

Kapitel 2

Grundlagen und theoretische Herleitung der Methode

2.1 Darmstädter Modell der Hagia Sophia

Dieser Arbeit liegt ein geometrisches Modell der Hagia Sophia zu Grunde, das an der Technischen Universität Darmstadt entstanden ist (Abbildung 4.19). Seine Ursprünge reichen bis in die 1990er Jahre zurück. Zu Beginn sollte es als eine Art Kulisse für eine Forschungsarbeit im Rahmen eines Schwerpunktprojektes der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) zur »Theatralität« dienen. Darin sollte »die Hagia Sophia Justinians in Konstantinopel als Schauplatz weltlicher und geistlicher Inszenierung in der Spätantike« untersucht werden.¹ Konkret wurden die liturgischen Abläufe während der Gottesdienste im Kontext rekonstruierter Einbauten untersucht. Bilder des Modells wurden erstmals 2008 im Rahmen der »Ausstellung Einblicke in den virtuellen Himmel« der Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt gezeigt und im zugehörigen Katalog publiziert², die Ergebnisse zu den Einbauten im wissenschaftlichen Begleitband zur Ausstellung »Byzanz: Pracht und Alltag« 2010 in Bonn zusammengefasst³

Das Modell zeigt die wichtigsten Innenräume der Hagia Sophia: Das Hauptschiff einschließlich dem Altarraum und der Apsis, die Seitenschiffe und die drei Teile der Galerien. Nicht gebaut wurden der Narthex und der Exonarthex, der Hof und alle Nebenräume. Das gleiche gilt für die Umgebung und die außen liegenden Bauteile. Statt der nachträglichen Veränderungen und Einbauten zeigt das Modell die rekonstruierte Ausstattung im Altarbereich – Chorschränken, Syntrotron und Ziborium – sowie die Solea und den Ambo.

Das Darmstädter Modell wurde von Anfang an als Forschungswerkzeug verstanden. Es sollte als Umgebung für die Rekonstruktion antiker Prinzipien praktischer Geometrie dienen⁴ und

¹ DFG-Projektnummer 5194526.

² Stichel 2008.

³ Stichel 2010.

⁴ Svenshon 2010 und Hauck, Noback und Grobe 2013, siehe auch: Svenshon 2003, Stichel 2003, Stichel und Svenshon 2004.

verlässliche Raumeindrücke liefern. Dazu wurde es in Hinblick auf die Verwendung in der Lichtsimulationssoftware RADIANCE angelegt.⁵

Schon ganz am Anfang der Entwicklung des Modells stand also der Anspruch, computergraphische Methoden nicht nur zur Visualisierung zu nutzen, sondern belastbare Simulationsergebnisse zu liefern, die sich für die Erforschung von Beleuchtung und Raumwahrnehmung nutzen lassen. Im Begleitband zur Bonner Ausstellung ist das Modell in Grundrissen, Schnitten und Ansichten dokumentiert. Der Beitrag zeigt die Vorgehensweise bei Modellierung, Lichtsimulation und Auswertung und diskutiert erste Ergebnisse – wie die ursprünglich helleren Seitenschiffe.⁶ Für die Ausstellung wurden darüber hinaus drei große Leuchtkästen entwickelt, die den Lichteindruck des ursprünglichen Bauzustands mittels eines selbst entwickelten HDR-Verfahrens wirklichkeitsgetreu wiedergeben.⁷ Das Modell und die angewandten Methoden wurden in weiteren Tagungsbeiträgen dokumentiert und Raumeindrücke mittels weiterentwickelter Ausstellungsstücke präsentiert.⁸ Unter anderem wurde 2014 ein hintergrundbeleuchtetes Panorama in der Ausstellung »Einblicke in den virtuellen Himmel: Neue und alte Bilder der Hagia Sophia« der Universitätsbibliothek Augsburg gezeigt.

2.2 Computermodelle und Simulation

Computermodelle können von sehr unterschiedlicher Natur sein. In der Architektur und Bauforschung sind geometrische Modelle verbreitet. Diese Modelle können Abbilder realer Objekte sein, z. B. 3D-Scans, sie können aber auch Vorwegnahmen realer Objekte sein, wie die digitalen Gebäudemodelle in der Planung. In beiden Fällen handelt es sich um die mathematische Beschreibung räumlicher Formen als Flächen, Splines, Constructive Solids etc. Diese können auch zur räumlichen Organisation weiterer Informationen dienen wie BIM- oder GIS-Modelle.

Unter Computermodellen versteht man aber auch mathematische Beschreibungen von Zusammenhängen und Prozessen für die numerische Simulation.⁹ Auch diese Beschreibungen können geometrisch organisiert sein. Simulationsmodelle implementieren Theorien der Physik, Biologie, Wirtschaft etc. um Probleme numerisch zu lösen. Ist eine analytische Lösung – also mit Hilfe einer übersichtlichen mathematischen Gleichung – nicht möglich, kommen statistische Verfahren zum Einsatz.

⁵ RADIANCE ist eine unter Forschern im Bereich der Lichtsimulation weit verbreitete Software, die dementsprechend gut auf Fehler und für verschiedene Anwendungsfälle untersucht ist. Vergl. *The RADIANCE 5.1 Synthetic Imaging System* 2017; Larson, Shakespeare, Mardaljevic u. a. 1998; Maamari u. a. 2006; Dür und Geisler-Moroder 2008. Die am Modell angewandten Methoden der Lichtsimulation wurden regelmäßig mit der RADIANCE-Community diskutiert: Grobe, Hauck, Noback und Zeimetz 2008; Hauck, Noback und Shakespeare 2010; Hauck und Noback 2012; Noback 2012; Noback und Wittkopf 2014.

⁶ Grobe, Hauck und Noback 2010.

⁷ Hauck und Noback 2012.

⁸ Noback 2011; Stichel, Hauck und Noback 2011; Hauck, Noback und Grobe 2013.

⁹ Vergl. Binder 2004.

Man unterscheidet zwischen statischen und dynamischen Simulationen. Bei statischen Simulationen ermittelt man den Zustand, den ein System unter den gegebenen Bedingungen einnimmt, z. B. die Spannungsverhältnisse in einem Bauteil unter Last mit Hilfe eines Finite-Elemente-Modells. Mit dynamischen Simulationen untersucht man die Zustandsänderung eines Systems über die Zeit, bei der ein Zustand vom vorherigen abhängig ist, wie z. B. in der Wettervorhersage. Die Lichtsimulation ist in diesem Sinne eine statische Simulation, selbst wenn zeitlich veränderliche Eingangsbedingungen wie das Wetter untersucht werden.

Sowohl Geometrie- als auch Simulationsmodelle werden auf ihren jeweiligen Zweck zugeschnitten. Sie sind Vereinfachungen realer Objekte oder realer Systeme, an denen nur einzelne Aspekte untersucht werden sollen. Zugleich sind Computermodelle manipulierbar. So können etwa Varianten vor der Produktion verglichen werden. Auf diese Weise können Modelle in Entwicklungs- und Planungsprozesse eingebunden und iterativ verbessert werden. Das kann durch die Ergebnisse von Untersuchungen an ihnen geschehen oder durch schrittweise Integration zusätzlicher Informationen und Elemente wie in der Bauplanung. Die Rekonstruktionsmodelle in der Bauforschung sind zweckgebundene Vereinfachungen und Ergebnis iterativer Prozesse.

Computermodelle stehen in einem Spannungsverhältnis zur empirischen Umwelt, die sie verständlich oder vorhersehbar machen sollen. Simulationsmodelle werden experimentell überprüft und auf dieser Basis bewertet. Sie werden zum Teil auch als heuristische Werkzeuge eingesetzt, die realen Versuchen vorausgehen, z. B. bei Crash-Tests. Informationsmodelle sollen aktuell und vollständig sein, Planungsmodelle realisierbar, auch Rekonstruktionsmodelle sollen keinen besonders spekulativen Charakter aufweisen.

2.3 Computergrafische Visualisierung und Lichtsimulation

Geometrische Computermodelle sind zunächst unsichtbar, lassen sich aber mit computergrafischen Methoden visualisieren. Diese Darstellungen sind meist perspektivische oder parallele Projektionen auf die Oberfläche eines Bildschirms oder eines anderen Ausgabemediums. Durch die Darstellung (ggfs. geschnittener oder verdeckter) Kanten kann man räumliche Objekte erkennen. Eine richtungsabhängige Helligkeit der Oberflächen unterstützt den räumlichen Eindruck zusätzlich. Verfahren dafür sind z. B. das Flat- oder das Phongshading.¹⁰

Für die Visualisierung lassen sich mehr oder weniger einfache Simulationsverfahren einsetzen. Mit dem sogenannten Backward Raytracing lässt sich von einem Beobachtungspunkt aus eine räumliche Szene untersuchen und dabei Spiegelung, Lichtbrechung und Schattenwurf nachvollziehen.¹¹ Gehen Oberflächeneigenschaften wie Farbe, Reflexionsgrad, Musterung etc. in die Berechnung ein – man spricht von Materialmodellen – nähert man sich einer photorealistischen Darstellung an.

¹⁰ Glassner 1995, S. 731 ff.

¹¹ Glassner 1995, S. 990 ff., 1009 f.

Für den Realismus ist die adäquate Berechnung der Beleuchtung einer Szene von besonderer Bedeutung. Das direkte, von punktförmigen Lichtquellen in der Szene abgestrahlte oder von weit entfernten Lichtquellen von außerhalb parallel in die Szene einfallende, Licht ist dabei relativ einfach mittels Backward Raytracing zu berechnen. Schwieriger zu berechnen sind ausgedehnte Lichtquellen, die weiche Schatten werfen und Licht, das sich indirekt in der Szene ausbreitet. Ersteren kommt man durch Unterteilung der Lichtquelle und durch stochastische Verfahren bei, für letztere gibt es eine Reihe von Verfahren.

Das einfachste Verfahren, die indirekte Beleuchtung zu berechnen, ist den Anteil diffusen Lichts zu überschlagen und dem Licht von den Objekten hinzuzurechnen. Beim Radiosity-Verfahren wird davon ausgegangen, dass die Oberflächen das Licht in alle Richtungen gleichmäßig reflektieren bzw. abstrahlen (ideal diffuse Reflexion). Die Szene wird in gleichmäßige Flächen unterteilt und zwischen diesen iterativ das Strahlungsgleichgewicht bis auf eine definierte Ungenauigkeit berechnet. So entsteht eine von der Beobachtungsrichtung unabhängige Lichtverteilung in der Szene, die beim Backward Raytracing eingerechnet werden kann.¹²

Radiosity kann keine Effekte erfassen, die von glänzenden oder spiegelnden Oberflächen verursacht werden. Die Wirkung transparenter Objekte, die Licht brechen und ungleichmäßig streuen, lässt sich so ebenfalls nicht berechnen. Zum Teil kann man das mit Monte Carlo Raytracings, das statistische Verfahren für das Backward Raytracing der indirekten Beleuchtung nutzt.¹³ Vollständig erreicht man das mit Verfahren, die eine Berechnung mittels Raytracing von den Lichtquellen aus einschließen:¹⁴ Photon Mapping,¹⁵ (Bidirektionales) Path Tracing¹⁶ oder Metropolis Light Transport.¹⁷ Den Aufwand, der für solche Berechnungen notwendig ist, kann man durch spezialisierte Hardware, z. B. Grafikkarten und Parallelisierung in den Griff bekommen. Die Entwicklung in diesem Bereich wird heute von der Spiele- und Filmindustrie vorangetrieben, die sich dazu auch im wissenschaftlichen Bereich engagiert.

Auch wenn für die Visualisierung von Computermodellen Methoden zum Einsatz kommen, die man als Simulation bezeichnen kann, spricht man im engeren Sinne dann von Lichtsimulation, wenn nicht nur das generieren von realistischen Bildern im Vordergrund steht, sondern andere Auswertungsmethoden – insbesondere quantitative – zum Einsatz kommen. Die Überprüfung der eingesetzten Verfahren mittels empirischer Methoden ist dann ein notwendiger Teil der wissenschaftlichen Arbeit.

2.4 Methodik der Lichtsimulation historischer Bauzustände

Der konkrete Ausgangspunkt dieser Arbeit ist eine theoretische Auseinandersetzung mit der Methodik der Lichtsimulation, die der Verfassers vorab in einem Buchbeitrag zusammenge-

¹² Glassner 1995, S. 883 ff.

¹³ Glassner 1995, S. 1009 f.

¹⁴ Glassner 1995, S. 1039 f.

¹⁵ Jensen und Christensen 1995.

¹⁶ Lafortune 1996, S. 91–101.

¹⁷ Veach und Guibas 1997.

fasst hat.¹⁸ Der Betrag versucht theoretische Lücken zu schließen, die eine Verankerung der Lichtsimulation in der historischen Bauforschung behindern und schlägt einen systematischen Arbeitsablauf zur Anwendung der Methode vor. Er stützt sich dabei auf Vorarbeiten, die solche Methoden aus dem Blickwinkel der Computergrafik und Bauforschung zu fassen versuchen.

Devlin¹⁹ betont die Bedeutung physikalisch plausibler Simulationsverfahren, um belastbare Bilder zu gewinnen, mit denen sich Hypothesen zur Wahrnehmung von Innenräumen und Gegenständen in rekonstruierten Umgebungen prüfen lassen. Sie weist auf das Problem der Wiedergabe und Wahrnehmung dieser Bilder bei der Auswertung hin. Als Fehlerquellen identifiziert sie u.a. den Einfluss der Umgebung, unter der computergenerierte Bilder betrachtet werden, den Dynamikumfang der Wiedergabemedien und die physiologischen Effekte beim Betrachten. Sie schlägt zur Kontrolle des Kontrastumfangs und zur Anpassung von Bilddaten an den darstellbaren Dynamikumfang des Wiedergabemediums (*tone mapping*) verschiedene Methoden vor. Vor allem plädiert sie für eine lückenlose Dokumentation der verwendeten Simulationsmodelle und -verfahren, um die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Earl et al.²⁰ zeigen in ihrer simulationsbasierten Analyse der Basilica Portuense (Portus, Italien) die Abhängigkeit der Wahrnehmung von Material und Form des Innenraums von der Beleuchtung durch Kunst- und Tageslicht. Für eine solche Analyse formulieren sie folgende Voraussetzungen:

1. die Berücksichtigung von Lichteffekten die durch Umgebungsbedingungen hervorgerufen werden wie im Luftvolumen vorhandene, streuende Partikel
2. die genaue Modellierung von künstlichen und natürlichen Lichtquellen, der photometrischen Eigenschaften des Himmels
3. die genaue Beschreibung der raumdefinierenden Geometrie
4. die Beschreibung der Licht-Interaktion an den raumbegrenzenden Flächen
5. die physikalische Gültigkeit der verwendeten Algorithmen zur Berechnung des Lichttransports

Earl et al. diagnostizieren einen nur schleppenden Transfer der schnell fortschreitenden Entwicklungen der Computergraphik zu Anwendungen in der Archäologie. Diese bleiben zudem typischerweise auf isolierte Aspekte beschränkt. Neben der unzureichenden Validierung der Methoden in diesen Analysen werden ein Mangel an Daten und fehlende Schnittstellen zu bestehenden Datenbanken gemessener Reflexionseigenschaften von Materialien festgestellt. Daher beschränken sich diese Simulationsstudien typischerweise auf die von der verwendeten Software bereitgestellten Modelle, die oft nicht auf die konkreten historischen Materialien anwendbar sind.

¹⁸ Noback 2019.

¹⁹ Devlin 2012.

²⁰ Earl u. a. 2013.

Den Nutzen von standardisierten Himmelsmodellen, physikalisch korrekter Materialbeschreibungen und Verfahren zur Berechnung des Lichttransports betonen Papadopoulos und Earl auch in der Beleuchtungsanalyse dreier Innenräume Minoischer Bauten in Kreta.²¹

Den in der Computergrafik etablierten Begriff des *Predictive Rendering*²², der auf perzeptuell und physikalisch korrekte Bilder abzielt, wird von Happa et al.²³ um eine historische Komponente erweitert und als *Cultural Heritage Predictive Rendering* vorgestellt. Sie schlagen eine Abfolge von Arbeitsschritten vor, um Bilder historischer Szenen herzustellen und dabei ihre Angemessenheit zu untersuchen (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Arbeitsschritte des *Cultural Heritage Predictive Rendering*. Quelle: Noback 2019.

Arbeitsschritt	Ergebnis	Validierung	Fehlermetrik
Messung optischer Eigenschaften der Oberflächen und Lichtquellen	Emissionen-geometrie Materialmodelle	Goniometrischer Vergleich Oberflächeneigenschaften	Goniometrischer Fehler
Simulation des Lichttransports	Radiometrische Werte	Radiometrischer Vergleich	Radiometrischer Fehler
Visualisierung der Berechnungsergebnisse	Wahrgenommenes Bild	Vergleich der Wahrnehmung	Wahrnehmungsfehler
Historische Eigenschaften der dargestellten Szene	Plausibles Bild	Historischer Vergleich	Abschätzung historischer Fehler

Die Aufgabe der historischen Validierung wird dabei einem Experten übertragen, der durch den Vergleich mit Quellen und etablierten Annahmen die Plausibilität der Bilder feststellt. Abgesichert wird die Methode, indem man sich auf einer Timeline schrittweise vom heutigen an den untersuchten Zustand heranarbeitet und bauliche Veränderungen als Filter, verstellende Elemente und Beleuchtungsattribute betrachtet, die an Ankerpunkten auf der Timeline das heutige Bild verändern. Dabei werden Varianten gebildet, die auf Plausibilität untersucht werden können und zusammengenommen einen Graphen von Hypothesen bilden.

Die Vorgehensweise, sich vom heutigen Zustand eines Gebäudes mittels der im Befund erkennbaren Veränderung in die Vergangenheit vorzuarbeiten ist in der Bauforschung etabliert. Genauso analysiert z.B. Mainstone in seinem Standardwerk die Baugeschichte der Hagia Sophia anhand der Bauaufnahme von van Nice²⁴.

²¹ Papadopoulos und Earl 2014.

²² Greenberg u. a. 1997.

²³ Happa u. a. 2012.

²⁴ Mainstone 1988, S. 85–127.

Das Delegieren der Validierung an einen bauhistorischen Experten ist aber aus Sicht der Bauforschung selbst naturgemäß wenig hilfreich, ist sie doch selbst dieser Experte. Sie muss folglich eine eigene Perspektive auf die Methode der Lichtsimulation entwickeln und sie mit eigenen Fragestellungen und Methoden, insbesondere im Kontext der computergestützten Rekonstruktion verknüpfen.

Eine solche Perspektive findet sich in der London Charter,²⁵ die sich um den Begriff *computer visulisation* dreht und sich mit der Erzeugung von Bildern mittels dreidimensionaler Modelle befasst. Wie Happa et al. definiert sie damit die Methode über ihr Produkt. Sie zielt darauf, diese Bilder, die aufgrund photorealistischer Darstellung eine große Wirkung haben, kritikfähig zu machen. Eine Qualitätssicherung soll den hypothetischen und unvollständigen Charakter der Modelle aufzeigen und deren Herstellungsmethoden vermittels von Annotationen transparent machen, die Quellen nachweisen und Entscheidungsprozesse nachvollziehbar machen.²⁶

2.5 Forschungslücke und methodischer Ansatz

Der Fokus der London Charter auf die Verschränkung von Modellen und Bildern verstellt den Blick auf die Möglichkeiten der computergrafischen Methoden, die der Bildproduktion zu Grunde liegen. Technische Lichtsimulationen, wie sie in Darmstadt, aber auch von Devlin, Papadopoulos und Earl, etc. gesetzt worden sind, gewinnen mit diesen Methoden numerische Daten, die sich vielseitiger auswerten lassen. Auf solche Nutzungen fehlt der Baugeschichte bislang eine etablierte Perspektive.

Der oben schon erwähnte theoretische Artikel²⁷ versucht Licht in diese Sache zu bringen, indem er die Begriffe *rendering* und *computer visulisation* in der oben zitierten Verwendung fallen lässt. Stattdessen führt er *Rekonstruktion* und *Simulation* als Begriffe ein. Dabei beschreibt die Rekonstruktion die Herstellung der Modelle, Simulation das Generieren und Auswerten numerischer Daten. Der Begriff Visualisierung umfasst lediglich eine von mehreren Möglichkeiten der Auswertung. Die mit dieser Abfolge verknüpften Arbeitsschritte unterscheiden sich signifikant in der Art der Wissensgewinnung und der zur Durchführung notwendigen Expertise.

1. Die *Rekonstruktion* von Bauzuständen vermittels computergestützter Geometrie – und möglicherweise verknüpfter Metadaten – wird dabei als eigenständige Methode begriffen, welche Erkenntnisse empirischer, quellenanalytischer und theoretischer Herkunft in die räumliche Sphäre überträgt und auf Kohärenz abgleicht. Sie folgt einem *holistischen* Ansatz. Widersprüche und Lücken im vorhandenen Wissen treten so zu Tage und durch die Kombination entsteht eine erweiterte Vorstellung vom Ganzen.
2. Die *Lichtsimulation* mit solchen Modellen gleicht einem Experiment, mit dem sich Hypothesen überprüfen lassen. Sie untersucht also ganz *spezifische* Fragestellungen, die

²⁵ The London Charter Interest Group 2009.

²⁶ Vergl. auch Grellert und Pfarr-Harfst 2019 und Pfarr 2010.

²⁷ Noback 2019. Die folgenden Abschnitte fassen den methodischen Ansatz des Artikels zusammen.

entsprechend formuliert werden müssen. Sie ist vom Ergebnis der Rekonstruktion abhängig, weil sie nicht ohne ein schlüssiges Modell durchgeführt werden kann. Um die physikalischen Prozesse der Beleuchtung zu simulieren, benötigt man mathematische Modelle der optischen Eigenschaften der Materialien und Lichtquellen. Um diese Eigenschaften zu bestimmen, werden Messungen durchgeführt, also weitere empirische Grundlagen eingebunden. Die numerischen Ergebnisse bedürfen einer Auswertung, für die die Lichtsimulation eigene Methoden vorhält.

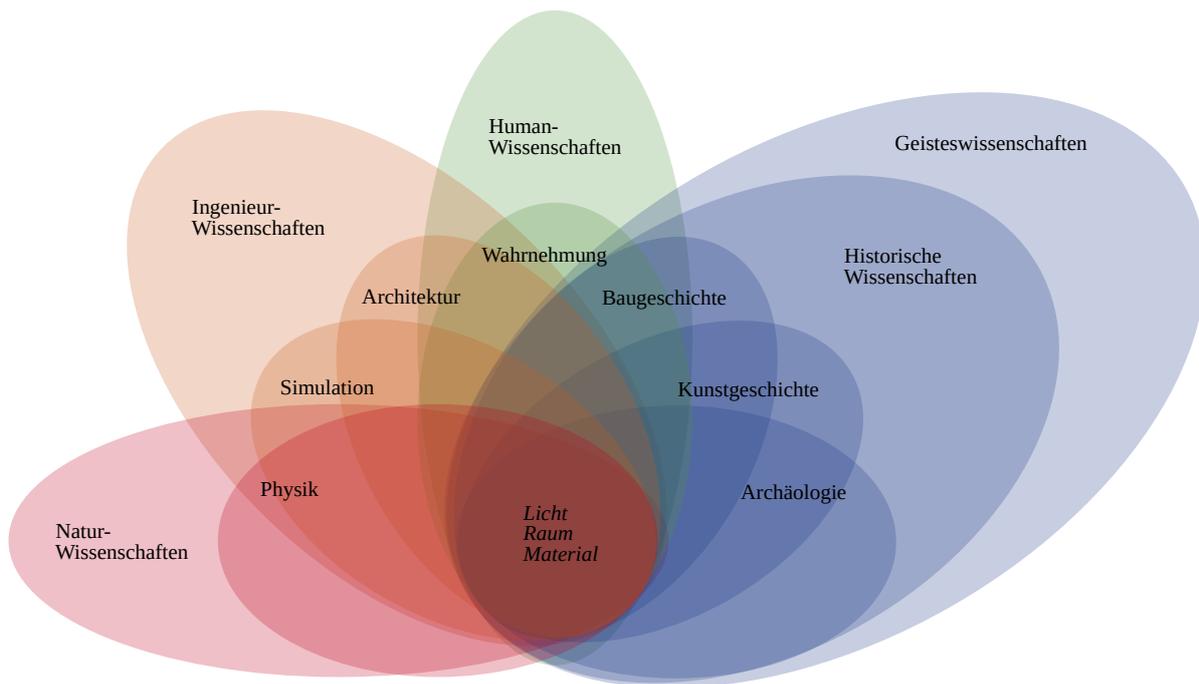


Abbildung 2.1: Überblick des interdisziplinären Feldes.

Um diese beiden Formen der Produktion und Verarbeitung von Wissen für die Bauforschung zu erschließen, muss die Arbeitsweise in den interdisziplinären Forschungskontext (Abbildung 2.1) eingebettet werden. Dazu wird eine Abfolge von Arbeitsphasen vorgeschlagen (Abbildung 2.2):

1. Bedingt durch den experimentellen Charakter der Lichtsimulation ist es notwendig *Arbeitshypothesen* zu formulieren, mit denen sich Fragestellungen in ein Untersuchungsprogramm übersetzen lassen, das auch eine adäquate Auswertung beinhaltet. Aus den Hypothesen leiten sich zudem Anforderungen an die geometrische Modellierung und die Materialmodelle ab. Bei der Formulierung der Arbeitshypothesen müssen die spezifischen Unsicherheiten der Rekonstruktion des jeweiligen Gebäudes im Auge behalten werden. Es ist abzuwägen, in wieweit sich die formulierten Fragen mit dem vorhandenen Wissen über den Bau überhaupt beantworten lassen. Für die Formulierung der Arbeitshypothesen ist Expertise aus der Archäologie, der Bau- und Kunstgeschichte nötig, die sicherlich durch die Lichttechnik unterstützt werden kann.

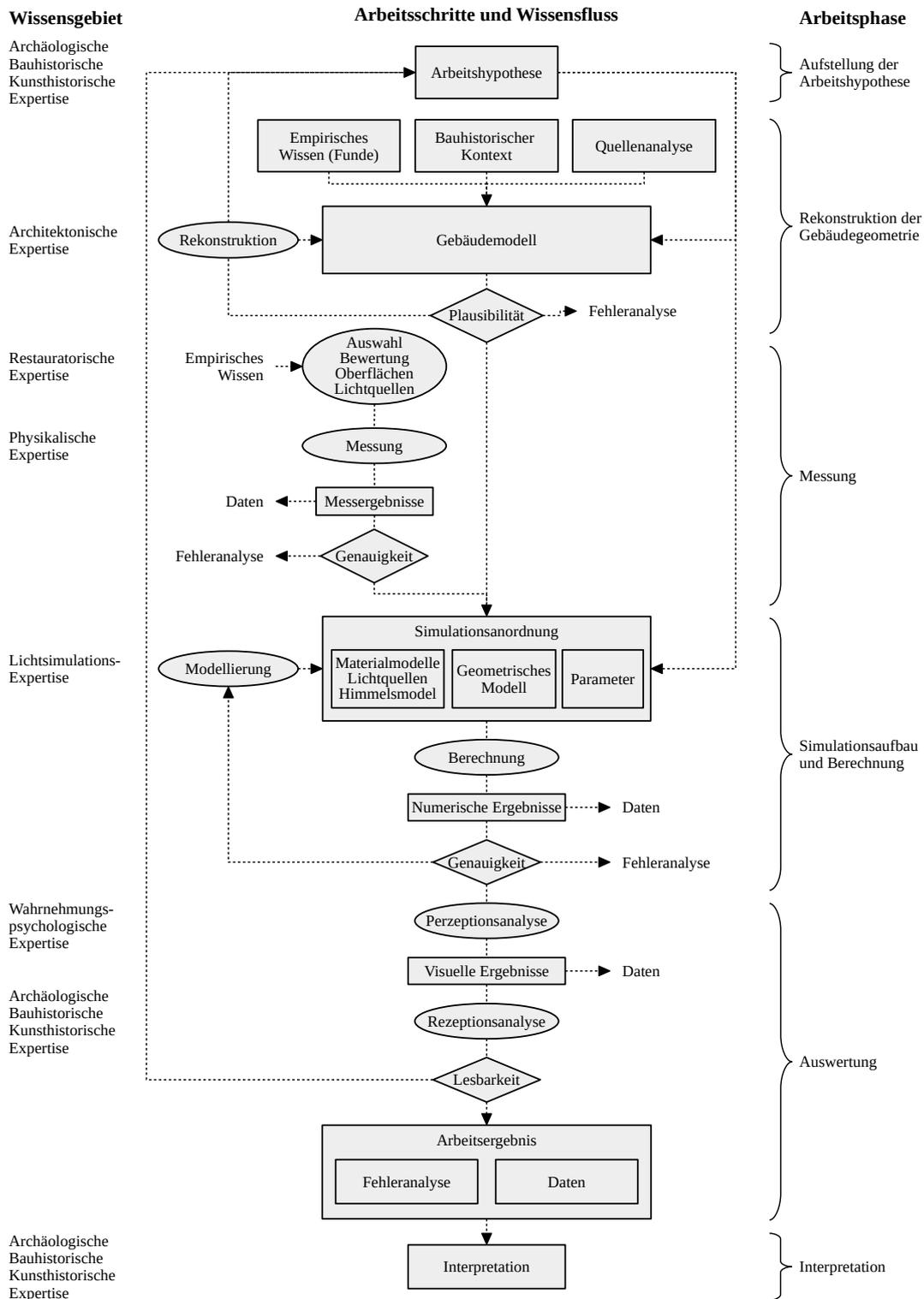


Abbildung 2.2: Schematischer Vorschlag zu den Arbeitsphasen, Wissensfluss und Expertise innerhalb der Lichtsimulation rekonstruierter Bauzustände. Quelle: Noback 2019.

2. Die Rekonstruktion der Gebäudegeometrie des untersuchten Bauzustandes erfordert architektonische Expertise. Die Rekonstruktion integriert Wissen unterschiedlicher Natur zu einem plausiblen Modell. Dabei lassen sich drei Wissensquellen unterscheiden, bei deren Interpretation die jeweils unterschiedlichen Erkenntnismethoden zu beachten sind und daher wiederum unterschiedliche Expertise erfordern:
 - a) Empirisches Wissen schließt alle materiellen Spuren, also Funde und Befunde am Bau ein. Dieses Wissen ist notwendigerweise unvollständig oder widersprüchlich, sonst wäre keine Rekonstruktion nötig. Alterung, Verlust, Verformung und Veränderung erfordern eine Interpretation des materiellen Befundes, die bauforscherische Expertise voraussetzt.
 - b) Eine Quellenanalyse kann Lücken im materiellen Befund schließen, erfordert aber eine Expertise in der Interpretation und Kritik von Text- und Bildquellen.
 - c) Lücken im Befund lassen sich auch durch Vergleich im bauhistorischen Kontext schließen. Kenntnis der Bautradition und typologischer Entwicklungen erlauben deduktive Schlüsse.

Die architektonische Expertise ist in diesem Prozess in doppelter Weise gefragt: Das Zusammenführen von Informationen aus unterschiedlichen Quellen zu einem kohärenten, baubarem, menschlichen Proportionen und Ansprüchen gerechten dreidimensionalen Modell zu verarbeiten, erfordert praktisches und methodisches Wissen, wie es auch bei der Planung moderner Gebäude notwendig ist. Zugleich erfordert das Schließen von Lücken und das Auflösen von Widersprüchen eine kreative Leistung im Sinne des Entwurfs. Rekonstruktionsmodelle sind daher *heuristische* Arbeitsmittel, die im Arbeitsprozess eine benennbare Plausibilität erreichen, aber ihren hypothetischen Charakter nicht ganz ablegen können.

3. Die Modellierung der optischen Materialeigenschaften von Oberflächen und Lichtquellen erfordert eine weitere Form empirischer Wissensgewinnung: die *Messung* an den jeweiligen Materialien. Das setzt eine physikalische Expertise voraus, aber auch eine restauratorische. Die Probeflächen sind auf Einflüsse der Alterung hin zu untersuchen, für die Messung geeignete auszuwählen und gegebenenfalls zu reinigen.
4. Die Herstellung einer *Simulationsanordnung* schließt die Modellierung von Oberflächenmaterialien, Lichtquellen und Himmelszuständen ein und verbindet sie mit dem geometrischen Modell der Rekonstruktion. Das aus den Arbeitshypothesen entwickelte *Untersuchungsprogramm* bestimmt die Parameter der nachfolgenden *Berechnung*. Das erfordert eine Expertise in Lichttechnik und Lichtsimulation.
5. Die gewonnenen numerischen Daten können zum Teil direkt aufbereitet werden, um z.B. die Lichtverteilung im Gebäude zu untersuchen. Für die Beantwortung archäologischer, bau- und kunsthistorischer Fragen ist es aber zumeist notwendig, zwei weitere Schritte der Auswertung anzuschließen um die Wahrnehmung der rekonstruierten Lichtszenen zu erschließen:

- a) Die *Perzeptionsanalyse* visualisiert die numerischen Daten, indem sie Algorithmen einsetzt, die physiologische und psychologische Prinzipien der menschlichen Wahrnehmung nachstellen. Das erfordert eine wahrnehmungspsychologische Expertise.
 - b) Kann man bei der Perzeptionsanalyse davon ausgehen, dass die physiologischen und psychologischen Prinzipien der Wahrnehmung über die menschliche Geschichte hinweg gleichgeblieben sind, ist die Rezeption einer Lichtszene ein kulturell geprägter Prozess. Daher ist vor der Interpretation visueller Ergebnisse eine *Rezeptionsanalyse* durchzuführen, eine kulturwissenschaftliche Expertise erfordert.
6. Der Auswertung folgt die *Interpretation* der visuellen und numerischen Ergebnisse im Kontext einer archäologischen, bau- und kunsthistorischen Expertise. Dabei sind die Arbeitshypothesen zu bewerten und die Fehlerquellen und Unsicherheiten der einzelnen Arbeitsschritte zu diskutieren.