

# Kapitel 7

## Materialmodelle I: Marmordekoration

### 7.1 Materialmodell für die Marmoroberflächen

Die Suche nach geeigneten Materialmodellen für die Oberflächen wurde aus praktischen Gründen auf die in RADIANCE vorhandenen eingegrenzt. Das RADIANCE `plastic` ist für alle Materialien gedacht, bei denen das direkt reflektierte Licht nicht die Farbe des Materials annimmt. Im Gegensatz dazu färbt das Modell `metal` das direkt reflektierte Licht ein. Das `plastic` Modell färbt also nur das diffus reflektierte Licht. Das Modell kann aber nicht alle Eigenschaften des Marmors korrekt beschreiben. Marmor ist transluzent, besonders in die helleren Varianten kann das Licht daher in das Volumen eindringen und an anderen Stellen wieder austreten, was an Ecken und Kanten sichtbar wird (Abbildung 7.1).

Die Verwendung dieses analytischen Datenmodelles erlaubt für die Marmormaterialien nicht nur eine gewisse Anschaulichkeit, sie kann auch ein methodisches Problem der Modellierung der Materialeigenschaften für die Hagia Sophia lösen: Wenige Oberflächen befinden sich in ihrem ursprünglichen Zustand, die Marmoroberflächen sind zum Beispiel stark verschmutzt. So lassen sich die Glanzeigenschaften, die sich im Modell in den Parametern *Specularity* und *Roughness* (Tabelle 6.1) ausdrücken, lediglich eingrenzen. Mit den Grenzen der möglichen Werte für diese Parameter lässt sich die Bandbreite numerisch ausdrücken.

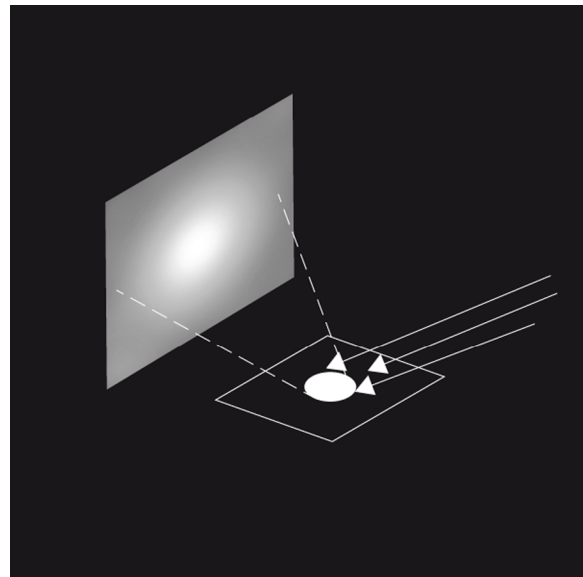
### 7.2 Ermittlung der Reflexionskoeffizienten mit einer Kamera

Wie könnten die Parameter für das Materialmodell der Marmoroberflächen ermittelt werden? Reflexionskoeffizienten werden gewöhnlich mit einem Spektrometer gemessen. Das war im Fall der Hagia Sophia aber vor Ort nicht möglich. Außerdem interessierte in diesem Fall auch die Varianz der Reflexionskoeffizienten auf den Oberflächen, also die Musterung des Marmors. Daher kam ein bildbasiertes Verfahren zum Einsatz.

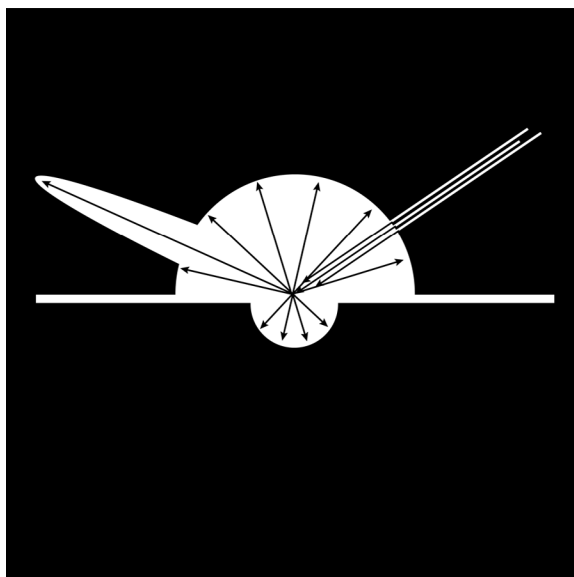
Die RADIANCE-Umgebung bietet hierfür das Programm `macbethcal` an. Es erlaubt, die Reflexionskoeffizienten in den drei Farbkanälen für eine Oberfläche zu ermitteln, indem ein Foto der Oberfläche zusammen mit einer Farbkarte, dem MACBETH COLOR CHART, aufgenommen wird. Das Programm kalibriert das Bild anhand der bekannten Reflexionskoeffizienten der Farbflächen auf der Karte. Damit werden Farbabweichungen ausgeglichen, die durch die



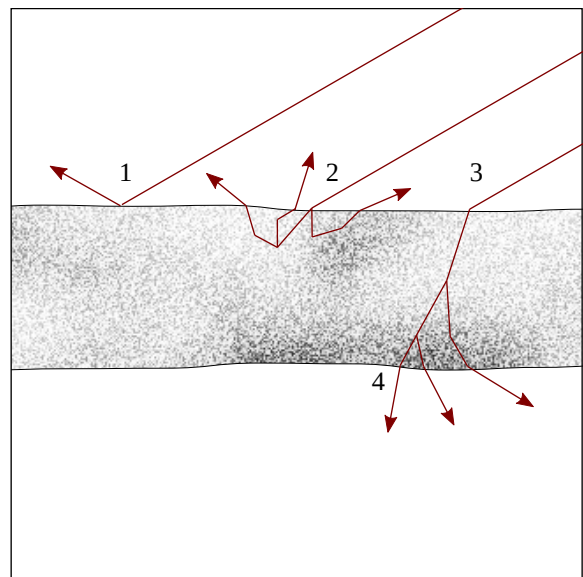
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 7.1: Lichttechnische Eigenschaften von Marmor: (a) Polierte und matte Marmorprobe aus der Sammlung der Hochschule Luzern. (b) Besonders auf den hellen Marmorboden einfallendes Sonnenlicht trägt zur diffusen Beleuchtung bei. (c) Einfallendes Licht wird vorwiegend diffus reflektiert, polierter Marmoroberflächen weisen darüber hinaus eine direkte Reflexionskomponente auf. Bei dünneren Bauteilen kann ein Teil diffus transmittiert werden. (d) Licht wird an der Oberfläche reflektiert (1). Licht dringt in den Marmor ein, wird gestreut und tritt diffus auf der Seite des Lichteinfalls (2) oder in andere Richtungen aus (3). Unterschiedliche Dichte und Farbe des Marmors beeinflusst das Streuverhalten (4).  
Abbildungen: Hochschule Luzern.

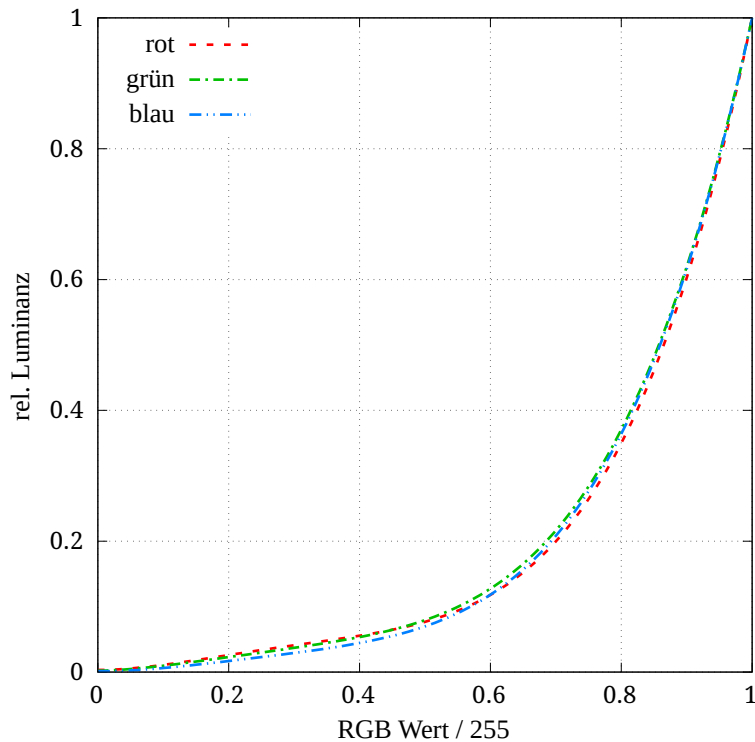


Abbildung 7.2: Kontrastwiedergabe einer Digitalkamera (Nikon D700). Die Beziehung von Leuchtdichten zu RGB Werten der Bilddatei ist nicht linear. Die Kontrastwiedergabe nähert sich damit der menschlichen Wahrnehmung an. Um Reflexionskoeffizienten fotografierter Oberflächen zu ermitteln, muss aber eine lineare Beziehung errechnet und ein absoluter Bezug zu bekannten Werten hergestellt werden.

individuellen Beleuchtungsbedingungen entstehen. Insbesondere aber wird das exponentielle Kontrastverhalten fotografischer Aufnahmemedien, bzw. der digitalen Bildverarbeitung linearisiert (Abbildung 7.2).<sup>1</sup>

macbethcal erlaubt die Aufnahme größerer Flächen, sodass durchschnittliche Reflexionskoeffizienten ermittelt werden können und darüber hinaus die Aufnahme der Marmorstruktur ganzer Platten. Ein großer Vorteil ist, dass nur Bilder vor Ort aufgenommen werden müssen. Das Verfahren ist für Materialien geeignet, bei denen die diffuse Reflexion dominiert. Es ist folglich ungeeignet für stark spiegelnde Oberflächen oder Metalle. Es erfordert eine gleichmäßige Ausleuchtung der Materialien, bei der spiegelnde Reflexionen von Lichtquellen auf der Oberfläche zu vermeiden sind. Daraus folgt implizit, dass die Oberflächen eben sein sollten.

<sup>1</sup> Grund dafür ist die Gammakorrektur:  $I_{\text{out}} = I_{\text{in}}^\gamma$ , also die Anpassung an die nicht lineare Wahrnehmung von Helligkeiten. Farbstandards der digitalen Bildverarbeitung z. B. sRGB-Farbraum legen ein  $\gamma = 2,2$  zu Grunde.

Sind diese Bedingungen erfüllt, kann von einer Abweichung innerhalb von 10 % gerechnet werden.<sup>2</sup>

Es ergibt sich folgende Arbeitskette:

1. Die Oberflächen wurden mit dem Farbchart fotografiert. Dabei wurde nach möglichst typischen, sauberen Flächen Ausschau gehalten, zum Beispiel am Boden, der offenbar regelmäßig gewischt wird. In den Galerien sind einige Wandflächen offenbar gereinigt worden. Bei manchen Materialien, wie dem Marmor celticum wurden kleinere Stücke herangezogen, die in den Boden eingelassen waren, z. B. im Bereich des Omphalions. Alle Probeflächen wurden unter der gegebenen Beleuchtung fotografiert und dabei auf Schatten und Reflexionen geachtet.
2. Von den Bildern wurden zwei Dateien generiert. Eines, bei dem das Farbchart ausgeschnitten (chart.tif) wurde und ein zweites mit der Probefläche (marmor.tif). Diese werden mit ra\_tiff in das RADIANCE-Bildformat umgewandelt (Listing 7.1).
3. Mit macbethcal wird eine Kalibrierungsdatei (marmor.cal) erzeugt und zusätzlich ein Debug-Bild (debug.pic, Listing 7.2): Macbethcal bestimmt zunächst eine lineare Kontrastkorrektur anhand der grauen Farbfelder. Danach wird eine Farbkorrektur mit der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.<sup>3</sup> Der Algorithmus schließt Farbfelder aus, die vom Medium nicht wiedergegeben werden können.<sup>4</sup> Wenn das auch moderate Farbtöne betrifft, erfolgt eine Warnung. Im Debug-Bild werden ausgeschlossene Farbfelder dokumentiert und die anhand der ermittelten Korrektur errechneten Farben dem Zielfarbtönen gegenübergestellt (Abbildung 7.4). Damit kann die Qualität der Korrektur visuell überprüft werden.
4. Die Kalibrierungsdatei wird mit dem Programm pcomb auf das Bild der Probe angewendet (Listing 7.3).

```
$ ra_tiff -r chart.tif chart.pic  
$ ra_tiff -r marmor.tif marmor.pic
```

Listing 7.1: Umwandlung der Bilddateien

Mit dem Programm ximage können aus den Bildern für beliebige Ausschnitte durchschnittliche Reflexionskoeffizienten ermittelt werden. Die Farbwerte in der gewonnenen RADIANCE-Bilddatei entsprechen den Reflexionskoeffizienten in der Definition des plastic Materials, da

---

<sup>2</sup> Manpage macbethcal (Radiance developers 2020): »If the lighting conditions are carefully controlled (as in the case of a flatbed scanner), it is even possible to get reliable reflectance values this way, at least within 10 % or so.«

<sup>3</sup> Manpage macbethcal (Radiance developers 2020).

<sup>4</sup> Der Farbton des Feldes liegt außerhalb des Gamuts (Manpage macbethcal (Radiance developers 2020): »Out of Gamut«).

```
$ macbethcal -d debug.pic chart.pic marmor.cal
```

Listing 7.2: Erzeugung der Kalibrierungsdatei

```
$ pcomb -f marmor.cal marmor.pic > marmor_cal.pic
```

Listing 7.3: Anwendung der Kalibrierung

bei den Aufnahmen ja spiegelnde Reflexionen ausgeschlossen wurden. Aus den Reflexionskoeffizienten der drei Farbkanäle kann der farblich gewichtete Reflexionsgrad für die diffuse Reflexion ermittelt werden:

$$\rho_{\text{diff}} = r \cdot 0,265 + g \cdot 0,67 + b \cdot 0,065 . \quad (7.1)$$

Um den Gesamtreflexionsgrad zu ermitteln, ist später die spekulare Reflexion aus dem spec-Parameter mit einzubeziehen<sup>5</sup>:

$$\rho = \rho_{\text{diff}} \cdot (1 - \text{spec}) + \text{spec} . \quad (7.2)$$

So ergeben sich die Reflexionskoeffizienten in Tabelle 7.1.

## 7.3 Muster der Marmormaterialien

Die gewonnenen Bilder können in das Materialmodell eingebunden werden (Listing 5.3), um die Farbenvarianz und Muster individueller Platten wiederzugeben. Sie lassen sich auch zu sich endlos wiederholenden Marmormustern weiterverarbeiten. In beiden Fällen werden die Farbparameter im zugehörigen `plastic` Definition auf 1 gesetzt. Der in der `RADIANCE`-Bilddatei gespeicherte Reflexionskoeffizient für die einzelnen Pixel der Oberfläche wird dann mit 1 multipliziert, also unverändert übernommen. Das `plastic` Modell liefert dann lediglich die Werte für *Specularity* und *Roughness*.

Alternativ können die gemittelten farbigen Reflexionskoeffizienten in die `plastic` Definition übernommen werden und das Muster als Bilddatei in Graustufen eingebunden werden. Dazu wird es mit dem Programm `normpat` auf die jeweilige mittlere Helligkeit normalisiert. Das ist im Fall des *Marmor celticum* und des roten Porphyrs geschehen. Hier wurden kleinere Stücke herangezogen, die in den Boden im Bereich des Omphalions eingelassen waren. Diese waren deutlich weniger verschmutzt als die Flächen an den Wänden, da der Boden offensichtlich regelmäßig gewischt wird.

Beim *Marmor celticum* war diese Probe zu klein, um einen durchschnittlichen Reflexionsgrad für das Muster zu ermitteln. Das Muster weist fast reine schwarze Flächen und ebenso reine weiße Adern auf, die teilweise ebenfalls Flächen bilden. Von beiden wurden Werte auf der

<sup>5</sup> Jacobs 2012, S. 19.

Tabelle 7.1: Übersicht der mittleren Reflexionskoeffizienten der Marmormaterialien in den drei Farbkanälen

Material	$r$	$g$	$b$	$\rho_{\text{diff}}$	Anmerkung
<i>Marmor celticum</i>	0,25	0,25	0,25	0,25	nach beschriebener Anpassung
<i>Verde antico</i>	0,08	0,08	0,06	0,08	
<i>Porfido serpentino verde</i>	0,08	0,09	0,06	0,09	
<i>Onyx</i>	0,39	0,31	0,18	0,32	
<i>Prokonnesischer Marmor</i>	0,35	0,34	0,28	0,34	
<i>Pavonazzetto</i>	0,47	0,42	0,32	0,43	helle Variante
<i>Cipollino rosso</i>	0,23	0,18	0,16	0,19	
<i>Roter Porphy</i>	0,15	0,10	0,09	0,11	
<i>Cipollino verde</i>	0,38	0,38	0,30	0,37	stark verschmutzt
<i>Giallo antico</i>					kein Wert
<i>Breccia corallina</i>					kein Wert

Probe gemessen, für die hellen Bereiche: 0,82 0,80 0,79, für die dunklen: 0,03 0,03 0,03. Auf Basis dieser Werte wurden Bilder von den großflächigen Mustern im Kontrast angepasst. Anhand der angepassten Bilder wurde der durchschnittlichen Reflexionsgrad berechnet: 0,25 0,25 0,25. Die im Kontrast angepassten Bilder der Muster wurden in das Modell eingebunden und so der Kontrast dieses Materials dem Ursprungszustand angenähert.

Ungünstige Aufnahmebedingungen haben besonders bei frühen Digitalfotos und Aufnahmen auf Film zu sichtbarem Rauschen geführt. Oft sind einige Gelbtöne bei den Digitalaufnahmen »Out of Gamut«, möglicherweise eine Schwäche der Sensoren aus der Zeit um 2005. Da mit der vorhandenen Beleuchtung operiert wurde, konnten nicht immer diffuse Schatten und subtilere Reflexionen vermieden werden. Viele Tafeln haben zudem Risse und herausgebrochene Stellen. Der *Verde antico* leidet offenbar besonders an diesem Problem. Diese Lücken und Risse sind oft mit weiteren Ablagerungen gefüllt. Das größte Problem ist aber der oftmals stark verschmutzte Zustand vieler Oberflächen. Der Staub verfälscht das Ergebnis dabei auf zweierlei Weise: Zum einen verändert er den Reflexionskoeffizienten und die Farbe, zum anderen reduziert er den Kontrast innerhalb der Marmorstrukturen.

Es ergibt sich folgende Übersicht der aufgenommenen Marmorarten:

1. *Marmor celticum*. Probe aus dem Omphalion. Hier wurde der Kontrast wie beschrieben wiederhergestellt. Der Tabellenwert wurde nach der Anpassung ermittelt. Die Bilder der Muster zeigen noch Grautöne, die vom Staub herrühren. Die Zuordnung der Wandtafeln zu einzelnen Marmorblöcken konnte im Modell nur zum Teil wiedergegeben werden, da nicht alle Muster aufgenommen werden konnten.
2. *Giallo antico*. Dieses Material wurde bei der bildbasierten Erfassung übersehen. Das Material kommt außerhalb des Narthex an der Westwand und der Wand der Apsis vor



Abbildung 7.3: Mit der Aufnahme der MACBETH-Farbkarte kann die Farbigkeit und der diffuse Reflexionsgrad des Materials unabhängig von Kameraeinstellungen und Beleuchtung bestimmt werden. Schatten und Reflexionen sind zu vermeiden.

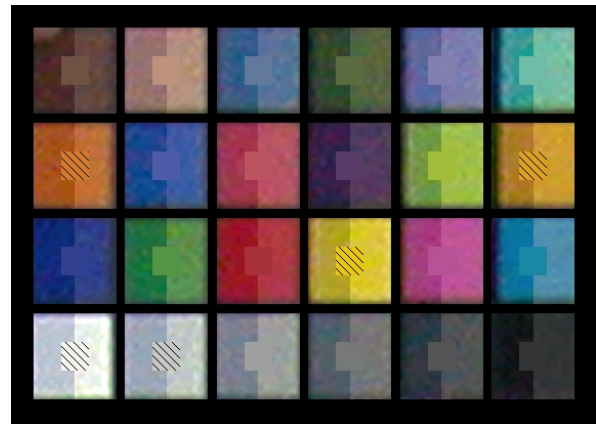


Abbildung 7.4: Debug-Bild, das `macbethcal` für ein Bild von Cipollino verde errechnet hat. Es zeigt, dass die hellen neutralen Töne und die gelben und orangenen Farbflächen für die Farbanpassung ausgeschlossen wurden. Die Quadrate in der Mitte der Farbflächen zeigen jeweils den Referenzwert, links sieht man den unkorrigierten Ton im Bild, rechts das Ergebnis der Umrechnungstabelle aus der Kalibrierungsdatei angewandt auf das Bild des Macbeth-Charts. Hier passen die Farben recht gut.



Abbildung 7.5: Veränderung von Farbe, Helligkeit und Glanz durch die Verschmutzung der Oberflächen am Beispiel einer Säule aus rotem Porphyry. Zustand 2015.



Abbildung 7.6: Unterschiedlicher Glanz der dunklen Einschlüsse im Verde antico. Zustand 2015.

und ist im verschmutzten Zustand leicht mit dem Onyx zu verwechseln. Es wurde im Modell durch den Onyx ersetzt.

3. *Verde antico*. Eine Probe wurde unten an der Ante der Kolonnaden am südwestlichen Hauptfeiler genommen, einer der am wenigsten verschmutzt erscheinenden Stellen. Hier waren auch nur wenige Risse zu beobachten. Der Mittelwert erscheint niedrig, ist aber durch die sehr dunklen Einschlüsse bedingt.
4. *Porfido serpentino verde*. Die Probe stammt vom Boden aus dem Omphalion.
5. *Onyx*. Die Probe vom südöstlichen Hauptfeiler erscheint noch am wenigsten verschmutzt. Wie der *Verde antico* zeigt dieses Material oft viele Risse. Sein subtiles Muster geht im Staub oft völlig unter.
6. *Prokonnesischer Marmor*. Für die Lichtverteilung im Raum vermutlich das wichtigste Material, da der Boden aus diesem Material besteht, der oft direktes Sonnenlicht und einen großen Teil des Himmelslichts erhält. Es konnten drei verwertbare Aufnahmen gemacht werden. Hier kann man zeigen, wie sich die gemessenen Durchschnittswerte für die Reflexionskoeffizienten von verschiedenen Aufnahmen unterscheiden: 0,37 0,37 0,33, 0,30 0,30 0,24 und 0,35 0,34 0,28. Der gewichtete Reflexionskoeffizient  $\rho_{\text{diff}}$  beträgt 0,37, 0,29 und 0,34. Aus den Werten kann man schließen, dass sich nicht nur die Helligkeit unterscheidet, sondern auch die Farbe. Das kann man anhand der korrigierten Bilder gut nachvollziehen. So ist nur im ersten Bild die charakteristische bläuliche Färbung der Äderung zu erkennen (Abbildung 7.7). Das zeigt die Grenzen der Methode, zumindest unter den beschriebenen Bedingungen. In der Tabelle findet sich der mittlere Wert, für das Modell wurden die unteren beiden Bilder gewählt, da sie farblich näher beieinander liegen.
7. *Pavonazzetto*. Die Probe stammt von der Wand des südwestlichen Nebenfeilers in der Westgalerie, die offenbar vor nicht allzu langer Zeit gereinigt wurde. Dort findet sich das Material in einer helleren und einer dunkleren Variante: 0,26 0,21 0,16 und 0,47 0,42 0,32. Die helle Variante ist das hellste Material unter den Marmorsorten. An den Wandflächen des Hauptraumes scheinen sich häufiger helle Exemplare zu finden.
8. *Cipollino rosso*. Die Probe stammt von derselben Wand wie der *Pavonazzetto* und wurde unter gleichen Bedingungen aufgenommen.
9. *Roter Porphy*. Die Probe stammt vom Boden aus dem Omphalion. Das Muster wurde separat an einer der Wände erfasst und nach der beschriebenen Methode ins Modell eingebunden.
10. *Cipollino verde* ist das wohl problematischste Material im Modell. Am südöstlichen Hauptfeiler konnte ein großflächiges Muster aufgenommen werden, allerdings im verschmutzten Zustand. Eine kleinere, weniger verschmutzte Fläche konnte nicht gefunden werden. Deshalb wurde der Kontrast der Bilder erhöht. Der Wert in der Tabelle könnte durch den Zustand deutlich verfälscht sein.

Der rote und grüne Porphy sind die dunkelsten Materialien und setzen sich deutlich ab. Der prokonnesische Marmor am Boden ist nach diesen Messungen nicht, wie Inanichi schreibt,



das Material mit dem höchsten Reflexionsgrad<sup>6</sup>, findet sich aber in der Gruppe der helleren Marmorarten. Der Marmor *celticum* und der *Verde antico* sind geprägt von einem großen Kontrast, nicht ganz so stark ist der Kontrast beim *Cipollino rosso* und *Pavonazetto*, dafür sind hier die Farbkontraste umso deutlicher. Das heißt auch, dass bei diesen Materialien an den Wänden die kräftig gefärbten Anteile deutlich hervortreten. Der Boden und die gelben Bänder aus *Onyx* haben deutlich geringere Kontraste.

Alle Materialien mit Ausnahme der *Porphy*-Sorten und des *Cipollino verde* zeigen Variationen unterschiedlicher Helligkeit und Musterung. Es konnte nicht systematisch nachvollzogen werden, ob diese Varianten gezielt eingesetzt wurden. Einige Entscheidungen lassen sich aber zeigen. So wurden auf dem Boden in den Seitenschiffen vorwiegend Platten vom prokonnesischem Marmor eingesetzt, deren Strukturen annähernd parallel zu den langen Kanten der Platten verlaufen. Dagegen zeigen die gespiegelten Platten des Hauptraums diagonale Muster. Der Kontrast der gespiegelten Platten des prokonnesischen Marmors hier und an den Wänden der Galerien hat einen spürbar höheren Kontrast als die Brüstungsplatten.<sup>7</sup>

In den Seitenschiffen ist die Materialverteilung auf den Wänden nicht vollständig modelliert worden. Die horizontalen Bänder sind mit den jeweiligen Materialien versehen, die Platten dazwischen sind allerdings durchweg mit prokonnesischem Marmor dargestellt. Eigentlich finden sich hier Platten aus *Verde antico* und *Pavonazetto*. Der *Verde antico* ist deutlich dunkler als die anderen Materialien. Daher wurde hier der durchschnittliche Reflexionsgrad der beiden Materialien verwendet.

## 7.4 Festlegung der Parameter *Specularity* und *Roughness*

Bei der beschriebenen Anwendung des *macbethcal*-Verfahrens wird davon ausgegangen, dass die Marmoroberflächen das Licht überwiegend diffus reflektieren. Sonst wäre mit größeren Abweichungen zu rechnen. Es muss also geprüft werden, ob diese Annahme richtig ist. Das heißt aber nicht, dass es gar keine spekulare Reflexion auf den Marmoroberflächen gibt. Inanici hat plausibel dargelegt, dass die Spiegelungen insbesondere im Fußboden charakteristisch für die Beleuchtung sind<sup>8</sup>. Es sind also Annahmen für die Parameter *Specularity* und *Roughness* zu machen, die mit *macbethcal* nicht ermittelt werden können.

Durch die Verschmutzungen ist der ursprüngliche Glanz nicht mehr fassbar. Es ist allerdings nicht völlig klar, ob die Platten ursprünglich glänzend waren. Mielsch geht davon aus, dass in römischer und byzantinischer Zeit die Oberfläche »nur matt, nicht spiegelnd glänzend« war, da »die durch die von Hand gearbeitete Politur leicht unregelmäßig war«.<sup>9</sup> Bitterer geht dagegen von einem ursprünglichen »polierte[n] Glanz der Oberfläche« aus und stellt heraus, dass dieser

---

<sup>6</sup> Inanici 2014, S. 178.

<sup>7</sup> Vielleicht ein Hinweis auf den bei Paulus genannten »bosporischen« Marmor.

<sup>8</sup> Inanici 2014, S. 177.

<sup>9</sup> Mielsch 1985, S. 16.

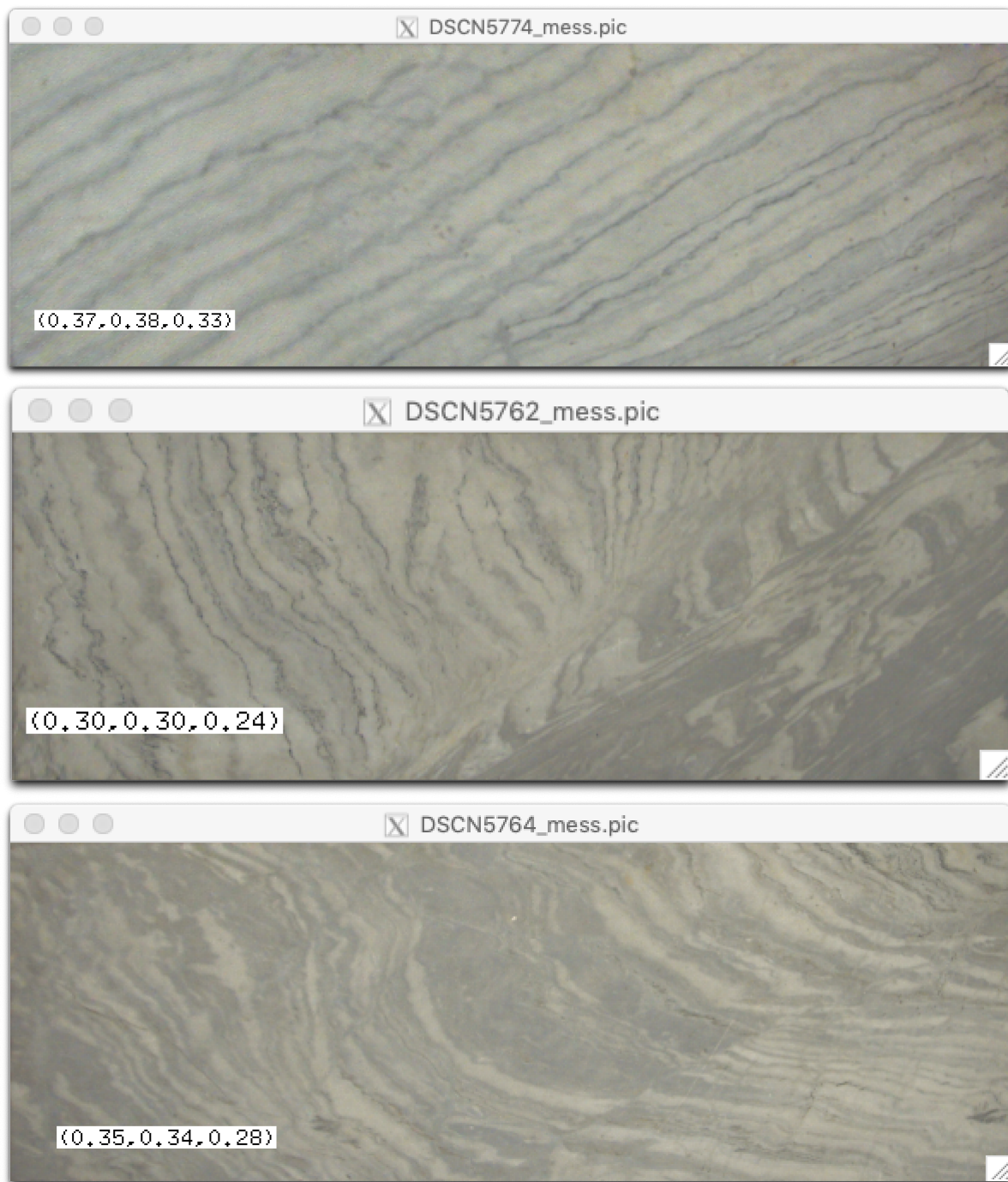


Abbildung 7.7: Mit dem macbethcal Verfahren korrigierte Bilder dreier Platten prokonnesischem Marmors, wie er am Boden des Hauptraums zu finden ist. Unten rechts jeweils die ermittelten durchschnittlichen Reflexionskoeffizienten für die Bildkanäle rot, grün und blau der gezeigten Flächen.

in den antiken Quellen als vorrangiges Charakteristikum beschrieben wird.<sup>10</sup> Er verweist auf einen Hinweis bei Plinius, das die Platten mit besonders feinem Sand aus Äthiopien oder Indien geschnitten werden, der durch eine eiserne Säge bewegt wird. Gröberer Sand macht das Polieren aufwendiger, wofür thebaischer Sand verwendet wird »sowie der aus Tuff- oder Bimsstein gewonnene«.<sup>11</sup>

Die Bilder der Marmoroberflächen in der Hagia Sophia zeigen unregelmäßige Bearbeitungsspuren, die bei weiterem Polieren vielleicht verschwunden wären, aber auch die spiegelnden Reflexionen konzentrierter Lichtquellen (Abbildung 7.8). Denkbar ist auch, dass sich die Behandlung der Oberfläche im Laufe der Zeit geändert hat, oder dass Renovierungsbemühungen den Oberflächencharakter verändert haben. Die gerade laufenden Reinigungsmaßnahmen resultieren in eigenartig hellen, matten Oberflächen.



Abbildung 7.8: Bearbeitungsspuren und Reflexionen auf den Marmoroberflächen. Auch in den Spiegelungen zeigen sich die Unebenheiten der Oberfläche. Zustand 2015.

In welchem Umfang die Oberflächen poliert wurden und der Zusammenhang von Arbeitsweisen und erzieltm Glanz lässt sich anhand der Literatur offenbar nicht klären. Um aber dennoch Annahmen für die offenen Parameter machen zu können wurde anhand industriell verarbeiteter Proben eines weißen Marmors exemplarisch überprüft, in welchem Rahmen sich die Werte bewegen können. Dazu wurde eine hochglänzend polierte und eine perfekt matte Probe (Abbildung 7.1(a)) goniophotometrisch für Einfallswinkel von  $\vartheta_i = 10^\circ$ ,  $\vartheta_i = 30^\circ$  und  $\vartheta_i = 50^\circ$  vermessen. Aus den Daten wurde ein Schnitt in der Ebene generiert, in der das einfallende und reflektierte Lichtes liegen (Abbildung 7.9).

<sup>10</sup> Bitterer 2013, S. 4.

<sup>11</sup> Plinius d. Ä., *Naturalis historia* 36.52-53f

Aus den Messungen für  $\vartheta_i = 10^\circ$  wurden in loser Anlehnung an die Methode nach DIN-Norm 5036<sup>12</sup> für Messungen mit der Ulbrichtkugel die Reflexionsgrade ermittelt (Tabelle 7.2). Dazu wurden die Messdaten der Reflexionshemisphäre bzw. einer Fläche von  $7^\circ$  um den Ausfallswinkel herum mit dem Programm *mountain*<sup>13</sup> integriert und durch den Integral der Referenzmessung geteilt. Die Deutsches Institut für Normung (DIN)-Norm macht Empfehlungen für die Größe der Ausfallsöffnung, die wesentlich kleiner ist. Der Öffnungswinkel entspricht hier  $1,15^\circ$ ). Zur Parametrisierung des Ward-Modells ist sie daher nur bei glatten Oberflächen nützlich. Der gewählte Öffnungswinkel von  $7^\circ$  erfasst gerade so den gesamten spekularen Peak, wie in Abbildung 7.9 sichtbar. Die DIN-Norm sieht eine Messung bei  $\vartheta_i = 8^\circ$  vor. Aufgrund der Geometrie der Messapparatur und des Peaks wurde ein etwas größerer Winkel gewählt.

Tabelle 7.2: Reflexionsgrade der Marmorproben, aus den Messdaten für  $\vartheta_i = 10^\circ$  nach DIN 5036 für Messungen mit der Ulbrichtkugel extrahiert.

Probe	Gesamtreflexionsgrad $\rho$	direkter Reflexionsgrad $\rho_d$
glänzender Marmor	55,3 %	5,6 %
matter Marmor	54,6 %	0,013 %

Aus den Ergebnissen kann man sehen, dass sich die Gesamtreflexionsgrade nur wenig unterscheiden. Auf die mit dem *macbethcal*-Verfahren ermittelten Werte kann man also mit den genannten Einschränkungen vertrauen. Die Spanne von 0 – 5,6 % für den direkten Reflexionsgrad kann für die Bestimmung des *Specularity* Parameters herangezogen werden.<sup>14</sup> Im Modell wurde ein Wert von 4 % für die *Specularity* angenommen.

Im Diagramm sieht man darüber hinaus, dass der direkte Reflexionsgrad mit größerem Einfallswinkel ansteigt. Auch die matte Probe bekommt dann eine Beule. Dieser Zusammenhang wird vom *plastic*-Modell mit Hilfe der Fresnelschen Formeln wiedergegeben.

Der letzten Parameter, die *Roughness* für den Marmor, lässt sich hier nur schätzen. Die Manpage gibt für diesen Parameter eine Spanne von 0 – 0,2 an, 0 wäre ein perfekter Spiegel, größere Werte stehen für seidenmatt glänzende Oberflächen. Die Abbildung 7.10 zeigt die Auswirkung verschiedener Werte für den *Roughness* Parameter. Vergleicht man diese mit den Reflexionen von Fenstern und Lichtquellen in Abbildung 7.8, so scheint ein Wert von 0,05 die Effekte am besten wiederzugeben.

<sup>12</sup> DIN 5036-3:1979 1979. Siehe Kapitel 6.

<sup>13</sup> Teil der Software des Goniophotometers PGII der Firma *pab advanced technologies Ltd*, Freiburg.

<sup>14</sup> Man beachte, dass der *Specularity* Parameter des *plastic* Materials bei der Berechnung zur diffusen Reflexion hinzugerechnet wird, der direkte Reflexionsgrad aber die gesamte Reflexion in Richtung der spekularen Reflexion umfasst. Zum Zusammenhang von *Specularity* und Messungen mit der Ulbrichtkugel siehe Larson, Shakespeare, Ehrlich u. a. 1998, S. 307. Werte von mehr als 6 % sind für Materialien vom Typ *plastic* ungewöhnlich. Siehe Larson, Shakespeare, Ehrlich u. a. 1998, S. 308.

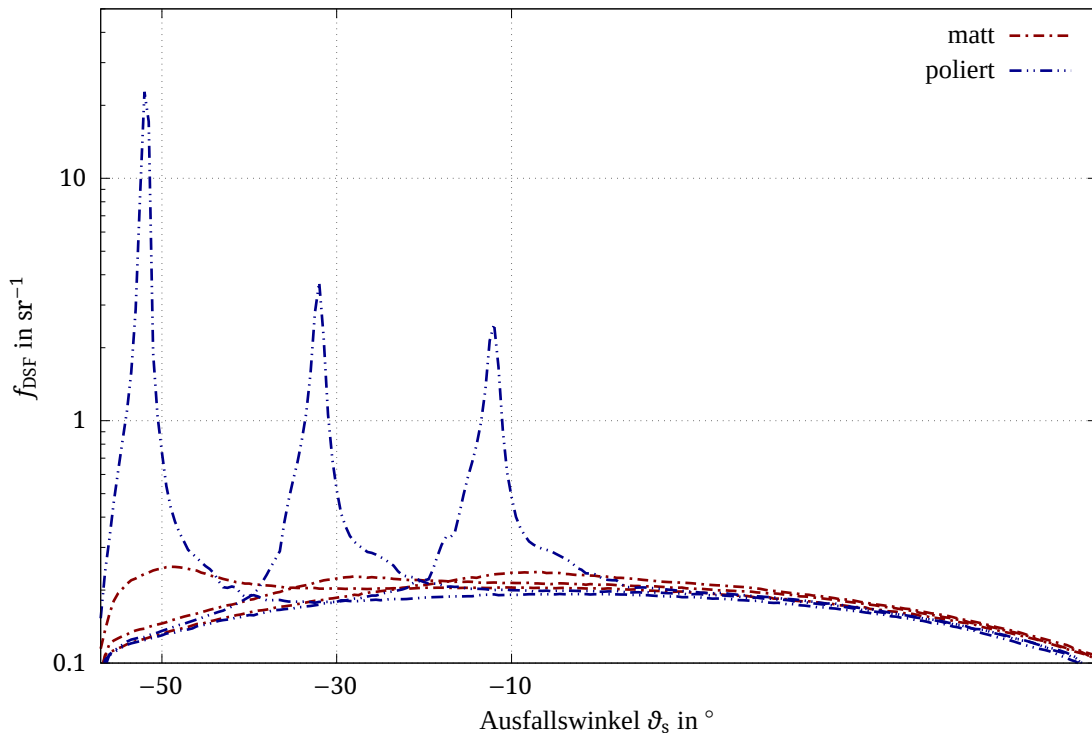


Abbildung 7.9: Gemessenes Reflexionsverhalten der polierten und matten Marmorproben im Vergleich: DSF in der Reflexionsebene ( $\varphi_i = 0^\circ$ ;  $\varphi_s = 0^\circ$ ) der Einfallswinkel von  $\vartheta_i = 10^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $50^\circ$  in logarithmischer Darstellung.

## 7.5 Materialmodelle für die vergoldeten und silbernen Bauteile

Für die Modellierung der vergoldeten und silbernen Oberflächenmaterialien gibt es am Bau keine Befunde. Daher wurde auf Literaturwerte zurückgegriffen. Bei Glassner finden sich spektrale Messungen für beide Materialien.<sup>15</sup> Hier wurde auf eine Kopie der Werte im MGF-Format<sup>16</sup> zurückgegriffen, die sich direkt in das RADIANCE meta l Materialmodell konvertieren lässt.<sup>17</sup>

Bleibt die Wahl für die Parameter *Specularity* und *Roughness*. Blanke Metalloberflächen haben einen spekularen Anteil von über 50 %<sup>18</sup> oft von mehr als 90 %<sup>19</sup>. Es wurden Varianten getestet und nach Sicht ein Wert von 80 % als realistisch eingeschätzt. Für die *Roughness*

<sup>15</sup> Glassner 1995, S. 1167 f.

<sup>16</sup> <https://floyd.lbl.gov/mgf/mat/glassner.tar.Z>.

<sup>17</sup> Lars O. Grobe hatte diese Quelle ausfindig gemacht und ins Modell übernommen.

<sup>18</sup> Larson, Shakespeare, Ehrlich u. a. 1998, S. 308.

<sup>19</sup> *The RADIANCE 5.1 Synthetic Imaging System* 2017.

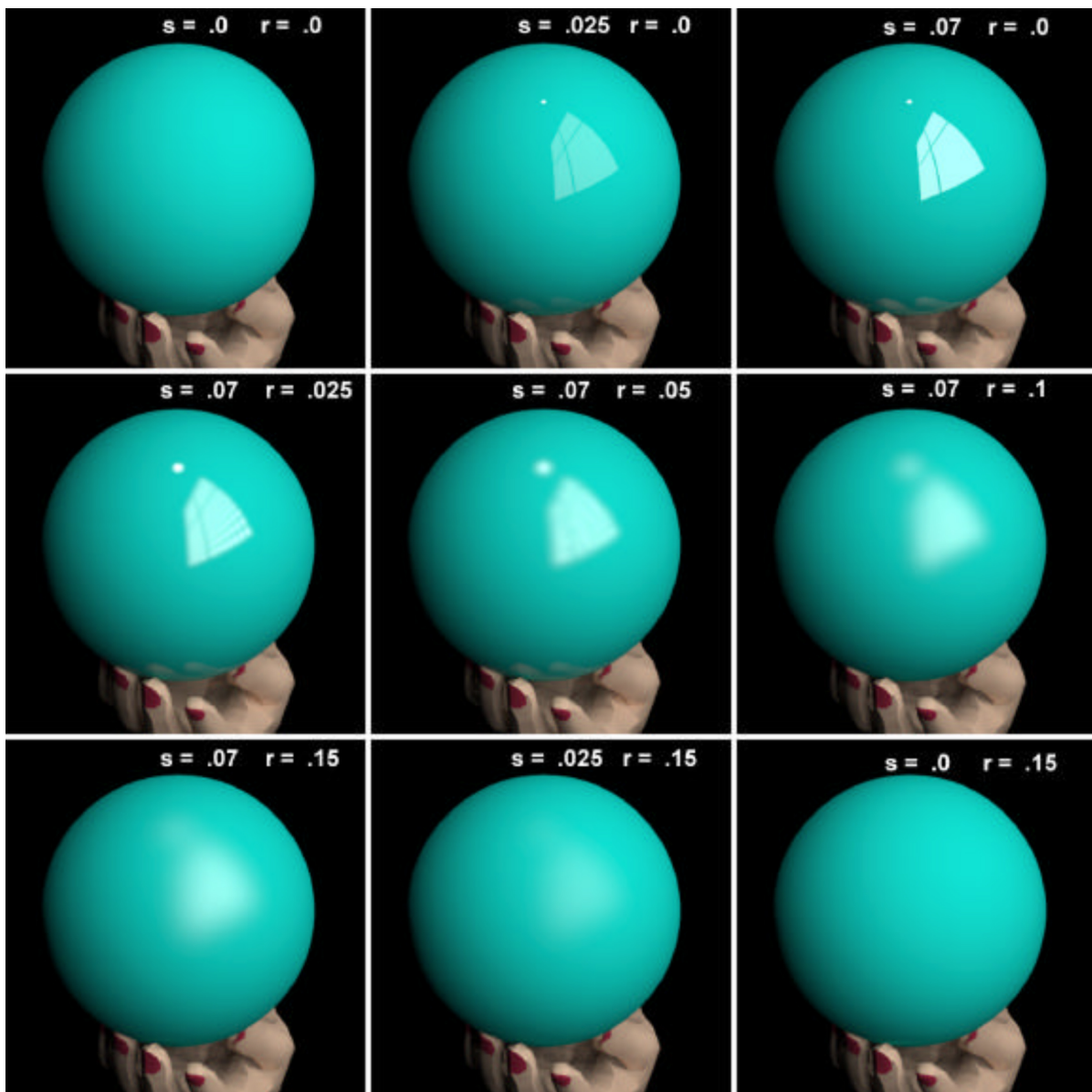


Abbildung 7.10: Verschiede Einstellungen für den Roughness Parameter. Quelle: Larson, Shakespeare, Mardaljevic u. a. 1998. © Robert Shakespeare

wurde der Wert so gewählt, dass beim Silber nahe Gegenstände noch zu erraten sind (0.02). Zusammenfassend ergibt sich Tabelle 7.3.

Tabelle 7.3: Parametrisierung der Materialmodelle für vergoldete und silberne Oberflächen

Material	red	green	blue	spec	rough
Gold	0.997303	0.781942	0.334048	0.8	0.02
Silber	0.970677	0.960545	0.910700	0.8	0.02

## 7.6 Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf

Die goniophotometrischen Messungen an den Marmorproben zeigen, dass der Marmor einfallendes Licht vorwiegend diffus reflektiert, folglich sind für die Berechnung der Beleuchtungsstärken vorrangig die diffusen Reflexionskoeffizienten von Bedeutung. Hierbei ist der Reflexionskoeffizient des Marmorbodens für die Genauigkeit der Berechnung von besonderer Relevanz, da er einen großen Teil des Lichts vom Himmel und häufig direktes Sonnenlicht erhält. Hier konnten Varianten aufgenommen werden, daher ist hier die Sicherheit größer und die Bandbreite der Messungen von  $\rho_{\text{diff}}$  zwischen 0,29 und 0,37 hilft bei der Eingrenzung der zu erwartenden Fehler. Die anderen Marmorsorten nehmen einen relativ geringeren Anteil an der Gesamtoberfläche ein. Auch wenn hier die Unsicherheiten größer sind, ist doch zu erwarten, dass sich die Fehler in der gleichen Größenordnung bewegen. Abweichungen von 10 – 20 % sind schwer wahrzunehmen.

*Specularity* und *Roughness* sind aufgrund des relativ geringen spekularen Anteils an der Reflexion von geringerer Bedeutung bei der Berechnung der Beleuchtungsstärken. Wo allerdings direktes Sonnenlicht spekulär reflektiert wird, können nahe liegende Oberflächen rund um den Ausfallswinkel zu viel oder zu wenig Licht erhalten. Die *Roughness* der Marmoroberflächen und die Streuung in den Fenstergläsern wirken diesem Fehler entgegen.

Die Leuchtdichten werden von den Fehlerquellen der diffusen Berechnung in gleicher Weise betroffen. Zusätzlich wirken sich Abweichungen in der *Specularity* besonders stark aus. Trifft das Auge reflektiertes Sonnenlicht von einer Marmoroberfläche mit der *Specularity* von 0,04 statt 0,02, so würde doppelt soviel Licht ankommen. Da die Ausgangsleuchtdichte der Lichtquelle im Vergleich zu den anderen Oberflächen sehr groß ist, bewirkt das einen wahrnehmbaren Unterschied. Je flacher der Einfallswinkel ist, je größer wird hierbei der absolute Fehler. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Ermittlung dieses Parameters kann die Berechnung folglich eher zeigen, wo hohe Leuchtdichten aufgrund spekulärer Reflexionen auftreten. Da der Parameter aus der oberen Menge der denkbaren Werte gewählt wurde, geben die berechneten Leuchtdichten in etwa die obere Grenze möglicher Werte an. Fehler bei der Parametrisierung der *Roughness* haben ähnliche Auswirkungen auf die Leuchtdichten. Ist der Wert zu hoch, sind die Leuchtdichten der Glanzlichter zu niedrig. Der Wert für die *Roughness* wurde daher eher niedrig gewählt, die Leuchtdichte wird also analog zur *Specularity* eher überschätzt.

Die Darstellung von Farbe und Kontrast der Marmorarten in den berechneten Bildern ist mit einer gewissen Skepsis zu betrachten. Sicher liegt der vermittelte Raumeindruck aber deutlich näher am ursprünglichen Zustand als der im heutigen Gebäude. Die Restaurierungen der letzten Jahre ändern das aber Stück für Stück.

Schließlich gibt es noch subtilere Abweichungen in der Darstellung des Marmors. Zunächst wären die individuellen Muster der einzelnen Platten zu nennen. Alle Oberflächen sind im Computermodell vollkommen eben und ohne die kleinsten Fehlstellen, Risse oder Bearbeitungsspuren. Beim Sägen der Platten und bei der handwerklichen Weiterverarbeitung kommt es aber sicher zu Unebenheiten und anderen Unregelmäßigkeiten. Zudem fehlen dem Modell die feineren plastischen Details der Blattwerke in den Kapitellen und den *À-jour*-Arbeiten. Marmor ist ein natürliches Material und daher nicht frei von Fehlstellen und Rissen. Im Fall der Säulen ist darüber hinaus mit der Verwendung von Spolien auszugehen, die Spuren ihrer ursprünglichen Verwendung tragen. Diese Charakteristika prägen durchaus den Eindruck von Raum und Oberflächen.

Die numerischen Abweichungen des *macbeth chart*-Verfahrens ließen sich reduzieren, z. B. durch Messungen mit einem Reflexions-Spektrometer und modernes Colormanagement im Zusammenhang mit bekannten Lichtquellen. Mit Polarisationsfiltern ließen sich Reflexionen auf den Messflächen vermeiden. Die eigentliche Unbekannte ist aber in den Oberflächen selbst und ihrem heutigen Zustand zu sehen. Eine systematische Erfassung der Variationen des Marmors im Gebäude und die Reinigung der Probestellen ist dazu unabdingbar. Auch weniger gut erreichbare Flächen müssten erfasst werden. Alternativ könnte man die Zusammenstellung eines Katalogs der im ganzen römischen Reich verwendeten Marmorarten und ihren Variationen denken, dessen Reflexionskoeffizienten und Muster digital erfasst werden. Dann würde man die Oberflächen im Gebäude den Materialien im Katalog zuordnen können. Ein solcher Katalog wäre auch für andere Bauten nutzbar.<sup>20</sup>

Hier werden der Literatur folgend, die *Buntmarmore* als einheitliche Materialgruppe beschrieben und behandelt.<sup>21</sup> Tatsächlich sind die Buntmarmore aber sehr unterschiedliche Gesteine. Das heißt, sie sind das Ergebnis unterschiedlicher geologischer Umformungsprozesse die zu unterschiedlichen Materialeigenschaften führen. Die Petrologie nimmt hier Unterscheidungen vor, an der sich eine weitere Erforschung der optischen Eigenschaften orientieren kann. So dringt das Licht in die homogenen, harten Oberflächen der Porphyrsorten, offenbar nicht allzu tief ein. Die hellen Marmorarten sind dagegen durchscheinend, der Onyx hat fast glasartige Eigenschaften. Brekzien oder Konglomerate bestehen aus verschiedenen Ausgangsgesteinen, die unterschiedliche optische Eigenschaften während der Metamorphose beibehalten können. Ein Beispiel sind die dunklen Einschlüsse im *Verde antico* (Abbildung 7.6). Verbesserte Materialmodelle auf Basis systematischer Messungen der einzelnen Steinarten sollten die Unterschiede zwischen den Gesteinsarten und innerhalb der Gesteine wiedergeben<sup>22</sup>.

---

<sup>20</sup> Earl u. a. 2013 beklagt den Mangel an verfügbaren Modellen.

<sup>21</sup> Z.B. Mielsch 1985.

<sup>22</sup> Dafür wären Methoden zu entwickeln, die *Spatially Varying Bidirectional Reflectance Distribution Function* (SVBRDF) zu messen, z. B. auf Basis von: Ren u. a. 2011; Dong u. a. 2010; Li, Sunkavalli und Chandraker 2018.



Damit Verbesserungen der Erfassungsmethoden und Materialmodelle für die historischen Bau- forschung wirklich nützlich sind, ist der Zusammenhang mit der Erforschung des historischen Produktionskontexts entscheidend. Gemeint ist eine genauere Untersuchung der handwerk- lichen und künstlerischen Herangehensweise in Bezug auf die räumliche Verwendung der einzelnen Materialien im Bau und die Herstellung gewünschter Oberflächeneigenschaften. Letzteres ist hierbei als eine Auseinandersetzung mit den natürlichen Materialeigenschaften aufzufassen. Auch die Veränderung der Materialien über die Zeit durch Alterung, Pflege, Re- paratur muss in diesem Zusammenhang erforscht werden. Die Oberflächen sind als Artefakte menschlichen Wirkens zu betrachten, deren ursprünglicher Zustand analog zur Gebäudegeome- trie zu *rekonstruieren* ist. Messung und Simulation sind wertvolle Methoden für diese Aufgabe. (Abbildung 7.11).

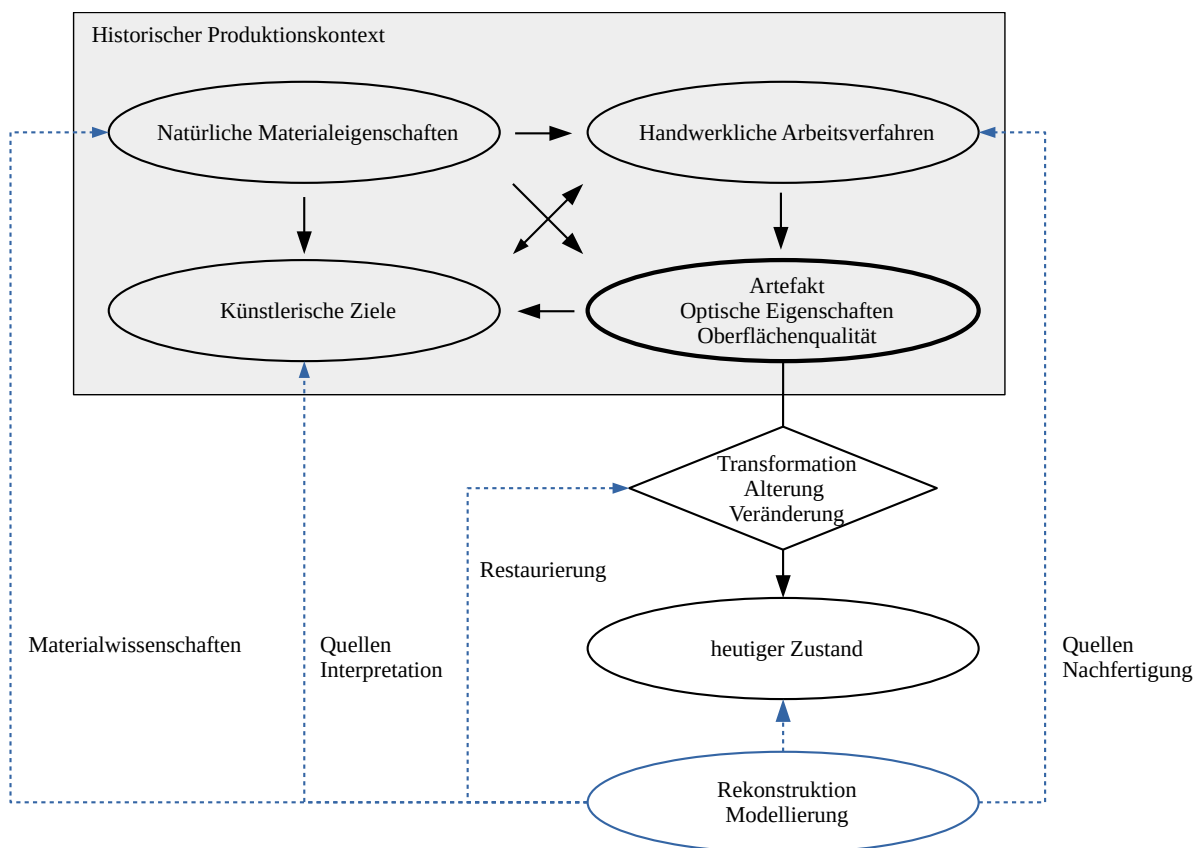


Abbildung 7.11: Rekonstruktion der Oberflächeneigenschaften als Rekonstruktion des historischen Produktionskontexts.

Das Eindringen des Lichts in das Volumen der Marmoraterialien legt eine Untersuchung des Subsurface scattering (SSS) nahe.