

Anlage 4: Projektbeschreibung

MATEDIS

MATERial**DIG**italisierung**S**ystem zur realistischen Bemusterung in der individuellen Hausplanung

Zur Einreichung im Förderprogramm **ZIM-KOOP** als FuE-Kooperationsprojekt, Projektform **KF**, im Themenbereich **ITK**

Geplante Laufzeit: 24 Monate
Geplanter Projektstart: Mai 2014

Primäre Projektziele:

- **Analyse, Design und Entwicklung einer Materialdigitalisierungsanlage zur realistischen Oberflächendarstellung bei unterschiedlicher Beleuchtung im Rahmen der virtuellen Haus- und Wohnungsplanung**
 - **Prototypischer Client zur Nutzung auf mobilen Endgeräten**
- **Entwicklung eines Basis-Materialbeschreibungsstandards zur Nutzung in (kommerziellen) interaktiven, visuellen Anwendungen**
- **Einsatz der neuen Materialformate in hochqualitativen Visualisierungen**
- **Neuartiges Verfahrens zur Speicherung der Daten in Cloud-basierten und normierten Datenpools mit eigener Workflow-Engine**

Kooperationspartner

		Kürzel
aus der Wirtschaft (KMU)

aus der Wissenschaft	Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Sankt Augustin, Institute für Visual Computing, Prof. Dr. André Hinkenjann	IVC

*Hinweis zur geschlechtsneutralen Sprachregelung in der Projektbeschreibung :
Aus Gründen besserer Lesbarkeit werden im Text geschlechtsneutrale Formen oder generisches Maskulinum verwendet.*

Kurzfassung:

Im Kooperationsprojekt soll eine Materialdigitalisierungsanlage zur realistischen Oberflächendarstellung bei unterschiedlicher Beleuchtung im Rahmen der virtuellen Haus- und Wohnungsplanung entwickelt werden. Um diese effizient einsetzen zu können, sollen gleichzeitig Optimierungsmöglichkeiten der Lichtberechnungsalgorithmen im Renderingverfahren gesucht werden sowie ein neuartiges Verfahren zur Speicherung der Daten mittels einer zu entwickelnden eigenen Workflow-Engine.

Im Rahmen der Steigerung des wirtschaftlichen Nutzens des geplanten Gesamtsystems sollen Basis-Materialbeschreibungsstandards zur Nutzung in (kommerziellen) interaktiven visuellen Anwendungen entwickelt werden und für die Nutzer über eine ebenso im Projekt zu entwickelnde Client-App für mobile Endgeräte wie Smartphones oder Tablet-PCs verfügbar gemacht werden. In diesem Zusammenhang soll ein Cloud-basierter und normierter Datenpool entwickelt und aufgebaut werden.

- je Partner eine Kurzfassung des Teilprojektes (max. 1.200 Zeichen) → Stichwortartige Aufzählungen der geplanten innovativen Features reichen m. E. für das PDF-Formular

Projektbeschreibung

1. Beabsichtigte technologische Entwicklung von Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen

Das Vorhaben hat zum Ziel, Materialien und ihre spezifischen Oberflächeneigenschaften in einer neuartigen Anlage optisch bei unterschiedlichen Licht- und Ausleuchtverhältnissen zu erfassen und in standardisierter Form abzulegen, um sie in digitalisierter Form für 3D-Haus-simulationsanwendungen verfügbar zu machen. Dazu sollen neben der für die teil-automatisierten Aufnahmen erforderliche Hardware auch eine Standardisierung der Formate erfolgen und dem künftigen Nutzer unterstützende Cloud-Dienstleistungen sowie Clients für mobile Endgeräte zur Seite gestellt werden. Das später auf dem Markt angebotene System soll eine gezieltere und realitätsnahe Auswahl von Materialien im Rahmen der privaten und gewerblichen Hausbauplanung ermöglichen und somit kostspielige Fehlentscheidungen und Frustrationen bei den Nutzern vermeiden helfen.

Abgeschlossene Vorarbeiten und Schwächen der bisherigen Lösungsansätze:

Das Material eines Gegenstandes bestimmt zusammen mit seiner Geometrie, wie Licht von ihm reflektiert wird. Damit bestimmt das Material ganz wesentlich das Erscheinungsbild von Gegenständen unter unterschiedlichen Beleuchtungssituationen.

Aktuelle Fortschritte im Bereich der interaktiven globalen Beleuchtungssimulation, unter anderem in dem von den Antragstellern erfolgreich durchgeführten ZIM-Projekt "IVAB", ermöglichen physikalisch basierte und damit realistische Darstellungen von Objekten. Im genannten ZIM-Projekt wurden PC-Cluster-basierte Ansätze verfolgt, die die Energieverteilung in virtuellen Szenen (im Anwendungsfall in geplanten Gebäuden) innerhalb von Sekunden berechnen können. Dabei wurden analytische Reflexionsmodelle zur Materialbeschreibung genutzt, die reale Materialien nicht nachgebildet haben. Analytische Reflexionsmodelle sind Modelle, die Reflexionseigenschaften durch Formeln versuchen zu beschreiben. Unterschiedliche Reflexionseigenschaften verschiedener Oberflächen werden mit solchen Modellen durch Änderungen der Parameter der Reflexionsformeln nachgebildet.

Damit können realistische Materialien jedoch nur ansatzweise nachempfunden werden. Ein sog. „fitting“ der Parameter wäre notwendig, um die komplexen Reflexionsverhältnisse gezielter an die unterschiedlichen Materialien anzupassen. Dieses Ziel war nicht Gegenstand der genannten Vorarbeiten.

Die Nutzung von gemessenen Reflexionseigenschaften erlaubt die Nutzung realistischer, tatsächlich vorhandener Materialien. Damit ist es z.B. möglich, die Eigenschaften einer realen Fliese für ein Bad zu messen und in einer realistischen Simulation eines virtuellen Bades zu nutzen.

In den Projekten "IVAB" und der "virtuellen Bemusterung im Ein- und Mehrfamilienhausbau" hat sich die Notwendigkeit ergeben, Materialien schnell und einfach zu erfassen. Denn die beste Lichtberechnung ergibt keine wirklich hochwertige Darstellung, wenn die Materialien selbst nicht anmutungsgetreu dargestellt werden. Zudem sollten einmal erstellte Materialien auf einfache Art und Weise auch anderen Anwendern des VR-Systems zur Verfügung gestellt werden können, so dass der gesamte Aufwand zur Materialerfassung bei der Erweiterung der Auswahl zu einem Materialienpool signifikant sinkt.

Um dies zu erreichen, sollen im Rahmen des FuE-Projektes in den Teilprojekten der Partner sich ergänzende Bausteine geschaffen werden, um sie in ein später marktfähig zu gestalten- des Gesamtsystem aus Produkten und Dienstleistungen integrieren zu können.

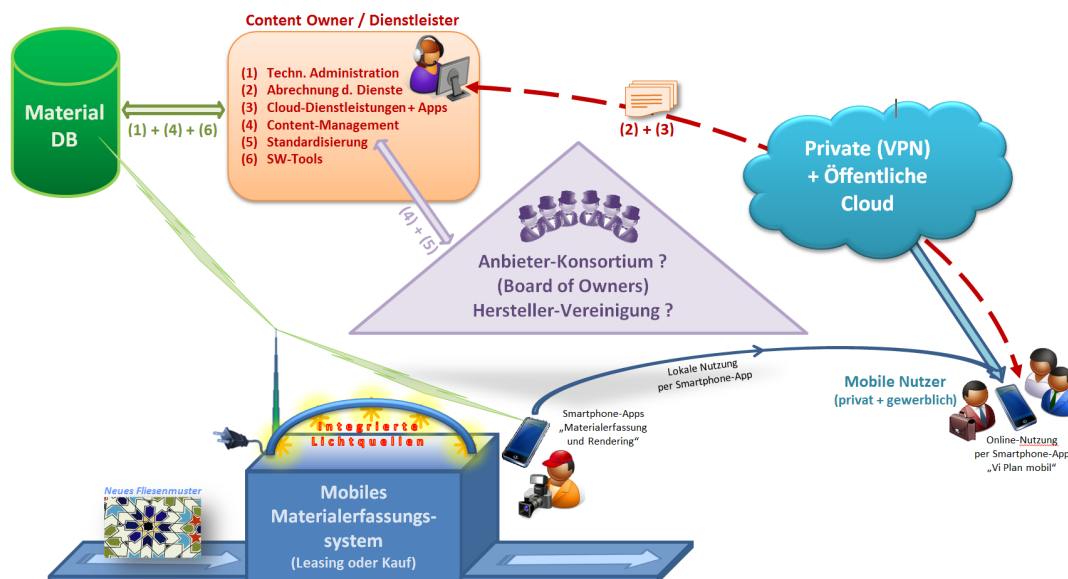


Abb. 1: Vorschlag für Schaubild: Komponenten mit Funktionalitäten aus der Vermarktungssicht → zur Diskussion gestellt (Müngersdorff)

2. Angestrebte technische Funktionalitäten und relevante Parameter (→ Kapitel ist noch komplett in Überarbeitung)

Abb. 2: Übersicht der zu entwickelnden Komponenten aus technischer Sicht

2.1. Materialerfassung, Rendering und Nachbearbeitung

Materialerfassung und -speicherung

- Entwicklung eines Materialdigitalisierungsverfahrens, das ein realistisches Verhalten bei unterschiedlicher Beleuchtung erlaubt. Hierzu zählt die Entwicklung und Konstruktion einer technischen Anlage, welche die Aufnahme von bis zu 1m² großen Materialien ermöglicht. Optimalerweise sollen hier auch Smartphone- oder Tablet-kameras zum Einsatz kommen können.
- Entwicklung verfeinerter Algorithmen zur Lichtberechnung um die neue Material-schnittstelle, so dass die neuen Materialien auch genutzt werden können. Hierfür werden u. a. die Shader entsprechend angepasst.
- Optimierung der rechnerischen Verfahren zur Lichtberechnung bei der Materialerfassung, so dass die Berechnungszeit deutlich verringert wird.
- Definition eines anforderungsgerechten Speicherformats für BRDFs¹, das sowohl die entstehende Datenmenge berücksichtigt als auch die Möglichkeit bietet, je nach gewünschter/erreichter Performance größere Detailstufen zu verwenden
- Implementierung eines Material-Fitters, der gemessene Materialien in entsprechend geeignete analytische Modelle überführen kann. Dies geschieht im Wesentlichen über die Ermittlung einer passenden Parametrisierung mittels der Analyse der entstandenen Messdaten. Es existiert eine Vielzahl von analytischen Modellen, die u.a. auch

¹ BRDF = bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion

gerade für Zwecke der Annäherung gemessener Daten entwickelt wurden. Es ist zu bewerten, welche Materialtypen von besonderer Wichtigkeit im Sinne der aufzubauenden Materialdatenbank sind. Auf Basis dieser Bewertung können die analytischen Modelle ausgewählt und in den Fitter integriert werden.

- Neben gemessenen BRDFs und ihren gefitteten Varianten sind auch einfache Basismaterialien vorzusehen.

Rendering

- Die Darstellung der neuen Materialien muss in das Rendering-System integriert werden. Dies betrifft sowohl die direkte Visualisierung der gemessenen Materialien (in unterschiedlichen Detailstufen) als auch die Integration neuer analytischer Modelle. Von zentraler Bedeutung bzgl. der Vermeidung von Performanceproblemen ist hier auch, dass die Materialien Importance Sampling² unterstützen müssen.
- Dieses und weitere Beschleunigungsansätze für globale Beleuchtungsberechnung sollen im Rahmen des Projekts umgesetzt werden.
- Ebenso sind fortgeschrittene Methoden der Weiterverwendung bereits berechneter Daten zur Approximation des Erscheinungsbilds einer Szene nach einer Änderung des Betrachterstandpunktes zu untersuchen.

Nachverarbeitung der Rendering-Resultate

- Anhand von zusätzlichen Informationen über die Bilddaten (z.B. Geometrieinformationen in Form von Tiefenwerten und Normalenvektoren) sollen Filtertechniken integriert werden, um deutlich schneller gute visuelle Ergebnisse zu erhalten. Dies bietet sich insbesondere bei Szenen an, die in der Hauptsache diffuse Materialien enthalten. Für spiegelnde Materialien sind wenigstens pixelweise Materialinformationen zusätzlich zu berücksichtigen.
- Entsprechend der zu implementierenden Verfahren soll das an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg entwickelte Postprocessing-Framework *GrIP* genutzt werden, so dass diese Verfahren auf einfache Weise integriert werden können.
- Dazu müssen die weiteren pixelweisen Informationen auch an den Client zurückgesendet werden können. Wünschenswert ist hier eine relativ abstrakte Herangehensweise, so dass keine direkte Abhängigkeit zwischen dem Postprocessing und serverseitigem Code entsteht.

Netzwerkschnittstelle

- Die Netzwerkschnittstelle muss um die Übertragung der neuen Materialtypen erweitert werden. An dieser Stelle kann auf die im Projekt IVAB **prototypisch** geschaffene Schnittstelle zurückgegriffen werden. Diese wird in diesem Projekt um die Möglichkeit der Übertragung der neuen Materialtypen erweitert.

2.2. Materialdatenbank und Cloud-Speicherdienste

Die Anforderungen an die geplante Materialdatenbank und die Cloud-Speicherdienst lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- Entwicklung eines passenden Verfahrens zur Speicherung der Daten, die während der Aufnahme im Aufnahmeapparat entstehen. Hierzu sollen zwei unterschiedliche Ver-

² Importance sampling = Technik zur Erzeugung von Stichproben anhand einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, als eine Möglichkeit zur Varianzreduktion, also zur Steigerung der Effizienz von Monte-Carlo-Simulationen

fahren implementiert werden: Ein vereinfachtes Verfahren (Basis) ohne komplexe Lichtbeschreibung, dessen Daten auch durch Tablets oder konventionelle PCs interpretiert und berechnet werden können und ein zweites Verfahren für die hochauflösende Lichtberechnung und Darstellung in einem komplexen VR-System.

- Erstellung eines Cloud-Dienstes, welcher Materialien (= Textur + zusätzliche Informationen) in mindestens zwei Qualitäten (Basis und BDRF) aufnehmen kann und diese für interessierte Nutzer zur Verfügung stellt. Der Cloud-Dienst soll eine strukturierte Ablage von Materialien für alle Anwender zur Verfügung stellen, in die diese ihre Daten hoch- und auf den lokalen PC (in das jeweils vorhandene Programm mit einer Schnittstelle zur Cloud-Datenbank) herunterladen können. Zielstellung ist, dass z.B. Anwender A die Daten von Anwender B auch nutzen kann, sofern dieser sie in der Cloud-Datenbank zur öffentlichen Nutzung zur Verfügung gestellt hat. Die Datenbank soll auch ermöglichen, dass Materialien, die am Standpunkt A von Anwender A erstellt wurden, auf einfache Art und Weise zum Standpunkt B von Anwender A transportiert werden können, sprich das synchronisieren der Daten auf einfache Art und Weise (ähnlich dem Dropbox-Prinzip).
- ...
- ...
- ...

2.3. Hardware-System und Steuerung zur Erfassung von SVBRDF

Hard- und Softwaresystem zur Erfassung von SVBRDF

- Das Erfassungssystem soll in der Lage sein, Materialien zu erfassen, deren Reflexionseigenschaften über die Oberfläche variieren (Spatially Varying BRDF). Praktische Beispiele hierfür sind Hölzer mit ihre charakteristischen Maserung oder Fliesen mit Dekor, im Gegensatz zu Materialien wie Autolack, wo die Erfassung der BRDF an einem Punkt der Oberfläche genügt.
- Das Erfassungssystem soll von den vorgesehenen Endanwendern direkt nutzbar sein, was besondere Anforderungen an Robustheit, Softwareergonomie, Platzbedarf und Kosten stellt. Neben einer regelrechten BRDF soll das Erfassungssystem auch die Bildressourcen für einfachere Materialien bzw. Rendering-/Shadingverfahren erzeugen können (z.B. diffuse Texturen + Bumpmaps).
- Die Erfassungshardware besteht aus einem optoelektronischen und (einfachen) mechanischen Aufbau, der über mehrere steuerbare Lichtquellen und mehrere Kameras die BRDF erfassen kann. Die Hardware soll möglichst ohne während des Erfassungsvorgangs bewegliche Teile auskommen, was einen einfachen Aufbau und damit relativ geringe Hardwarekosten möglich macht. Die Erfassungshardware soll mechanisch so dimensioniert sein, dass Materialproben von anwendungsrelevanter Größe in einem Durchgang erfasst werden können.
- Die Erfassungssoftware besteht aus vier wesentlichen funktionalen Blöcken:
 - Steuerung des Erfassungsvorgangs, also der Lichtquellen und der Kameras. Der Erfassungsvorgang soll voll automatisiert ablaufen können.
 - ...
- .

2.4. Materialerfassung und Rendering mit mobilen Clients, “demokratische Variante”,

Ein mobiler Client für Smartphone und Tablet wird eingeführt, der es den künftigen Nutzern des Gesamtsystems ermöglichen soll, das geplante 3D-Hausobjekt und dessen Räume in Echtzeit virtuell zu begehen, ohne auf einen Tischrechner zurückgreifen zu müssen. Nach Möglichkeit wird hierzu direkt auf dem Tablet (in OpenGL oder einem daran angelehnten Grafikframework) berechnet, damit man sich nahezu latenzfrei bewegen kann. (Arbeitspakete 7.A bzw. 7.B)

• ..

3. Führende Konkurrenzprodukte/-verfahren, internationaler Stand der Technik unter Angabe der charakteristischen technischen Daten im Vergleich mit eigenen Entwicklungszielen

3.1. Materialdatenbank

Es gibt derzeit einige Ansätze, eine globale Bibliothek für Materialbeschreibungen oder Ausschreibungsrelevante Texte für die Baubranche zur Verfügung zu stellen. Die Ansätze lassen sich dabei in folgende Teilbereiche gliedern:

1. Für die Ausschreibung von Bauwerken optimierte Bibliotheken

Ein typischer Vertreter ist hierbei das Portal <http://www.ausschreiben.de> von Orca Software. Dieses bietet eine Plattform, bei der interessierte Hersteller teilnehmen können und sich in eine vorgegebene Gliederung einbringen. Der Fokus liegt auf Ausschreibungstexten, optional kann Bildmaterial zur Verfügung gestellt werden. Dieses Bildmaterial hat jedoch beispielhaften Charakter, so kann z.B. der Aufbau einer Wand dargestellt werden oder es werden Werbefotos von z. B. Laminat oder Parkett gezeigt, jedoch immer aus Katalogsicht, d. h. das Ziel dabei ist nicht, dass die Daten in einem Visualisierungssystem dargestellt werden können. Basierend auf dem Ziel und dem Fokus von Orca Software als ein Ausschreibungssystem ist dies auch nachvollziehbar und verständlich.

Ein weiterer Vertreter wäre die STL Bau unter <http://www.stlb-bau-online.de/> - diese Plattform hat ebenfalls den Fokus auf Ausschreibungstexte (überwiegend für die öffentliche Hand).

2. Online-Bibliotheken für die Darstellung von realistischen Oberflächen in Computergrafiken

Für die Verwendung von Oberflächen (Texturen) und Materialien gibt es eine Menge unterschiedlicher Anbieter wie z.B. Turbosquid³ oder The3DStudio.com). Diese stellen Materialbibliotheken zur Verfügung, die jedoch der exemplarischen Darstellung dienen und keine Herstellerspezifischen Bibliotheken nutzen, was sie für die konkrete Bemusterung von Ein- und Mehrfamilienhäusern (inkl. Ausgabe des Preises) nicht nutzbar macht, da die Darstellung der Fliese verwendet werden muss, die später auch tatsächlich verbaut wird (denn genau dies ist der Anspruch der virtuellen Bemusterung).

In den großen Renderern wie 3DSMax oder Cinema 4D gibt es Texturbeschreibungssprachen und auch entsprechende Bibliotheken, allerdings auch wiederum nicht bezogen auf konkrete Hersteller (bzw. nur in Ausnahmefällen).

Systeme wie Substance von Allegorithmic stellen einen sehr interessanten Ansatz für die Beschreibung von Oberflächenmaterialien zur Verfügung, die z.B. in der Unity-Oberfläche Verwendung finden (<http://www.allegorithmic.com/getstarted>) - in diesem Umfeld gibt es

³ (<http://www.turbosquid.com/Search/Artists/tgarch?referral=tgarch&gclid=CNON6K6E2roCFUNe3godQTsAng>); (<http://www.the3dstudio.com/>)

auch Materialbibliotheken, die mit dem System erstellt wurden⁴ (). Jedoch auch wiederum nicht konkret für die Baubranche und noch viel weniger mit dem Fokus auf konkrete Hersteller, sondern dafür, eine Plattform für Unternehmen oder Personen in der PC-Spieleindustrie zu schaffen.

Der Ansatz, eine allgemeine Beschreibungssprache zu nutzen, die in mehreren Systemen verwendet werden kann, wurde hier allerdings bereits auf eine gute Art und Weise umgesetzt, jedoch mit dem Fokus auf Spiele und den damit einhergehenden Möglichkeiten, auf Detailreichtum und realistische Optik nicht ganz so viel Wert legen zu müssen.

Unser Ansatz unterscheidet sich genau dort: Er ist als Kommunikationsplattform gedacht, welche die Anwender zusammenbringt und ihre Marktmacht nutzt, Inhalte entweder zu teilen oder gesammelt einzufordern.

3. Austauschplattform für 3D-Objekte für Sanitär und Heizkörper

Die ARGE für das SHK-Handwerk bietet unter <http://www.shk-branchenportal.de/> eine Plattform, bei der 3D-Objekte von verschiedenen Herstellern angeboten werden. Diese stehen als einzelne Dateien zur Verfügung, die erst in das jeweils weiterverarbeitende System übertragen werden müssen, d. h. es gibt keine Unterstützung beim Implementieren dieser Daten in das jeweilige Planungsprogramm.

Für die Automatisierung von Aufgaben (Workflow-Engine) – wie z. B. dem Import in das Planungssystem von neuen Materialien sofort nach Erscheinen – haben wir keine Referenz gefunden. In unserem Fall sollen die Regeln für die Verteilung von Daten weitestgehend natursprachlich geschrieben werden, damit können auch Fachanwender die Materialpflege für ein Unternehmen übernehmen – es sind keine Informatiker oder Systemadministratoren dafür nötig (welche es bei vielen kleinen und mittleren Unternehmen im Baubereich schlichtweg auch nicht gibt). Alles, was für die zentrale Verwendung einer gemeinsamen Materialdatenbank für ein Unternehmen nötig ist, ist ein Internetanschluss.

Produkt	Eigenschaften	Preis (€)	Bewertung der Nachteile
„TurboSquid“	Texturen-Anbieter + große Auswahl		- keine herstellerspezifischen Materialien
The3DStudio	Texturen-Anbieter + große Auswahl		

3.2. Globale Beleuchtungsberechnung

Einführung

Die globale Beleuchtungsberechnung mit klassischem Path Tracing (PT) geht auf (Kajiya, 1986) zurück. Hier wird ein Monte-Carlo-Ansatz zur Lösung der in der selben Veröffentlichung vorgestellten Bildsynthesegleichung vorgeschlagen. PT ermöglicht die Visualisierung einer Vielzahl von (indirekten) Beleuchtungseffekten, hat aber bei starken indirekten Beleuchtungsanteilen und Effekten wie Kaustiken mit starkem Rauschen in den Ergebnisbildern und damit einer unter Umständen impraktikabel langen Konvergenzzeit zu kämpfen. Die grundsätzliche Idee des PT ist es, eine große Anzahl von Strahlen in die Szene zu verschießen und diese entlang stochastisch bestimmter Pfade zu verfolgen. Für diese Pfade wird dann der Energiebeitrag gemäß der Bildsynthesegleichung bestimmt und in das Ergebnisbild eingerechnet.

Basierend auf PT haben (Lafortune, 1993) und (Veach, 1997) das Bidirectional Path Tracing (BDPT) sowie (Veach et al., 1997) Metropolis Light Transport (MLT) entwickelt. BDPT basiert auf der Idee, Strahlen nicht nur vom Betrachter aus in die Szene zu schießen, sondern zeitgleich auch von den Lichtquellen aus. Die Pfade von Betrachter und Lichtquelle

⁴ <http://www.allegorithmic.com/products/substances>

werden dann auf unterschiedliche Arten verbunden, um effizient eine Vielzahl von Beleuchtungseffekten darstellen zu können. Beispielsweise konvergieren Kaustiken mit BDPT gewöhnlich sehr viel schneller als mit PT.

MLT basiert auf dem Metropolis-Hastings-Algorithmus (MRR53, Has70) und mutiert gefundene Transportpfade, so dass diese relativ lokal untersucht werden können. Mit diesem Verfahren können besonders schwierige Lichtverhältnisse wie die indirekte Beleuchtung durch einen sehr schmalen Türspalt deutlich besser berechnet werden. Zur Initialisierung von MLT wird gewöhnlich BDPT verwendet.

Ein MLT sehr ähnliches, aber deutlich einfacher zu implementierendes Verfahren, ist das Energy Redistribution Path Tracing (ERPT) (Cline et al., 2005). Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die Anwendung der Mutationsstrategien aus MLT auf herkömmliches PT. Zusätzlich zum eigentlichen Renderingverfahren werden zwei Ansätze zur Filterung vorgestellt. Die erste Variante basiert auf der Betrachtung der tatsächlich durchgeführten Mutationen pro Pixel und nähert diese mittels eines Boxfilters an den diesbezüglichen Erwartungswert an. Die zweite Variante bezieht sich auf die Beeinflussung des Sampling-Prozesses in der Form, dass eine zu große Differenz in der Abtastrate zwischen unterschiedlichen Pixel vermieden wird. Die Resultate dieser beiden Filtervarianten zeigen, dass hier ein großes Potenzial hinsichtlich der effizienten, photorealistischen Bildsynthese besteht.

Weiterhin existiert der Ansatz des Photon Mappings (PM) (Jensen, 1996) und des darauf aufbauenden progressiven Photon Mappings (PPM) (Hachisuka et al., 2008) sowie seiner stochastischen Erweiterung (SPPM) (Hachisuka et al., 2009), welche zuletzt von Georgiev et al. mit BDPT im Vertex-Connection-and-Merging-Verfahren (VCM) (Georgiev et al., 2012) kombiniert wurde. Während PM dabei grundsätzlich nicht erwartungstreu (aber konsistent) ist, verbessert PPM das Verfahren so, dass der Schätzer mit wachsender Anzahl an Photonen immer erwartungstreuer wird. SPPM ermöglicht zusätzlich die Darstellung von Effekten wie Schärfentiefe und Bewegungsunschärfe. Grundsätzlich enthält PM durch die Dichteabschätzung bereits eine Art Filterprozess.

All diese Verfahren verfolgen ganz oder teilweise einen Monte-Carlo-Ansatz und weisen folglich die diesen Ansätzen inhärenten Probleme auf; je nach der Menge an verschossenen Strahlen und Geometrie- sowie Beleuchtungskomplexität ist bei den direkt visualisierenden Verfahren ein unterschiedlich starkes Rauschen in den resultierenden Bildern zu sehen, welches verfahrensabhängig auch nach zehntausenden von Samples (betrachteten Lichtpfaden pro Pixel) noch nicht verschwindet. Photon-Mapping-Verfahren weisen hingegen tendenziell eher unscharfe Artefakte auf, die ihren Ursprung in der Dichteabschätzung einer zu geringen Anzahl verfügbarer Photonen haben. Ein Monte-Carlo-Ansatz wird hier beim Abbruch der Photonenpfade verwendet (*Russian Roulette*).

Problematisch bei der Anwendung von Monte-Carlo-Verfahren ist ihr hoher Rechenaufwand. Die Standardabweichung der Verfahren entwickelt sich mit $\mathcal{O}\left(n^{-1/2}\right)$, d.h. es wird die vierfache Anzahl an Samples benötigt, um das Rauschen zu halbieren (Pharr et al., 2010, S. 638).

Da auch auf aktuellster Hardware (z.B. GeForce GTX Titan) in etwas komplexeren Szenen bislang nur zwischen 10 und 100 Millionen Strahlen pro Sekunde verschossen werden können (auch abhängig von der Materialkomplexität und den verwendeten Datenstrukturen), ergibt sich ein (proportional zur Anzahl darzustellender Pixel wachsender) hoher Rechenaufwand.

Wird Interaktivität oder gar Echtzeitfähigkeit verlangt, so müssen deutliche Einschränkungen hinsichtlich der maximalen Strahltiefe und/oder der generellen Sampling-Eigenschaften getroffen werden.

Möglichkeiten sind etwa die Verwendung von Whitted-Style Ray Tracing bei Interaktion und ein Umschalten auf PT bei statischer Szene (z.B. angehaltener Kamera) oder auf Anfrage.

Ansätze zur Verminderung des Rauschens oder schnelleren Erzeugung visuell überzeugender Ergebnisse sind etwa (adaptives) Importance Sampling oder Filterverfahren für die erzeugten Bilddaten.

Verwandte Arbeiten und Stand der Technik

Hinsichtlich der im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Verfahren besteht bereits eine beträchtliche Menge grundlegender Arbeiten. Hierzu sollen im Folgenden einige der grundlegenden bis hin zu sehr aktuellen Forschungsergebnissen kurz zusammengefasst werden, um einen Überblick über den Stand der Technik zu geben.

Im Bereich der Monte-Carlo-Verfahren gibt es eine Reihe von Möglichkeiten zur Beeinflussung des für die Bestimmung hochdimensionaler Integrale (hier: Rendergleichung) verwendeten Sampling-Prozesses. Da der Sampling-Prozess zufallsbasiert abläuft, ist eine Wahl von Zufallszahlen hoher Güte von großer Bedeutung. Häufig finden auch sogenannte *Low-Discrepancy-Sequenzen* Einsatz, wie etwa die Van-der-Corput- oder die Sobol-Sequenz (Kollig et al., 2002). Diese Sequenzen bieten den Vorteil, den Wertebereich sehr gleichmäßig und vollständig abzudecken, was bei herkömmlichen Pseudozufallszahlen nicht gegeben ist. Die generierten Zahlen werden für eine Vielzahl von Entscheidungen innerhalb der Integralbestimmung benötigt, so z.B. für die Wahl der Strahlrichtung von generierten und reflektierten Strahlen, für die Auswahl zu betrachtender Materialkomponenten, die Selektion abzutastender Lichtquellen oder Entscheidungen über Strahlabbrüche.

Bei der Richtungsbestimmung zu verfolgender Strahlen während der Pfadgenerierung ist weiterhin die Reflexions-, Transmissions- oder Streufunktion (Bidirectional Reflectance/Transmission/Scattering Distribution Function) des Materials zu berücksichtigen, um eine deutlich schnellere Konvergenz des Verfahrens erreichen zu können. Dies bedeutet, dass Strahlen anhand passender Dichtefunktionen wahrscheinlicher in Richtungen verschossen werden, aus denen ein höherer Energiebeitrag zu erwarten ist; man spricht von *Importance Sampling* (IS).

IS kann jedoch nicht nur auf Basis der Materialeigenschaften beeinflusst werden, sondern auch durch vorherige Abschätzungen der Lichtverteilung in der Szene. Da die Lichtverteilung aber genau die durch globale Beleuchtungsberechnung zu bestimmende Information ist, muss zumindest auf gröbere Informationen zurückgegriffen werden. Diese können das IS jedoch deutlich unterstützen.

Zur Nachverarbeitung von Bilddaten sowie zur Filterung während des Rendering-Prozesses selbst, insbesondere zum Zwecke der Entrauschung, existiert eine Vielzahl von Arbeiten. Teilweise sind die dort vorgestellten Ansätze auch direkt mit adaptiven Samplingmethoden verknüpft. Außerdem arbeiten die verschiedenen Verfahren auf Grundlage unterschiedlicher Daten, d.h. während bei einem Verfahren die reinen Farbdaten der Pixel ausreichen können, werden in einem anderen Verfahren zusätzliche Daten wie ein G-Buffer (also ein die Szenengeometrie aus Betrachterperspektive beschreibender Puffer) genutzt.

Wesentliche Entwicklungen zur Filterung von Bilddaten, die mittels Monte-Carlo-Verfahren erzeugt wurden, sind insbesondere in den letzten Jahren entstanden. Dies ist sowohl auf die stark steigende Leistungsfähigkeit der (Grafik-)hardware zurückzuführen als auch auf die mittlerweile selbstverständliche Nutzbarkeit von GPUs für allgemeine Anwendungszwecke.

Sowohl Lafortune und Willems (Lafortune et al., 1995) als auch Jensen (Jensen, 1995) stellen 1995 bereits relativ ähnliche Ansätze vor, um die Lichtverteilung in einer Szene grob zu schätzen und auf Basis dieser die Dichtefunktionen lokal zu adaptieren. Dutré und Willems verwenden in (Dutré et al., 1995) einen ähnlichen Ansatz wie Jensen. Die adaptive Dichtefunktion wird dabei über ein Gitter gespeichert, dessen Zellen jeweils identisch große Raumwinkel abbilden. Um die Dichtefunktionen speichern zu können, wird die Szene in Patches unterteilt, analog zu Finite-Elemente-Methoden.

Tobler et al. stellen in (Tobler et al., 1998) eine neue Formfaktor-Analogie vor, mit deren Hilfe IS in Monte-Carlo-Verfahren verbessert und damit die Konvergenzrate beschleunigt werden kann.

Zimmerman erarbeitet in seiner Dissertation (Zimmermann, 1998) sowohl verbessertes IS für Lichtquellen als auch das *Light Volume Rendering*. Dieses basiert auf der Berücksichtigung der *Field Radiance* L_f (Bestrahlungsdichte) und deren Kombination mit den lokalen Dichtefunktionen der jeweiligen BRDFs. Das Light Volume wird innerhalb eines Vorverarbeitungsschritts gefüllt und repräsentiert den Lichtfluss im Raum geometrieunabhängig. Mitunter werden hier deutlich verbesserte Ergebnisse im Vergleich zu klassischem PT erzielt, jedoch hat der Einsatz des Light Volumes auch mit Problemen zu kämpfen, so dass etwa bei komplexer Geometrie Fehler, wie z.B. durch Oberflächen tretende Strahlung, auftreten können.

Ähnliche Methoden verfolgen auch Szirmay-Kalos et al. in (Szirmay-Kalos et al., 1999) und Pérez et al. in (Pérez et al., 2000). In (Xu et al., 2001) wird auf die Photon Map nach Jensen zurückgegriffen, wie auch in (Hey et al., 2002). Das Sampling wird bei letzterem Verfahren durch richtungsabhängige Footprints benachbarter Partikel beeinflusst. Pérez geht in seiner Dissertation (Pérez Cazorla, 2003) zusätzlich noch auf triangulationsbasierte Verfahren zur progressiven Verfeinerung ein. Die Ergebnisse zeigen, dass auch mit einer deutlich verringerten Anzahl verschossener Strahlen durch geschickte Interpolationstechniken in eher niederfrequenten Bildbereichen bereits gute Ergebnisse erzielt werden können.

Generelle Hinweise zu höherdimensionalen Integrationsproblemen geben Kollig und Keller in (Keller et al., 2002). Hier wird das Latin Hypercube Sampling ebenso vorgestellt wie (t,m,s) -Netze und die darauf basierenden $(0,1)$ -Sequenzen, wobei es sich im Wesentlichen um mehrdimensionale Low-Discrepancy-Sequenzen handelt. Zur sinnvollen Verwendung bei vielen Dimensionen wird die Cranley-Patterson-Rotation (Cranley/Patterson, 1976) ebenso wie das Owen Scrambling (Owen, 1995) als Strategie zur Vermeidung von Korrelationsartefakten angeführt.

In (Chen et al., 2002) beschreiben Chen et al. Möglichkeiten zur effizienten Repräsentation von oberflächenbasierten Lichtfelddaten. Grundsätzlich kann die Verfügbarkeit eines groben Lichtfelds stark zur Verbesserung des Samplings einer Szene beitragen, indem das Lichtfeld zur Berechnung adaptiver Dichtefunktionen genutzt wird. Dabei muss in jedem Fall betrachtet werden, wie eine Interpolation zwischen benachbarten Werten des Lichtfeld durchgeführt wird. Dies hängt insbesondere auch von der Verteilung der verfügbaren Werte ab.

Handelt es sich um stark gestreute Daten, können wie in (Hinkenjann/Pietrek, 1998) und (Hinkenjann/Roth, 2007) auch Verfahren aus der Streudateninterpolation in Betracht kommen.

Hachisuka et al. stellen in (Hachisuka et al., 2008) ein adaptives Sampling- und Rekonstruktionsverfahren für mehrdimensionale Integrale vor und wenden dieses auf weiche Schatten, Bewegungsunschärfe und Schärfentiefe an. Die Autoren geben an, dass sich die Methoden prinzipiell auf beliebige Dimensionen erweitern lassen, wobei jedoch berücksichtigt werden muss, dass dabei auch neue Herausforderungen entstehen können.

Mit dem *Adaptive Wavelet-Rendering* (Overbeck et al., 2009) existiert zudem ein Verfahren, das sowohl auf adaptives Sampling als auch auf Post-Processing auf Basis der errechneten Wavelet-Repräsentation der Bilddaten zurückgreift.

Das von Reshetov 2009 vorgestellte Morphological Antialiasing (Reshetov, 2009) ist die Grundlage für viele heute gängige Verfahren zur Berechnung von Antialiasing im Bildraum. Im Kontext von PT ist dies tendenziell allerdings nicht von so großer Bedeutung, da ohnehin eine Integration über die gesamten Pixelflächen stattfindet und Antialiasing damit dem Verfahren grundsätzlich inhärent ist.

Ritschel et al. schlagen in (Ritschel et al., 2009) ein Verfahren zur Approximation diffuser globaler Beleuchtung im Bildraum vor. Es wäre denkbar, ein solches Verfahren auch mit korrekter globaler Beleuchtung zu kombinieren, um schneller gute visuelle Ergebnisse zu erreichen, die bei einer Grenzwertbetrachtung auch gegen das physikalisch korrekte Ergebnis konvergieren.

2010 stellen Dammertz et al. in (Dammertz et al., 2010) ein Wavelet-basiertes Verfahren zur Filterung von Nachbarschaften mit dem Ziel der Entfernung hochfrequenten Rauschens vor. Neben Farbinformationen wird hier schon zusätzlich auf Tiefen- und Normaleninformationen zurückgegriffen, die in Ray-Tracing-basierten Ansätzen aber ohnehin ohne zusätzliche Kosten berechnet werden können. Weiterhin wird hier auch verglichen, wie das Filterverfahren auf eine Unterabtastung hinsichtlich der Beleuchtungsberechnung reagiert.

Basierend auf (He et al., 2010) entwickeln Bauszat et al. in (Bauszat et al., 2011) ein Verfahren zum "geführten" Filtern von verrauschten Bildern. Dabei wird lediglich die indirekte Beleuchtung gefiltert. Dies geschieht auf Basis der Annahme, dass das rauschfreie Bild als Lineartransformation eines anderen, ebenfalls rauschfreien Bildes (hier bestehend aus Tiefen- und Normaleninformationen) bestimmt werden kann. Auf diese Weise wird eine kantensensitive Weichzeichnung durchgeführt, wobei Texturwerte erst nach der Filterung in das Bild hinein multipliziert werden. Da das Verfahren sich in dieser Form ohnehin nur für diffuse Materialien eignet, ist dies auch korrekt. Die Filterung selbst erfolgt mittels Integralbildern/Summed Area Tables und ist damit auch unabhängig von der letztlichen Größe des Filterkernels recht performant.

In (Roth/Hinkenjann, 2011) wird ein graphbasiertes Post-Processing-Framework vorgestellt, welches bereits sowohl für Entrauschungs- als auch andere Algorithmen mit interaktiver Parametrisierung erfolgreich eingesetzt wurde.

Shirley et al. schlagen in (Shirley et al., 2011) einen Rekonstruktionsalgorithmus für Bilder aus stochastischen Hardware-Renderern vor, welcher auf einer Abschätzung der Frequenzeigenschaften einzelner Pixel beruht. Gute Ergebnisse werden hier bereits mit 16 Samples pro Pixel erzielt, allerdings wird das Verfahren nur für Schärfentiefe, Bewegungsunschärfe und stochastische Transparenz eingesetzt. Ob sich diese Methode auch für die Filterung in vollständigen Monte-Carlo-basierten Renderern eignet, bleibt offen.

Ein ähnliches Framework wie das Adaptive Wavelet Rendering schlagen Rousselle et al. in (Rousselle et al., 2011) vor. Basis ist die Minimierung des pixelweisen mittleren quadratischen Fehlers. Es werden in einem iterativen Verfahren passende pixelweise Filter(-größen) ausgewählt und anschließend entsprechende Samples gewählt, so dass der mittlere quadratische Fehler möglichst gut minimiert werden kann.

Ebenfalls von Rousselle et al. stammt das in (Rousselle et al., 2012) vorgestellte adaptive Rendering mit nicht-lokalem Mittelwertfilter. Durch die Verwendung zweier Puffer mit jeweils der Hälfte der berechneten Samples und eine Filterung der Puffer "über Kreuz" (also mit den Filtergewichten des jeweils anderen Puffers) wird die Korrelation zwischen Filtergewichten und Signalrauschen minimiert und das Ergebnis stark verbessert.

Auf Lehtinen et al. geht die Rekonstruktion des Lichtfelds zur Darstellung indirekter Beleuchtung im PT zurück (Lehtinen et al., 2012). Die Autoren geben an, dass durch die Ausnutzung anisotroper Eigenschaften des Lichtfelds die effektive Abtastrate eines Renderers durch ihr Verfahren ein Vielfaches der tatsächlichen Abtastrate erreicht. Da die Filterung selbst grundsätzlich unabhängig von der Szenengeometrie erfolgt, wird das Verfahren auch als erweiterter Filter für Bilddaten bezeichnet.

Schwenk et al. beschreiben in (Schwenk et al., 2012) die adaptive Filterung anhand der Varianzinformationen einzelner Pixel. Es wird eine Unterteilung in separate Puffer mit niedriger und hoher Varianz durchgeführt. Anschließend wird der Puffer mit hoher Varianz mittels eines kantensensitiven Verfahrens gefiltert und die beiden Puffer werden wieder

kombiniert. Da sich die Varianz mit zunehmender Anzahl an Samples immer weiter verringert und eine Filterung erst ab einem gewissen Schwellwert durchgeführt wird, nimmt der durch die Filterung eingeführte systematische Fehler mit dem Fortschreiten des Renderprozesses kontinuierlich ab.

In (Sen/Darabi, 2012) werden die funktionalen Abhängigkeiten zwischen Eingabe- und Ausgabedaten des Rendering-Systems analysiert. Die Ergebnisse werden dazu verwendet, mittels eines Cross-Bilateral-Filters die Daten so zu filtern, dass Szenendetails erhalten bleiben, während Rauschen verschwindet. Die Autoren geben an, dass sich ihre Methode generell für jedes aus Monte-Carlo-Verfahren entstehende Rauschen eignet, da keine physikalischen Annahmen bezüglich der Art der Eingabedaten gemacht werden.

Mehta et al. zeigen in (Mehta et al., 2013), wie verrauschte Bilder mittels einer neuartigen Frequenzanalyse in Echtzeit gefiltert werden können, so dass interaktive globale Beleuchtung möglich wird. Zu beachten ist dabei allerdings die Beschränkung auf diffuse Materialien.

Aktuelle ähnliche Produkte und Abgrenzung

Brigade

Bei Brigade handelt es sich um eine auf Echtzeitanwendungen ausgerichtete Path-Tracing-Engine, die insbesondere auch für die Nutzung in Spielen konzipiert wurde. Insbesondere die gute Unterstützung interaktiver Szenen (im Sinne dynamischer Geometrie) spielt hier eine wichtige Rolle. Brigade wird von OTOY entwickelt und soll in Zukunft als kommerzielles Produkt angeboten werden.

Arauna 2

Bei Arauna 2 handelt es sich um das Nachfolgerprojekt von Arauna, eines der ersten echtzeittauglichen Ray Tracer. Arauna 2 ist indirekt auch mit Brigade assoziiert, da Jacco Bikker von der bei *Katholieke Universiteit Leuven* in den Niederlanden bei der anfänglichen Entwicklung von Brigade stark beteiligt war.

Octane Render

Octane Render stammt, wie Brigade, ebenfalls von OTOY und dient im Wesentlichen zur interaktiven Finalisierung von vorher gestalteten 3d-Modellen in Form der Anpassung von Texturen, Materialien und Beleuchtung. Auf Basis der Echtzeitvorschau von Octane Render können die Auswirkungen dieser Veränderungen gut eingeschätzt werden, so dass schnell ein finales Ergebnis erreicht werden kann. Wie auch Brigade arbeitet Octane Render auf Basis von Monte-Carlo-basiertem Path Tracing.

Der an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg selbst entwickelte Path Tracer „Spark“ bietet im Vergleich zu den bestehenden (meist kommerziellen) Lösungen von Drittherstellern mehrere Vorteile:

- Unabhängigkeit von Drittherstellern und zur Verfügung gestellten Schnittstellen entsprechender Renderer
- Schnittstellen-Offenheit des eigenen Renderers, dementsprechend gute Anpassbarkeit der Schnittstellen zwischen Renderer und Postprocessing sowie Netzwerkschnittstelle
- Möglichkeit der Umsetzung fortgeschrittener Verfahren zur Optimierung der globalen Beleuchtungsberechnung

Produkt / Hersteller	Eigenschaften	Preis (€)	Bewertung der Nachteile
„Brigade“ / Fa. OTOY	Path tracing engine für Spiele + gute Unterstützung interaktiver Szenen		Nicht frei verfügbar, lizenzgebunden
„Arauna 2“ / Uni	Ray-Tracer		

Leuven	+ Echtzeitfähig		
„Octane Render“ / Fa. OTOY	Interaktiver Renderer + mit Echtzeitvorschau		

3.3. Erfassungssysteme für die optischen Eigenschaften physischer Materialien

Das Grundprinzip der BRDF erfordert verallgemeinert die Erfassung der des von einer Materialoberfläche in alle Richtungen reflektierten Lichtes, und zwar unter allen möglichen Einfallrichtungen. Ein Erfassungsgerät muss also sowohl die Einfallrichtung des Lichtes als auch die Richtung, aus der das reflektierte Licht aufgenommen wird, in jeweils zwei Freiheitsgraden variieren können. Einer der ersten Ansätze für ein Erfassungssystem nach dem Prinzip des Gonioreflektometers wurde bereits 1990 von Murray-Coleman und Smith beschrieben (Murray 90); es sieht jeweils eine bewegliche Lichtquelle und einen beweglichen Photosensor vor, um die vier erforderlichen Freiheitsgrade abzudecken. Das Reflektometer von Ward nutzt eine CCD-Kamera mit einem extremen Weitwinkelobjektiv in Kombination mit einer verspiegelten Halbkugel, um die Freiheitsgrade der Ausfallrichtung ohne mechanische Komponenten abdecken zu können (Ward 92). Das Gonioreflektometer von Dana et al. (Dana 96) erlaubt bereits die Erfassung von SVBRDF, allerdings kann es nicht alle vier Freiheitsgrade unabhängig verändern und erlaubt deshalb nur die Erfassung isotroper Materialien.

Neuere Ansätze entwickeln in der Regel dieses Grundprinzip weiter, mit der Zielsetzung einer hohen räumlichen Auflösung und der Beschleunigung des Erfassungsvorganges. Letztere kann insbesondere durch den Verzicht auf bewegliche Komponenten erreicht werden, indem für mehrere Einfall- und Betrachtungsrichtungen jeweils fest angebrachte Lichtquellen bzw. Sensoren vorgesehen werden. Die heute verfügbaren kostengünstigen Halbleiterlichtquellen (LED) und Sensoren begünstigen solche Ansätze. Ben-Ezra et al. verwenden Leuchtdioden (LED) in einer halbkugelförmigen Anordnung, die abwechselnd als Lichtquelle und als Photosensor eingesetzt werden, was die dedizierte Hardware für die Sensoren einspart, allerdings auch nur für die Erfassung von BRDF, nicht aber von SVBRDF, geeignet ist (Ben-Ezra 2008). Ren et al. beschreiben einen Ansatz, der mit einer einzelnen, manuell bewegten linearen Lichtquelle und einer festen Kamera auskommt und die BRDF-Parameter durch Vergleich mit der Reflexionsantwort einer Anzahl von Referenzmaterialien rekonstruiert, die jeweils mit erfasst werden (Ren 2011). Aittala et al. verwenden ebenfalls eine fest installierte Kamera und als Lichtquelle einen fest installierten Flachbildschirm, der eine Variation der Beleuchtungsrichtung durch Darstellung unterschiedlicher Bildinhalte ermöglicht (Aittala 2013). Beide Verfahren sind auf isotrope Materialien beschränkt.

Das in diesem Projekt zu entwickelnde Erfassungssystem soll ein Optimum aus minimalem Zeitbedarf für die eigentliche Erfassung, der Einsetzbarkeit für alle relevanten Materialarten und -dimensionen und einer möglichst hohen Qualität der erfassten Daten realisieren. Zudem soll das gesamte Hardwaresystem kostengünstig sein. Dieses Optimum wird von keinem Verfahren im Stand der Technik in hinreichendem Maße erreicht. So kommen reine BRDF-Erfassungssysteme nicht in Frage, zudem ist zu untersuchen, inwieweit für die relevanten Materialien die Beschränkung auf isotrope Materialien ausreichend ist. So haben viele Textilien anisotrope Reflexionseigenschaften, wobei der Grad der Anisotropie bestimmt, inwieweit eine Erfassung dieser Eigenschaft erforderlich ist.

Produkt	Eigenschaften	Preis (€)	Bewertung der Nachteile
Reflektometer von Ward			
Gonioreflektometer von Dana			

4. Erhebliche technische Risiken des FuE-Projekts

4.1. Materialspeicherung

Herausforderungen, die im Kontext mit der Materialerfassung bzw. -speicherung auftreten können, beziehen sich insbesondere auf die Effizienz und Performance eben dieser. Je nach erfasstem Detailgrad, verwendetem Kompressionsschema und Materialart (insbesondere isotrope vs. anisotrope Materialien) können die entstehenden Datenmengen erheblich sein. Während dies für die Speicherung als solche grundsätzlich keine Herausforderung darstellen sollte, da der verfügbare Speicher einfach erweitert werden kann, ist die Übertragung der Daten von deutlich größerer Bedeutung. Hier ist bezüglich der Anbindung des Clients, der auf die Materialdatenbank zugreift, die Geschwindigkeit der Anbindung von essentieller Bedeutung, da bei verhältnismäßig langsamer Anbindung lange Ladezeiten entstehen können.

Denkbar ist hier aber auch ein lokaler Caching- oder Synchronisations-Mechanismus, der auf lokal zwischengespeicherte Materialversionen zurückgreift, sofern keine Aktualisierung der Eigenschaften dieses spezifischen Materials stattgefunden hat. Diese Variante erscheint auch sinnvoll, wenn berücksichtigt wird, dass theoretisch mehrere hundert Clients zeitgleich auf die Datenbank zugreifen könnten, was auch aus Netzwerksicht eine Herausforderung darstellt, wenn sehr große Datenmengen übertragen werden müssen.

4.2. Rendering

Das verwendete Renderingverfahren zeichnet sich zum einen durch eine sehr hohe visuelle Qualität aus, hat aber zum anderen auch mit sehr hohen Berechnungszeiten zu kämpfen. Es wurden bereits einige Möglichkeiten vorgeschlagen, diese zu reduzieren, so dass auch in ungünstigen Beleuchtungssituationen hochqualitative Bilder innerhalb einiger Sekunden berechnet werden können sollten. Da die Verfahren in Kombination mit dem bestehenden Renderer jedoch noch nicht sämtlich praxiserprobt sind, können die Berechnungszeiten durchaus auch länger ausfallen als erwartet. Eine Möglichkeit des "Fallbacks" bleibt immer die Verwendung eines einfachen multilateralen Filterverfahrens, welches in diffusen Umgebungen gut funktioniert und bereits erprobt ist. Der Performancegewinn, der durch andere Verfahren, wie erweitertes Importance Sampling erreicht werden kann, bleibt zu prüfen.

4.3. Cloud-Datenbank

Für die Cloud-Datenbank ergibt sich das Risiko, dass im schlimmsten Fall eine sehr hohe Anzahl von Materialien und Anfragen auf einmal bearbeitet werden muss und die Cloud-Datenbank zudem prüfen muss, ob es sich beim hochzuladenden Material um ein Duplikat handelt. Gleichzeitig darf nicht ausgeschlossen werden, wenn zwei Hersteller tatsächlich nur geringfügig unterschiedliche Materialien anbieten (was durchaus vorkommt), dass dies zu einer Ablehnung seitens der Datenbank führt. Die Datenstruktur muss einfach und nachvollziehbar sein und eine schnelle und einfache Suchfunktion beinhalten, welche die gewünschten Ergebnisse liefert.

Zudem muss ein Dropbox-ähnliches System geschaffen werden, welches es einem Anwender erlaubt, seine Datenbestände in der Cloud zu speichern und auf einen anderen PC zu übertragen. Zusätzlich zur reinen Materialdefinition gibt es also auch noch einen Benutzer-spezifischen Bereich, welcher unter Ausschluss der Öffentlichkeit verwaltet werden muss.

Es gilt also, sehr viele unterschiedliche Anforderungen und Datenmengen "unter einen Hut" zu bringen und für den Anwender simpel und jederzeit nachvollziehbar zu verpacken. Dies gilt auch für die Ergebnisse der Texturen, die sich am besten in einer Vorschau - auch auf einem 3D-Element - zeigen lassen sollten. Die aktuelle Web-GL-Unterstützung moderner Browser lässt zudem auch noch etwas zu wünsche übrig, so dass ggf. eine Alternative dazu gefunden werden muss (siehe: <http://caniuse.com/webgl>).

4.4. Regelbasiertes (DSL) Workflowsystem

Wir beschäftigen uns seit einigen Jahren mit Testgetriebener Entwicklung und zudem seit dem letzten Jahr mit modellbasierter Entwicklung und der Erstellung domänenspezifischer Sprachen (sprich dem Steuern von Softwareprogrammen über annähernd natursprachliche Eingabe von Sätzen innerhalb einer klar definierten Fachdomäne). Insofern ist dieser Bereich unserer Entwicklung noch jung. Wir sind jedoch davon überzeugt, dass die einfachere Interaktion mit Softwaresystemen über Regelbasierte, Natursprachliche Ansätze es den Fachanwendern erlaubt, unsere Systeme noch schneller produktiv zu schalten, was für uns einen geringeren Dienstleistungsanteil bedeutet und damit die Möglichkeit bietet, mehr Kundenprojekte zu realisieren. Zudem nutzen wir für dieses Projekt die Expertise unseres Partners DevBoost⁵ () die sich schon seit vielen Jahren intensiv mit der Entwicklung von DSLs beschäftigen.

Das Workflowsystem muss in der Lage sein, über Plugins die Sprache zu erweitern, so dass jedes vorhandene Plugin bestimmte Sprachspezifika mitbringt. Damit gibt es ein generisches Sprachsystem, welches durch die Plugins in seiner Funktionsweise erweitert wird.

So können z.B. die 3D-Objekte unterteilt sein in „Sanitärobjekte“ und „Küchen“. Beide Kategorien unterscheiden sich wahrscheinlich in den Attributen, mit denen sie beschrieben werden. Bei einer Küche wäre z.B. eine Regel zur Information eines Benutzers mit „Informiere mich über neue Objekte < 400€“ weniger angebracht, als bei Waschbecken. Zudem sind andere Aspekte zum Filtern nötig – bei Küchen könnte es z.B. einen Filter auf „mit oder ohne Elektrogeräte“ geben, welcher durch das Plugin „Küche“ mitgebracht wird und den es bei Waschbecken (voraussichtlich) nicht gibt.

Zudem können im Laufe der Entwicklung bzw. der Lebenszeit der Clouddatenbank weitere Felder in Kategorien dazukommen, wie z.B. eine Herstellerproduktnummer oder Klassifizierung, welche dann durch die Aktualisierung des Plugins sofort für die Workflow-Engine zur Verfügung steht, ohne dass die Workflowengine selbst angepasst werden muss. Durch die Verwendung des Plugin-Systems kann dieses Problem gelöst werden, da die generische DSL in der Workflow-Engine selbst nur die Ablaufmöglichkeiten bietet und alle weiteren Spezifika komplett durch Plugins gelöst werden.

...

4.5. Implementierung in ...

4.6. Hard- und Softwaresystem zur Erfassung von SVBRDF

Wesentliches Risiko bei der Entwicklung des Erfassungssystems ist die ungenügende Erreichung des angestrebten Optimums aus Erfassungszeit, Nutzbarkeit für alle relevanten Materialarten und -dimensionen sowie hoher Datenqualität, bei geringen Systemkosten. Es kann bei den einzelnen Eigenschaften jedoch durchaus priorisiert werden, so daß das resultierende System immer noch produktiv einsetzbar ist. So kann die Datenqualität

⁵ <http://www.devboost.de/de/Portfolio#LanguageDesign>

etwas reduziert werden, um die - für den produktiven Einsatz besonders wichtige - Erfassungszeit zu verkürzen, falls diese zu lang wird.

Das Risiko zu hoher Systemkosten wird als gering angesehen, da die existierenden Ansätze bereits zeigen, dass mit kostengünstigen Kameras sehr vielversprechende Resultate erreichbar sind. Aus der Erfahrung des .. in der Entwicklung der Optik und Elektronik von LED-Beleuchtungssystemen wird zudem erwartet, dass sich die Beleuchtungsseite ebenfalls kostengünstig und dennoch in hoher Qualität realisieren lässt.

4.7. Erweiterung des hybriden Renderingsystems von ...

Wesentliches Risiko hierbei ist, dass die Renderingverfahren, um die VRfx erweitert wird, bei produktiv relevanten Datensätzen zu hohe Anforderungen an die Hardwareressourcen der verwendeten Rechnersysteme stellen, was im Extremfall dazu führen würde, dass die erfassten Materialien nicht im System ... nutzbar wären. Im Projekt IVAB wurden jedoch bereits die Voraussetzungen geschaffen, um unterschiedliche Renderingverfahren je nach Anwendungsfall und verfügbaren Hardwareressourcen flexibel einsetzen zu können. Auf dieser Basis soll im hier beantragten Projekt aufgebaut werden, sodass das oben beschriebene Risiko als sehr gering einzuschätzen ist.

4.8. Mobile Clients und Middleware

Ein technisches Risiko besteht im Projekt in der nahtlosen Integration des Mobilten Gerätes - welches im Standardfall notwendigerweise direkt auf seiner GPU im nicht-physikalischen Modus rendert - an die Softwarestrukturen, die speziell für das Pathtracing spezifizierten Modelle des physikalisch rendernden IVAB-Projektes.

Hier muss eine Middleware geschrieben werden, die das Modell umrechnet und so optimiert, dass es den Anforderungen auf einem Mobilten Client gerecht wird und im dortigen OpenGL-Framework flüssige Animationszeiten erzielt. Diese sind ausschlaggebend für das Raumerlebnis des Nutzers und unserer Erfahrung nach zentral für den Erfolg einer App.

Durch unsere langjährige Erfahrung in Datenbackends und automatischen Vektor-Konvertierungsverfahren, können wir auf die nötigen Designverfahren und Best-Practice-Herangehensweisen zurückgreifen und das Projekt erfolgreich abzuschließen.

5. Wirtschaftliche Risiken des FuE-Projekts

Die wirtschaftlichen Risiken des geplanten Projektes liegen primär bei den beiden Industriepartnern, die die Verwertung steuern werden, und denen auch hinsichtlich gewährter Förderung noch ein reelles wirtschaftliches Teilrisiko verbleibt. Die Verwertungsaktivitäten der wissenschaftlichen Partner ... und IVC beschränken sich in der Regel auf den technischen Support für die in bereits im Kooperationsvertrag geregelter Lizenz zur Nutzung überlassenen Eigenentwicklungen. Aus diesem Grund werden nachstehend nur die Risiken der Partner .. und .. beschrieben.

...

Das wirtschaftliche Risiko besteht für ... darin, dass ...

6. Anteil des Antragstellers am gesamten Vorhaben, Charakterisierung des innovativen Kerns des Teilprojektes und Abgrenzung zu den anderen Teilprojekten

6.1. IVC

Anteil des Antragstellers am gesamten Vorhaben

BRDF-Speicherung:

Bei der Bestimmung und Verwendung von BRDFs werden gewöhnlich einige Parameter unberücksichtigt gelassen. Es handelt sich dabei um die Wellenlänge (nur RGB-Werte werden berücksichtigt), die Polarisation, sowie zeitliche und Positions-Unterschiede zwischen eintreffender und ausgehender Strahlung. Effekte wie Streuung innerhalb eines Materials, Fluoreszenz oder Phosphoreszenz sind somit nicht darstellbar.

Die einfachste Variante zur Abtastung und Speicherung von BRDFs basiert auf der Nutzung eines regelmäßigen Gitters. Je nach BRDF kann die Nutzung eines unregelmäßigen Gitters sinnvoller sein, insbesondere wenn die Intensität von Reflexionen in bestimmten Intervallen stark variiert, in anderen aber nahezu konstant ist.

Weiterhin sind Messungen mit nahezu identischen Winkeln für ein- und ausgehende Strahlung sowie nahe dem Glanzwinkel schwierig oder unmöglich. Dies führt zu Lücken in den akquirierten Daten, die auf sinnvolle Weise durch inter- bzw. extrapolierte Daten gefüllt werden müssen.

Die Speicherung von für die hochqualitative Darstellung geeigneten BRDFs muss berücksichtigen, dass die Rohdaten je nach Messauflösung eine signifikante Menge an Speicher belegen können. Während dies für die reine Archivierung keine Herausforderung darstellt, spielt die Speichereffizienz bei der Verwendung zur Laufzeit eine zentrale Rolle. Somit ist es notwendig, gängige Methoden zur BRDF-Kompression zu betrachten und zu vergleichen, so dass eine geeignete Methode ausgewählt und in das System integriert werden kann. Hierbei ist auch von Bedeutung, ob lediglich isotrope oder auch anisotrope BRDFs unterstützt werden sollen, da die Anisotropie einen deutlichen Zuwachs beim Speicherbedarf zur Folge hat.

In Betracht kommende Kompressionsverfahren basieren z.B. auf Wavelets, Spherical Harmonics oder Faktorisierungsverfahren. Die Waveletkompression mit Nichtstandard-Wavelets bietet dabei den Vorteil einer flexiblen Rekonstruktion.

Zusätzlich zur direkten Verwendung gemessener BRDFs kommt auch die Verwendung analytischer Modelle in Betracht, die anhand einer passenden Parametrisierung entsprechend gefittet werden können. Hierzu existiert eine Vielzahl von Arbeiten und auch eine Reihe gut geeigneter Modelle.

1. **Beleuchtungsberechnung mit Nutzung gemessener BRDFs:** Die in IVAB implementierte globale Beleuchtungsberechnung auf Basis von Monte-Carlo-Verfahren soll hier als Grundlage dienen. Darauf aufbauend wird die neue Möglichkeit geschaffen, gemessene Materialien zu visualisieren. Dabei sind mehrere Punkte zu beachten:
 - a. Die Rekonstruktion der BRDF-Werte aus dem gewählten Speicherformat muss möglichst performant erfolgen können.

- b. Die rekonstruierten Werte sollen den tatsächlichen, korrekt zu messenden Werten möglichst ähnlich sein.
- c. Das Verfahren muss gut für die Implementierung auf GPUs geeignet sein.
- d. Der negative Performanceeinfluss der Nutzung mehrerer BRDFs in einer Szene soll möglichst gering ausfallen.

Von zentraler Bedeutung ist auch die Unterstützung von Importance Sampling für gemessene BRDFs.

2. **Beschleunigung der Beleuchtungsberechnung:** Beim zum Einsatz kommenden Verfahren handelt es sich um traditionelles Path Tracing nach (Kajiya, 1986). Insbesondere in Situationen mit einem deutlichen Anteil indirekter Beleuchtung hat diese Methode Schwächen, die sich in einer langen Konvergenzzeit niederschlagen.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, können auf Basis der Erfahrungen aus dem Projekt IVAB erweiterte Methoden zur Beschleunigung der Beleuchtungsberechnung realisiert werden. Mögliche Ansätze dazu sind etwa das bidirektionale Path Tracing nach Lafortune/Willems (und später Veach), Metropolis Light Transport nach Veach und Guibas, Energy Redistribution Path Tracing nach Cline et al., Vertex Connection and Merging nach Georgiev et al. sowie Manifold Exploration Path Tracing nach (Jakob, Marschner 2012).

Neben diesen algorithmisch unterschiedlichen Verfahren existiert auch eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Beeinflussung des stochastischen Abtastverfahrens. Dabei ist die grundlegende Idee, Informationen über die Lichtverteilung in der Szene zu nutzen, um Strahlen anhand entsprechender Wahrscheinlichkeitsdichten zu "lenken". Da aber gerade die Bestimmung der Lichtverteilung das Ziel globaler Beleuchtungsverfahren ist, kann höchstens mit Annäherungen gearbeitet werden.

Zusätzlich sind auch Nachverarbeitungsschritte in Betracht zu ziehen, die das in den berechneten Bilddaten vorhandene Rauschen durch intelligente Filterverfahren reduzieren. Weitere Ansätze können auch auf Lichtfelddaten zurückgreifen, um etwa eine teilweise Rekonstruktion der Bilddaten ohne eine vollständige Neuberechnung zu vollziehen.

Sowohl die Implementierung sich algorithmisch von Path Tracing unterscheidender (bzw. Path Tracing erweiternder) Verfahren, als auch die Nutzung von Methoden zur Optimierung des Abtastprozesses sollen untersucht werden. Es soll eine Auswahl zu implementierender Verfahren getroffen werden, die am besten zum bestehenden System passt und den potenziell größten Performancegewinn bietet.

Charakterisierung des innovativen Kerns des Teilprojektes

Bisherige Ansätze konzentrieren sich im Wesentlichen entweder nur auf die Erfassung der Materialien oder Darstellungsverfahren unter Verwendung als bereits verfügbar angenommener Materialien. Die Kernidee der Teile des Projekts, an denen das IVC beteiligt ist, befasst sich mit der vollautomatischen Erfassung der Materialien, deren Repräsentation zur Verwendung in unterschiedlichen Darstellungsverfahren (von "Preview-Qualität" bis zu "photorealistisch") sowie mit den letztlichen Renderingverfahren. Die wesentliche Innovation ist dabei die Bereitstellung einer vollständig integrierten Kette von der Erfassung bis zur Darstellung, wobei das IVC an vielen wesentlichen algorithmischen Komponenten beteiligt bzw. für diese auch hauptverantwortlich ist.

Abgrenzung zu den anderen Teilprojekten

Das IVC befasst sich im Wesentlichen mit allen Komponenten, die direkt die Nutzung und Darstellung der Materialdaten betreffen. Dies umfasst die Netzwerkschnittstelle des verteilten Renderers, das Speicherformat der Materialerfassung sowie die analytische Approximation der Materialien, den Rendervorgang als solchen, sowie auch die Nachverarbeitung der Bilddaten der globalen Beleuchtungsberechnung durch passende Filterverfahren.

7. Möglichkeit und Notwendigkeit des FuE-Projekts für den Antragsteller

7.1. IVC:

An der H-BRS wird bereits seit längerem in unterschiedlichen Zusammenhängen im Bereich globaler Beleuchtungsberechnung geforscht und entwickelt. Das erste größere Projekt in diesem Rahmen war "TraCell" (**2007-2009**). Projekthinhalt war die Entwicklung eines echtzeitfähigen Ray Tracers zur Verwendung im Bereich der Simulation von Augenoperationen. Dieser Bereich war deswegen von großem Interesse, da gerade hier die gut durch Ray Tracing darstellbaren Effekte wie Schattenwurf, Brechung oder Reflexion von großer Bedeutung sind.

In TraCell wurde als Hardwareplattform zunächst ein Cluster aus Cell-Prozessoren in Form mehrerer Exemplare von Sonys Playstation 3 sowie IBM CellBlades genutzt. Die Entwicklung auf der ungewöhnlichen Cell-Architektur stellte eine große Herausforderung dar, bot aber auch die Möglichkeit einer sehr hohen Performance. Da letztlich die Weiterentwicklung des Cell-Prozessors ins Stocken geriet, wurde zum Ende des Projekts eine Portierung des Renderers auf NVIDIAs CUDA-Architektur vorgenommen.

Diese Architektur diente auch im Rahmen von IVAB als Plattform für die erste Implementierung globaler Beleuchtungsberechnung. Hier wurde NVIDIAs auf CUDA aufsetzendes Framework *OptiX* eingesetzt. OptiX bietet einen generischen Ansatz zur Implementierung strahlbasierter Verfahren sowie die Nutzung bereits vorhandener Datenstrukturen, so dass sich der Entwickler auf die eigentliche "mathematische" Seite konzentrieren kann. Ein großer Vorteil von OptiX ist, dass der Entwickler sich nicht um low-level-Optimierungen für aktuelle und neue GPU-Generationen kümmern muss. Diese werden letztlich mit neuen OptiX-Versionen von NVIDIA selbst geliefert.

Generell ist außerhalb des hier beantragten Projekts an der H-BRS im Institut für Visual Computing die weitergehende Beschäftigung mit globalen Beleuchtungsverfahren und ihren Optimierungen auch im Rahmen von Promotionsprojekten vorgesehen und hat auch bereits begonnen. Insofern können hier entstehende Synergieeffekte genutzt werden.

Durch den weiteren Ausbau der Erfahrungen mit globaler Beleuchtungsberechnung und der Nutzung von GPUs wird das IVC in die Lage versetzt, dieses Wissen in mittelständische Unternehmen zu transferieren. Regionale Unternehmen zeigen bereits jetzt ein großes Interesse daran.

Zudem bietet dieses Projekt eine weitere Möglichkeit der Vertiefung der Kooperation mit angesehenen Hochschulinstituten wie dem ... und den engagierten gewerblichen Partnern aus der Baubranche.

8. Fachliche Eignung des eingeplanten Personals

8.1. IVC

Das Institut für Visual Computing der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg wird für das geplante Projekt zwei bereits im Institut beschäftigte Master-Absolventen der Informatik einsetzen. Sowohl Herr ... (MSc) als auch Herr ... (MSc) besitzen durch ihre im Studium gesetzten Schwerpunkte die erforderliche Qualifikation für die gestellten Anforderungen und haben bereits bei den Vorarbeiten zu diesem Projekt mitgewirkt.

Anlage A

Referenzen

- Kajiya, James T. „The rendering equation“. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 20:143–150, 1986.
- Lafortune, Eric P. „Bi-Directional Path Tracing“. In *Proceedings of Compugraphics '93*, 145–153, 1993.
- Veach, Eric. „Robust Monte Carlo methods for light transport simulation“. Stanford University, 1997.
- Veach, Eric, und Leonidas J. Guibas. „Metropolis light transport“. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 65–76, 1997.
- Metropolis, Nicholas, Arianna W. Rosenbluth, Marshall N. Rosenbluth, Augusta H. Teller, und Edward Teller. „Equation of state calculations by fast computing machines“. *The journal of chemical physics* 21 (1953): 1087.
- Hastings, W. Keith. „Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications“. *Biometrika* 57, Nr. 1 (1970): 97–109.
- Cline, David, Justin Talbot, und Parris Egbert. „Energy redistribution path tracing“. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 24:1186–1195, 2005.
- Jensen, Henrik Wann. „Global illumination using photon maps“. In *Rendering Techniques' 96*, 21–30, Springer, 1996.
- Hachisuka, Toshiya, Shinji Ogaki, und Henrik Wann Jensen. „Progressive photon mapping“. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 27, Nr. 5 (2008): 130.
- Hachisuka, Toshiya, und Henrik Wann Jensen. „Stochastic progressive photon mapping“. *ACM Trans. Graph.* 28, Nr. 5 (Dezember 2009): 141:1–141:8. doi:10.1145/1618452.1618487.
- Georgiev, Iliyan, Jaroslav Krivánek, Tomáš Davidovič, und Philipp Slusallek. „Light transport simulation with vertex connection and merging“. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 31, Nr. 6 (2012): 192.
- Pharr, Matt, und Greg Humphreys. *Physically based rendering: From theory to implementation*. Morgan Kaufmann, 2010.
- Kollig, Thomas, und Alexander Keller. „Efficient multidimensional sampling“. In *Computer Graphics Forum*, 21:557–563, 2002.
- Lafortune, Eric P., und Yves D. Willems. „A 5D Tree to Reduce the Variance of Monte Carlo Ray Tracing“. In *Rendering Techniques '95*, herausgegeben von P. M. Hanrahan und W. Purgathofer, 11–20, 1995. <http://www.graphics.cornell.edu/~eric/Dublin.html>.
- Jensen, Henrik Wann. „Importance driven path tracing using the photon map“. In *Rendering Techniques '95*, herausgegeben von P. M. Hanrahan und W. Purgathofer, 326–335, 1995.
- Dutré, Philip, und Yves D. Willems. „Potential-driven Monte Carlo Particle Tracing for Diffuse Environments with Adaptive Probability Functions“. In *Rendering Techniques '95*, herausgegeben von Prof Dr Patrick M. Hanrahan und Prof Dr Werner Purgathofer, 306–315. Eurographics. Springer Vienna, 1995. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-9430-0_29.
- Tobler, Robert F., László Neumann, Mateu Sbert, und Werner Purgathofer. „A New Form Factor Analogy and its Application to Stochastic Global Illumination Algorithms“. In *Eurographics Symposium on Rendering/Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, 35–44, 1998.
- Zimmerman, Kurt. „Density Prediction for Importance Sampling in Realistic Image Synthesis“. Indiana University, 1998.
- Szirmay-kalos, László, Balázs Csébfalvi, und Werner Purgathofer. „Importance driven quasi-random walk solution of the rendering equation“. *Computers & Graphics* 23, Nr. 2 (1999): 203–211. doi:10.1016/S0097-8493(99)00030-8.

- Perez, F., I. Martin, F.X. Sillion, and X. Pueyo. „Acceleration of Monte Carlo path tracing in general environments“. In *The Eighth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2000. Proceedings*, 71–439, 2000. doi:10.1109/PCCGA.2000.883883.
- Xu, Qing, Jizhou Sun, Wei Zunce, Yantai Shu, Stefano Messelodi, and Jing Cai. „Zero Variance Importance Sampling Driven Potential Tracing Algorithm for Global Illumination.“ In *WSCG (Short Papers)*, 38–43, 2001.
- Hey, Heinrich, und Werner Purgathofer. „Importance sampling with hemispherical particle footprints“. In *spring conference on computer graphics*, 107–114, 2002. doi:10.1145/584458.584476.
- Pérez Cazorla, Frederic. „Global illumination techniques for the computation of high quality images in general environments“. Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.
- Cranley, R., und T. N.L. Patterson. „Randomization of number theoretic methods for multiple integration“. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 13, Nr. 6 (1976): 904–914.
- Owen, Art B. *Randomly permuted (t, m, s)-nets and (t, s)-sequences*. Springer, 1995.
- Chen, Wei-Chao, Jean-Yves Bouguet, Michael H. Chu, und Radek Grzeszczuk. „Light field mapping: efficient representation and hardware rendering of surface light fields“. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 21:447–456, 2002.
- Hinkenjann, André, und Georg Pietrek. „Using scattered data interpolation for radiosity reconstruction“. In *Computer Graphics International, 1998. Proceedings*, 715–720. IEEE, 1998.
- Hinkenjann, André, und Thorsten Roth. „Phase space rendering“. In *Advances in Visual Computing*, 691–700. Springer, 2007.
- Hachisuka, Toshiya, Wojciech Jarosz, Richard Peter Weistroffer, Kevin Dale, Greg Humphreys, Matthias Zwicker, und Henrik Wann Jensen. „Multidimensional adaptive sampling and reconstruction for ray tracing“. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27:33, 2008.
- Overbeck, Ryan S., Craig Donner, und Ravi Ramamoorthi. „Adaptive wavelet rendering“. *ACM Trans. Graph* 28, Nr. 5 (2009): 1–12.
- Reshetov, Alexander. „Morphological antialiasing“. In *Proceedings of the Conference on High Performance Graphics 2009*, 109–116, 2009.
- Ritschel, Tobias, Thorsten Grosch, und Hans-Peter Seidel. „Approximating dynamic global illumination in image space“. In *Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games*, 75–82, 2009.
- Dammertz, Holger, Daniel Sewtz, Johannes Hanika, und Hendrik Lensch. „Edge-avoiding À-Trous wavelet transform for fast global illumination filtering“. In *Proceedings of the Conference on High Performance Graphics*, 67–75, 2010.
- He, Kaiming, Jian Sun, und Xiaoou Tang. „Guided image filtering“. In *Computer Vision–ECCV 2010*, 1–14. Springer, 2010.
- Bauszat, Pablo, Martin Eisemann, und Marcus Magnor. „Guided Image Filtering for Interactive High-quality Global Illumination“. In *Computer Graphics Forum*, 30:1361–1368, 2011.
- Roth, Thorsten, und André Hinkenjann. „GrIP: A Framework for Experiments with Screen Space Algorithms“. In *8. Workshop Virtuelle und Erweiterte Realität der GI-Fachgruppe VR/AR*, 85–96, 2011.
- Shirley, Peter, Timo Aila, Jonathan Cohen, Eric Enderton, Samuli Laine, David Luebke, und Morgan McGuire. „A local image reconstruction algorithm for stochastic rendering“. In *Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, PAGE–5, 2011.
- Rousselle, Fabrice, Claude Knaus, und Matthias Zwicker. „Adaptive sampling and reconstruction using greedy error minimization“. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 30:159. ACM, 2011.
- Rousselle, Fabrice, Claude Knaus, und Matthias Zwicker. „Adaptive rendering with non-local means filtering“. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 31, Nr. 6 (2012): 195.
- Lehtinen, Jaakko, Timo Aila, Samuli Laine, und Frédo Durand. „Reconstructing the indirect light field for global illumination“. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 31, Nr. 4 (2012): 51.

- Schwenk, Karsten, Arjan Kuijper, Johannes Behr, und Dieter Fellner. „Practical noise reduction for progressive stochastic ray tracing with perceptual control“ (2012).
- Sen, Pradeep, und Soheil Darabi. „On filtering the noise from the random parameters in Monte Carlo rendering“. *ACM Trans. Graph.* 31, Nr. 3 (2012): 18.
- Mehta, Soham Uday, Brandon Wang, Ravi Ramamoorthi, und Fredo Durand. „Axis-aligned filtering for interactive physically-based diffuse indirect lighting“. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 32, Nr. 4 (2013): 96.
- (Murray 90) J. F. Murray-Coleman and A.M. Smith. The Automated Measurement of BRDFs and their Application to Luminaire Modeling. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, pp. 87-99, Winter 1990
- (Ward 92) Gregory J. Ward. Measuring and Modeling Anisotropic Reflection. SIGGRAPH'92 proceedings, pp. 265-272, July 1992.
- (Dana 96) Kristin J. Dana, Shree K. Nayar, Bram van Ginneken and Jan J. Koenderink. Reflectance and Texture of Real-World Surfaces. Columbia University Technical Report, CUCS-048-96, December 1996.
- (Ben-Ezra 2008) Ben-Ezra, Moshe, et al. "An LED-only BRDF measurement device." *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on. IEEE, 2008.
- (Ren 2011) Ren, P., Wang, J., Snyder, J., Tong, X., & Guo, B. (2011, August). Pocket reflectometry. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)* (Vol. 30, No. 4, p. 45). ACM.
- (Aittala 2013) Aittala, M., Weyrich, T., & Lehtinen, J. (2013). Practical SVBRDF Capture In The Frequency Domain. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*,32(4).

Anlage A

9. Wirkung des FuE-Projekt auf die technische und wirtschaftliche Situation des Antragstellers

9.1. Darstellung der Wirkung des FuE-Projekts auf die Wettbewerbsfähigkeit des Antragstellers (Umsatzsteigerung, Anzahl d. Beschäftigten)

9.2. Darstellung der Wirkung des FuE-Projekts auf die technologische Basis und das FuE-Potenzial des Antragstellers

9.3. Welche für den Antragsteller neuen Technologiegebiete bzw. Kombinationen moderner Technologien werden in Angriff genommen?

Anlage B

10. Konzept zur Erfolgskontrolle bis zur Markteinführung

Definition von eindeutigen technischen und wirtschaftlichen Zielkriterien
Definition von Meilensteinen, wann diese Kriterien erreicht werden sollen
Beabsichtigte Maßnahmen zur Markteinführung
Angezielte Märkte und angestrebte Marktanteile

Die Projektpartner schaffen durch den Einsatz geeigneter Methoden und Werkzeuge zum Projektmanagement sowie zum Management kollaborativer Softwareentwicklung und Dokumentation die Voraussetzungen für die Erreichung der technischen und wirtschaftlichen Projektziele. Sie führen ferner eine fortlaufende Überwachung des Fortschritts der Entwicklungsarbeiten durch.

Die Erreichung der Projektziele wird anhand folgender datierter Meilensteine und technischer/fachlicher Zielkriterien überprüft. Wirtschaftliche Zielkriterien für jeden Meilenstein sind dessen Erreichung in der geplanten Zeit (mit einem Toleranzbereich von +/- 2 Wochen) und mit den geplanten Ressourcen.

Meilensteine	eindeutige technische Zielkriterien
M 1: 31.07.2014 Freigabe der Spezifikation	Die komplette technische Spezifikation und Anforderungsanalyse ist abgeschlossen und liegt schriftlich vor. Jeder Projektmitarbeiter kennt seine Aufgabe und Rolle. Hierzu liegt eine schriftliche Aufgabenplanung für jeden Mitarbeiter vor, in der die Arbeitspakete geschlüsselt und geplant sind. Die Projektplanung in GANTT-Form liegt vor.
M 2: 30.09.2014 Definition der Materialformate	Die Materialformate sind abgestimmt und dokumentiert. Sie liegen vor für folgende Materialgruppen: <ul style="list-style-type: none">• Fliesen• Holzböden• Teppiche• Tapeten• Putz• Verblender (Klinker)• Hölzer• Glas• Metall• Dachziegel• Kunststoff• Stein Die Beschreibung existiert als Schnittstellenformat, auf Basis derer alle Partner ihre Umsetzungen vornehmen. Für die Qualität "Normal" werden alle obenstehenden Materialgruppen auch in der Software umgesetzt. Für die Qualität "BRDF" werden jedoch nur folgende Materialgruppen als Referenzanwendungsfälle umgesetzt: <ul style="list-style-type: none">• Fliesen• Verblender• Holzböden Diese dienen als vorrangige Anwendungsfälle für die Entwicklung des weiteren Materialerfassungsprozesses.

<p>M 3: 30.06.2015 ALPHA-Versionen der Softwaresysteme</p>	<p>Erste Integrationstests mit ALPHA-Versionen der jeweiligen Software-systeme sind möglich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materialerfassung in normaler Qualität ist möglich • Materialerfassung in BDRF-Qualität ist als ALPHA-Version (noch nicht voll ausgereift) möglich • Rendering von normalen Materialien ist möglich • Rendering von BDRF-Qualität ist als ALPHA-Version (noch nicht voll ausgereift) möglich • Die DSL ist in der Grammatik festgelegt • Die Cloud-Infrastruktur ist implementiert (Technik ist vorhanden, Betriebssysteme, sowie Programmkomponenten ausgewählt und eine Backupstrategie vorhanden) • Die Struktur der Cloud-Datenbank ist komplett definiert • Die Workflow-Engine ist komplett definiert und das Plugin-System konzipiert • Die Ansichten in Vi Plan basieren auf der neuen 3D-Ansteuerung <p>Eine Präsentation des Systems wurde auf der BAU 2015 gezeigt (größte europäische Baumesse) -> http://www.bau-muenchen.com/</p>
<p>M 4: 31.10.2015 BETA-Versionen der Softwaresysteme</p>	<p>Erste Integrationstests mit BETA-Versionen der jeweiligen Softwaresysteme sind möglich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materialerfassung in BDRF-Qualität ist als BETA-Version möglich • Rendering von BDRF-Qualität ist als BETA-Version möglich • Die DSL ist inkl. der Plugin-Struktur umgesetzt • Das Workflow-System wird in der Cloud-Infrastruktur betrieben • Die Cloud-Datenbank ist mit einer grafischen Benutzeroberfläche nutzbar • Vi Plan kann die normale Qualität der Materialien in 3D und 2D-Ansicht zeigen • Die Schnittstellen für den Datenabgleich von Vi Plan mit dem Cloudsystem sind definiert • Die Deduplizierung von Daten ist umgesetzt • Die Benutzersteuerung im System ist umgesetzt • Es gibt einen öffentlichen Baum des Materialsystems • Nutzung und Darstellung von in der Materialdatenbank vorhandenen Definitionen auf dem Mobilien Client
<p>M 5: 31.03.2016 Prozessfähigkeit des Gesamtsystems</p>	<p>Die internen und externen Tests des Gesamtsystems und der Komponenten sind abgeschlossen; die aus den Tests resultierenden erforderlichen Verbesserungen zur Erreichung der Prozessfähigkeit sind eingearbeitet.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es wurden Testprotokolle mit Mängeln und bestätigten Features erstellt (Checklisten) • Ein vollständiger Durchlauf des Gesamtsystems ist reibungslos möglich. Dieser besteht aus: Materialerfassung in normaler Qualität, Upload in die Cloud, Verteilung auf einen anderen Rechner, Benutzung in der virtuellen Bemusterung • Das Userinterface kann im Produktivbetrieb bedient werden • Materialien können in normaler und in BDRF-Qualität erfasst werden • Das Rendering von BDRF-Materialien ist in der virtuellen Bemusterung implementiert • Ein Test-Betrieb mit 5 Anwendern von ... findet statt, um das System zu prüfen • Ein Test-Betrieb mit 1-2 Anwendern von ... erfolgt zur Prüfung der Materialaufnahme und Materialverwendung
<p>M 6: 30.09.2017 Vorbereitung Markteinführung</p>	<p>Folgende Maßnahmen wurden durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fertigstellung der Clients für das Vi2000-Ökosystem und Integration in die Produkte (...) - Integration der Technologien in die Major-Release von Vi2000

	<ul style="list-style-type: none"> - Veröffentlichung der Major-Release von Vi2000 - Integration in die Entwicklungsumgebung für Apps von ... - Ansprache von Plattformen wie ausschreiben.de für die Kooperation
<p>M 7: 31.12.2017 Markteinführung</p>	<p>Vorstellung des Gesamtsystems auf Hausmessen und im hauseigenen ...-Kundenvideokanal.</p> <p>Folgende Events wurden durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vorstellung auf einer Hausmesse bei ... - Vorstellung auf 3 Schulungen von .. - Aufnahme des Systems in das Angebots- und Akquise-Portfolio von ... (Katalog, Werbevideo etc.) - Vorstellung der Anlage durch den Partner ... <p>Ansprache von:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mindestens 3 Unternehmen des Fertighausbaus - Mindestens 10 Unternehmen des Massivbaus - Mindestens 5 Unternehmen des Baustoffhandels - Mindestens 3 Unternehmen des Schienenverkehrs/Spezialfahrzeugbaus

Tabelle 1: Erfolgskontrolle mit datierten Meilensteinen und eindeutigen technischen und wirtschaftlichen Zielen

Anhang B zur Anlage 5

Gemeinsamer Arbeitsplan

1) Vereinfachter Arbeitsplan mit Meilensteinen