

## G. Lichtsimulation in der digitalen Rekonstruktion historischer Architektur

→ Baugeschichte, Computervisualisierung, Lichtsimulation, Predictive Rendering

Bilder rekonstruierter Architektur sind allgegenwärtig. Weithin spürbar ist der Wunsch, historische Architektur als Lebenswelt stimmungsvoll zu vermitteln. In der Baugeschichte werden solche Darstellungen als Bildquellen verstanden und immer wieder dafür kritisiert, dass die photorealistische Darstellungsweise die Unsicherheiten der Rekonstruktion historischer Bauten verschleiert. In der Computergrafik steht hingegen die verlässliche Herstellung der computergenerierten Bilder selbst im Vordergrund. Unter dem Begriff Predictive Rendering hat sich dafür eine Pipeline etabliert, die von der Herstellung geeigneter Computermodelle optischer Materialeigenschaften über die Simulation der Lichtverteilung im Raum zur menschlichen Wahrnehmung einer Szene fortschreitet. Dabei ist jeder Schritt mit einem Fehlermanagement verbunden.

Dieser Artikel unternimmt den Versuch einer Erweiterung dieser Pipeline zu einer experimentellen Methode der Lichtsimulation für die Untersuchung der Beleuchtung und Wahrnehmung historischer Architektur. Die erweiterte Pipeline beginnt mit der Formulierung geeigneter Forschungsfragen. Sie schreitet fort über die geometrischen Rekonstruktion und die Messung der optischen Eigenschaften historischer Baumaterialien zur Simulation selbst. Sie endet mit einer vierstufigen Analyse: der Auswertung der numerischen Ergebnisse, der Untersuchung dieser Ergebnisse im Kontext visueller Wahrnehmung, einer Diskussion der historischen Rezeption der Szene und schließlich der Interpretation der Ergebnisse für die Baugeschichte.

## □ 01

Lichtsimation als experimentelle Methode: Rekonstruktion der Lichtstimmung morgens an einem Weihnachtstag in der Hagia Sophia des 6. Jahrhunderts. Die computergestützte Rekonstruktion historischer Architektur kann sich nur weiterentwickeln, wenn sie sich nicht mehr als bloße Visualisierung begreift. Lichtsimulation als experimentelle Methode in der historischen Bauforschung bietet die Chance, die Lichtgestaltung vergangener Architektur zu untersuchen und wieder erlebbar zu machen.



## G.1 Prolog: An artist's impression

Illustrationen, die geplante Weltraum-Missionen erläutern oder die Arbeit der Weltraumteleskope veranschaulichen, tragen häufig Titel, die die Worte **An artist's impression** enthalten. Sie zeigen Szenen aus fernen Welten, die Menschen niemals werden sehen können, von denen man ihnen aber eine Vorstellung geben möchte. Dem nüchternen Naturwissenschaftler ist diese Form von **Science Fiction** unheimlich, deshalb verweist er sie lieber in die Welt der Kunst. Dessen kognitive Dissonanz gegenüber der stimmungsgeladenen Darstellungsweise und ihrer medialen Funktion findet ihre Paralle in den Bedenken der historischen Wissenschaften im Umgang mit fotorealistischen Darstellungen rekonstruierter Architektur bei Computervisualisierungen verlorener Bauten. **01**

Genauer betrachtet sind die Bilder, die den Ausgangspunkt dieser Betrachtung bilden, fotorealistische perspektivische Darstellungen rekonstruierter historischer Architektur, die teils verändert, teils verloren ist. Die Anfertigung dieser Bilder auf Basis von computergestützten dreidimensionalen Modellen ist ein Betätigungsfeld von Architekten in der Bauforschung und ein Anwendungsbereich moderner architektonischer Darstellungsmethoden, die sich aus der Architekturperspektive entwickelt haben. Diese Bilder zeigen mehr als geometrische Rekonstruktionen von Räumen, sonst würden zur Darstellung Linienzeichnungen in orthogonalen Projektionen (Grundrisse, Schnitte und Ansichten) genügen. Die Perspektive dieser Bilder impliziert den Augpunkt eines menschlichen Betrachters und ihre fotorealistische Darstellung impliziert Eigenschaften des menschlichen Sehens. Um die Architektur so zu zeigen, wie Menschen sie sehen würden, muss die Geometrie der Szene durch Oberflächenqualitäten wie Farbe, Struktur und Glanz ergänzt und mit computergrafischen Methoden **ins Licht gesetzt** werden.

Die computergrafischen Methoden, die hier zur Anwendung kommen, berechnen die Verteilung von Licht und Schatten im Raum, ferner Lichteffekte wie Strahlen, Reflexionen und Glanzpunkte. Diese Verfahren gleichen denen **technischer Lichtsimulationen**, nur dass die numerischen Resultate zu Bildern weiterverarbeitet werden. Jede dieser **artist's impressions** ist eigentlich das Ergebnis der Anwendung präziser mathematischer Methoden, auch wenn die Voraussetzungen, Einschränkungen und Potenziale dieser Methoden im bauhistorischen Kontext selten reflektiert werden. **02**

### ■ 01

Als Beispiel lese man zwischen den Zeilen: **International Forum of Virtual Archaeology, The Seville Principles, Internet, ohne Jahr, <https://web.archive.org/web/20160117033144/>, vgl. <http://www.arqueologiavirtual.com/carta/wp-content/uploads/2012/03/BORRADOR-FINAL-FINAL-DRAFT.pdf>**

### ■ 02

Das seit 2015 laufende Dissertationsprojekt des Autors »Lichtsimulation verlorener Gebäudezustände am Beispiel der Hagia Sophia Justinians« soll diese Arbeit leisten. Diese Arbeit stützt sich dabei auf Erfahrungen mit einer Lichtsimulation der Hagia Sophia, siehe: Lars Grobe, Oliver Hauck, Andreas Noback. **Das Licht in der Hagia Sophia – Eine Computersimulation**, in: Falko Daim, Jörg Drauschke (Hg.), **Byzanz – Das Römerreich im Mittelalter, Volume 2,1 Schauplätze**, Mainz 2010.

## G.2 Licht als konstituierendes Element historischer Architektur

Licht und Architektur stehen in einem unlöslichen Zusammenhang: Beleuchtung als Voraussetzung menschlichen Sehens ist eng mit allen funktionalen Aspekten von Architektur verknüpft und zugleich ist Licht das dominante Medium, in dem wir Architektur erleben. **03** Beleuchtung erschließt die Elemente des architektonischen Entwurfs und dynamisiert ihn durch die natürliche Veränderung des Lichts psychologisch im Tages- und Jahresverlauf und unter dem Einfluss des Wetters. Künstliche und natürliche Beleuchtung bieten unzählige Möglichkeiten zur Inszenierung von Räumen, Objekten und Handlungen und nicht selten sind Lichteffekte selbst Mittelpunkt architektonischer Inszenierung. Licht steht damit in enger Beziehung zur kulturellen Bedeutung von Architektur. **04** Folglich sind **Lichtkonzepte** für die Erforschung historischer Gebäude von großem Interesse. **05** Erkenntnisse zum Stand technischer und wirtschaftlicher Möglichkeiten der Beleuchtung, zu gestalterischen Vorlieben und zu metaphysischen Vorstellungen von Licht erweitern das Verständnis typologischer Entwicklungen und des individuellen historischen Entwurfs. **Lichtsimation** im Kontext der historischen Bauforschung kann helfen, Lichtkonzepte von Gebäuden zu klären, die verloren oder nur in veränderter Form erhalten sind.

### ■ 03

Für den Zusammenhang von Licht-Wahrnehmung und Architektur siehe insbesondere: Christian Bartenbach, Walter Witting, *Handbuch der Lichtgestaltung: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen*, Wien 2009; William M. C. Lam, *Perception and lighting as formgivers for architecture*, New York 1992; Grundlagen in: James J. Gibson, *The perception of the visual world*, Cambridge 1950; Lam and Ripman 1992.

### ■ 04

Überblick in Lam and Ripman 1992, Rüdiger Ganslandt, Harald Hofmann, *Handbuch der Lichtplanung*, Braunschweig, Wiesbaden 1992; und Richard Kelly, *Light as an Integral Part of Architecture*, in *College Art Journal* 12 (1) 1952, S. 24–30.; zur metaphysischen und mystischen Bedeutung von Licht: Peter Sloterdijk, *Lichtung und Beleuchtung: Anmerkungen zur Metaphysik, Mystik und Politik des Lichts*, in: Willfried Baatz (Hg.), *Gestaltung mit Licht*, Ravensburg 1994, S. 14–38.

### ■ 05

Für einen Überblick bieten sich zwei Tagungsbände an: Daniela Mondini und Vladimir Ivanovici (Hg.), *Manipulating light in pre-modern times. Architectural, artistic and philosophical aspects*, Mendrisio 2014; Peter Schneider und Ulrike Wulf-Rheidt, *Licht-Konzepte in der vormodernen Architektur, Diskussionen zur Archäologischen Bauforschung* 10, Regensburg 2010.

### ■ 06

The London Charter Interest Group, *The London Charter*, [http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london\\_charter\\_2\\_1\\_en.pdf](http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_en.pdf), Hugh Denard, *A new Introduction to The London Charter*, in: Anna Bentkowska-Kafel et al., *Paradata and Transparency*, in: *Virtual Heritage, Digital Research in the Arts and Humanities*, Farnham 2012, S. 57–71.

## G.3 Auseinandersetzung mit der Computervisualisierung in der Computergrafik und in den historischen Wissenschaften

Bilder haben keine Fußnoten und keine argumentative Struktur, die wissenschaftliches Arbeiten nachvollziehbar und kritikfähig macht. Das fotorealistische Erscheinungsbild von Computervisualisierungen evoziert eine Sicherheit, die im Gegensatz zu den Unsicherheiten der Rekonstruktion steht. Die Auseinandersetzung mit den Visualisierungen in den historischen Wissenschaften zielt daher vornehmlich auf eine nachhaltige Qualitätssicherung der Modelle und deren Herstellungsmethoden und entwickelt Vorschläge für Annotationen, die den hypothetischen und unvollständigen Charakter des Modells transportieren, Quellen aufzeigen und Entscheidungsprozesse nachvollziehbar machen. <sup>06</sup> Selten sind allerdings Arbeiten, die computergrafische Methoden einsetzen, um Fragen der Beleuchtung historischer Architektur selbst zu klären, und sich in diesem Kontext theoretisch mit diesen Methoden auseinandersetzen. <sup>07</sup>

Dem steht mit der Computergrafik ein mit Forschungsmitteln aus der Unterhaltungs-, Automobil- und anderen Branchen gut ausgestatteter Wissenschaftszweig gegenüber, der intensiv an der Verbesserung von Simulationsmethoden, Modellen zur Darstellung komplexer Materialeigenschaften, an der Untersuchung menschlicher Wahrnehmung und Vielem mehr arbeitet. <sup>08</sup> Auf der Suche nach Anwendungsmöglichkeiten hat auch der Einsatz computergrafischer Methoden im Kontext historischer Architektur aus dieser Richtung bereits eine theoretische Reflexion erfahren.

Ein systematischer Vorschlag, wie man bei der Darstellung historischer Architektur vorgehen kann, wird in **Cultural Heritage Predictive Rendering** von Happa et al. formuliert. <sup>09</sup> Die Autoren schlagen eine Abfolge von Arbeitsschritten vor, um Bilder historischer Szenen herzustellen und dabei ihre Angemessenheit zu untersuchen <sup>T1</sup>:

□ T1  
Arbeitsschritte des Cultural Heritage  
Predictive Rendering

■ 07  
Einzelne Beiträge finden sich in den Tagungsbänden: Mondini and Ivanovici 2014, Schneider and Wulf-Rheidt 2010; weitere Beispiele: Mehlika Inanici, *Lighting Analysis of Hagia Sophia*, in: *Direktorium des Hagia Sophia Museums* (Hg.), *Annual of Ayasofya Museum, Istanbul 2014*, S. 166–202; Eva Zányi et al., *Lighting and byzantine glass tesserae*, in: *Proceedings of the 2007 EVA London conference, 2007*; Kate Devlin et al. *Predictive lighting and perception in archaeological representations*, in: *UNESCO World Heritage in the Digital Age, 30th Anniversary Digital Congress, 2002*; Jassim Happa et al., *Illuminating the past: state of the art*, in: *Virtual reality 14* (3) 2010, S. 155–182.

■ 08  
Allein Disney unterhält weltweit fünf große Forschungsinstitute und arbeitet beispielsweise mit der Carnegie Mellon University oder der ETH Zürich zusammen.

■ 09  
Jassim Happa et al., *Cultural heritage predictive rendering*, in: *Computer Graphics Forum*, 31, 2012, S. 1823–1836.

Arbeitsschritt Untersuchungsgegenstand	Ergebnis	Validierungsmethode	Fehlermetrik
1. Reflexionsverhalten der Oberflächen und Lichtquellen	Emmissionsgeometrie Materialmodelle	Goniometrischer Vergleich Oberflächeneigenschaften	Goniometrischer Fehler
2. Simulation des Lichttransports	Radiometrische Werte	Radiometrischer Vergleich	Radiometrischer Fehler
3. Visualisierung der Berechnungsergebnisse	Wahrgenommenes Bild	Vergleich der Wahrnehmung	Wahrnehmungsfehler
4. Historische Eigenschaften	Plausibles Bild	Historischer Vergleich	Abschätzung historischer Fehler

- Dabei erweitern sie das in der Computergrafik etablierte **Predictive Rendering**, das auf perzeptuell und physikalisch korrekte Bilder abzielt, um eine historische Komponente: Durch Vergleich mit historischen Quellen und etablierten Annahmen soll die Plausibilität der Bilder ermittelt bzw. verbessert werden. Diese Aufgabe kommt einem historischen Experten zu. Der historische Vergleich lässt sich als dreistufiges Verfahren darstellen:
- Am Anfang steht die vergleichende Untersuchung historischer Aufzeichnungen und bekannter Annahmen. Dabei wird eine **Timeline** der Veränderungen an **historischen Ankerpunkten**, beginnend mit dem derzeitigen Zustand, aufgestellt und dabei ein Graph von Hypothesen (Varianten) entwickelt. Die Veränderungen werden als Filter, verstellende Elemente und Beleuchtungsattribute kategorisiert.
- In der Implementierungsphase werden notwendige Daten gewonnen und berechnet. Dabei werden die im ersten Schritt gewonnenen Erkenntnisse in Form von Beleuchtungs- und Materialeinstellungen und geometrischen Szenen integriert.

Die gewonnenen Resultate (wahrnehmungsoptimierte Bilder) werden mit den historischen Erkenntnissen verglichen. Dabei werden die Hypothesen als wahr, falsch oder unsicher bewertet. Je nach Ergebnis werden die Hypothesen überarbeitet und es wird wieder beim ersten Schritt der Untersuchung begonnen. Schließlich liegen Bilder vor, die als plausibel bezeichnet werden können.

Die Computergrafik bietet sich mit diesem Framework als Hilfswissenschaft an, verlangt aber nach einem historischen Experten, der ihre Arbeit bewertet. Aus dem Blickwinkel der historischen Bauforschung steht eine theoretische Auseinandersetzung mit den methodischen Voraussetzungen der Lichtsimulation in ihrem Feld noch aus und soll im Folgenden versucht werden.

## G.4 Verankerung der Lichtsimulation in der historischen Bauforschung

Die Frage nach dem Nutzen fotorealistischer Computervisualisierungen historischer Architektur für die Bauforschung und damit ihrer **Kritikfähigkeit** kann nur im **Kontext der Untersuchung von Beleuchtung** als Teildisziplin der historischen Bauforschung beantwortet werden. Hier können die Verfahren der Visualisierung als **Lichtsimation** begriffen und als experimentelle Methode verankert werden. Das heißt, die historische Bauforschung sollte die Lichtsimulation nicht als Beitrag externer Experten auffassen, z. B. in der Weise, wie sie dendrologische Untersuchungen für ihre Arbeit nutzt, sondern sie muss sich die Methode zu eigen machen. Die Bauforschung muss dazu eine eigne Sicht auf physikalische, physiologische und wahrneh-

mungspsychologische Aspekte der Beleuchtung in ihrem Feld entwickeln. Um Lichtsimulation sinnvoll nutzen zu können, ist zu klären:

- für welche Fragen der historischen Bauforschung die Lichtsimulation Antworten liefern kann,
- wie sie dafür geeignete Hypothesen formulieren muss,
- wie sie die Expertise natur- und ingenieurwissenschaftlicher Akteure für ihre Formen der Wissensgewinnung integrieren kann,
- in welcher Beziehung die Lichtsimulation zur Rekonstruktion historischer Architektur mittels computergestützter Modelle steht,
- wie die computergrafischen Methoden der Lichtsimulation Legitimität gewinnen,
- mit welchen besonderen Unsicherheiten bei der Anwendung der Lichtsimulation im historischen Umfeld zu rechnen ist, wie die Ergebnisse der Lichtsimulation für die Bauforschung interpretiert werden können.

## G.5 Methodik der Lichtsimulation in der historischen Bauforschung

In der London Charter wird der Begriff **computer-visualisation** verwendet. Damit wird die Erzeugung dreidimensionaler Modelle historischer Bauzustände über ihr Produkt definiert. <sup>10</sup> Hier sollen zur Klärung der Methodik drei Begriffe verwendet werden: **Rekonstruktion**, **Visualisierung** und **Simulation**. Die Herstellung eines Gebäudemodells wird hier als Methode aus eigenem Recht verstanden: die computergestützte **Rekonstruktion** ist ein Verfahren, Erkenntnisse empirischer, quellenanalytischer und theoretischer Herkunft in die räumliche Sphäre zu übersetzen und dabei Kohärenz herzustellen. Sie verfolgt also einen **holistischen** Ansatz. Dadurch treten Widersprüche und Lücken im vorhandenen Wissen zutage und idealerweise entstehen durch das Zusammenfügen der Teile neue Vorstellungen vom Gebäude als Ganzem. **Visualisierung** wäre dann eine Methode zur medialen Vermittlung von Ergebnissen, die aus der Rekonstruktion gewonnen wurden. Die **Rekonstruktion** kann aber auch ohne das Ziel, visuelle Ergebnisse herzustellen, betrieben werden, sie kann zum Beispiel dazu dienen, akustische oder statische Fragen zu klären.

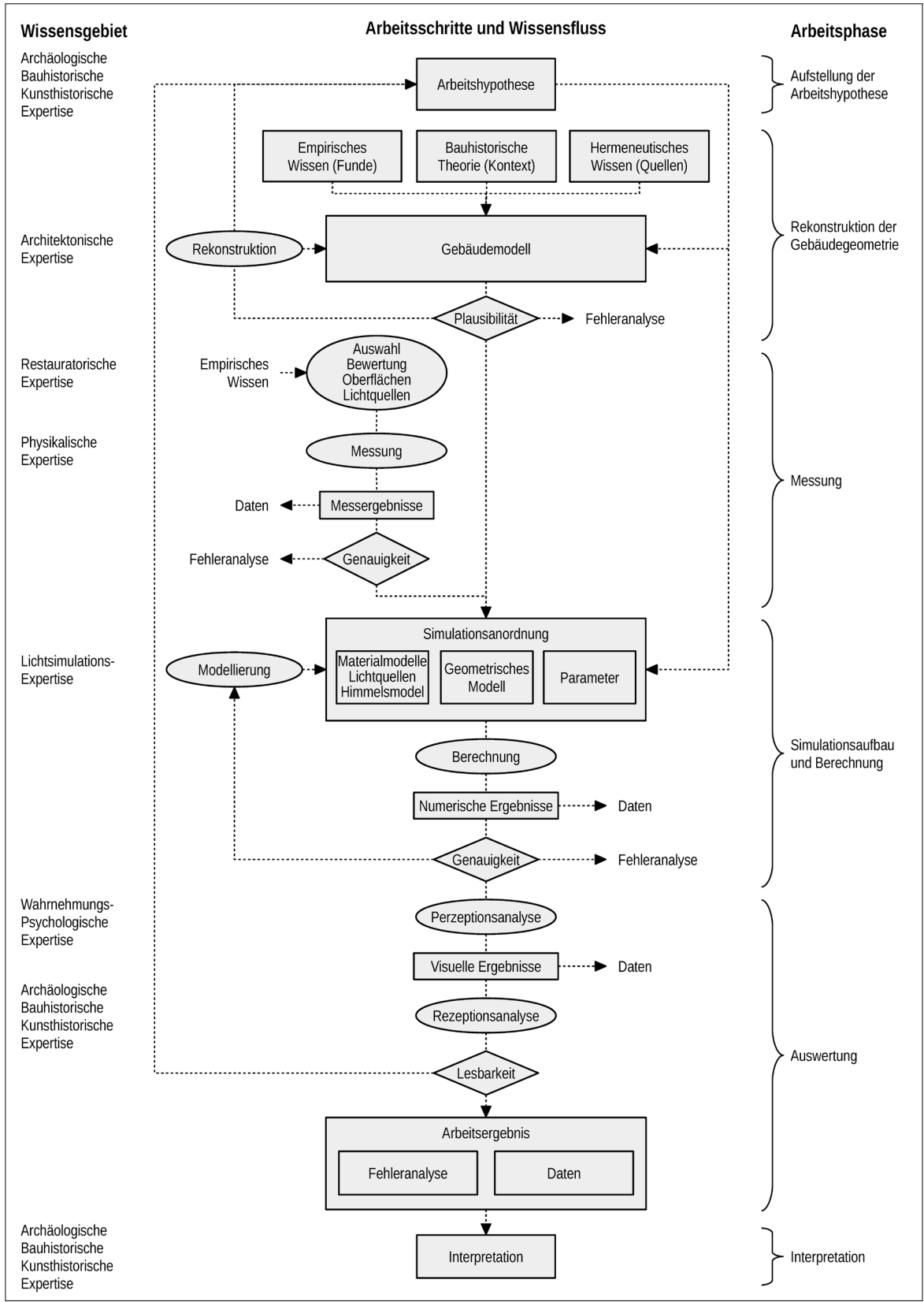
Im Gegensatz zur Visualisierung wird die Lichtsimulation hier als **Experiment** an einem virtuellen Objekt verstanden, mit dem sich **Hypothesen** überprüfen lassen. Im Gegensatz zum holistischen Ansatz der Rekonstruktion untersucht sie möglichst **spezifische** Fragen der Beleuchtung historischer Architektur. Die **Lichtsimation** ist von der Rekonstruktion abhängig, sie kann ohne ein geschlossenes geometrisches Modell nicht durchgeführt werden. Die Auseinandersetzung mit den Resultaten der Rekonstruktion ist daher integraler Bestandteil ihrer Methodik, dem besondere Aufmerksamkeit gebührt, weil in der Rekonstruktion die größten methodischen Unsicherheiten

■ 10  
London Charter 2009.



vermutet werden dürfen. Die Lichtsimulation führt die Rekonstruktion mit dem **Modellieren der Oberflächen und Lichtquellen** fort und integriert dazu die Ergebnisse **physikalischer Messungen** als zusätzliches empirisches Wissen. Die Lichtsimulation liefert zunächst numerische Ergebnisse wie die Verteilung von Beleuchtungsstärken. **Visuelle Ergebnisse** werden als Teil der Auswertung dieser numerischen Resultate auf Basis wahrnehmungspsychologischer Erkenntnisse verstanden. Lichtsimulation stellt ein Bindeglied zwischen der empirischen und der quellenanalytischen Wissensgewinnung dar, indem sie die Wahrnehmung räumlicher Szenen durch den historischen Betrachter rekonstruiert. Die Lichtsimulation lässt sich in folgende Arbeitsphasen unterteilen <sup>[02]</sup>:

1. Die Aufstellung einer Arbeitshypothese
2. Erstellung des Gebäudemodells mittels computergestützter Rekonstruktion der Gebäudegeometrie
3. Die Messung der Oberflächen und Lichtquellen
4. Simulationsaufbau und Berechnung
5. Auswertung der numerischen Ergebnisse
6. Interpretation der visuellen und numerischen Ergebnisse



□ 02  
Ablaufschema Lichtsimulation mit Arbeitsschritten

## G.6 Aufstellung der Arbeitshypothese

Für den wissenschaftlichen Arbeitsprozess ist das Aufstellen einer Hypothese unerlässlich. Die Möglichkeiten für das Zusammenspiel von Licht und Architektur sind mannigfaltig, wenn nicht unendlich. Das Aufstellen einer Arbeitshypothese hilft, die **spezifischen Beleuchtungscharakteristika** eines Bauzustands zu erkennen und genauer zu untersuchen. Darüber hinaus soll sie Annahmen bewusst machen, die zwangsläufig getroffen werden, wenn Perspektiven ausgewählt, Materialien definiert, eine Tageszeit festgelegt oder über geometrische Unsicherheiten entschieden wird.

Auch wenn Hypothesen möglichst spezifisch sein sollen, geschieht ihre Findung im Kontext des Ganzen. Die Hypothese verbindet daher Fragen der Beleuchtung mit jenen der Bautechnik, der Statik, der Kosten, der Nutzung, des Handwerks, der Symbolik, des Narrativs etc. Dazu soll sie Textquellen oder Befunde interpretieren und entwickelte Theorien auf den Bauzustand anwenden, die Wirkung auf den historischen Betrachter antizipieren, die Rolle des Lichts für die Inszenierung und funktionale Nutzung des Gebäudes interpretieren und die dynamisierende Wirkung veränderlicher Beleuchtung für die Architektur erfassen.

Die weiter ausgearbeitete **Arbeitshypothese** sollte in Relation zum Umfang der Kenntnisse über den Bauzustand stehen. Je weniger über den Bauzustand bekannt ist, desto stärker sollte man die Hypothese einschränken, entweder auf allgemeine Aussagen zur Lichtverteilung oder auf Lichteffekte, die sich auch bei großen Unsicherheiten zeigen lassen. Dabei ist es hilfreich zu wissen, dass für die menschliche Wahrnehmung relative Helligkeitsunterschiede entscheidend sind und nicht absolute Werte. Eine weiter ausgearbeitete Arbeitshypothese sollte Ideen formulieren, unter anderem:

- zu Einsatz und Verhältnis von Tageslicht und Kunstlicht,
- zu Lichtrichtungen und herausgehobenen Orten,
- zu Anzahl, Platzierung und Größe von Öffnungen und Lichtquellen,
- zum Zusammenhang zwischen der Veränderung des Sonnen- und Himmelslichts im Tages- und Jahresverlauf und der Ausrichtung und Gestaltung des Gebäudes,
- zum Zusammenhang zwischen Materialwahl und Lichtverteilung,
- zu erwartenden Effekten wie Glanz, Blendung, Dunkelheit,
- zum erwarteten Verhältnis zwischen direkter und indirekter Beleuchtung.

Ein weiterer Schritt bei der Aufstellung der Arbeitshypothese ist, die architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten von Licht, Raum, Material und Form mit den physikalischen Größen der Lichtsimulation in Relation zu setzen, also Metriken zu finden, mit denen sich gestalterische Entscheidungen im Ergebnis zeigen lassen.

## G.7 Rekonstruktion der Gebäudegeometrie

Wie oben formuliert, ist die Lichtsimulation einer historischen Szene nicht ohne eine Rekonstruktion des Bauzustandes denkbar. Zugleich kann die Lichtsimulation in einem iterativen Prozess zur Rekonstruktion eines Bauzustandes beitragen, indem sie ihre Ergebnisse einbringt und mögliche Varianten ausschließt. Die Lichtsimulation stellt sich dabei neben andere Möglichkeiten der Untersuchung mittels eines computergestützten Modells wie die akustische und thermische Simulation, statische Untersuchungen, Massenermittlung für Massenflüsse und wirtschaftliche Untersuchungen etc.

Zunächst muss aber vorhandenes Wissen zusammengeführt werden, um dabei Lücken und Widersprüche durch weitere Nachforschungen zu schließen. Bei einem existierenden Bauwerk kann es sinnvoll sein, sich, wie bei Happa et al. beschrieben, schrittweise vom derzeitigen zu früheren Zuständen vorzuarbeiten. **11** Varianten zu formulieren hilft, Lücken und Widersprüche zu konkretisieren.

■ 11

Happa et al. 2012.

1. Empirisches Wissen ist alles Wissen, das aus der Anschauung materieller Spuren, also Funden und Befunden am Bau, gewonnen werden kann. Dazu gehört auch all das, was durch Messung, Fotografie etc. in das Modell einfließt. Modelle auf Basis empirischer Erkenntnisse lassen sich an der Realität überprüfen; sie zeigen gleichzeitig jedoch auch die Lücken empirischer Erkenntnis und müssen diese schließen. Es ist nicht immer wünschenswert, dass empirische Erkenntnisse ungefiltert in ein Modell einfließen. Beispielsweise kann ein Laserscan Verformungen einbeziehen, die in einem früheren Bauzustand nicht belegt sind, ein Foto zeigt Altersschäden und Schmutz oder eine Oberfläche unter einer untypischen Beleuchtung. Ein Modell sollte das **Wissen** über einen Bauzustand darstellen und möglichst wenig Zufälliges und Unreflektiertes mitschleppen.

2. Die Quellenanalyse von Texten, Bildern etc. liefert weitere Erkenntnisse über einen Bau. Aussagen über Architektur sind nicht selten unpräzise oder in metaphorischem Stil verfasst und daher interpretationsbedürftig. Quellen können generell ideologisch gefärbt sein und eigenständige Interpretationen der Architektur darstellen, sie verraten dadurch Zusammenhänge zwischen der Wahrnehmung der zeitgenössischen Betrachter und den mit der Architektur verknüpften Narrativen. In jedem Fall muss das Ergebnis einer ausreichenden Quellenkritik in die Rekonstruktion einfließen.

3. Der Stand der bauhistorischen Forschung zum räumlichen und zeitlichen Kontext des Gebäudes ist bei der Rekonstruktion einzubeziehen. Theorien zu Bautraditionen und Bautypentwicklung, von den Fähigkeiten und Methoden der Bauleute, zu regionalen Besonderheiten und den Rollen der Beteiligten zur Entstehungszeit helfen die empirischen und quellenanalytischen Erkenntnisse zu verstehen und Lücken im Modell deduktiv zu schließen.

4. Wesentlich für eine computergestützte Rekonstruktion ist, dass sie Wissen aus verschiedenen Wissensgebieten miteinander verbindet, die jeweils andere Erkenntnismethoden anwenden. Dabei überprüft sie gegenseitig empirisch, quellenanalytisch und theoretisch gewonnene Erkenntnisse. Sie unternimmt den Versuch, diese Erkenntnisse mithilfe eines virtuellen dreidimensionalen Modells ineinander zu integrieren, d. h. das akkumulierte Wissen erhält räumliche Form und Ausdehnung. In einem solchen Modell ist ein Weg von A nach B nicht nur eine gedachte Verbindung, sondern muss von einem Menschen geometrisch beschritten werden können. Dadurch erhalten Bauteile Dimensionen und damit ein Volumen, das Gewicht, Statik, Kosten etc. impliziert.

Rekonstruktionsmodelle müssen wie die architektonischen Modelle kohärent sein. Die Erstellung eines Rekonstruktionsmodells gleicht insofern der Herstellung eines Modells im architektonischen Entwurf. Um eine architektonische Idee baubar zu machen, müssen Widersprüche funktionaler, technischer und geometrischer Natur aufgelöst werden, Kosten, Materialflüsse und Ansprüche der verschiedenen Gewerke antizipiert und der Bauherr überzeugt werden. Architekten suchen in diesem Prozess nach Synergien und Optimierungen. Der Architekt lernt, Entscheidungen nicht monokausal zu begründen und an Narrative anzuknüpfen. Seine Herangehensweise ist davon geprägt, Komplexität zu reduzieren und Kohärenz herzustellen. <sup>12</sup>

Bei der Rekonstruktion der Gebäudegeometrie und der Modellierung für die Simulation selbst werden Arbeitsmittel und Methoden angewandt, auf die Architekten im Entwurfsprozess und der Entwurfspräsentation zurückgreifen. <sup>13</sup> Tatsächlich sind es häufig ausgebildete Architekten, die Computervisualisierungen historischer Bauten herstellen. Sie dürfen diese Methoden daher durchaus als Teil ihrer Disziplin beanspruchen, müssen dazu aber ihre Rolle im interdisziplinären Kontext verstehen, die Unterschiede zwischen historischen und heutigen Bauprozessen und Denkweisen reflektieren und ein Gleichgewicht zwischen dem Einbringen eigener Entwurfserfahrung und dem wissenschaftlichen Zweifel an den Ergebnissen finden.

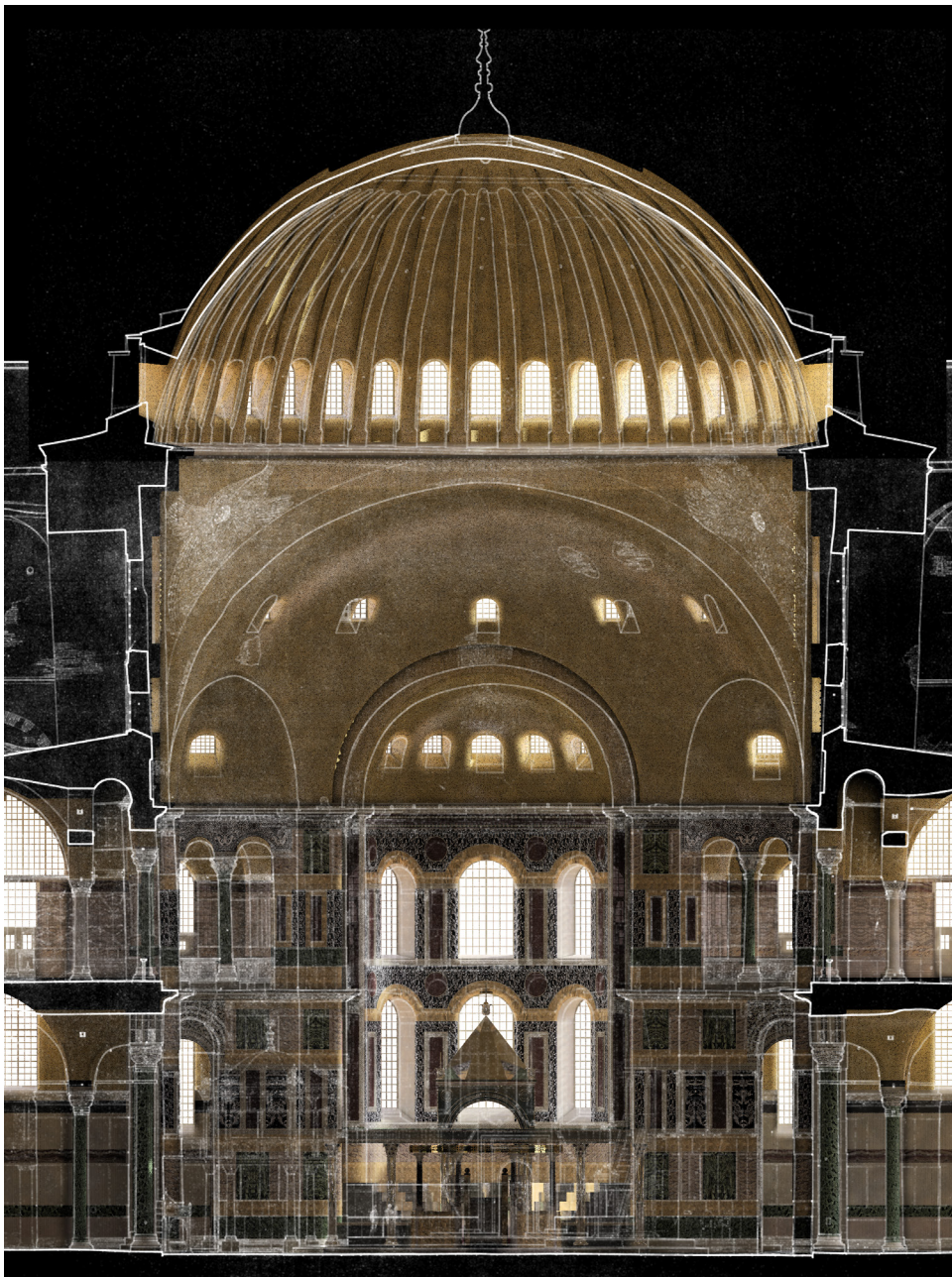
■ 12

Eine Analyse des architektonischen Entwurfs: Jörg Potthast, »Sollen wir mal ein Hochhaus bauen?«: das Architekturbüro als Labor der Stadt, Schriftenreihe der Forschungsgruppe »Metropolenforschung« des Forschungsschwerpunkts Technik-Arbeit-Umwelt am Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin 1998, Nr. FS II 98–502.

■ 13

Eine Beschreibung dieser Arbeitsweise findet sich in: Jörg Potthast, »Sollen wir mal ein Hochhaus bauen?«: das Architekturbüro als Labor der Stadt, Schriftenreihe der Forschungsgruppe »Metropolenforschung« des Forschungsschwerpunkts Technik-Arbeit-Umwelt am Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin 1998, Nr. FS II 98–502, S.63–65.

Die computergestützte Rekonstruktion bedient sich der architektonischen Expertise also gleich doppelt: Erstens, indem sie Methodenwissen der Architektur adaptiert, um komplexe bauhistorische Wissenszusammenhänge zu organisieren und im dreidimensionalen Raum auf Kohärenz, Vollständigkeit und Realisierbarkeit zu überprüfen. Zweitens bedient sie sich der Erfahrung des Architekten, um Baumentscheidungen ihrer historischen Vorgänger nachzuvollziehen und Entscheidungen zu treffen, wo historisches Wissen nur lückenhaft vorhanden ist. <sup>[03]</sup>



□ 03

Rekonstruktion des Entwurfs der Hagia Sophia: Schnitt durch das Modell überlagert mit einer Schnitzzeichnung der Bauaufnahme von Robert van Nice. Die idealisierte Geometrie der Rekonstruktion weicht insbesondere in den höher liegenden Teilen des Gebäudes deutlich von der tatsächlichen Geometrie des Gebäudes ab. Das Gebäude hatte sich schon während der Bauzeit verformt und die Geometrie der höher liegenden Bauteile wurde angepaßt (unter Verwendung von: Robert L. van Nice: Saint Sophia in Istanbul. An architectural survey. I. II. Washington DC, 1965 / 1986.

5. Ergebnis der Erstellung des Gebäudemodells und Iteration des Rekonstruktionsprozesses: Die Erstellung des Gebäudemodells liefert die Basis für das geometrische Modell in der Simulationsanordnung. Es beinhaltet die Verteilung von Materialien und Lichtquellen, die Umgebung und Ausrichtung des Gebäudes etc. Darüber hinaus lässt sich anhand der dokumentierten Widersprüche und Lücken die **Plausibilität** oder **Wahrscheinlichkeit** des Modells abschätzen. Kriterien dafür sind die Kohärenz und Vollständigkeit des zusammengefassten Wissens sowie die Realisierbarkeit des Gebäudezustandes in technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Hinsicht. Ist das Resultat nicht ausreichend plausibel, ist die Arbeitshypothese anzupassen, nach weiteren Erkenntnissen zu suchen, womit die Iteration des Rekonstruktionsprozesses beginnt. <sup>14</sup>

#### ■ 14

Genauer untersuchen sollte man die Frage, wie zu verfahren ist, wenn sich das Ergebnis quellenanalytischer und empirischer Wissensgewinnung widersprechen. Generell wird der Wahrheitsgehalt von Aussagen in unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen nach jeweils anderen Kriterien bestimmt, die nicht immer miteinander kompatibel sind. Daher ist nicht im Vorhinein klar, welche Rolle die gemeinsam gewonnenen Erkenntnisse in der Wissensgewinnung der Einzeldisziplinen spielen können.

## G.8 Messung der Oberflächen und Lichtquellen

Zu den Voraussetzungen einer Lichtsimulation gehören **Materialmodelle**, die die optischen Eigenschaften der Oberflächen und Lichtquellen beschreiben:

- Farbe bzw. Absorptionsgrad, Muster (albedo map)
- Winkelabhängiges Reflexions- und Transmissionsverhalten (Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF) <sup>15</sup>) als Maß für Glanz und Streuung. <sup>04</sup>
- Oberflächenrelief bzw. Selbstverschattung (height map) für Lichtquellen räumliche Abstrahlcharakteristik (Lichtstärke-Verteilungskurve (LVK))

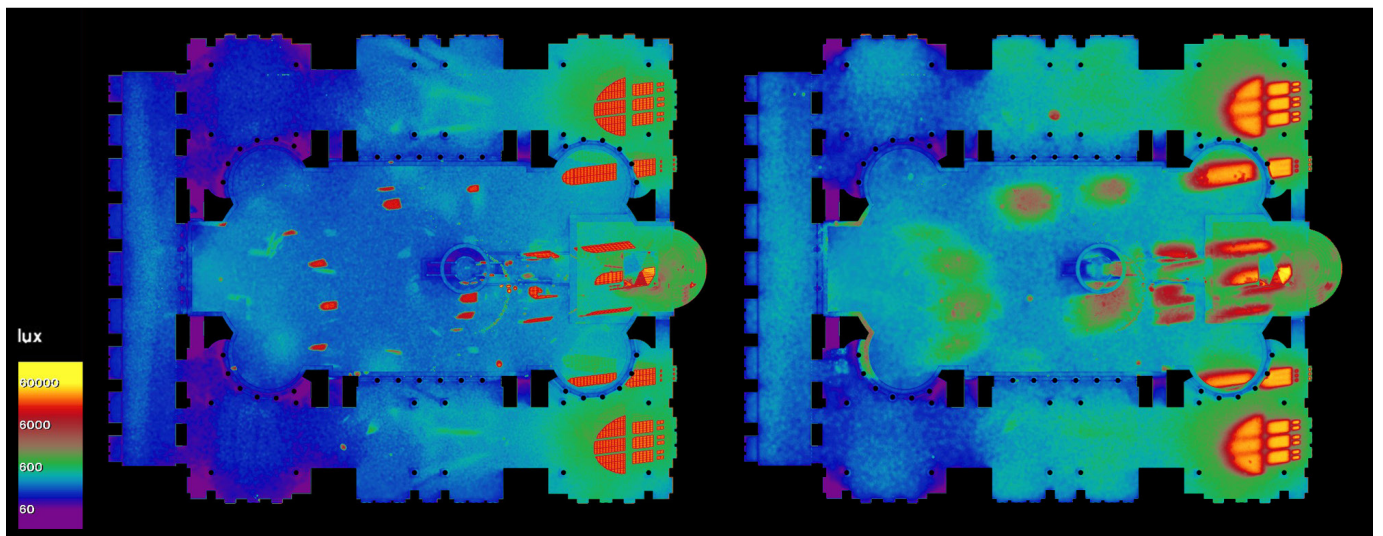
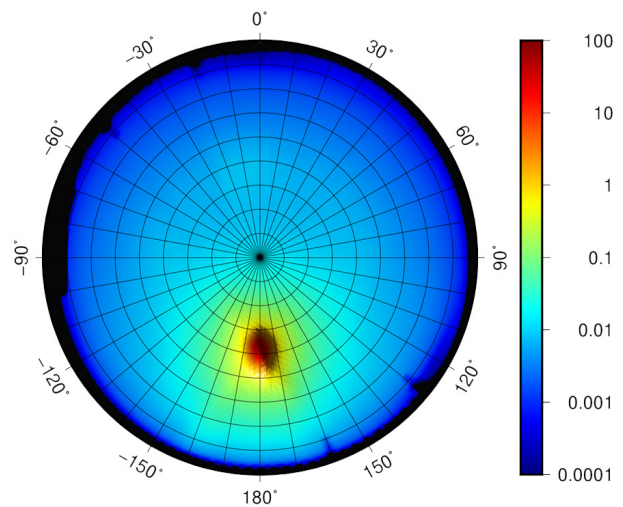
#### ■ 15

Fred E. Nicodemus, Joseph C Richmond, Jack J Hsia, Irving W Ginsberg, Thomas Limperis, Geometrical considerations and nomenclature for reflectance, Washington 1977.

Diese Daten müssen an geeigneten Proben gemessen werden. Auf Basis dieser Messung werden die Materialmodelle gewählt und parametrisiert. Um die Genauigkeit der Modellierung zu ermitteln, muss das Resultat mit den Messungen verglichen werden.

□ 04

Typische Probe von zylindergeblasenem römischem Fensterglas und Messungen ihres Streuverhaltens bei 40 Grad Einfallswinkel. Darunter die Auswirkung des Streuverhaltens auf die Lichtverteilung im Inneren der Hagia Sophia. Die optischen Eigenschaften historischer Materialien sind zumeist unbekannt. Alterungserscheinungen erschweren zusätzlich ihre Messung. Für die Lichtverteilung in Innenräumen sind die Eigenschaften der Verglasung und der Oberflächen aber von entscheidender Bedeutung. (TU Darmstadt / Hochschule Luzern)





## ■ 16

Zu spektralen Eigenschaften historischer Lichtquellen: Kate Devlin, Alan Chalmers, Duncan Brown, Predictive lighting and perception in archaeological representations, in: UNESCO World Heritage in the Digital Age, 30th Anniversary Digital Congress, 2002.

## ■ 17

Christopher Schwartz, Michael Weinmann, Roland Ruiters, Reinhard Klein, Integrated High-Quality Acquisition of Geometry and Appearance for Cultural Heritage, in: VAST: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Eurographics Association, Goslar 2011, S. 25–32; Christopher Schwartz, Ralf Sarlette, Michael Weinmann, Reinhard Klein, DOME II: A Parallelized BTF Acquisition System, in: Proceedings of Eurographics Workshop on Material Appearance Modeling: Issues and Acquisition, Zaragoza 2013, S. 25–31.

## ■ 18

Wil Hershberger, Taming those Annoying Highlights: Cross-Polarization Flash Macro Photography, [https://web.archive.org/web/20061104203652/](https://web.archive.org/web/20061104203652/web/20061104203652/) und vgl. <http://www.naturescapes.net/042004/wh0404.htm>.

## ■ 19

Lindsay W. MacDonald, Visualising an Egyptian Artefact in 3D: Comparing RTI with laser scanning, in: Proceedings of the 2011 international conference on Electronic Visualisation and the Arts, S. 155–162.

## ■ 20

Peter Apian-Bennowitz, New scanning goniophotometer for extended BRTF measurements, in: SPIE Optical Engineering + Applications, 779200–779200. International Society for Optics and Photonics, 2010; J. Kohler, T. Noll, G. Reis, D. Stricker, A full-spherical device for simultaneous geometry and reflectance acquisition, in: 2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 2013, S. 355–362; und D. Hünerhoff, U. Grusemann, A. Höpe, New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection, in: Metrologia 43 (2) 2006, S. 11.

Bei historischen Gebäuden ist mit komplexen Oberflächeneigenschaften zu rechnen, die sich aus der handwerklichen Fertigung, der Verwendung natürlicher Materialien und dem Qualitätsanspruch der Bauten ergeben. Moderne Bürourgebungen hingegen, die das Hauptanwendungsgebiet technischer Lichtsimulationen darstellen, werden zumeist mit einfachen matten Oberflächen gestaltet. Für historische Gebäude kann daher nicht auf gut überprüfte Materialmodelle zurückgegriffen werden. Das stellt eine besondere Anforderung an diesen Arbeitsschritt dar und macht die Lichtsimulation historischer Bauten es zu einem wichtigen Feld der Grundlagenforschung. Gleiches gilt entsprechend auch für historische Lichtquellen. <sup>16</sup>

1. Auswahl geeigneter Oberflächen durch konservatorische Bewertung: Um geeignete Oberflächen für die Vermessung zu finden, sind Funde oder Bauteile einer **konservatorischen Bewertung** zu unterziehen. Dabei ist zu klären, inwieweit sich die Oberflächeneigenschaften einer Probe durch Alterung oder Verschmutzung verändert haben. Zum Vergleich kann es sinnvoll sein, historische Herstellungsverfahren und Oberflächenbearbeitung nachzuvollziehen und Proben nachzufertigen. Auch in diesem Bereich ist Grundlagenforschung nötig.

2. Messung: Die in der Visualisierung häufig angewandte Praktik, Oberflächen mit fotografischen Aufnahmen zu füllen, ist für eine Simulation der Lichtwirkung unter wechselnder Beleuchtung unzureichend. Fotos enthalten neben Farben und Mustern auch die Selbstverschattung strukturierter Oberflächen und Glanzeffekte einer bestimmten Beleuchtung. Um die oben aufgeführten optischen Eigenschaften von der Beleuchtung unabhängig zu messen, gibt es zwei grundsätzliche Verfahren: die gemeinsame Erfassung der Eigenschaften als Bidirectional Texture Function (BTF) <sup>17</sup> oder deren separate Erfassung. Erstere bedient sich eines Arrays von Kameras und Leuchten und rechnet die gewonnenen Daten um. Dieses Verfahren ist an ein Labor gebunden und eignet sich vor allem für dreidimensionale Bauteile bis zu ca. 1 m Kantenlänge.

Bei der separaten Erfassung werden Farben und Reflexionsgrade mit einem (mobilen) Spektrometer gemessen. Muster können mit polarisiertem Licht erfasst werden <sup>18</sup>, Oberflächenreliefs mit Laserscans, Nahfeldphotogrammetrie oder Reflectance Transformation Imaging (RTI). <sup>19</sup> Für eine exakte Erfassung der winkelabhängigen Reflexion bzw. Streuung ist mit der **Goniophotometrie** <sup>20</sup> allerdings auch hier eine laborgebundene Messung nötig. <sup>21</sup> Proben müssen folglich transportiert werden.

3. Genauigkeit der Messungen: Messgeräte und ihre Anordnung beeinflussen die Genauigkeit der Messung. Besonders hervorzuheben sind jedoch Unsicherheiten, die durch die Alterung und Verschmutzung historischer Oberflächen verursacht werden. Diese zu quantifizieren ist ein wichtiger Teil der Fehleranalyse.

## G.9 Simulationsaufbau und Berechnung

Die Simulationsanordnung ist als Erweiterung und Spezifizierung des Gebäudemodells zu verstehen. Dabei wird aus dem Rekonstruktionsmodell insbesondere die makroskopische Geometrie übernommen und ergänzt <sup>T2</sup>. Insgesamt besteht die Versuchsanordnung aus folgenden Teilen, die entsprechend der Arbeitshypothese zu parametrisieren sind:

### ■ 21

#### Experimentelle portable Ansätze:

Peiran Ren, Jiaping Wang, John Snyder, Xin Tong, Baining Guo, Pocket Reflectometry, in: ACM SIGGRAPH 2011 Papers, 2011, S. 45:1–45:10; Westlund and Meyer 2001.

- Geometrisches Modell auf Grundlage der Rekonstruktion (inkl. Ort, Ausrichtung, verschattende Umgebung),
- Himmelsmodell,
- künstliche Lichtquellen,
- Materialmodelle auf Grundlage der Messungen, Einstellungen für die Berechnung, wie die Wahl von Perspektiven und Messpunkten.

### ■ 22

Richard Perez, Robert Seals, Joseph Michalsky, All-weather model for sky luminance distribution – preliminary configuration and validation, in: Solar energy 50 (3) 1993, S. 235–245.

Als Himmelsmodelle können standardisierte synthetische Modelle zum Einsatz kommen, die mit Ortsangaben und Tageszeiten eingestellt werden. <sup>22</sup> Interessant können aber auch individuelle, mit speziellen fotografischen Verfahren erfasste Himmelslicht-Situationen sein, mit denen sich zeigen lässt, wie Architektur durch Licht dynamisiert wird. <sup>23</sup>

### ■ 23

Paul Debevec, Making »The Parthenon«, in: VAST05. The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Eurographics Association, 2005; Jessi Stumpf, Chris Tchou, Andrew Jones, Tim Hawkins, Andreas Wenger, Paul Debevec, Direct HDR Capture of the Sun and Sky, in: AFRIGRAPH '04 Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa, New York 2004, S. 145–149.

□ T2

Maßstäbe und Rekonstruktionsverfahren

Maßstab	Ungefähre Größe	Rekonstruktion	Eigenschaft	Datenerhebung Messung
Makro	größer als 10mm	Architektur Umgebung	Geometrie Lichtquellen Himmel	Baufaufnahme Quellenauswertung Befundanalyse Laserscans Photogrammetrie Wetterbestimmung
Meso	10mm bis 0.1mm	Oberflächengestaltung	Material- und Farbverteilung  Oberflächenprofil	Restauratorische Befundanalyse Nahfeldphotogrammetrie Fotografie Laserscan
Mikro	kleiner als 0,1mm	Materialauswahl Finish	Reflexionseigenschaften	Restauratorische Befundanalyse Goniophotometrie Spektroskopie

1. Modellierung: Für die Versuchsanordnung muss das Rekonstruktionsmodell angepasst und mit Materialmodellen versehen werden. Die meisten Berechnungsverfahren verstehen Geometrie nur als einfache ebene Flächen. Die Geometrie muss zudem vollkommen geschlossen sein und sie muss an die Aufteilung von Oberflächenmaterialien angepasst und mit Materialmodellen verbunden werden. Letztere beschreiben die Oberflächen auf dem meso- und mikroskopischen Maßstab [T2].

Diese Eigenschaften der Oberflächen können mit Parametern und mathematischen Formeln gefasst werden (parametrische bzw. analytische Modelle) [24] oder direkt aus gemessenen Daten interpoliert werden (datenbasierte Modelle). [25] Datenbasierte Modelle sind dabei universeller und häufig genauer, analytische Modelle sind dafür einfacher zu handhaben und können auch für Oberflächen verwendet werden, für die nur gealterte Proben verfügbar sind, also wenn keine guten Messergebnisse vorliegen. Zudem liegt in der Übersetzungsleistung der Parametrisierung auch ein wissenschaftlicher Gewinn: Man muss die Eigenschaften der Oberflächen verstanden haben. Analog zu dem Gebäudemodell repräsentiert ein parametrisiertes Materialmodell das Wissen über die Oberfläche. Dennoch sollten die parametrisierten Modelle auf Messungen basieren und mit ihnen verglichen werden. [26]

#### ■ 24

Überblick: Julie Dorsey, Holly Rushmeier, François Sillion, Digital Modeling of Material Appearance, San Francisco 2008.

#### ■ 25

Greg Ward, Computing and applying variable-resolution data for bidirectional scattering distribution functions. Technical report, United States Department of Energy 2011.

#### ■ 26

Beispiele: Arne Dür, David Geisler-Moroder, Validation of Radiance against CIE17.1:2006 and Improved Adaptive Subdivision of Circular Light Sources. [http://radiance-online.lbl.gov/community/workshops/2008-fribourg/Content/Geisler-Moroder/RW2008\\_DGM\\_AD.pdf](http://radiance-online.lbl.gov/community/workshops/2008-fribourg/Content/Geisler-Moroder/RW2008_DGM_AD.pdf); Gregory J. Ward, Measuring and modeling anisotropic reflection, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 26 (2) 1992, S. 265–272; Mashhuda Glencross, Gregory J. Ward, Caroline Jay, Jun Liu, Francho Melendez, and Roger Hubbard, A Perceptually Validated Model for Surface Depth Hallucination, in: ACM SIGGRAPH conference proceedings, Los Angeles 2008, S. 27:59:1–59:8 und Greg Ward, Mashhuda Glencross, A case study evaluation: perceptually accurate textured surface models, in: Proceedings of the 6th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, 2009, S. 109–115.

2. Berechnung: Um herauszuarbeiten, welche Fragen die Lichtsimulation beantworten kann und nach welchen Kriterien ein Modell als ausreichend zu betrachten ist, lohnt es sich, die Berechnungsverfahren genauer anzusehen:

**Numerische Simulationen** kommen zum Einsatz, wenn sich Probleme nicht mehr analytisch lösen lassen, d. h. wenn ein Zusammenhang nicht mehr in einer Gleichung mit einer lösbaren Zahl von Unbekannten beschrieben werden kann. Dazu wird das Problem in analytisch fassbare Teile zerlegt (die sich also mit Gleichungen lösen lassen). Bei der Verbindung der Teile werden **stochastische Verfahren** eingesetzt. Untersucht man eine ausreichend große Anzahl von Einzelfällen (Proben), kann man Aussagen über das Gesamtproblem machen. Es stellt sich dabei ein Zusammenhang zwischen der Komplexität des Problems, der erreichten Genauigkeit und der Anzahl der Proben ein. Die mögliche Anzahl von Proben ist dabei häufig der limitierende Faktor, der über die mögliche Komplexität und die erreichbare Genauigkeit entscheidet. Probleme müssen so formuliert werden, dass sie sich in gegebener Zeit berechnen lassen.

Im Fall der Lichtsimulation ist das zu lösende Gesamtproblem zumeist die Frage, wie sich das Licht gegebener Lichtquellen in einer Szene verteilt; das Teilproblem entspricht den einzelnen Reflexions-, Berechnungs- und Absorptionsprozessen an den einzelnen Oberflächen. Die Probe ist ein einzelner Lichtstrahl, der Quelle und Ziel verbindet und dabei abgelenkt und abgeschwächt wird. Durch Aufsummieren der Strahlen, die unterschiedliche Wege im Raum genommen haben, ergeben sich Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken.

## ■ 27

Dabei werden eine Reihe von Erscheinungen wie Polarisierung, Lumineszenz, Beugung etc. vernachlässigt, die für manche historische Materialien relevant sein können. Ein Beispiel wäre der Glanz von Perlmutter-Oberflächen, der durch Interferenz zustande kommt.

## ■ 28

Andere Verfahren gehen von der Lichtquelle aus oder kombinieren beide Richtungen (Bidirectional Raytracing, Photon Mapping), weiterentwickelte Verfahren speichern Pfade zwischen Lichtquelle und Messpunkt und versuchen auf dieser Basis weitere zu finden (z. B. Metropolis Light Transport). Siehe: Toshiya Hachisuka, Shinji Ogaki, Henrik Wann Jensen, Progressive Photon Mapping, in: ACM SIGGRAPH Asia 2008 Papers, ACM 2008, S. 130:1-130:8; Henrik Wann Jensen, Niels Jørgen Christensen, Photon maps in bidirectional Monte Carlo ray tracing of complex objects, in: Computers & Graphics 19 (2) 1995, S. 215-224; Eric Veach, Leonidas J. Guibas, Metropolis Light Transport, in: Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1997, S. 65-76.

## ■ 29

Christoph F. Reinhart, Marilyne Andersen, Development and validation of a Radiance model for a translucent panel, in: Energy and Buildings 38 (7) 2006, S. 890-904; Andreas Noback, Lars O. Grobe, Stephen Wittkopf, Accordance of Light Scattering from Design and De-Facto Variants of a Daylight Redirecting Component, in: Buildings 3 (30) 2016.

## ■ 30

Ausführlicher dargelegt in: Andreas Noback, Mosaics - Dealing with precious material, 11th International Radiance Workshop, Copenhagen 2012, <https://www.radiance-online.org/community/workshops/2012-copenhagen> und Andreas Noback und Stephen Wittkopf, Complex Material Models in Radiance, 13th Radiance Workshop, London 2014, <https://www.radiance-online.org/community/workshops/2014-london>.

Die Schwierigkeit liegt dabei darin, den Zusammenhang von Lichtquelle und einem Messpunkt herzustellen. Den Lichttransport im Modell ermittelt man nach den physikalischen Gesetzen der **geometrischen Optik**.<sup>27</sup> Im für die technische Lichtsimulation gängigsten Verfahren, dem **Backward Raytracing**, geht man bei der Strahlverfolgung vom Messpunkt aus.<sup>28</sup> Über das Schicksal eines Lichtstrahls an den Orten von Reflexion oder Brechung entscheidet hierbei eine Mannigfaltigkeit von Materialmodellen. Diese verbinden Materialeigenschaften zu einer Wahrscheinlichkeitsfunktion, welche die Ablenkung oder Absorption eines Lichtstrahls bestimmt. Wenn sich im Strahlengang diffus reflektierende Oberflächen befinden, die Licht aus vielen Richtungen reflektieren, müssen ausreichend viele Strahlen in diese Richtungen geschickt werden, um Lichtquellen oder weitere (helle) Flächen zu finden. Mit der Anzahl der Reflexionsvorgänge steigt dabei die Zahl der zu untersuchenden Strahlen exponentiell an. Je kleiner dabei Lichtquellen oder wichtige helle Flächen sind, desto zeitaufwendiger muss die Berechnung gewählt werden, sonst vergrößert sich die Gefahr, dass Lichtquellen übersehen werden und damit das Ergebnis verfälscht wird. Es muss also genau geprüft werden, ob die mögliche Anzahl von Proben ausreicht, um ein Problem adäquat zu lösen.

3. Numerische Ergebnisse: Die Simulation liefert numerische Resultate in folgender Form:

- Lichtverteilung auf den Oberflächen (Beleuchtungsstärken) oder an spezifischen Messpunkten,
- Helligkeitsverteilung in einem Blickfeld (Leuchtdichten),
- Alternative Metriken wie Lichtfelder.

Technische Lichtsimulationen liefern diese Werte in absoluten photometrischen Einheiten mit einem großen Kontrastumfang (HDR) und zumeist für drei Farbkanäle (oft RGB). Diese können im Fall der Leuchtdichten zu Bildern weiterverarbeitet werden. Insbesondere mit Beleuchtungsstärken lassen sich aber auch **nicht bildbasierte Analysen** erstellen, wie zum Beispiel Untersuchungen, wie eine bestimmte Materialwahl die Lichtverteilung beeinflusst oder ob mit der Helligkeitsverteilung Räume hierarchisiert werden.

4. Genauigkeit der Berechnung: Die erreichte Genauigkeit der Berechnung ist von der Anzahl der Strahlen und der Eignung der Materialmodelle für die zu erwartenden Lichteffekte an den Oberflächen bestimmt. Die technische Lichtsimulation weist die Eignung ihrer computergrafischen Methoden für einen Anwendungsfall durch den Vergleich zu Messungen nach.<sup>29</sup> Solche Nachweise finden sich ausschließlich für zeitgenössische Wohn- und Bürogebäude und moderne Baumaterialien. Historische Gebäude weisen aber häufig eine komplexere Geometrie und komplexere Materialien als die heutige Architektur auf. Dies ist ein weiteres Feld für die Grundlagenforschung.<sup>30</sup>

Liegen nach der Simulation numerische Ergebnisse vor, ist zu prüfen, ob diese eine Überprüfung der Hypothese erlauben. Ist das nicht oder nur unzureichend der Fall, sind in der nächsten Iteration drei Verbesserungen denkbar:

- Verbesserung der Simulationsmethode durch höhere Genauigkeit, Einsatz geeigneterer Verfahren oder Verbesserung der Materialmodelle,
- Erweiterung des empirischen Wissens, insbesondere durch die verbesserte Messung von Materialeigenschaften,
- Verbesserung der Interpretation der Quellen und Schärfung der Hypothese.

## G.10 Auswertung der numerischen Ergebnisse

### ■ 31

Gregory Ward Larson, Holly Rushmeier, Christine Piatko, A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes, in: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 3 (4) 1997, S. 291–306; Überblick: Erik Reinhard, Wolfgang Heidrich, Paul Debevec, Sumanta Pattanaik, Greg Ward, Karol Myszkowski, High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting, Burlington 2010.

1. Die Perzeptionsanalyse ist der erste Teil der Interpretation. Sie verarbeitet die numerischen Ergebnisse und erzeugt mittels High Dynamic Range (HDR) visuelle Ergebnisse. 31 05

### □ 05

Perzeptionsanalyse: Visualisierung der menschlicher Wahrnehmung nach dem Verfahren von Larson et al.: Das Gegenlicht der Fenster in der Apsis führt zur Blendung und damit zu einem Verlust der Sehschärfe.



## ■ 32

Christian Bartenbach, Walter Witting, **Handbuch der Lichtgestaltung: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen**, Wien 2009; Lam and Ripman 1992; Gibson 1950.

## ■ 33

siehe: Jan Wienold, Jens Christoffersen, **Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras**, in: *Energy and Buildings* 38 (7) 2006, S. 743-757.

2. Dazu bedient sie sich physiologischer und psychologischer Erkenntnisse zur menschlichen Wahrnehmung. <sup>32</sup> Charakteristisch für sie ist, dass sie als kulturell universell aufgefasst werden können und sich zum Teil mathematisch bzw. statistisch formulieren lassen. Die Perzeptionsanalyse umfasst die Untersuchung:

- der relativen Helligkeitswahrnehmung,
- der relativen Farbanpassung,
- der Anpassung des Auges an die Lichtverhältnisse (das impliziert eine Zeitkomponente),
- der Blendung <sup>33</sup>,
- der Veränderung der Wahrnehmung von Farben und Kontrasten im Dunkelsehen,
- die Lenkung der Aufmerksamkeit,
- der Formerkennung und Sehschärfe im Zusammenhang mit vorhandener Helligkeit und Kontrast.

3. Die Perzeptionsanalyse geht in die **Rezeptionsanalyse** über. Sehen ist ein erlernter und kulturell geprägter Prozess. In der Rezeptionsanalyse werden die Ergebnisse der Perzeptionsanalyse im Kontext historischer Sehgewohnheiten und künstlerischer Vorstellungen befragt. Dazu sind sie mit den Textquellen in Beziehung zu setzen. Durch diesen Vergleich lassen sich Erkenntnisse zu künstlerischen Mitteln und deren Tradition gewinnen. Die Rezeptionsanalyse betrachtet:

- die Aufmerksamkeitslenkung,
- aus dem jeweiligen Alltag besonders herausstechende Effekte,
- Identifikation von sichtbaren Effekten in den Quellen.

4. Bewertung der Lesbarkeit von Lichteffekten: Perzeptions- und Rezeptionsanalyse liefern Aussagen zur **Lesbarkeit** der Lichteffekte. Auf dieser Grundlage kann die Arbeitshypothese angepasst werden.

5. Die Ergebnisse lassen sich in einen Datenteil und eine Fehleranalyse zusammenfassen:

- Daten,
- Messergebnisse,
- numerische Ergebnisse der Berechnung
- Visuelle Ergebnisse, abgeleitete Daten zu Blendung etc.,
- bei der Herstellung des Modells und der Materialmodelle gewonnenes Wissen,
- Fehleranalyse,
- Abschätzung der Plausibilität des Modells oder einzelner Varianten,
- Genauigkeit der Messungen,
- Genauigkeit der Berechnung und der Materialmodelle,
- Abschätzung der Lesbarkeit der Lichteffekte.

## G.11 Die Beurteilung der Arbeitshypothese und Interpretation der Ergebnisse

Im letzten Schritt wird die Arbeitshypothese aufgrund der zusammengefassten Ergebnisse bewertet und die Bedeutung von Architektur und Beleuchtung im historischen Kontext interpretiert. Hier werden Bezüge zur (kunst-)historischen Forschung, Baugeschichte und Archäologie hergestellt, und es wird die entsprechende Expertise eingebunden. Zur Interpretation gehören unter anderem:

1. die Untersuchung der **gestalterischen Mittel**, d. h.
  - des Einflusses der einzelnen Oberflächen und Lichtquellen auf die Lichtverteilung,
  - der Direktionalität der Beleuchtung und der daraus resultierenden Schattenbildung,
2. die Identifikation **künstlerischer Strategien**,
  - der Hierarchie der Orte entsprechend der Helligkeitsverteilung,
  - der Manipulation der Formwahrnehmung durch Herausbildung von Helligkeitsverläufen,
  - der Manipulation der Fokusfindung,
  - der Manipulation von Adaptionsverhalten und Helligkeitswahrnehmung, um eine spezifische Lichtstimmung herzustellen.
3. die **Berücksichtigung des Überbaus**, d. h. der architektonischen und künstlerischen Ziele im Kontext
  - religiöser Vorstellungen,
  - politischer und gesellschaftlicher Ziele,
  - zeitgenössischer Wissenschaft und Philosophie,
  - kunstgeschichtlicher Entwicklungen.

## G.12 Fazit und Ausblick

Die Abhängigkeit von der Rekonstruktion impliziert die Integration der Lichtsimulation in breiter angelegte Studien. Ein Rekonstruktionsversuch wird das Wissen aus möglichst vielen Gebieten des Bauens einsammeln, um einen hohen Grad an Vollständigkeit und Kohärenz zu erreichen.

Gegenüber der in der Einleitung dargestellten Methode des CHPR setzt der hier vorgeschlagene Ansatz auf eine Trennung von Rekonstruktions- und Simulationsmodell. Das geschieht im Sinne wissenschaftlicher Arbeitsteilung, aber auch mit Hinblick auf die Erschließung von Wissensquellen jenseits der Untersuchung der Beleuchtung, insbesondere bei der Einbettung in größer angelegte Studien und als Vorarbeit für die Weiterverwendung des Modells. Ein wichtiger Unterschied ist die Betonung der Messung historischer Proben mit ihren Schwierigkeiten. Insgesamt lässt sich zeigen, dass die Besonderheiten ihrer Anwendung im historischen Kontext alle Aspekte der Lichtsimulation beeinflussen.

Bei allem Aufwand bleibt die Lichtsimulation historischer Bauzustände ein heuristisches Verfahren. Ihre Unsicherheiten sind groß. Wären sie kleiner, müsste sie vermutlich anderen Verfahren weichen, wie Messungen am Gebäude selbst. Sie ist ein Austesten von Möglichkeiten im Rahmen dessen, was durch die schrittweise Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Wissensquellen und Expertisen ausgeschlossen werden kann. Sie sollte daher als offener, variantenreicher und iterativer Prozess betrieben werden. Eine Qualität der Methode ist, dass sie in ihren Ergebnissen mehr Antworten liefert als Fragen gestellt wurden. Sie sollte also ihre Arbeitshypothesen anpassen und erweitern.

## G.13 Epilog: An artist's impression

Nicht nur mit Blick auf die Finanzierung des notwendigen Aufwandes von Rekonstruktion und Lichtsimulation sollten die medialen und musealen Produkte dieser Arbeit und ihre kreativen Aspekte nicht gering geschätzt werden. In der gesellschaftlichen und kreativen Auseinandersetzung mit der historischen Architektur liegt selbst ein Wert. In der Untersuchung historischer Artefakte vertiefen wir uns in die menschliche Vergangenheit mit ihren unauf lösbaren Rätseln. Im Nachempfinden historischer Ideen erweitert sich unsere Vorstellung von uns selbst und unserer heutigen Welt. Die wissenschaftliche Methodik soll Fehler vermeiden, die Auseinandersetzung selbst ist aber ein kreativer Prozess, der sich durchaus in spielerischen Varianten niederschlagen darf. Wir betrachten in der vergangenen Architektur schließlich Resultate künstlerischer Arbeit. Ohne die Entwicklung unserer eigenen apperzeptiven Fähigkeiten werden wir diese kaum verstehen können. In diesem Sinne darf das Ergebnis der skizzierten Methode auch genau das sein: **An artist's impression.**