

**Unterstützung der Material- und Produktauswahl
in der Architektur
durch Plausibilität der Entscheidung**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Architektur

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christoph Spiekermann

geb. 08.11.1968

Weimar, März 2008

**Unterstützung der Material- und Produktauswahl
in der Architektur
durch Plausibilität der Entscheidung**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Architektur

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christoph Spiekermann

geb. 08.11.1968

Weimar, März 2008

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Dirk Donath

Prof. Dr.-Ing. Claus Dießenbacher

Tag der Disputation:

22. 09. 2008

»Es ist wichtig, das Material zu verstehen, das man verwendet.«
(Louis I. Kahn)

Inhaltsverzeichnis

0. Abstract	1
1 Motivation und Einführung.....	2
1.1 Material und Architektur	4
1.1.1 Die Oberfläche als Medium der Architektur	5
1.1.2 Das Verhältnis von Form und Material.....	7
1.1.3 Der Einsatz neuer Materialien in der Architektur	9
1.1.4 Der Trend zur emotionalen Seite des Materials.....	11
1.2 Das Problem der Materialwahl	13
1.2.1 Unzureichende Such- und Informationsmöglichkeiten	13
1.2.2 Fehlende Bewertungsmöglichkeiten.....	14
1.2.3 Die Unterstützung der Entscheidung	15
1.3 Aufbau der Arbeit	16
1.3.1 Zielsetzung.....	16
1.3.2 Definition des Begriffs „Material“	18
1.3.3 Struktur der Arbeit.....	19
I Die Materialwahl	
2 Der Prozess der Materialwahl.....	22
2.1 Der Zeitpunkt der Materialfestlegung	22
2.2 Die Basis des Materialwissens.....	24
2.2.1 Inspirations- und Informationsquellen.....	25
2.2.2 Zugriffsmöglichkeiten auf die Wissensbasis.....	26
2.3 Strategien bei der Auswahl.....	28
2.4 Unterstützung der Materialwahl	31
3 Digitale Techniken bei der Materialwahl.....	33
3.1 Digitale Darstellung von Material.....	34
3.1.1 Alphanumerische Beschreibung von Material	34
3.1.2 Grafische Darstellung von Material	35
3.1.3 Visualisierung von Material.....	38
3.1.4 Übernahme von Materialdaten in die CAD-Umgebung.....	41
3.1.5 Darstellung von Produkten in „virtual showrooms“	44
3.1.6 Augmentierte Darstellungen von Material	46
3.1.7 Darstellung haptischer Materialeigenschaften	48
3.2 Digital gestützte Materialsuche	51
3.2.1 Suche nach harmonischen Farbkonzepten	51
3.2.2 Suche in Werkstoff-Datenbanken	54
3.2.3 Unterstützung der Produktsuche	55
3.2.4 Studien zu einer umfassenderen Materialwahl	58
3.3 Digitale Individualisierung von Material.....	59
3.4 Der integrierte Gesamtprozess	61
3.4.1 Zusammenfassung der Problemstellung.....	61
3.4.2 Vision eines zukünftig möglichen Gesamtprozesses.....	62

II Die Entscheidungskriterien

4	Unterteilung der Entscheidungskriterien.....	66
4.1	Beteiligte an der Auswahl.....	66
4.2	Unterteilung der Kriterien nach Relevanz	68
4.2.1	Absolut wichtige KO-Kriterien	68
4.2.2	Relativ wichtige Kriterien.....	68
4.3	Material-Klassifikation.....	69
4.3.1	Traditionelle Klassifikationssysteme.....	69
4.3.2	Eine Alternative zu starren Klassifikationssystemen.....	71
5	Kriterien bei der Materialwahl	73
5.1	Festlegung der Kriterien	73
5.1.1	Sinnliche Kriterien.....	74
5.1.2	Technische Kriterien.....	77
5.1.3	Ökonomische Kriterien.....	80
5.1.4	Ökologische Kriterien.....	82
5.1.5	Subjektive Kriterien.....	82
5.2	Hierarchische Struktur	83
5.3	Definition des ausschlaggebenden Kriteriums.....	85

III Das Verfahren

6	Ranking aller Materialien	88
6.1	Daten vorliegender Materialeigenschaften.....	88
6.1.1	Das Spektrum möglicher Daten.....	89
6.1.2	Mögliche Wege der Datenerzeugung.....	91
6.1.3	Skalenniveau der Entscheidungskriterien	95
6.2	Festlegung des Zielwerts	101
6.2.1	Übernahme vorhandener Werte.....	101
6.2.2	Manuelle Werteingabe	102
6.2.3	Interfacegestaltung.....	104
6.3	Festlegung der Gewichtung.....	106
6.3.1	Unterscheidung nach Kriterien.....	106
6.3.2	Direkte Eingabe für jedes einzelne Kriterium	107
6.3.3	Hierarchisch aufgebaute Paarvergleiche.....	108
6.3.4	Vereinfachte Eingabe in hierarchischer Struktur	109
6.4	Berechnung der Einzelunähnlichkeit.....	111
6.4.1	Angabe der Unähnlichkeiten	111
6.4.2	Prinzipielle Berechnung von Unähnlichkeiten	112
6.4.3	Individuelle Modifikationen	114
6.5	Berechnung der Gesamtunähnlichkeit	116
6.5.1	Ermittlung der Gesamtdistanz.....	116
6.5.2	Umgang mit nicht vorliegenden Daten	117
6.5.3	Umgang mit KO-Kriterien	118
6.6	Diskussion des Rankings.....	119
7	Zusätzliche Analyse des Ergebnisses.....	122
7.1	Multidimensional Scaling	122
7.1.1	Unterschiedliche Arten von MDS.....	123
7.1.2	Berechnungsziel Stressminimierung.....	124
7.1.3	Berechnungsverfahren	125
7.1.4	Dimensionalität des Ergebnisraums	127

7.2	Statische Untersuchung.....	128
7.2.1	Analyse der Ergebnisqualität	129
7.2.2	Interpretation des Ergebnisses.....	131
7.3	Dynamische Untersuchung	133
7.3.1	Manipulation der Auswahl der Elemente.....	134
7.3.2	„What-If“-Strategie.....	136
7.3.3	Browsen.....	137
7.3.4	Protokollierung des Verlaufs.....	137
7.3.5	Probleme dynamischer Verfahren bei MDS.....	138
7.4	Diskussion des Multidimensional Scaling.....	139
8	Prototyp.....	141
8.1	Verwendete Software.....	141
8.2	Materialdaten	142
8.3	Eingabe	143
8.4	Berechnung.....	145
8.5	Ausgabe.....	147
8.6	Beispiel.....	149
9	Schlussbetrachtung.....	156
9.1	Zusammenfassung.....	156
9.2	Diskussion besonderer Kritikpunkte	158
9.3	Fazit	161
9.4	Ausblick	162
Anhang A.....	165	
A.1	Glossar.....	166
A.2	Abbildungsverzeichnis	169
A.3	Formelverzeichnis.....	175
A.4	Quellenverzeichnis	176
A.5	Im Prototyp verwendete Software.....	188
A.6	Weiterführende Quellen.....	189
	Inspirations- und Informationsquellen.....	189
	Materialdatenbanken im Web.....	190
	Virtual showrooms	192
	Produktkonfiguratoren.....	192
	Interaktive MDS-Anwendungen	192
Anhang B	193	
B.1	Berechnung Farbreduktion und -ähnlichkeit	194
B.2	Screenshots zum Berechnungsbeispiel im Prototyp	196
Thesen	A	
Curriculum Vitae	D	
Tabellarischer Lebenslauf.....	D	
Veröffentlichungen	D	
Ehrenwörtliche Erklärung	E	
Danksagung.....	F	

Architektur wird vorwiegend über die den Raum begrenzenden Oberflächen wahrgenommen. Das Oberflächenmaterial kann daher mit seinen sinnlichen Eigenschaften die Entwurfsintention unterstützen, zugleich muss es aber auch zahlreiche technische, ökonomische und ökologische Anforderungen erfüllen. Materialwahl in der Architektur bedeutet somit das Abwägen einer Vielzahl von Parametern, die sich sowohl inhaltlich als auch hinsichtlich ihrer Relevanz stark unterscheiden.

Problemstellung

Die Entscheidung für ein Material kann dabei durch verschiedene analoge und digitale Ansätze unterstützt werden. Die vorhandenen Systeme sind jedoch allesamt begrenzt: in den von ihnen berücksichtigten Aspekten, den möglichen Suchwegen oder ihren Inhalten. Keines der in dieser Arbeit untersuchten Systeme berücksichtigt zudem die unterschiedliche Wichtigkeit oder gegenseitige Abhängigkeiten und Unschärfen der in die Materialwahl einfließenden Kriterien.

Lösungsvorschlag

Die vorliegende Arbeit formuliert daher eine Gesamtstrategie zur besseren Unterstützung der Entscheidung für ein Oberflächenmaterial.

Im Wesentlichen wird dabei eine Methode vorgestellt, wie die inhaltlich höchst unterschiedlichen Kriterien, welche Einfluss auf die Materialwahl ausüben, mit ihrer jeweiligen Relevanz gegeneinander in Ansatz gebracht werden können, um eine umfassende Bewertung der Materialalternativen zu ermöglichen. In einem zweiten Schritt wird mit Multidimensional Scaling eine Technik der Informationsvisualisierung benutzt, die eine zusätzliche Unterstützung durch weitere Analysemöglichkeiten und andere Suchwege eröffnet. Das vorgeschlagene Verfahren ist in einem Software-Prototyp umgesetzt.

Ziel

Die Arbeit soll damit einen Beitrag leisten, die Auswahl eines geeigneten Materials in der Architektur zu erleichtern, diese Entscheidung plausibel begründen zu können und den Weg der Entscheidungsfindung nachvollziehbar werden zu lassen.

Motivation und Einführung

»To be interested in materials is to ask questions about the nature of the real in contemporary culture, in all of its complex and contradictory dimensions. To understand a building material at this level, it is necessary to become familiar with its physical characteristics and the associations inherent in its cultural history - with the ways in which a material is used, perceived and remembered within the larger contexts of its production.«

[Kennedy 2001, S.12]

Wie kommt man dazu, sich als Architekt wissenschaftlich mit Such- und Bewertungsstrategien bei der Suche von Oberflächenmaterialien in der Architektur zu beschäftigen?

Die Antwort ist – wie das Thema selbst - vielschichtig und vielleicht nur in der Summe aller Teile zu verstehen:

Freude am Material

Ein Teil der Antwort liegt bereits im Thema „Material“ selbst: Das Wissen als fühlender Mensch und als Architekt, wie sehr bestimmte Materialien in der Umgebung das Wohlbefinden beeinflussen können, die Freude, ausdrucksstarke Materialien anzuschauen oder zu berühren, aber auch immer wieder aufs Neue das Staunen bei der „Entdeckung“ neuer Materialien mit vorher nicht gekannten Eigenschaften und Effekten.

Diese hier nur knapp angerissenen Punkte zum Thema Material und Architektur werden in Kapitel 1.1 als wesentlicher Teil der Einführung in das Thema weiter ausgebreitet.

Digitale Materialien

Ein zweiter, nicht zu verleugnender Teil der Antwort liegt in der jahrelangen Beschäftigung mit Techniken der Architekturvisualisierung und der Erstellung zahlreicher Visualisierungen im Rahmen der eigenen Berufsausübung als Architekt:

Jedes im Rendering verwendete „Material“ muss dabei in all seinen Parametern so eingestellt werden, dass das digitale Bild den realen Materialeindruck möglichst gut wiedergibt. Hierzu bedarf es einer vorherigen intensiven Beschäftigung mit jeweils charakteristischen Materialeigenschaften, die dann - teilweise deutlich überzogen - herausgearbeitet werden können. Selbstverständlich gibt es auch im Bereich der „digitalen Materialien“ immer wieder faszinierende Neuentwicklungen zu entdecken.

Einige der heutzutage nutzbaren Visualisierungstechniken werden - unter dem Blickwinkel einer möglichen Entscheidungsunterstützung - in Kapitel 3 näher beschrieben.

Probleme der Baupraxis

Weniger von Faszination als von einer gewissen Hilflosigkeit geprägt sind dagegen die Probleme, mit denen ich mich selbst als planender Architekt und im Austausch mit zahlreichen Kollegen in der Praxis allzu oft konfrontiert sah:

Häufig stellt sich nämlich die Frage, mit welchen Bauprodukten eine Entwurfsidee am besten umgesetzt werden kann. Wie trifft ein Architekt diese Entscheidung für eine bestimmte Oberflächenausführung?

Die Suche nach Bauproduktinformationen führt dabei – auch oder vielleicht gerade im Zeitalter des Internets – zu oftmals nicht untereinander vergleichbaren und somit wenig tragfähigen Aussagen. Die notwendige Entscheidung für eine bestimmte Ausführung erfolgt letztlich dann oft doch wieder nur „aus dem Bauch heraus“. Eine „Begründung“ - gegenüber dem Bauherrn, aber auch für sich selbst - wird notfalls „zurechtgebogen“. Ein für mich sehr unbefriedigendes Vorgehen, was die immer wiederkehrende Frage aufwirft, ob das zwangsläufig so sein muss. Diese Problematik der Materialsuche und -auswahl wird in Kapitel 1.2 näher ausgeführt.

Suche nach Lösungen

Seit Beginn meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Informatik in der Architektur der Bauhaus-Universität Weimar ist es nun meine Aufgabe, für ausgemachte Probleme im Prozess einer Bauplanung Lösungen zu suchen. Die ständige Recherche nach nützlichen Techniken und Methoden - auch aus fachfernen Gebieten - sowie der regelmäßige kollegiale Austausch über entdeckte Softwaretools mit einer möglichen sinnvollen Anwendung in Entwurf und Planung gehört dabei zu den selbstverständlichen Tätigkeiten.

Das Thema „Plausibilität im Planungsprozess“ – also die Nachvollziehbarkeit und Begründbarkeit von Planungsentscheidungen - ist dabei die Klammer, die alle am Lehrstuhl betreuten Forschungstätigkeiten zusammenhält. Unter diesem Schlagwort werden unterschiedlichste Ansätze verfolgt, »eine durchgehende und zugleich sinnvolle digital gestützte Planungstätigkeit« [infAR 2007] zu erreichen.

Vorgehensweise

Auch die vorliegende Arbeit soll einen kleinen Beitrag liefern, einen vielleicht recht speziellen, aber dennoch nicht unwichtigen Ausschnitt der gesamten Architekturplanung mittels digitaler Techniken zu verbessern:

Es wird ein Weg skizziert, wie die Materialwahl in der Architektur, also die Entscheidung für eine bestimmte Materialausführung, sinnvoll unterstützt werden kann. Als wesentliches - wenn auch nicht als einziges - Element einer möglichen Unterstützung wird dabei versucht, den eigentlichen Entscheidungsprozess möglichst plausibel, nachvollziehbar und begründet abzubilden.

Die Basis dieser gewählten Vorgehensweise sowie der konkrete Aufbau der Arbeit werden in Kapitel 1.3 dargelegt.

Eine Arbeit im Bereich Architekturinformatik bewegt sich - ähnlich wie die Architektur selbst - inhaltlich im Spannungsfeld zwischen Kunst und Technik. Beiden Blickrichtungen muss entsprochen werden, zwischen beiden Sichtweisen soll vermittelt werden.

Hinsichtlich Länge und Tiefe der einzelnen Ausführungen wird daher immer versucht, das notwendige Maß zu finden, welches noch ausreicht, den vorliegenden Sachverhalt fachlich korrekt und präzise wiederzugeben, aber dennoch so knapp zu formulieren, dass die Arbeit in ihren Kernaussagen und in ihrem „roten Faden“ leicht verständlich lesbar bleibt. Dem eher künstlerisch ausgerichteten Architekten mögen einige Ausführungen in der Arbeit vielleicht zu technisch, dem Informatiker bzw. Ingenieur dagegen einige Formulierungen eher zu pauschal oder zu schwammig erscheinen. Ich lasse mich jedoch bewusst auf diese Gratwanderung ein, da ich davon überzeugt bin, dass nur eine von beiden Seiten nachvollziehbare Strategie die Chance auf gemeinsame Anerkennung und die eventuelle Realisierung einer im größeren Rahmen anwendbaren Software mit sich bringt.

1.1

Material und Architektur

»Now the subject of Material is clearly the foundation of architecture, and perhaps one would not go very far wrong if one defined architecture as the art of building suitably with suitable material.«

[Morris 1891]

Die gebaute Umwelt besteht als Teil der physikalischen Welt selbstverständlich immer aus „Material“. Mit schätzungsweise mehr als 75% allen jemals durch den Menschen gewonnenen Materials gelten - vergangene und noch existierende - Städte mit Abstand als größte Materialverbraucher in der Menschheitsgeschichte. [Fernandez 2006, S.7].

» [...] design intention and the material world coexist as an animated assertion of possibilities made physical. Designers understand that a fundamental step in design involves the translation of intention into material form.«

[Fernandez 2006, S.10]

Die Sichtweise eines Gestalters, ein Bauwerk sei »Übersetzung einer Entwurfsintention in eine materielle Form« [Fernandez 2006, S.10], ist dagegen viel ganzheitlicher zu verstehen, sie weist weit über die rein physikalische Bedeutung von Material als Baustoff hinaus: Selbstverständlich spielt in der Betrachtung eines Materials - neben seinem offensichtlichen technisch-konstruktiven und somit eher ingenieurmäßig bewerteten Einsatz - immer auch die gestalterisch-künstlerische Perspektive eine entscheidende Rolle. Materialien sprechen in der Wahrnehmung alle Sinne an. Dabei kann durch das Spiel mit Bedeutungskontexten eine bestimmte Atmosphäre bewusst erzielt werden, die Gesamtwahrnehmung eines Entwurfs wird bestimmt durch das Spannungsverhältnis zwischen Form, Konstruktion und Material.

Unzählige neue Materialien und Materialkombinationen, aber auch die »genüssliche Inszenierung traditioneller Baustoffe« [Schittich 2006, S.586] und Verarbeitungstechniken eröffnen dabei heutzutage nahezu unbegrenzte Entfaltungsmöglichkeiten, „anything goes.“ Der gestalterische Ausdruck ergibt sich nicht mehr zwangsläufig aus der Form, sondern kann und muss eigenständig geplant und entworfen werden [Doveil 1994, S.67]. Diese Freiheit des Mate-

rialeinsatzes kann beim Betrachter - manchmal bewusst eingesetzte - Irritationen hervorrufen. Sie führt aber verstärkt auch beim Planer zu Unsicherheiten bei der Wahl des „richtigen“ Materials.

1.1.1

Die Oberfläche als Medium der Architektur

»Indeed, a material's surface, its skin, is what guides our senses in our perception of walls, floors and roofs and, ultimately, of spaces.«

[Vollard 2004, S.9]

»Oberflächen sind dabei der direkte Mittler zwischen Mensch und Architektur: Hier berührt und fühlt man ein Gebäude.«

[Sauer 2005]

Architektur wird – unabhängig davon, ob sie sich eher nach außen als Baukörper oder aber nach innen als Zwischenraum darstellt – im Wesentlichen über die begrenzenden Oberflächen wahrgenommen. Diese „Haut“ eines Bauwerks ist das vermittelnde Medium zwischen Mensch und Architektur. Die Oberflächen prägen in Ihrer Materialität den Charakter der Innen- und Außenräume.

Rund 90 % der Informationsreize des Menschen basieren auf dem Sehsinn [Hegger 2006, S. 652]. Dieser erlaubt als Fernsinn auch die Wahrnehmung weiter entfernter oder nur mittelbar erlebbarer Gebäudeteile. Für die Gesamtwahrnehmung eines Raumcharakters ist primär also das Aussehen des Oberflächenmaterials entscheidend.

Neben dem Sehsinn werden durch Bauwerke aber auch alle weiteren Sinne angesprochen. Die Art der Oberflächen wirkt sich z.B. auch auf die akustische Qualität eines Raums oder auf die gefühlte Behaglichkeit aus. *»Die Summe der Faktoren, die ein Material ausstrahlt und reflektiert, beeinflusst nicht nur unsere Sinne, das Psychische, sondern auch unser biologisches, organisches Leben«* [Neutra 1966, S.13].

Ästhetische Qualität eines Materials

»Seeing, smelling and 'hearing' these elements not only enables us to register them individually, but also unlocks a virtually limitless range of potential meanings and references which obviously transcend the domain of the purely technical.«

[Vollard 2004, S.9]

Über diese *»unmittelbar an ihren objektiv oder auch durch sinnlich-praktischen Umgang feststellbaren«* Eigenschaften hinaus wird ein Material weiterhin in seinen ästhetischen Qualitäten wahrgenommen und somit in seiner Gesamtheit *»atmosphärisch erfahren«* [Böhme 1994, S.85]. Böhme spricht dabei von Qualitäten, die verschiedenen Sinnesbereichen zuzuordnen sind, also vom *»synästhetischen Charakter«* eines Materials, der geradezu *»leiblich«* gespürt werden kann. *»Die ästhetische Qualität eines Materials ist die charakteristische Weise, in der man es empfindet«* [Böhme 1994, S.86].

Dieses Empfinden beruht letztlich auf subjektiven oder kulturellen Bedeutungszuweisungen. Das Wahrgenommene wird also mit vorherigen Erfahrungen abgeglichen und übersteigt somit den Bereich des objektiv Messbaren. Menschen verschiedener individueller oder kultureller Hintergründe können also auf die objektiv gleiche Oberfläche unterschiedlich reagieren.

Zunehmende Wertschätzung der Oberfläche

Das Material - oder genauer: die Wertschätzung, die ein Bauwerk vorwiegend aufgrund des Materialeinsatzes erfährt - spielte in der Architekturgeschichte bis in die jüngste Vergangenheit eine untergeordnete Rolle und wurde kaum thematisiert. Dies lässt sich einfach begründen mit einer eingeschränkten Auswahl bzw. Beschaff-

barkeit an möglichen Baustoffen (Naturstein, Ziegel, Holz), denen zudem nur eine dienende Rolle zugewiesen wurde [Schittich 2006, S.586].

»The broad proliferation of curtain wall systems allowed the disconnection of the façade material from the building's structure and infrastructure, freeing the material choice from utilitarian functions so that the façade could become a purely formal element.«

[Addington 2005, S.3]

»Mit seiner ganzen Vielfalt an Möglichkeiten ist das Thema Oberfläche heute so spannend wie selten zuvor. Eine ungemaine Freude am Experiment ist allerorts zu sehen, Grenzen werden ausgelotet, überlieferte Sehgewohnheiten in Frage gestellt, neue Materialien und Konzepte erprobt.«

[Schittich 2005, S.13]

»Ein Großteil der gesamtgesellschaftlichen Arbeit ist ästhetische Arbeit oder Inszenierungsarbeit.«

[Böhme 1994, S.93]

»Um unter der Flut von Eindrücken Aufmerksamkeit zu erzielen, sind inszenierte Stimmungen von Material und Oberflächen gefragt.«

[Schittich 2006, S.587]

»The material qualities of contemporary surfaces that are the most intriguing are precisely those that are the most unstable, that put into question the singularity of material properties and the absoluteness of material definitions.«

[Kennedy 2001]

»In einer Zeit, in der kaum noch ein Tabu zu brechen ist, besteht für Architekten und Designer ein besonderer Anreiz darin, durch die ungewohnte Anwendung von Materialien mit den herkömmlichen Sehweisen zu spielen und diese aufzulösen.«

[Heilmeyer 2006]

Dieser eher beiläufige Blick auf das Oberflächenmaterial ändert sich erst durch eine Reihe von technischen Entwicklungen: Ausgehend von der konstruktiven Trennung von Tragelementen und bekleidender Haut, die eine freiere und individuellere Gestaltung der Oberflächen ermöglichte, geht der Weg über die Entwicklung unzähliger neuartiger Bauelemente und Verarbeitungstechniken bis hin zu heute verbreitet Anwendung findenden Individualmustern, die - z.B. durch Digitaldruck oder Rapid Prototyping-Technologien - industriell und kostengünstig herstellbar sind.

Im Bauwesen wurde schon immer kreativ mit neuen Techniken experimentiert. Viele Entwicklungen haben - nach einer Phase des Erprobens - verbreitet Einzug in die Architektur genommen und diese entsprechend geprägt. Die heutigen technischen Möglichkeiten erlauben nun als Resultat der genannten Entwicklung, die Haut eines Gebäudes oder eines Raums unabhängig und individuell zu planen. Es ist daher festzustellen, dass die Materialität einer Oberfläche in der Architektur heute eigenständig festgelegt werden kann und muss.

Gefahr der Oberflächlichkeit

Gebäude werden zunehmend als Markenzeichen oder Werbeträger gebaut und genutzt. Der individuelle Gestaltungsspielraum bei Grundrissorganisation und Raumgestaltung ist dabei oftmals durch den Einfluss von Projektsteuerern und Finanzcontrollern stark eingeschränkt. Um sich trotz üblicherweise herrschenden Kostendrucks von Konkurrenten auf dem Markt abzuheben, bleibt als einzige Möglichkeit, *»die Möglichkeiten von Material und Oberfläche zu nutzen, um Kreativität zu zeigen und dem Bau Identität zu verleihen«* [Schittich 2006, S.586]. Fassaden und Oberflächen werden also regelrecht inszeniert, je unverwechselbarer, verblüffender, oder ungewöhnlicher, desto besser. Moden und Trends folgen dabei heutzutage immer rascher aufeinander, *»unsere immer schnelllebiger Welt verlangt stets Neues«* [Schittich 2001, S.18].

Auch das Bauen ist diesem Rhythmus unterworfen. Die heute mögliche Freiheit in der Gestaltung der Haut eines Bauwerks birgt also leider die Gefahr, *»dass die Oberfläche mehr und mehr oberflächlich wird, also zum ‚Hingucker‘, zum bloßen Gag verkommt«* [Sauer 2005].

Eine parallele Entwicklung ist aber auch in Bezug auf die Repräsentation von Architekturbüros zu beobachten: Bauwerke werden heutzutage vorwiegend durch Architektur fotografie in Hochglanzzeitschriften oder via Internet einem breiteren Publikum vermittelt. Architekten können daher durch spektakuläre Bilder, durch gezielte Tabubrüche oder durch ungewöhnliche und verblüffende Materi-

»The representation of 'materiality', the perception of qualities attributed to materials, and our multiple understandings of what it means to be material, are all integral parts of media culture. Mediated representations of tangible or haptic material qualities may, in fact, be less literally 'real', but the reality of their pervasive presence in our culture is undeniable.«

[Kennedy 2001]

aleffekte und -kombinationen relativ einfach weltweite Aufmerksamkeit erlangen.

Das Inszenieren von Architektur beginnt dabei bereits in der Entwurfsphase. Schon die orthographische Projektion in einfachen Architekturdarstellungen privilegiert die Oberfläche [Addington 2005, S.5], um wie viel mehr wird dies erst beim heute kaum noch wegzudenkenden „perfekten Rendering“ mit seinen aufgemapten Texturen der Fall sein? Wettbewerbspläne werden durch Fotos von Oberflächenstrukturen collageartig ergänzt, um den Materialcharakter des Entwurfs auf den ersten Blick zu transportieren. Es gilt, aus der breiten Masse der Konkurrenten hervorzustechen. »So eine Entwicklung kann nicht ohne Auswirkungen auf den Entwurf selbst bleiben.« [Schittich 2006, S.587]

Zusammenfassung

Die Oberfläche spielt in ihrer Materialität für die Wahrnehmung und Vermittlung von Architektur eine entscheidende Rolle. Zahlreiche Entwicklungen haben dazu geführt, dass diese Materialität unabhängig geplant werden kann und muss. Die Oberfläche wird dabei zunehmend mit Bedeutung aufgeladen und zu Werbezwecken genutzt, daher besteht die Gefahr, dass ein innovativer Materialeinsatz nur aus »banaler Effekthascherei« [Schittich 2005, S.13] erfolgt.

1.1.2

Das Verhältnis von Form und Material

Die beschriebene Konzentration auf die Oberfläche erfordert zwangsläufig auch neue Antworten auf die Frage nach der häufig geforderten „konstruktiven Ehrlichkeit“ im Umgang mit Material, der „Materialgerechtigkeit“.

Jeder dingliche Gegenstand befindet sich in einem Spannungsverhältnis aus Form und Material. Die Art dieses Verhältnisses wird durch den vom Menschen am Material vollzogenen Bearbeitungsprozess gelenkt, »die menschliche Tätigkeit prägt dem Material eine Form auf [...] und sie macht es zu dem, was es ist« [Böhme 1994, S.78]. Die Frage nach Materialgerechtigkeit kann daher nur in Bezug auf die möglichen Herstellungs- und Verarbeitungstechniken beantwortet werden.

Weiterentwicklung der Verarbeitungstechniken

Tradierte Formen waren ursprünglich einem handwerklichen Umgang mit nur wenigen Materialien geschuldet. Die unkritische Weiterverwendung solcher Formen bei gleichzeitig industrieller Herstellungsweise mit neuen Baustoffen wurde daher durch die Moderne zu recht in Frage gestellt. Folgerichtig begann daraufhin die Suche nach einer Formensprache, die den neuentwickelten Techniken angemessen war.

»Heute, in Zeiten mehrschichtiger Aufbauten, lassen sich fast alle Baukörper in unterschiedlichen Materialien konstruieren. Neueste Fertigungs- und Rechenmethoden verhelfen dabei der Form, sich von den Vorgaben des Materials zu lösen. Die Beziehung zwischen Form und Baustoff wird zunehmend unklar.«

[Schittich 2006, S.587]

»So sind die Materialien virtuelle Einheiten geworden, denen schwer korrekte Namen zu geben sind. Die Materialien, wie wir sie kannten - die Familie der Hölzer, die der Metalle, des Glases, der Keramik, der Kunststoffe -, haben sich tief verändert [...] Zwischen dem früheren Begriff Holz und dem heutigen Inhalt befindet sich eine so große Kluft, daß frühere chemisch-physische Denkkategorien paradox werden.«

[Doveil 1994, S.65]

Heute hingegen lassen sich durch computergestützte Konstruktions- und Berechnungsverfahren nahezu beliebige Formen kreieren und anschließend auch in einer Vielzahl von Materialien umsetzen. Insbesondere dadurch, dass die letzte Schicht fast nur noch eine bekleidende Funktion zu erfüllen braucht, lassen sich im Prinzip alle Formen - und seien es zweifach gekrümmte Volumina - in fast allen Materialien realisieren. Nicht nur Gehrys aus drei organischen Körpern bestehender neue Zollhof in Düsseldorf, der mit drei verschiedenen Materialien bekleidet ist, definiert dabei die Grenzen neu, wann eine Form noch einem Material entspricht.

Weiterentwicklung der Materialien

Aber auch die einzelnen Materialien an sich haben die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit extrem verschoben. Durch Nutzung des heutigen Spektrums denkbarer Verarbeitungstechniken - vom mechanischen Optimieren (z.B. Auftrennen von Holz und Wiederausammenfügen zu Furnierstreifenholz) über physikalisch-chemische Vorgänge (z.B. neue Legierungen) bis hin zu Eingriffen im Nanometermaßstab (z.B. der vielzitierte „Lotuseffekt“) - weisen viele Produkte mittlerweile Eigenschaften auf, die mit den ursprünglichen Ausgangsmaterialien nicht mehr viel zu tun haben.

Weiterhin können auch mehrere - teilweise grundverschiedene - Grundstoffe zu Composite-Materialien kombiniert werden, in denen sich die jeweiligen Einzeleigenschaften positiv ergänzen (z.B. eine Kombination aus Acrylglas- und Holzlamellen zu einem transparenten und dennoch „warmen“ Produkt). Solche Materialien lassen sich dann gar keinen bekannten Familien mehr eindeutig zuordnen.

Denken in Bauteilen

Gerade in der Architektur sollten darüber hinaus nicht nur die Eigenschaften von Einzelmaterialien oder Halbzeugen betrachtet werden, sondern komplette Bauteile. Heutige bautechnische Vorgaben und Nutzungs-Ansprüche erfordern fast zwangsläufig eine Aufteilung eines Bauteils in mehrere Funktionsschichten. Einzelne Materialien werden im Systemzusammenhang eines Bauteils optimiert [Hegger 2006, S.653].

In den meisten Fällen - von bewusst als Stilmittel eingesetzten, getrennt wahrnehmbaren funktionalen Ebenen einmal abgesehen - kann aber nur die äußere Schicht des Bauteils gesehen werden. Ist dieses Bauteil dann in Bezug auf seine Materialität „unehrlich“ konstruiert?

Fazit

Vielleicht ist es als Architekt mittlerweile notwendig, sich vom tradierten Denkmuster zu lösen, die Form im direkten Zusammenhang mit dem Material sehen und entwerfen zu müssen. Auch wenn bestimmte Formen immer noch gefühlsmäßig eher bestimmten Materialien verbunden zu sein scheinen (z.B. Entwürfe von Zaha Hadid,

»What would seem to be a process of material impoverishment - the separation, standardization, multiplication of material products - creates instead a charged, void space for architecture. Within this

void, it is difficult to differentiate between material products, and harder still to locate an inherent architectural logic for material use. Yet this void can also be a 'play space' offering new freedoms.«

[Kennedy 2001, S.18]

»Working with materials becomes more like cooking. It is the recipe and the mix, the choice and the relative proportions of ingredients that determine the characteristic properties of materials. [...] The challenge to the architect is to see these changing successions not as losses to the discipline, but as gains.«

[Kennedy 2001, S.16]

die selbst in Beton nur schwierig zu realisieren sind), löst sich die „architektonische Logik“ der richtigen Materialverwendung mehr und mehr auf.

Stattdessen bieten neue Materialien und Verfahren eine bisher nicht gekannte Freiheit im Entwurf. So könnte zu Beginn der Planung - neben der Form - beispielsweise *»zuerst eine Klärung der gewünschten Assoziationen bzw. der angestrebten Atmosphäre«* [Hansen 2005, S.68] stehen, um erst im Anschluss ein geeignetes Produkt zu suchen. Gebaute Beispiele (z.B. der Prada Shop in Los Angeles) zeigen, dass – wenn die gewünschten Qualitäten eines Materials erst einmal formuliert sind – im Zusammenspiel von Architekt und Baustoffindustrie ein geeignetes Produkt (hier der grasgrüne PUR-Schaum namens foam) notfalls sogar erst im Nachgang entwickelt werden kann.

1.1.3

Der Einsatz neuer Materialien in der Architektur

»While it is difficult to project real numbers, it has become a widely held belief that more new products have been developed in the last twenty years than in the prior history of materials science.«

[Brownell 2006, S.6]

Neue Materialentwicklungen und Bearbeitungstechnologien erweitern den Kreis der möglichen Materialien immer weiter, zudem wird daran gearbeitet, die technischen Eigenschaften von bekannten Materialien weiter zu verbessern [Funhoff 2005, S.29]. Die Zahl der insgesamt zur Verfügung stehenden Materialien und Produkte ist dadurch in den letzten Jahren im Vergleich zur gesamten Geschichte der Materialwissenschaften extrem angestiegen. Bei den meisten Materialien handelt es sich allerdings weniger um grundsätzliche Neuentdeckungen, sondern eher um die *»neuartige Kombination bekannter Materialien, um neue Effekte zu erzeugen oder Effekte auf andere Materialien zu übertragen«* [Funhoff 2005, S.29].

»We're definitely seeing a very new, emergent trend of architects getting involved in developing materials. It seems as if some are eschewing theory for pragmatics, or else applying theory in a pragmatic way. In many cases, this trend exists because architects are simply interested in creating things.«

[Jana 2006]

Translokation bekannter Materialien

Nur wenige dieser Materialien werden dabei speziell für das Bauwesen entwickelt: Die Zahl der Unternehmen aus der Baubranche, die gezielt Forschung im Bereich Material betreiben, ist sogar mit 24% um die Hälfte niedriger als in vergleichbaren Industriezweigen [Funhoff 2005, S.28]. Auch wenn immer mehr Architekten Einfluss nehmen auf die Entwicklung neuer Materialien, stellt der oben genannte Prada-Schaum, der speziell für diesen einen Laden-Entwurf entwickelt wurde, eine absolute Ausnahme dar.

»The development in our time of new materials, finishes, and processes applicable to the built environment is based upon sophisticated technology, a by-product of pure research. [...] In general, archi-

Stattdessen wurden viele „neue Materialien“ ursprünglich eher für sehr spezielle Anwendungen wie z.B. die Raumfahrt entwickelt. Erst anschließend werden diese auf der Suche nach zusätzlichen Einsatzgebieten und Absatzmärkten für andere Gebrauchsgüter übernommen (NASA-Effekt). Oft werden auch bestimmte Produkte aus bekannten Materialien zunächst in einem branchenfremden

tects and designers are dependent upon materials manufacturers for creating products they can use and for disseminating information about those products.«

[Osborne 1990, S.8]

»Im Neuland stehen keine Wegweiser. Materialexperimente werden also immer wieder notwendig sein - und sie werden auch nie ihren Reiz verlieren, nicht für den Ingenieur, nicht für den Konstrukteur, nicht für den Gestalter und erst recht nicht für den Architekten, der diese unterschiedlichen Ansätze verbinden, zumindest aber koordinieren muss.«

[Hullmann 2002, S. 29]

»Ein Innovator hat eine bessere Reputation am Markt (auch bei Standardprodukten) und ihm wird eine größere Kompetenz zugestanden, die sich wiederum in einer höheren Akzeptanz seiner Produkte niederschlägt.«

[Funhoff 2005, S.28]

Aufgabenbereich eingesetzt (z.B. Edelstahlgitter als Industriefilter) und erst nach längerer Zeit für eine mögliche Anwendung am Bau (hier z.B. als Fassadenbekleidung) „entdeckt“ und entsprechend weiterentwickelt. Die Innovation bezieht sich hier also nicht auf das Material an sich, sondern auf die Art und den Ort des Einsatzes.

Als „neu“ können Materialien in der Architektur letztlich also bereits dann bezeichnet werden, wenn sie im jeweiligen Zusammenhang unerwartet sind, als *»Materialkombinationen für bisher unbekannt Funktionen«* [Hullmann 2002, S.29], oder als solche, mit denen man nicht vertraut ist und über die - zumindest im Bauwesen - noch keine hinreichenden Erfahrungen vorliegen [Cardwell 1997, S.18]. Ein Architekt, der sich - z.B. um mit seinem Entwurf aufzufallen (vgl. Kapitel 1.1.1) - auf die Suche nach „neuen Materialien“ begibt, kann also auf zahlreiche Produkte aus fremden Branchen zurückgreifen, diese versuchen zu adaptieren oder an unüblicher Stelle einzusetzen, und mit diesen die von ihm gewünschten Effekte erzielen oder die geforderten Funktionen erfüllen. *»Materialdiversifikation, Materialverfremdung, bewusster Materialmissbrauch oder Materialtransfer aus baufremden Bereichen sind anerkannte Stilmittel geworden.«* [Hegger 2005, S.7]

Einschränkungen im Bauwesen

Es ist auffällig, dass neue Materialien oftmals zunächst in als besonders kreativ geltenden Bereichen mit gleichzeitig geringer Gebrauchsdauer (z.B. Ladenbau, Innenarchitektur, Eventarchitektur) ausprobiert werden. Bis zu einer breiteren Anwendung neuer Materialien auch im Bauwesen kann hingegen viel Zeit vergehen. Fernandez nennt z.B. für die USA als Zeitraum von der Entwicklung eines neuen Konstruktionsmaterials bis zur Produktion und Verbreitung im Bauwesen die Spanne von 17 Jahren [Fernandez 2006, S.11]. Die Durchsetzung von innovativen Produkten im Bauwesen dauert damit deutlich länger als in vergleichbaren Industriezweigen.

Die Gründe hierfür liegen zum einen an den umfangreichen Regelwerken, Normen und Zulassungsprozeduren [Funhoff 2005, S.28], so dass zumeist nur große Firmen den oftmals langen und kostspieligen Weg einer Markteinführung neuer Produkte beschreiten können, zum anderen an fehlenden Langzeiterfahrungen [Hegger 2005, S.7]: Während der langen Gebrauchsdauer von Bauwerken - auch unter extremen Beanspruchungen - muss vor allem die Sicherheit der Nutzer, aber auch die Gebrauchstauglichkeit und ein akzeptables Aussehen gewahrt bleiben. Eine neuartige Verwendung selbst bekannter Materialien stellt daher für den Architekten, aber auch für den Hersteller immer ein gewisses Risiko dar.

Innovative und aufsehen erregende Materialexperimente können allerdings auch in der Hochbau-Architektur relativ einfach in weniger sensiblen Bereichen stattfinden, also z.B. an nichttragenden Bauteilen wie an bekleidenden Oberflächen oder wiederum bei

Innenausbauten. Die Entscheidung für ein bestimmtes Material wird letztlich von allen am Bau Beteiligten getragen, allerdings werden die Hersteller von Bauprodukten noch sehr wenig zu Fragen der Materialwahl herangezogen [Funhoff 2005, S.28]. Hier ist sicherlich noch einiges an Potential vorhanden. Industrie, Planer und Bauherren sind daher aufgefordert, *»auf dem Weg zu neuen Oberflächen mutig und kooperativ zusammenzuarbeiten«* [Sauer 2006, S.592].

Zusammenfassung

Ein Architekt kann aus einer immer größer werdenden Zahl von Materialien auswählen. Viele der neu entwickelten Produkte werden allerdings nicht speziell für das Bauwesen entwickelt. Für den Planer bedeutet dies, dass er zur Lösung seiner Entwurfsvorstellungen auch in anderen Branchen Materialien finden kann, die er nutzen oder weiterentwickeln kann. Für einen Einsatz im Bauwesen müssen diese dann allerdings zugelassen sein.

1.1.4

Der Trend zur emotionalen Seite des Materials

»Nevertheless, as we accumulate new technology, many of civilization's older materials and processes seem to emerge, or to be perpetuated. Although the industrial revolution has changed the patterns of our life-styles, many elements, processes, and styles continue to mark our lives.«

[Beylerian 1990]

»Caution is wise when praising the technical over the lyrical because we know that trivializing and discounting the value of the character of form, the meaning of shapes and surfaces, colors and materials, inevitably leads to a process bankrupt in spirit and impotent in fully capturing the imagination.«

[Fernandez 2006, S.3]

Der Architekt kann bei seiner Materialwahl nicht nur auf neu hinzukommende High-Tech-Produkte zurückgreifen. Auch tradierte Materialien und Verarbeitungsweisen bleiben - mit durchaus wieder zunehmender Bedeutung - bestehen bzw. werden wieder neu entdeckt.

Neben der Ausweitung der technischen Grenzen von Materialien geht es in der Architektur nämlich zunehmend darum, vor allem *»die sinnliche Erfahrungsebene von Baustoffen in den Mittelpunkt von Materialentscheidungen zu stellen und damit die visuellen und sinnlich erfahrbaren Qualitäten unserer gebauten Umwelt zu verbessern«* [Hegger 2005, S.6]. Der Trend bei der Materialwahl insgesamt scheint eindeutig zu solchen Materialien zu gehen, die *»haptischer, edler und sinnlicher«* sind [Birk 2006]. Woran liegt das?

Skepsis vor technologischen Neuerungen

Ein Teil der Antwort liegt sicherlich darin, dass - eventuell aufgrund negativer Erfahrungen in der Vergangenheit - ein mündiger Konsument heute nicht mehr blind darauf vertraut, *»daß neue Materialien [...] zivilisatorische Segnungen seien«* [Joppien 2002, S. 202]. Stattdessen herrscht mittlerweile eine vielleicht gesunde Skepsis vor.

Auch wenn neue Materialien praktischen Nutzen und ungeahnte Chancen versprechen (z.B. die leichter zu reinigende Sanitär Oberfläche), werden Fragen nach möglichen negativen Begleiterscheinungen für die Gesundheit (z.B. die Auswirkung von Nanopartikeln), nach Umweltauswirkungen durch Produktion oder Einsatz, oder nach vorhandenen Marktmechanismen und wirtschaftlichen Abhängigkeiten (z.B. von Rohöl) gestellt. Für die breite Akzeptanz eines neuen Produkts muss diese Aufrechnung schon einen deutlichen Mehrwert für den Nutzer ausweisen.

» Schon heute sind wir von Materialien umgeben, deren Aussehen keineswegs mehr das ist, was es scheint. Keramik sieht aus wie Metall, Kunststoff wie Holz, Stahl wie Wolle. »Mutierende«, d.h. ihr Aussehen ständig verändernde Materialien stürzen uns in Verwirrung, entziehen uns den Boden der Realität, oder was wir dafür halten. Selbst bei Nahrungsmitteln, den Grundstoffen unserer Existenz, erleben wir reihenweise Täuschungen, Spezialzüchtungen und Surrogate treten an die Stelle von empirisch verbürgten Produkten.«

[Joppin 2002, S 203]

»Virtual and actual worlds are inextricably inter-related and mutually defining. Instead of replacing the physical world of materials, the virtual world produces a renewed desire for tactility and texture in consumer culture.«

[Kennedy 2001]

»Materialien „neigen heute dazu, als Träger von ästhetischen, kulturellen Werten und unabhängig von der Gestalt, die der Gegenstand annehmen wird, eine eigene Sprache zu sprechen. Materialien zu verarbeiten erfordert heute vollständig neue Fähigkeiten und Entwurfshaltungen im Vergleich zur Vergangenheit“«

[Doveil 1994, S.64]

Wunsch nach hoher Erlebnisqualität

Neben diesen eher rationalen Ansätzen gibt es aber auch eine Erklärung auf der emotionalen Ebene: Die neuen Materialien verwirren unsere bisherigen Erlebnismuster, die durch jahrelange Erfahrungen aufgebaut wurden. Dadurch können »Unwohlsein« oder gar »Angst und Beklemmung« ausgelöst werden [Joppin 2002, S. 203].

Bei einer reinen Konzentration auf die technische Ebene, also die Leistungsfähigkeit eines Materials, droht die geistige, sinnliche und ästhetische Dimension verloren zu gehen. Die mittlerweile gewachsene Erkenntnis, dass heutige Technik Teile der Natur nachahmen oder gar überbieten kann, führt dann fast zwangsläufig dazu, dies durch eine Gegenbewegung, also z.B. »high-touch« statt »high-tech«, ausgleichen zu wollen [Beylerian 1990].

Reales Erleben als Gegenpol zur virtuellen Welt

Gleichzeitig führt auch die zunehmende Medialisierung und Virtualisierung der gesamten Welt, der »fortschreitende Materialitätsverlust der Dinge« [Doveil 1994, S.67] zu einer »Sehnsucht zurück nach dem Sinnlichen, nach dem direkten Erleben« [Sauer 2005]. Es scheint »ein tiefes Bedürfnis nach Greifbarem, Realem zu bestehen, nach Fühlbarkeit und Textur oder danach, konkrete Räume zu schaffen und eine besondere Emotionalität« [Schittich 2006, S.588]. Mehr noch, Material soll »kulturelle Identität vermitteln«, es soll sogar »Teil der Wünsche und Erwartungen der Gesellschaft« werden [Doveil 1994, S.68]. Gerade in anderen Kulturräumen seien solche »Materialgeschichten« zu beachten [Hansen 2005, S.68]. Einem Material wird heute also mehr als je zuvor abverlangt, auch die sinnlichen und ästhetischen Wünsche des Nutzers zu befriedigen. Die Akteure in Produktdesign und Marketing haben diesen Trend erkannt. Da im Zeitalter der Globalisierung in gesättigten Märkten alle Möglichkeiten der Differenzierung genutzt werden müssen [Esslinger 2005, S.33], geht es nach der Verbesserung der Herstellungsqualität nun um die »Erhöhung der Erlebnisqualität« eines Produkts [Doveil 1994, S.66] und als Folge davon darum, es »im Markt differenzierter und für den Nutzer noch zugänglicher (zu machen)« [Esslinger 2005, S.33].

Fazit

Auch für den Architekten ist es wichtig, bei der Materialwahl nicht nur die „harten“, technischen Anforderungen an ein Material zu berücksichtigen, sondern vor allem auf dessen „weiche“, sinnliche Eigenschaften Wert zu legen. Entwickelt der Entwerfende zudem noch ein Verständnis für die mit diesen Qualitäten verbundene zusätzliche Bedeutungsebene eines Materials, wird er - indem er insbesondere die gewünschten „weichen“ Eigenschaften gezielt formulieren kann - vielleicht eher ein geeignetes Material finden, das seine Entwurfsintentionen umfassend untermauert.

1.2

Das Problem der Materialwahl

»Designing is deciding. Amongst the many decisions taken during the design process, the choice of materials to be used is as crucial as any. [...] However long and for whatever reason it may be delayed, sooner or later a decision has to be made. If the design is to become part of the physical world there is simply no escaping this imperative.«

[Vollard 2004, S.9]

»Im Gegensatz zu früher, als für die üblichen Bauaufgaben meist nur auf die vor Ort verfügbaren Materialien zurückgegriffen werden konnte, steht uns heute eine bis dato nicht gekannte Vielfalt an Baustoffen aus aller Welt zur Verfügung, die sich stetig durch Neuentwicklungen aus der Industrie vergrößert. Das bringt ungeahnte Möglichkeiten, aber auch Gefahren mit sich, zumindest aber die Qual der Wahl.«

[Schittich 2005, S. 10]

»Erst durch den Abgleich der vom Architekten gewünschten Wirkung mit den geforderten Leistungsmerkmalen entsteht eine wirklich nachhaltige Materialität, die zu jenem Wohlbefinden führt, das Architektur lebenswert macht.«

[Hegger 2006, S.655]

Bisher wurde dargelegt, wie sehr ein Material - gerade durch seine sinnlichen oder „weichen“ Eigenschaften - die Entwurfsintention des Architekten stützen kann. Sowohl neue, als auch tradierte Materialien stehen dabei in großer Zahl zur Auswahl, zudem sind im Prinzip auch gezielte Weiterentwicklungen oder Adaptionen aus anderen Bereichen möglich.

Im Rahmen der Ausführungsplanung, allerspätestens aber bei der Vergabe von Bauleistungen, also bei der Umsetzung der Planungen in gebaute Realität, muss der Planer sich nun für die genaue Materialausführung jedes Bauteils entscheiden. Dabei stellen sich ihm jedoch eine ganze Reihe von Fragen:

Welche Produkte stehen überhaupt am Markt zur Verfügung? Wo und wie kann man sich über deren Eigenschaften informieren? Welches Material erfüllt dabei prinzipiell die Wünsche? Und welches Material ist letztendlich das „Beste“ für den entsprechenden Einsatzzweck?

Die Festlegung eines bestimmten Produkts ist also in zweierlei Hinsicht problematisch: Es mangelt nicht nur an durchgängigen und einheitlichen Informationsmöglichkeiten über Materialien, sondern - und dies ist viel entscheidender - es fehlt eine nachvollziehbare Strategie, wie prinzipiell denkbare Materialien in Bezug auf den Erfüllungsgrad der gewünschten oder geforderten Eigenschaften bewertet werden können.

1.2.1

Unzureichende Such- und Informationsmöglichkeiten

Aufgrund der immer größeren Anzahl prinzipiell vorhandener und – im Zeitalter globaler Warenströme – auch leicht erhältlicher Produkte wird es zunehmend schwieriger, gezielt nach diesen zu suchen und sich über deren Eigenschaften zu informieren.

Suche nach Materialien

Die Nutzung allgemeiner Suchmaschinen im Internet führt meistens zu wenig sinnvollen Ergebnissen. Die Suche kann hier nur über Schlagworte erfolgen und nicht etwa über gewünschte Materialeigenschaften, so dass der Nutzer eigentlich schon vorher wissen muss, was er genau sucht. Entsprechend beruht die Reihenfolge der angezeigten Ergebnisse dann auch nicht auf einer inhaltlichen Be-

wertung der Materialien an sich, sondern z.B. auf einer Auswertung der Anzahl und Relevanz der auf eine Webseite verweisenden Links. Eine derartige Suche kann daher zwar als ein erster Einstieg, nicht jedoch als zielgerichtete Suche betrachtet werden.

»The recent growth of Internet product information sites has not improved the situation at all, because the only method of search is by keyword, which seldom provides enough information to make an intelligent selection within a reasonable time frame.«

[IAI 2001]

Mehrere Online-Materialdatenbanken bieten dagegen – wenn auch je nach Intention der Datenbank sehr unterschiedliche – Suchmöglichkeiten auch nach konkreten materialspezifischen Eigenschaften an. Ihr Fokus ist aber oftmals stark eingeschränkt: z.B. auf die Suche nur nach Baustoff-Herstellern, auf bestimmte Materialgruppen (z.B. Suche nur nach Holzarten), oder auf bestimmte Prozesse (z.B. Verarbeitungsmöglichkeiten). Eine übergreifende und unabhängige Suche nach Materialien und Produkten ist auch so nur schwierig durchzuführen.

Informationspolitik der Hersteller

»The material selection and procurement/purchasing processes are currently not very well standardized. The thousands of product manufacturers each produce their own product data publications, usually deliberately unique so as to distinguish themselves from their competition.«

[IAI 2001]

Trotz aller genannten Einschränkungen ist das Ergebnis einer derartig durchgeführten Materialsuche üblicherweise eine ganze Reihe von Produkten, die auf den ersten Blick die Erfordernisse des Planers allesamt mehr oder weniger erfüllen. Will man sich jedoch detaillierter über die Eigenschaften der angebotenen Alternativen informieren, steht man vor höchst uneinheitlichen, unvollständigen oder gar vor fehlenden Produktdatenblättern. Die meisten Hersteller verstehen ihre Webseiten offensichtlich vorwiegend als Werbe- und nicht als Informationsplattform.

Fazit

Eine produkt- und herstellerübergreifende Suche nach dem besten Material ist für den Architekten nur mit großem Aufwand zu durchzuführen. Die Materialrecherche wird aufgrund der unzureichenden Such- und Informationsmöglichkeiten so leider *»zur Suche nach der Stecknadel im globalen Heuhaufen«* [Sauer 2005, S.14].

1.2.2

Fehlende Bewertungsmöglichkeiten

Das zweite und im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig behandelte Problem bei der Festlegung eines Materials ist, dass es – selbst bei umfassender Information – kaum Hilfestellung bei der Bewertung der unterschiedlichen Alternativen gibt. Die Aufgabe des Planers sollte jedoch sein, das „optimale“ Material für den jeweiligen Einsatzzweck herauszufinden.

Problem einer einseitigen Sichtweise

»The selection and use of materials too often becomes an exercise in two-dimensional composition, based on a generally uninformed set of notions about the unique attributes of those materials.«

[Fernandez 2006, S.9]

Oftmals wird die Beurteilung eines Materials allein auf der visuellen oder vorwiegend sinnlichen – und daher schwer objektivierbaren – Ebene vorgenommen. Gerade diese „weichen“ Eigenschaften eines Materials sind aber stark mit Bedeutung aufgeladen (vgl. Kapitel 1.1.4) und werden dadurch sehr individuell empfunden. Auch wenn eine solche Herangehensweise beim Erleben von Architektur sicherlich normal ist, führt sie daher nicht automatisch zur Auswahl

»In the general character of the word is the fact that a significant swath of contemporary designers are not able to discuss a material in terms that extend beyond the general and immediately sensory-oriented. The haptic and visual aspects of materials clearly dominate discussions of materiality and while these discussions may be rich, useful and inspirational, they are limited in the coverage of the topic in light of its potential.«

[Fernandez 2006, S.11]

»Tools and techniques are available for selecting materials by functional requirements, but for satisfying aesthetic requirements, tools are far less well developed.«

[Bezooyen 2002; S. 2]

des „besten“ Produkts. Eine solche Sichtweise ist zu verkürzt, da ein Material auch noch weitere Eigenschaften mit sich bringt bzw. insbesondere in der Architektur auch noch andere Aufgaben zu erfüllen hat.

Auf der anderen Seite wäre aber auch das alleinige Vertrauen auf „objektive“ Merkmale eines Materials, also z.B. ein rein technischer oder ein rein ökonomischer Standpunkt eine sehr einseitige Sichtweise, die die Wichtigkeit der sinnlichen und ästhetischen Seite eines Materials ignoriert. Auch eine solche Einschränkung der Entscheidungsgrundlage wäre daher nicht hinnehmbar.

Fazit

Der Architekt als Vermittler zwischen Kunst und Technik muss ein Material immer in der Gesamtsicht mit all seinen unterschiedlichen Eigenschaften ganzheitlich sehen und bewerten. Auch im Dialog zwischen Bauherr, Architekt und Industrie müssen beide Ebenen gleichberechtigt kommuniziert werden. Nur so kann im Grunde eine Materialwahl stimmig und optimal erfolgen.

Es fehlt letztendlich ein Bewertungssystem, in dem es gelingen kann, zum einen die „weichen“ Kriterien der Materialauswahl in nachvollziehbare Größen zu fassen, zum anderen diese anschließend aber auch in Relation zu setzen mit den eher „harten“ Faktoren. Eine solche Bewertungsstrategie könnte helfen, die Auswahl eines bestimmten Produkts unter Berücksichtigung aller Kriterien plausibel zu begründen.

1.2.3

Die Unterstützung der Entscheidung

Die Entscheidung für ein Material ist - wie dargelegt - durch das Einbeziehen und Abwägen vieler und dabei teilweise grundverschiedener Einflussgrößen geprägt. Das definierte Ziel ist dabei die Eingrenzung der Suche auf ein einziges Globalziel, nämlich das „optimale“ Material. Bei einer derartigen Entscheidung (viele Kriterien, ein Ziel) spricht man von einer mehrkriteriellen - speziell von einer multiattributiven – Entscheidung [Weber 1993, S.11].

Ansatz der Entscheidungstheorie

In der Entscheidungstheorie, die oft als betriebswirtschaftliches Instrument benutzt wird [Wikipedia 2006a], wird davon ausgegangen, dass Entscheidungen im Prinzip durch Entscheidungsunterstützende Systeme (decision support systems DSS) abgestützt werden können. Die Entscheidung selbst wird dem Nutzer durch ein solches System also nicht abgenommen, es liefert aber eine begründete und nachvollziehbare Datenbasis, auf der die jeweilige Entscheidung erfolgen kann.

»Entscheidungsunterstützende Systeme [...] sind computergestützte Informationssysteme, die Endbenutzern aller Ebenen - auch Entscheidern ohne Erfahrung mit der Informationstechnologie - bei der Lösung komplexer Probleme helfen.«

[Lusti 2002, S.3]

»Entscheidungsunterstützende Systeme fällen selbst keine Entscheidungen, sondern beschränken sich auf die Unterstützung von Handlungsträgern in bestimmten Entscheidungsphasen.«

[Lusti 2002, S.3]

Viele der in der Entscheidungstheorie entwickelten Methoden und Verfahren sind dabei für eine andere Grundkonstellation als bei der hier beschriebenen Materialwahl ausgelegt: In der Betriebswirtschaft geht es eher um Entscheidungen mit größeren ökonomischen Folgen wie z.B. Standortentscheidungen bei einer üblicherweise geringeren Zahl an Alternativen. Die Anwendung auch komplexerer Techniken kann sich also trotz eines größeren Aufwands relativ schnell auszahlen.

Entscheidungsunterstützende Systeme bei der Materialwahl

Im Gegensatz dazu soll im architektonischen Planungsprozess wiederholt und in begrenzter Zeit aus einer nahezu unüberschaubaren Produktpalette das „optimale“ Material ermittelt werden. Unter einer solchen Konstellation kehrt sich das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen schnell um.

Dennoch ist anzunehmen, dass einige der Verfahren oder zumindest Teile davon auch auf die Materialwahl anwendbar oder übertragbar sind. Die Grundannahme bleibt, dass - wenn es gelingt, die einzelnen Materialalternativen mit begründeten und nachvollziehbaren Daten zu unterfüttern - die Entscheidung für ein Material unterstützt werden kann.

1.3

Aufbau der Arbeit

»Die deskriptive Entscheidungstheorie untersucht [...] empirisch die Frage, wie Entscheidungen in der Realität tatsächlich getroffen werden.

Die normative Entscheidungstheorie sucht nach Kriterien rationalen Entscheidens [...].

Die präskriptive Entscheidungstheorie beschäftigt sich mit der Bereitstellung von Verfahren zur Fällung rationaler und praktikabler Entscheidungen.«

[Wikipedia 2006a]

Das Thema Materialwahl in der Architektur lässt sich je nach persönlicher Interessenslage und Hintergrund unter vielen verschiedenen Sichtweisen betrachten und bietet – gerade durch die neuesten Materialentwicklungen – noch viele unerforschte Bereiche.

An dieser Stelle soll daher das genaue Ziel dieser Arbeit definiert und dadurch von weiteren Forschungsgebieten abgegrenzt werden. Zudem erscheint es notwendig, von bestimmten Annahmen auszugehen sowie einige Begrifflichkeiten zu klären.

1.3.1

Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit soll einen Weg aufzeigen, wie die Wahl eines Materials in der Architektur unterstützt werden kann, indem die Entscheidung für das Material auf einer plausibleren Basis als zuvor vollzogen werden kann.

Plausibilität

Es ist davon auszugehen, dass es für jeden Einsatzzweck eine Vielzahl ähnlich gut geeigneter Materialien gibt, aus denen ein Planer letztlich eines auswählen muss. Die Wahl eines Materials in der Architektur wird also grundsätzlich aufgefasst als ein Problem der Entscheidung zwischen mehreren möglichen und nahezu gleichberechtigten Alternativen. Diese Entscheidung soll jedoch nicht nur „aus dem Bauch heraus“ oder „aus Erfahrung“, sondern auf einer plausiblen Basis vollzogen werden. Die getroffene Wahl soll also in jeder Hinsicht »*annehmbar, einleuchtend, nachvollziehbar, begreiflich, überzeugend*« sein [Wikipedia 2006b]. Da hierfür kein mit Sicherheit zum Erfolg führender Algorithmus bekannt ist, ist eine heuristische Strategie gefragt, die zumindest zu einer befriedigenden Lösung führt [Wikipedia 2006c].

Einschränkungen

Der Grundgedanke der Arbeit ist, diejenigen Kriterien, die die Entscheidung für ein Material beeinflussen, von einer eher subjektiven Meinung in „objektive“ Werte zu überführen, damit diese anschließend überhaupt in eine Gesamtbetrachtung einfließen können.

Es ist klar, dass dabei sowohl hinsichtlich der Kriterien als auch der Überführung einige Festlegungen getroffen werden müssen, die - sicherlich mit gleicher Berechtigung - auch anders angenommen werden könnten, ohne jedoch das Gesamtmodell als solches in Frage zu stellen. Eine abschließende, vollständige und absolut objektive Darstellung aller Einflusskriterien kann daher aufgrund dieser - notwendigerweise subjektiven - Definitionsarbeit nicht angestrebt sein.

Es wird zudem vorausgesetzt, dass Entscheidungsunterstützende Systeme dem Nutzer nur bei der Entscheidungsfindung helfen können, indem sie ihm Argumente für seine Wahl in die Hand geben. Sie werden ihm aber die letztendliche Entscheidung nicht vollständig abnehmen können. Das Ziel aller Betrachtungen kann und soll also explizit nicht die automatische Ermittlung des „absolut besten“ Materials sein.

Weiter wird ein rational agierender Nutzer vorausgesetzt, der an möglichst objektiven Ergebnissen interessiert ist. Voreingenommenheit gegenüber den Ergebnissen oder das Anwenden weiterer, nicht objektivierbarer Kriterien bei der Entscheidung (z.B. gute Erfahrungen mit Handwerkern, persönliche Beziehungen zu Baustoffhändlern oder einfach das Ausprobieren eines bestimmten, anderswo gesehenen Materials) kann aus Gründen der Allgemeingültigkeit der Strategie nicht weiter berücksichtigt werden.

Davon ausgehend, dass Digitaltechniken und Online-Instrumente zukünftig auch bei der Materialwahl noch weiter an Wichtigkeit zunehmen werden, sollen mit der vorgestellten Strategie vor allem die Möglichkeiten der digitalen Auswahlwerkzeuge verbessert werden. Grenzen, die sich in der sinnlichen Erfahrbarkeit eines Ma-

terials durch das Medium Computer zwangsläufig ergeben, werden – zumindest im Rahmen dieser Arbeit - akzeptiert.

Der vorgestellte Weg soll vor allem in den frühen Planungsphasen eine schnelle Eingrenzung prinzipieller Alternativen und eine prinzipielle Einordnung der Ergebnisse ermöglichen. Der weitere Kontakt zu Herstellern, das Einholen zusätzlicher detaillierter Produkt-Informationen oder das Überprüfen der Wirkung an Materialmustern oder Musterflächen wird dagegen - zumindest zunächst - nicht ausbleiben können.

» [...] new software tools that utilize standardized product information would improve the overall process, lessen the time required, and improve accuracy.«

[IAI 2001]

Als Vision dient letztlich das von der International Alliance for Interoperability IAI skizzierte „software tool“, das in der Lage ist, auf Grundlage von Produktdaten den Auswahlprozess zu verbessern und die für die Suche notwendige Zeit bei erhöhter Treffgenauigkeit zu verkürzen [IAI 2001]. Dieses Werkzeug im Sinne dieser Arbeit soll die Materialwahl vor allem auf eine plausible, also nachvollziehbare Grundlage stellen helfen.

1.3.2

Definition des Begriffs „Material“

»Material, das; -s, Materialien [.. i-en] lat.

1. für eine Arbeit benötigter Roh-, Bau-, Werkstoff.«

[DWDS 2008]

»To a craftsman, a knot in the wood or the grain of the stone are obstacles, but they also prompt variations. To a machine they are merely defects. To a craftsman, in other words, material is not an abstract category. Material is this particular piece before him. To a machine, and to the designer that established its operation, material is only a set of controlled properties.«

[Manzini 1989, S.28]

In den bisherigen Kapiteln wurden die Begriffe „Material“, „Baustoff“, „Produkt“ und teilweise sogar „Oberfläche“ nahezu gleichbedeutend nebeneinander verwendet. Der unterschiedliche Gebrauch der Begriffe - auch in den zitierten Quellen - hängt dabei selbstverständlich immer von der jeweiligen Perspektive und Intention der Autoren ab. Für die Zwecke dieser Arbeit ist es daher wichtig, einige Eingrenzungen vorzunehmen:

Es wurde anfangs besonders auf das ästhetische Potenzial durch den Einsatz von entsprechend gewählten Materialien hingewiesen. Dies bedeutet zum einen natürlich eine gewisse Bevorzugung der direkt erfahrbaren Oberfläche eines Materials, zum anderen eine Konzentration auf Ausbau- gegenüber den Rohbaumaterialien.

Aufgrund der langwierigen Zulassungsverfahren und des Unikatcharakters von Gebäuden, der eine Optimierung von Bearbeitungsprozessen nicht unbedingt erfordert, ist es – im Vergleich zu anderen Industriezweigen oder auch dem Produktdesign – im Bauwesen wesentlich üblicher, anstelle von Rohmaterialien mit bereits vorgefertigten Halbzeugen oder mit nur noch einzubauenden Bauprodukten zu arbeiten. Diese müssen daher selbstverständlich in die Betrachtung einbezogen werden.

Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen also - auch wenn aus Gründen besserer Lesbarkeit teilweise wechselnde Begriffe benutzt werden - unter „Material“ primär bereits vorverarbeitete, zugelassene oder zumindest prinzipiell zulassungsfähige und speziell im Ausbau einsetzbare Materialien und Produkte mit all ihren durch einen Bearbeitungsprozess erhaltenen Eigenschaften gemeint sein.

1.3.3**Struktur der Arbeit**

Die folgende Arbeit teilt sich hauptsächlich in drei inhaltlich gleichberechtigte und aufeinander aufbauende Teile. Im Anschluss daran folgt eine kurze Beschreibung des erarbeiteten Softwareprototyps sowie eine abschließende Betrachtung der vorgestellten Strategie:

I - Die Materialwahl

In Kapitel 2 wird zunächst der übliche Weg bei der Materialwahl unter dem Einsatz vorhandener Hilfsmittel beschrieben. Ein besonderer Schwerpunkt wird anschließend in Kapitel 3 auf die Betrachtung heutiger digitaler Systeme zur Unterstützung des gesamten Auswahlprozesses gelegt.

Diese Bestandsaufnahme dient zum einen zur genaueren Einordnung der Arbeit in das Themenfeld Material und Architektur und dazu, sich vom derzeitigen Stand der Entwicklungen abzugrenzen. Zum anderen ermöglicht sie, das Unbefriedigende an den derzeitigen Lösungen herauszustellen. Aktuelle Tendenzen in der Entwicklung der vorgestellten digitalen Werkzeuge können so erkannt und letztlich zu einer Vision eines integrierten Gesamtprozesses weitergedacht werden.

II - Die Entscheidungskriterien

Im Kapitel 4 werden die Entscheidungskriterien bei der Materialwahl formal nach ihrer Art und Auswirkung allgemein unterteilt sowie bestehende Material-Klassifikationssysteme untersucht. Darauf aufbauend werden im Kapitel 5 die im Rahmen dieser Arbeit konkret in die Materialwahl in der Architektur einfließenden Kriterien aufgeführt, detaillierter beschrieben und in einer Struktur zusammenfassend dargestellt.

Am Ende wird aus der Einzelbetrachtung der Kriterien heraus ein zusammenfassendes Gesamtkriterium für die Materialwahl formuliert, nach dem sich das weitere Vorgehen ausrichtet.

III - Das Verfahren

Abschließend wird ein zweistufiges Verfahren vorgeschlagen, wie das Ziel der Arbeit - nämlich die Entscheidung für ein bestimmtes Material nachvollziehbar begründen zu können - erreicht werden kann.

In der ersten Stufe im Kapitel 6 wird gezeigt, wie die zuvor benannten Kriterien in „objektive“ Werte gefasst und miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Der zweite Schritt in Kapitel 7 beschreibt zusätzliche Verfahren der Informationsvisualisierung, die eine weitere - und hinsichtlich des angestrebten Ziels - notwendige Analyse ermöglichen.

Prototyp und Abschlussbetrachtung

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren wurde unter Berücksichtigung weniger Einzelkriterien und weniger Materialien im Rahmen einer prototypischen Software umgesetzt. Diese wird zusammen mit ihren Ergebnissen im Kapitel 8 vorgestellt.

In Kapitel 9 wird die Arbeit in ihrer Argumentationslinie noch einmal kurz zusammengefasst, die vorgestellte Strategie im Vergleich zur beschriebenen bisherigen Arbeitsweise abschließend diskutiert sowie ein Ausblick auf weitere notwendige Arbeiten im Hinblick auf eine mögliche Umsetzung gegeben.

I Die Materialwahl

2 Der Prozess der Materialwahl

»Life is full of difficult choices. Everyone has their own way of dealing with these, some effective, some not. Studies of problem-solving distinguish two distinct reasoning processes [...]: deductive and inductive reasoning.«

[Ashby 2002, S.124]

Die Frage, wann, wie, und mittels welcher Medien sich der Planer für eine bestimmte Materialoberfläche festlegt, lässt sich nicht generell beantworten. Zu unterschiedlich und teilweise gar projektweise wechselnd sind die individuellen und bürospezifischen Arbeitsweisen, Vorlieben und Ansichten. Die folgende Darstellung des beschrittenen Wegs bei der Materialwahl sowie im nächsten Kapitel die Vorstellung der heute schon eingesetzten digitalen Techniken zur Unterstützung dieses Wegs kann und soll daher nicht mehr sein als eine prinzipielle Beschreibung der unterschiedlichen Möglichkeiten.

Der Weg von der ersten Formulierung eines Materialwunschs bis hin zur Entscheidung für ein konkretes Produkt kann grundsätzlich zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Planungs- und Bauablauf gegangen werden. Diese werden kurz hinsichtlich der daraus folgenden Auswirkungen auf die Materialwahl in Kapitel 2.1 beschrieben. Verschiedene Medien können dabei als Inspirations-, aber auch als Informationsquelle dienen und stellen Materialwissen in verschiedener Qualität und Detaillierung bereit. Diese werden in Kapitel 2.2 beleuchtet.

Auf der Basis dieses Materialwissens kann letztlich ein geeignetes Material für den jeweiligen Anwendungsfall gewählt werden. Hierbei lassen sich verschiedene Strategien verfolgen, die in Kapitel 2.3 diskutiert werden.

2.1 Der Zeitpunkt der Materialfestlegung

*»HOAI §15 Leistungsbild Objektplanung für Gebäude
[...]
LP 3 Entwurfsplanung (System- und Integrationsplanung)
[...] Durcharbeiten des Planungskonzepts [...] Zeichnerische Darstellung des Gesamtentwurfs [...] insbesondere mit Einzelheiten der Wandabwicklungen, Farb-, Licht- und Materialgestaltung
[...]
LP 5 Ausführungsplanung
[...] Durcharbeiten der Ergebnisse der Leistungsphasen 3 und 4 [...] Detaillierte Darstellung der Räume und Raumfolgen [...] Materialbestimmung«*

[BGBI 2001]

Auch wenn aus der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) nicht direkt die Beschreibungen von Planungsleistungen

abgeleitet werden können [InfAR 2007], gibt sie doch einen ersten Hinweis auf den – zeitlichen und inhaltlichen - Zusammenhang der Materialwahl mit dem Entstehungsprozess eines Bauwerks. Die Festlegung der gewünschten Materialoberflächen erfolgt im Rahmen aller sonstigen Entwurfsentscheidungen.

Man kann jedoch davon ausgehen, dass die einzelnen Leistungsphasen der HOAI in den seltensten Fällen linear hintereinander und separat abgearbeitet werden. Auch für den Zeitpunkt und die inhaltliche Bedeutung der Materialwahl ergeben sich daher letztlich drei prinzipielle Möglichkeiten, die - in Abhängigkeit von Projekt und Planer - unterschiedlich und kaum jemals in Reinform zur Anwendung kommen können:

»Als wesentliches gestalterisches Element steht Material mit seinen Eigenschaften und Möglichkeiten zunehmend am Anfang des Entwurfsprozesses und wird nicht länger als zwangsläufiges Endprodukt der Definition vielfältiger Anforderungen betrachtet.«

[Hegger 2006, S.652]

Materialwahl als Grundlage des Entwurfs

Eine große Vielfalt an Materialien ist heute in der Lage, die im Normalfall an ein Bauteil gestellten Anforderungen zu erfüllen. Die Wahl eines Materials, insbesondere natürlich eines Ausbaumaterials, ergibt sich also nicht mehr unbedingt zwangsläufig erst im Laufe des Entwurfs, sondern kann durchaus bereits zu Beginn der Entwurfstätigkeit stehen. Es ist daher durchaus denkbar, sich als Architekt zunächst allein der geplanten Atmosphäre und der Materialität eines Entwurfs zuzuwenden.

Material und Form sind nicht mehr unbedingt voneinander abhängig (vgl. Kapitel 1.1.2). Im Umkehrschluss kann man sagen, dass das anfangs gewählte Material nicht zwangsläufig einen Einfluss auf die Gestalt ausübt (wie dies z.B. noch bei einem Bugholzstuhl von Thonet der Fall war, dessen Form sich speziell aus dem Material Holz in Kombination mit einem neuen Herstellungsverfahren ableitete). Wenn also heute ein gesamter Entwurf allein aus dem Material heraus begründet wird, sind zumindest Zweifel angesagt.

Materialwahl am Ende des Bauprozesses

Das andere Extrem ist dagegen, die Materialwahl erst am Schluss des Bauprozesses zu treffen. Gerade die endgültige Festlegung des Fußbodenbelags oder der Wandbekleidung kann in vielen Fällen bis kurz vor die Fertigstellung des Bauwerks verschoben werden. Ein solches Abwarten erlaubt, die Entscheidung für ein Material unter Wahrnehmung der Raumwirkung an Musterflächen zu treffen. Bestimmte Effekte, z.B. dass Farben auf kleinen Flächen anders wirken als auf großen oder gar auf einem ausgedruckten Plan, können so zumindest minimiert werden.

Da heute zunehmend Bauwerke erstellt werden, ohne dass der zukünftige Nutzer vorher feststeht, hat dies zudem den entscheidenden Vorteil, dass dieser so die Möglichkeit hat, seine eigenen Vorstellungen – im Rahmen des konstruktiv Möglichen - mit einzubringen.

»Entwurf, Planung und Bauen ist davon geprägt, kleine, einzelne, losgelöste Tätigkeiten sehr verschieden aneinanderzureihen.«

[InfAR 2007]

»It is the point at which an abstract idea takes a concrete form. Naturally, this does not occur in one defining moment, as the design process is not a strictly linear succession of logical decisions.«

[Vollard 2004, S.9]

Parallel zum Entwurfsprozess

Die dritte und sicherlich am häufigsten vorkommende Möglichkeit ist, die Wahl des Materials als nur einen von vielen – durchaus voneinander losgelöst zu betrachtenden - Punkten innerhalb des gesamten Entwurfs- und Bauprozesses zu begreifen.

So wie sich andere Entwurfsentscheidungen – und manchmal auch erst die genauen Entwurfsziele - nach und nach im Durchlaufen iterativer Schleifen herauskristallisieren und teilweise auch später wieder verworfen werden können, lässt sich auch die Entscheidung für ein Material als ein ständiger Prozess des Überprüfens, Berichtigens und Verwerfens betrachten [Vollard 2004, S.9].

Fazit

Materialfestlegungen können in unterschiedlichen Phasen der Entwurfsplanung getroffen werden, wobei die übliche Vorgehensweise sicherlich die den Entwurf begleitende ist.

Sollen diese Entscheidungen unterstützt werden, muss der Zugriff auf Informationen über geplante Materialien sowohl zu allen Zeitpunkten als auch in unterschiedlicher Informationstiefe möglich sein. Auch die Bewertung der Alternativen sollte mehr oder weniger detailliert vorgenommen werden können.

2.2

Die Basis des Materialwissens

»Der Architekt als „Baustoffscout“ kann zum eigenständigen Job werden, wie etwa die Position des „Material Managers“ im Rotterdamer Büro von OMA zeigt: Dieser leitet alle Materialentwicklungen und Firmenkontakte des Büros. Oder man läuft eben mit offenen Augen durch die Welt, sammelt Informationen und bei Bedarf erinnert man sich wieder daran [...]«

[Sauer 2005, S.14]

Einen eigenen „Material-Manager“ mit der Aufgabe als „Baustoffscout“ können sich sicherlich die wenigsten Büros leisten. Das interessierte Aufnehmen von Inspirationen aus verschiedenen Quellen und auch das Sammeln von materialspezifischen Informationen dagegen wird jeder Architekt mehr oder weniger systematisch betreiben. Folglich trägt er eine Vielzahl von Bildern und Informationen mit sich herum, auf deren Basis sich - und sei es unterbewusst - seine Entwurfsideen, also auch seine Materialideen, entwickeln.

Der gezielte Zugriff auf dieses Wissen allerdings ist mit einigen Schwierigkeiten behaftet und hängt von der notwendigen Informationstiefe ab. Sollen jederzeit aktuelle und detaillierte Informationen abgerufen werden können, muss einige Energie in die Pflege dieses Wissensvorrats investiert oder aber auf externe Dienstleister zurückgegriffen werden.

2.2.1

Inspirations- und Informationsquellen

Die gesamte Umwelt kann jederzeit als Inspirationsquelle für Materialvorstellungen dienen. Nicht nur die gebaute Umwelt, sondern auch natürliche Oberflächenstrukturen, Muster, Effekte, Gerüche usw. können als direkte Vorlage oder aber durch Assoziations- bzw. durch Transformationsprozesse als Ideengeber wirken. Diese Art von Inspiration kann natürlich nur mittelbar in den eigenen Entwurf übersetzt werden.

Fachzeitschriften

Eine deutlich zielgerichtetere Quelle für Materialideen sind Magazine aus Mode, Lifestyle oder Design. Auch in Architekturzeitschriften sind in jüngster Zeit die Heftthemen (siehe Anhang A.6) verstärkt dem Thema „Material“ gewidmet.

Von Interesse für den Planer können hier zum einen Berichte über Bauwerke mit entsprechender Materialverwendung sein, die neben der Konzentration auf Einzelaspekte einen Hinweis geben können, welche Tendenzen in der Materialverwendung aktuell zu erkennen sind. Zum anderen tragen diese Zeitschriften im Anzeigenteil oft dem Heftthema angelehnte und umfangreich recherchierte Produktinformationen zusammen. Diese Kurzinfos können einen raschen Überblick geben und verweisen dann gezielt auf die Webseiten der Hersteller.

Fachbücher und -webseiten

Auch materialspezifische Fachbücher (siehe Anhang A.6) können – je nach ihrer Ausrichtung – als umfangreiche Informations- oder Inspirationsquelle dienen. Neben Nachschlagewerken, die oft zu einzelnen Stoffklassen (Holz, Metall, Glas, Textil etc.) technische Parameter und Verarbeitungsmöglichkeiten vorhalten, erscheinen in den letzten Jahren verstärkt Bücher, die als reine Inspirationsgeber neuartige Produkte, Effekte und Techniken vorstellen (siehe Anhang A.6). Solche Musterbücher *»machen die verfügbare Vielfalt stofflich oder in gebauten Zusammenhängen sichtbar. Dies verdeutlicht das zunehmende Bedürfnis, die sinnliche Erfahrungsebene von Baustoffen in den Mittelpunkt von Materialentscheidungen zu stellen und damit die visuellen und sinnlich erfahrbaren Qualitäten unserer gebauten Umwelt zu verbessern. Das Metier dieser Bücher ist die Oberfläche der Baustoffe.«* [Hegger 2005, S.6]

Vor allem aber zeigt die Zunahme solcher Bücher das gestiegene Interesse an Neuartigem und an Inspiration im Bereich Material.

Fachmessen

Gezielte Besuche materialspezifischer Fachmessen (siehe Anhang A.6) ermöglichen, sich spartenübergreifend über Neuigkeiten bei Produkten und Verarbeitungstechniken zu informieren. Solche Besuche haben gegenüber den bisher genannten Quellen den Vorteil, Materialien direkt an Mustern erleben zu können, also die Erfahrbarkeit nicht auf ein Abbild oder eine Beschreibung zu reduzieren. Zudem sind persönliche Gespräche mit Herstellern oder Ver-

arbeiten möglich. Dem stehen allerdings ein hoher Aufwand für solche Besuchsreisen und die zeitlich und räumlich eingeschränkte Verfügbarkeit der Information gegenüber.

Materialagenturen

Auf den oben genannten Messen werden oft Ausschnitte spezieller Werkstoff- und Materialsammlungen präsentiert. Auch ein Besuch solcher - dann vollständigeren - Sammlungen an ihrem Heimatort (siehe Anhang A.6) ermöglicht ein direktes „Begreifen“ und Erfahren von Materialeigenschaften und bietet umfassende Inspirationsmöglichkeiten (Die Sammlung MaterialConneXion® etwa umfasst 3500 Materialien und Prozesse, raumPROBE mehr als 1000. Stand März 2007). Der Nachteil des großen Aufwands und der eingeschränkten Verfügbarkeit bleibt allerdings bestehen, dafür wird man vielleicht etwas individueller betreut.

Materialspezifische Webseiten

Mehrere dieser Agenturen präsentieren ihre Materialsammlungen nicht nur in Realität, sondern auch als Datenbank im Internet. Je nach Ausrichtung des Betreibers können diese Webseiten eher informativen oder eher inspirierenden Charakter haben.

Diese Webseiten werden im Rahmen der digitalen Hilfsmittel (siehe Kapitel 3.2.3) näher beschrieben und bewertet.

Newsletter

Viele Betreiber von Materialagenturen bieten interessierten Nutzern auch an, einen regelmäßig erscheinenden E-Mail-Newsletter (siehe Anhang A.6) zu abonnieren, in dem sie über Neuigkeiten und über Vergessenes, aber Altbewährtes informieren.

Der Unterschied solcher Newsletter im Vergleich zu allen anderen Quellen ist, dass der Planer nicht selber aktiv werden muss, um Materialinformationen zu bekommen. So wird er immer wieder animiert, sich mit dem Thema Material zu beschäftigen.

2.2.2

Zugriffsmöglichkeiten auf die Wissensbasis

Alle Informationen und Ideen aus den oben genannten Quellen können jedoch nur dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn sie im Anwendungsfall wieder gezielt abgerufen werden können. Ohne einen solchen direkten Zugang wären die vermittelten Informationen nahezu wertlos.

Im Umgang mit Materialwissen gibt es prinzipiell folgende unterschiedliche Herangehensweisen:

Aufbau einer eigenen Materialsammlung

Egal ob nur im Gedächtnis, in Form von Produktkatalogen und Materialmustern im Regal oder als Link-Liste im Browser, die Pflege einer eigenen Materialsammlung bedeutet immer einen großen Aufwand. Fragen nach einer sinnvollen Kategorisierung, nach möglichen Suchwegen durch Querverweise und nach der regelmäßigen

Aktualisierung der Daten werden mit zunehmender Zahl verfügbarer Produkte mit immer unschärferen Abgrenzungen immer schwerer zu beantworten. Zudem wird man nie die Gewissheit über eine „Vollständigkeit“ der Sammlung haben. Zweifel an der Zweckmäßigkeit einer solchen Sammlung „auf Vorrat“ sind also angebracht.

Eigene Suche im Anwendungsfall

Die andere Herangehensweise – die selbstverständlich auch parallel zur eigenen Sammlung stehen kann – ist das zielgerichtete Recherchieren nach geeigneten Materialien erst zum Zeitpunkt einer möglichen Anwendung.

Ein solches Vorgehen erfordert dennoch grundsätzliche Kenntnisse über Materialien und einen vorhandenen Grundstock an Alternativen, also zumindest das Abrufen von Quellen oder Erfahrungen aus dem Kopf, die dann am Ausgangspunkt einer Suche stehen können. Anschließend kann der Planer die Richtung der Suche einengen, indem er näher definiert, welche Kriterien das gesuchte Material erfüllen soll. Derart präpariert lassen sich z.B. über eine Schlagwortsuche in Internetsuchmaschinen, Herstellersuche in speziellen Baudatenbanken oder die Eingabe der gewünschten Eigenschaften in Materialdatenbanken notwendige nähere Informationen zu möglichen Materialien erst zum Zeitpunkt der Anwendung herausfinden.

Beauftragung eines Materialscouts

Ein zusätzlicher Weg kann sein, einen Suchservice durch die genannten Materialagenturen oder neuerdings häufiger in Erscheinung tretende „Materialscouts“ in Anspruch zu nehmen (siehe Anhang A.6). Hat man seine Wünsche und Anforderungen formuliert und so ein Ziel vorgeben, können diese – selbstverständlich verbunden mit entsprechenden Kosten – aufgrund ihrer Spezialisierung auf Materialien und ihres Netzwerks an Kontakten entweder schnell geeignete Materialien herausfinden oder aber für eine gezielte Entwicklungsarbeit Kontakte zu denkbaren Herstellern knüpfen helfen.

Aufgrund der großen Anzahl der heute schon in der Architektur einsetzbaren Materialien, der zahlreichen Innovationen und der schnell ablaufenden Produktzyklen erscheint die Vorgehensweise einer zeitnahen Materialrecherche - notfalls mit Hilfe von Spezialisten - gegenüber der kontinuierlichen Pflege einer eigenen Materialsammlung von Vorteil zu sein.

2.3

Strategien bei der Auswahl

»For a given product, there is no longer a single material that presents itself as the obvious choice, almost as the only real candidate. Now there are different materials that compete one against another. Only an indepth and wide-ranging analysis of the entire manufacturing process and - in some cases - of the successive life of the product itself, can lead to the selection of the most satisfactory solution.«

[Manzini 1989, S.37]

»In selecting materials by their function-based value, they need to be objectively regarded by their inner properties. These inner properties can be represented by technical data. The process is characterized by starting with a clear goal and having an analytical attitude in making decisions.

In selecting materials by their aesthetic value, materials are subjectively regarded by their outer form, which requires the involvement of the designer with the material itself. The process of selection is done by exploration.

Exploration does not start with a clear goal, but the process itself is forming the goal, by cycles of ideation regarding alternatives.«

[Bezooyen 2002, S.2]

Das Suchen und Finden von Materialien ist nur der erste Schritt auf dem Weg zur Festlegung eines Materials. Im eigentlichen Auswahlprozess, der auch parallel zur Suche stattfinden kann, muss der Planer aus allen zur Kenntnis genommenen und somit ihm für die Auswahl zur Verfügung stehenden Materialien letztlich jene herausfiltern, die aufgrund ihrer technischen Eigenschaften zum Einsatz kommen könnten, zudem aber auch seine sinnlich-ästhetischen Ansprüche erfüllen. Und auch diesen Kreis der möglichen Materialien wird er versuchen immer weiter einzuengen, um sich letztendlich auf ein einziges, ihm für den Einsatzzweck am besten geeignet erscheinendes, festlegen zu können.

Das genaue Ziel der Suche ist dabei - je nach Art (siehe Kapitel 4) und Inhalt (siehe Kapitel 5) des Kriteriums - durch den Planer nicht immer eindeutig vorher festlegbar. Technische Werte sind z.B. einfacher und objektiver beschreibbar als sinnlich-ästhetische Eigenschaften. Bei der Entscheidung, ein Material in den Kreis der möglichen Materialien aufzunehmen, als auch bei der Überlegung, in welche Richtung möglicherweise die weitere Suche bzw. Einengung gehen soll, müssen daher unterschiedliche Verfahren angewendet werden können, welche sich in ihrer Systematik, ihrer Zielgerichtetheit sowie in dem Maße, wie sie auch innovative Lösungen hervorbringen, unterscheiden.

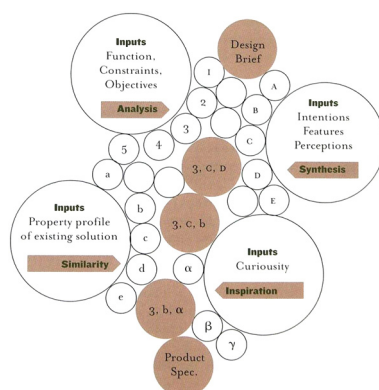


Abb. 2.1: Blasenmodell des Materialwahlprozesses

Ashby formuliert für den eigentlichen Materialwahlprozess ein „Blasen“-Modell, bei dem sich der Suchende Schritt für Schritt von einem Ausgangspunkt, bei dem die Erfordernisse eines Produkts - in welcher Form auch immer - definiert werden, zur letztendlichen Festlegung einer Materialausführung vortastet. Jeder weitere Schritt kann dabei beeinflusst werden durch eine der die vier grundsätzlich möglichen Verfahrensweisen »Analyse«, »Synthese«, »Ähnlichkeit« oder »Inspiration« [Ashby 2002].

Auch wenn Ashby diese Methoden auf ein Vorgehen im Produktdesign bezieht und daher immer auch das Zusammenspiel mit Herstellungsprozessen benennt, sind sie doch genereller Natur. Sie lassen sich als Grundprinzipien auch auf den Materialwahlprozess in der Architektur übertragen.

»The method of analysis has great strengths. It is systematic. [...] And it is robust – provided the inputs are precisely defined and the rules on which the modelling is based are sound. This last provision, however, is a serious one. It limits the approach to a subset of well-specified problems and well-established rules.«

[Ashby 2002, S.125]

Analyse

Bei einer rein analytisch-technischen Herangehensweise werden zunächst die Ziele der Suche in „konkrete“ Werte gefasst (z.B. Suche nach einem warmen Material) und können so im Anschluss mit den jeweiligen Werten der betrachteten Materialien abgeglichen werden (hier: Holz gilt als warmes Material).

Hierfür muss – was gerade zu einem frühen Zeitpunkt nicht selbstverständlich ist – dem Suchenden klar sein, wonach er überhaupt sucht. Er muss also das konkrete Ziel vor Augen haben. Weiter muss es aber auch sowohl technisch als auch inhaltlich möglich sein, diese Anforderungen an das zu suchende Material in „objektive“ Werte zu übersetzen. Dies wird gerade bei den „weichen“ Kriterien problematisch sein. Eine solche Übersetzung von Eigenschaften, die teils nur durch eher vage Begriffe umrissen sind (z.B. ein „warmes“ Material), kann dann nur per Definition – aufgrund einer Interpretation des Sachverhalts – erfolgen. Die sich daraus ergebenden Werte sind also nur bedingt „objektiv“. Einmal festgelegt können solche Kriterien aber anschließend dennoch in ein Analyseverfahren einbezogen werden.

Wenn die obigen Voraussetzungen erfüllbar sind, kann mit der Methode der Analyse ein Material sofort und plausibel begründbar als für den Einsatzzweck „möglich“ (die Eigenschaften des Materials erfüllen die gestellten Anforderungen) oder als „nicht möglich“ eingeordnet werden. Auch eine Beurteilung, wie gut diese erfüllt worden ist, kann so erfolgen, d.h. mehrere Materialien können auf diese Weise miteinander verglichen werden. Im Prinzip lässt sich so das „objektiv beste“ Material ermitteln.

Der Nachteil der rein analytischen Herangehensweise ist allerdings, dass sie keinerlei Hilfestellung gibt, in welche Richtung die weitere Suche gehen könnte, wenn nicht alle Kriterien definiert werden konnten. Sie ermöglicht eben nur den schematischen Abgleich von geforderten mit vorhandenen Eigenschaften.

Synthese

Genau diesen oben genannten Nachteil umgeht das Prinzip der Synthese, da es nämlich auf bereits vorhandenem Wissen über ähnlich gelagerte Fälle beruht. Auf der Basis eigener Erfahrungen oder aus der Betrachtung von mehreren vorliegenden Beispielen (z.B. gemütliche Wohnräume haben oft einen Holzfußboden) können so prinzipielle Lösungswege (hier: die Eingrenzung der Suche nach geeigneten Hölzern) abgeleitet werden.

Diese Suche nach Analogien dient dabei weniger einer rationalen Bewertung von Materialien, sondern eher dazu, zunächst überhaupt erst die Ziele der eigenen Suche näher zu definieren und daraus gezielte Einstiege in eine weitere Suche zu generieren. Sie ist daher auch nicht so zielgerichtet durch technische Systeme zu unterstützen wie etwa die reine Analysetätigkeit.

»At first sight the analogy-based methods of synthesis appear to have one major drawback: because they depend on past experience and designs, they cannot suggest radically new solutions, whereas analysis, requiring no such inputs, can.

This, however, may be too harsh a judgement. The method encourages cross-pollination: developments in one field can be adapted for use in another where it was previously unknown; it is innovation of a different sort – what might be called technology coupling. «

[Ashby 2002, S.126-127]

Ein deutlicher Nachteil dieser Methode mag zudem im Rückgriff auf Altbekanntes liegen: Indem man sich nur auf bereits Vorhandenes stützt, wird eine grundsätzliche Innovation erschwert. Ashby verweist jedoch auf die Möglichkeit einer evolutionären Entwicklung mittels »Auskreuzung« [Ashby 2002, S.127]. Die Methode der Synthese dient eher als ein erster Einstieg, aus der sich die weitere Suche entwickelt.

»The substitute, ideally, should match the incumbent in all important respects except, of course, the reason for wishing to replace it. So one way to approach such problems is that of "capture-edit-search".«

[Ashby 2002, S.127]

Ähnlichkeit

Die Methode einer Suche nach „Ähnlichkeit“ benötigt als Ausgangspunkt immer ein bereits vorhandenes Material (z.B. ein dunkles Holz). In einem dreistufigen Verfahren werden zunächst dessen Eigenschaften zusammengetragen (hier: „Holz“ und „dunkel“), anschließend eins oder mehrere dieser Attribute verändert (z.B. statt „dunkel“ eher „hell“), um dann mit dem daraus entstandenen Eigenschaftsprofil weiter arbeiten zu können (hier: weitere Suche nach hellen Hölzern).

Ähnlich wie das analytische Vorgehen beruht auch dieses Verfahren notwendigerweise auf einem Vorliegen „objektiver“ Daten. Neben der Vereinfachung, dass diese durch die Übernahmemöglichkeit nicht erst alle einzeln formuliert werden müssen, liefert es gegenüber der Analyse auch eine Hilfestellung zu den nächsten Schritten der Suche. Im Prinzip besteht durch die Änderung immer nur einzelner Werte die Möglichkeit des Browsens, also eines schrittweisen Umherschens rund um das Ursprungsmaterial. Ausgehend von einer zunächst vorgefassten – und damit nicht unbedingt innovativen – möglichen Lösung kann so der Lösungsraum gezielt erweitert werden, um letztlich doch zu kreativen und neuartigen Ansätzen zu kommen.

Inspiration

Als letzte Möglichkeit, den nächsten Schritt auf der Suche nach Materialien zu beeinflussen, benennt Ashby sich „einfach inspirieren“ zu lassen [Ashby 2002, S.128]. Eine Möglichkeit der Inspiration wäre z.B. das Aufnehmen von Bildern und Oberflächen aus der gesamten Umwelt. Auch wenn hieraus sicherlich Ideen erwachsen können, handelt es sich doch um ein recht zufälliges Ergebnis. Deutlich zielgerichteter kann da das Durchblättern und Lesen von entsprechenden Fachzeitschriften oder Musterbüchern sein (vgl. Kapitel 2.2.1). Man könnte also beispielsweise durch die Auswahl der benutzten Inspirationsquellen (z.B. eine Zeitschrift zum Thema Holzbau) den „Zufall“ in gewisse Bahnen lenken. Da auf einer bestimmten Stufe im Auswahlprozess bestimmte Vorentscheidungen bereits getroffen worden sind, kann unter Rückgriff auf diese Grundlage im Prinzip eine gezielte Inspiration herbeigeführt werden.

»Many good ideas are triggered by accident – by an unplanned encounter. The encounter is "inspiring," meaning that it provokes creative thinking. The scientific method is of no help here, inspiration of this sort comes by immersion: by exploring ideas almost at random, like delving in a treasure chest. The word "almost" here is important: if inspiration is to be useful, the treasury of ideas needs to have a little structure. «

[Ashby 2002, S.128]

In einer Zeit, wo die Neuigkeit an sich schon einen Wert darstellt, kann ein nicht-analytisches und nicht-planbares Vorgehen durchaus ein positives - da unerwartetes - Ergebnis hervorbringen. Inspiration sollte daher als eine ernstzunehmende und auch im Weiteren als

»Creative solutions to design problems can be reached in more than one way: the more flexible the approach, the greater the likelihood of creativity.«

[Ashby 2002, S.131]

unterstützenswerte Methode betrachtet werden, auch wenn nicht näher zu definieren ist, wie Inspiration genau vor sich geht.

Fazit

Keiner der oben beschriebenen Ansätze wird alleine zum Ziel führen, das „beste“ Material für den gewünschten Einsatzzweck herauszufinden. Ein Vorgehen, welches nur aus einem analytischen Abgleichen von Materialeigenschaften besteht, bedeutet im Resultat immer nur eine Negativauswahl, also die Elimination von wenig oder gar nicht geeigneten Materialien. Dagegen ermöglicht die alleinige Nutzung von Quellen, die nur der Inspiration dienen, kaum eine fachliche Aussage über ein Material. Jede Methode zeigt also ihre eigenen Stärken und Schwächen, jedes Verfahren stellt unterschiedliche Anforderungen an die zu Grunde gelegte Datenlage und ermöglicht im Anschluss ein unterschiedliches weiteres Vorgehen. Erst die Kombination mehrerer Wege wird zu einer guten und kreativen Materialwahl führen.

2.4

Unterstützung der Materialwahl

»When we think, we identify objects or ideas and also relations among them. When we identify anything, we decompose the complexity which we encounter. When we discover relations, we synthesize. This is the fundamental process underlying perception: decomposition and synthesis.«

[Saaty 1990, S.3]

»The development of new materials and technologies allow more freedom in design. Therefore, it is important for designers to stay up-to-date about new possibilities, and to exploit the special properties of new materials. This makes material selection important in the early phase of design, not rejecting or missing options merely because they are unfamiliar.«

[Bezooyen 2002, S. 2]

Zusammenfassend lässt sich die Materialwahl als eine äußerst komplexe Handlung verstehen: Sie steht zu einem nicht genau fixierten Zeitpunkt im Rahmen der sonstigen Entwurfsentscheidungen an und basiert auf unterschiedlichsten Quellen von Informationen, die zudem aufgrund von Neu- und Weiterentwicklungen am Markt einer steten Aktualisierung bedürfen. Zur Eingrenzung des letztendlich gewählten Materials können mehrere unterschiedliche Strategien verfolgt werden.

Will man den als problembehaftet erkannten Auswahlprozess (vgl. Kapitel 1.2) als Ganzes verbessern, hat man die Möglichkeit, an vielen verschiedenen Punkten und auf unterschiedlichen Ebenen anzugreifen. In dieser Arbeit soll schwerpunktmäßig die Entscheidungsfindung für ein bestimmtes Material unterstützt werden (vgl. Kapitel 1.3.1). Aus den obigen Betrachtungen lassen sich daher die folgenden Anforderungen an ein die Entscheidung unterstützendes Werkzeug ableiten:

Anforderungen

Da der Zeitpunkt der Materialwahl und somit die vorhandene und notwendige Informationstiefe wechseln kann, sollte der Zugang und die Auswertung von Materialinformationen zeitlich unabhängig und inhaltlich auf verschiedenen Detailstufen erfolgen können.

Da die Materialwahl auf jeweils aktuellem Materialwissen aufbauen können soll, liegt ein System nahe, das zum Zeitpunkt der Materialwahl automatisch die jeweils aktuellsten Produktdaten von Herstellern auslesen und interpretieren kann.

Ein die Entscheidung unterstützendes Werkzeug soll nicht automatisch eine einzige Lösung als Ergebnis vorgeben, sondern ermöglichen, die Entscheidung auf einer nachvollziehbaren und sinnfälligen Grundlage fällen zu können. Es soll daher vor allem den Prozess der Auswahl unterstützen, indem die komplexe Materialentscheidung in kleinen, einzelnen und überschaubaren Schritten vorgenommen werden kann.

Damit dieser schrittweise Auswahlprozess nicht nur auf eine einzige mögliche Strategie verkürzt wird, sollten alle genannten Strategien - und zwar in beliebig wechselnder Reihenfolge - verfolgt werden können. Das Werkzeug soll also ermöglichen, rein analytisch vorgehen zu können und Materialien aufgrund der Erfüllung geforderter Eigenschaften zu bewerten. Es soll den Rückgriff auf ein mehr oder weniger detailliert beschriebenes Material erlauben, um analoge oder ähnliche Materialien zu suchen. Und es soll - in Anlehnung an die eigentliche Suche - durchaus auch unerwartete Vorschläge für Materialien unterbreiten können.

3

Digitale Techniken bei der Materialwahl

»In addition, there are few software tools that attempt to provide assistance in material selection, [...] new software tools that utilize standardized product information would improve the overall process, lessen the time required, and improve accuracy.«

[IAI 2001]

Bereits heute werden diverse digitale Techniken im Rahmen der Material- und Produktauswahl in der Architektur eingesetzt. Selbstverständlich unterstützen sie alle auf ihre eigene Art und Weise den Materialwahlprozess. Diese Unterstützung verläuft dabei in unterschiedliche Richtungen:

Es gibt zahlreiche Techniken, die darauf zielen, ein Material mit seinen Eigenschaften digital darzustellen (Kapitel 3.1). Bei ihnen geht es im Prinzip um das „Ersetzen“ eines nicht real vorliegenden Materials durch eine digitale Repräsentation. Je besser die Darstellung hinsichtlich Aussagekraft und Qualität ausfällt, umso weniger relevant ist das Fehlen des realen Materials.

Die eigentliche Unterstützung besteht also darin, bei der Auswahl genauso agieren zu können, wie man es mit realen Materialien auch tun würde. Dies bedeutet aber im Umkehrschluss, dass durch diese Techniken erst einmal keine weitere fachliche Hilfestellung für die Auswahl zu erwarten ist.

Eine andere Möglichkeit darüber hinaus ist daher, den Computer – auf Grundlage programmierter Regeln und nach entsprechenden Nutzereingaben - auch bei der Suche und Bewertung „geeigneter“ Materialoberflächen einzusetzen. Hier gibt der Rechner also fachliche Hilfe. Werkzeuge in dieser Richtung werden in Kapitel 3.2 vorgestellt.

Zunehmend werden Digitaltechniken auch dazu eingesetzt, Oberflächen zunächst individuell zu beschreiben und erst anschließend nutzerspezifisch herzustellen. Diese Techniken haben mit der Materialwahl, wie sie hier verstanden werden soll, eher am Rande zu tun. Einige Beispiele hierzu werden jedoch der Vollständigkeit halber in Kapitel 3.3 aufgeführt.

Die bewusst sehr stark reduzierten Beschreibungen der einzelnen Themenfelder sollen zunächst das breite Spektrum der im Zusammenhang mit der Materialwahl genutzten Techniken zeigen sowie aktuelle Tendenzen erkennbar werden lassen. Sie erheben als Querschnittsbetrachtung keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern dienen im Anschluss vor allem als Basis und Verweismöglichkeit für die im Kapitel 3.4 formulierte Vision einer durchgehenden digitalen Unterstützung des Materialwahlprozesses.

3.1

Digitale Darstellung von Material

»Solange man Äpfel nicht per E-Mail verschicken kann, müssen Materialien bemustert werden«, so lautet das Motto von raumPROBE.«

[Birk 2006b]

Da nicht zu jedem Zeitpunkt und an jeder Stelle der Materialwahl auf alle Produkte real zurückgegriffen werden kann und soll, ist das Ziel der digitalen Materialdarstellung, eine für den jeweiligen Zweck ausreichende Information über diese nicht real vorliegenden Materialien zu vermitteln. Da der Zweck der Repräsentation je nach Zeitpunkt im Entwurfsprozess und je nach inhaltlicher Zielstellung jedoch stark variieren kann, lassen sich höchst unterschiedliche Ansätze und Techniken der Darstellung ausmachen.

Allen vorgestellten Ansätzen ist gemein, dass der Planer ein Material letztlich nur auf Grundlage eigener Erfahrung einschätzen und bewerten kann. Er bekommt darüber hinaus noch keine weitere Unterstützung bei der eigentlichen Materialwahl.

3.1.1

Alphanumerische Beschreibung von Material

Die einfachste Art Materialien zu kennzeichnen ist ihre textliche oder numerische Beschreibung. In architekturenspezifischen CAAD-Systemen lassen sich sowohl Raumbereichen als auch konstruktiven Bauteilen Materialien zuordnen. Beide Möglichkeiten haben jedoch ursprünglich weniger die Unterstützung gestalterischer Aspekte zum Ziel, als vielmehr die Absicht, schnell und strukturiert die Mengen und Massen für die Ausschreibung der Bauleistungen ermitteln zu können.

Angaben im Raumstempel

Wie bei ursprünglich manuell gezeichneten Plänen lassen sich auch in CAAD-Plänen Raumstempel eintragen, die für jeden Raum - neben der Festlegung der Funktion und einer eventuellen Durchnummerierung - den Fußbodenbelag und die automatisch ermittelte Grundfläche und Länge der umlaufenden Kanten aufführen. In einigen Systemen wird der Raum darüber hinaus als eigenständiges 3D-Objekt verwaltet, bei dem dann auch die Wand- und Deckflächen hinsichtlich ihrer Materialität beschrieben sein können.

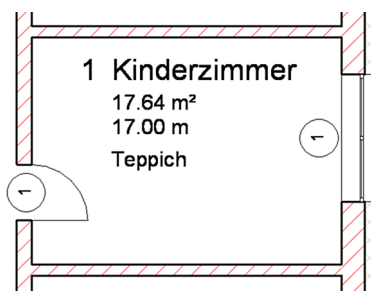


Abb. 3.1: Raumstempel in CAAD

Diese Daten können genutzt werden, eine Flächenermittlung oder ein umfassenderes Raumbuch zu erstellen.

Definition von CAAD-Bauteilen

Auch den konstruktiven Bauteilen lassen sich Materialien zuordnen. Hierbei kann - je nach System - auf Kataloge zurückgegriffen werden, die bereits detailliert die geplante Ausführungsart beschreiben.

Material	Kurztext
012021010	Abdichtung in Wand, G 200 DD, d= 24,0 cm
012021020	Abdichtung in Wand, G 200 DD, d= 36,5 cm
012021025	Vollziegel VMZ 20/1,6, MG II, d= 24 cm
012021030	Hlz 12/1,0 - MG II, d= 36,5 cm
012021050	Hlz 12/1,4 - MG II, d= 36,5 cm
012021070	Hlz 20/1,8 - MG II, d= 24,0 cm
012021100	Hlz 12/0,8-0,21, MG IIIa, d= 36,5 cm
012021160	Hlz 12/0,8-0,33, MG IIIa, d= 30,0 cm
012021190	Hlz 12/0,8-0,33, LM 36, d= 36,5 cm
012021210	Hohlblock Hbl 4, MG II, d= 36,5 cm
012021270	Porenbeton-Blocksteine 64/0,6, d= 30 cm
012021310	Ziegelsturz, d=36,5 cm, LW 76 cm
012021320	Ziegelsturz, d=36,5 cm, LW 101 cm
012021330	Ziegelsturz, d=36,5 cm, LW über 1,01 m
012021365	Stahlbetonsturz, d = 36,5 cm, LW <= 1,01m
012021390	Heizkörpernische, d= 16,5 cm
012021410	Rolladenkasten (vorgefertigt), d= 36,5cm
012021450	Rolladenkasten über Eck, als Zulage

Abb. 3.2: Bauteil-Materialzuweisung in CAAD

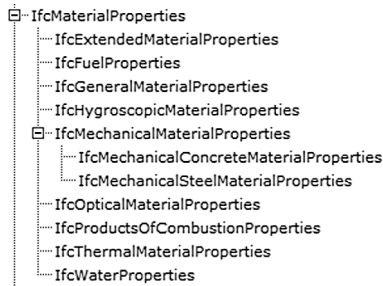


Abb. 3.3: IFC Material Properties

Neben einer dadurch ermöglichten automatischen Darstellung der Bauteile (z.B. Diagonalschraffur für Mauerwerk) dient dies vor allem dazu, Bauteillisten für die Vorbereitung der Ausschreibung auch gegliedert nach verschiedenen Baustoffen und Ausführungen (z.B. Ziegelart, Rohdichte, Mörtelgruppe des Mauerwerks) erstellen zu können.

Darüber hinaus lassen sich diese Angaben jedoch zunächst noch nicht weiter nutzen.

Komplexere Informationen im Gebäudeinformationsmodell

Erst der Gedanke eines umfassenden Gebäudeinformationsmodells (Building Information Model BIM) geht über eine reine Mengen- und Massenermittlung hinaus, indem die einmal im Datenmodell vorhandenen Informationen auch für weitere Zwecke genutzt werden können. So findet z.B. die Angabe der äußersten Bauteilschicht zugleich Verwendung in der Oberflächendarstellung in einer 3D-Visualisierung, die Angaben zum Gesamtbauteil dafür in statischen oder energetischen Berechnungen.

Mit IFC (Industry Foundation Classes) ist eine Standard-Schnittstelle für den softwareübergreifenden Datenaustausch beschrieben. Die in der aktuellen Version IFC 2x3 (Stand April 2007) definierbaren Materialeigenschaften beziehen sich dabei nur auf Bauteile, nicht auf Raumboflächen. Beschreibbar sind vor allem die physikalischen (mechanischen, thermischen, optischen, hygroskopischen) Eigenschaften eines Bauteils [IAI 2006].

Das offensichtliche Ziel dieser angehängten Zusatzinformationen ist, das digitale Gebäudemodell über die Beschreibung der Geometrie hinaus vor allem für unterschiedliche Simulationsrechnungen und einer damit verbundenen Optimierung der Planung einsetzen zu können.

Zusammenfassung

Die derzeit alphanumerisch in einem CAAD-Modell vorgehaltenen Materialeigenschaften können dazu genutzt werden, Abrechnungs- oder Simulationsaufgaben zu unterstützen, Aspekte der Oberflächengestaltung sind mit diesen Daten dagegen weniger verbunden. Einige der bereits vorhandenen Angaben (z.B. Fußbodenmaterial) können allerdings als Eingabedaten in einen umfassenderen Materialwahlprozess einfließen.

3.1.2

Grafische Darstellung von Material

Der „gezeichnete“ Plan ist immer noch das im Rahmen eines Bauantrags, in der Leistungsbeschreibung der HOAI sowie im Wettbewerb geforderte Medium, Architektorentwürfe und -planungen zu präsentieren und zu kommunizieren. Neben rein alphanumerischen Angaben werden Materialien in Plänen durch verschiedene grafische Mittel dargestellt.

Tabelle 8: Kennzeichnung der Schnittflächen

Spalte	1	2
Zeile	Anwendungsbereich	Kennzeichnung
1	Boden	
2	Kies	
3	Sand	
4	Beton (unbewehrt)	
5	Beton (bewehrt)	

Abb. 3.4: DIN 1356-1 Tabelle 8

Darstellung in Bauzeichnungen

Für Bauzeichnungen in der Objekt- und Tragwerksplanung, egal ob manuell oder computergestützt hergestellt, sind Grundregeln für die Darstellung definiert [DIN 1995]. Unter Verweis auf weitere Normen [DIN 1990; DIN 2002] wird für verschiedene Werkstoffe definiert, wie diese in Schnitten durch Schraffuren gekennzeichnet werden sollen. Ausdrücklich wird dabei die zusätzliche textliche Bezeichnung gefordert.

Diese Begrenzung der vorgenommenen Definitionen auf Schnittdarstellungen bezieht sich offensichtlich auf die verwendeten Konstruktionsmaterialien und weniger auf die sichtbare letzte Schicht der Oberfläche (vgl. Kapitel 1.3.2).

In welcher Form die Art des Oberflächenmaterials in Ansichtszeichnungen dargestellt werden soll, ist dagegen nicht definiert und bleibt daher dem Zeichner überlassen (z.B. als Fliesenspiegel, ange deutete Fugenbilder etc.).

Schraffuren und Muster in CAD-Systemen

Bereits einfache CAD-Systeme bieten Schraffur- und Musterfüllungen von zweidimensional umrandeten Flächen an, also von Schnittflächen oder auch von Oberflächen. Diese Schraffuren werden prozedural ausgeführt, die Darstellung mit einzelnen Strichen unterschiedlicher Länge, Dicke, Richtung, Farbe oder Strichart beruht also auf einer parametrisierten Erzeugungsvorschrift und kann daher leicht einem individuellen Bürostandard angepasst werden.

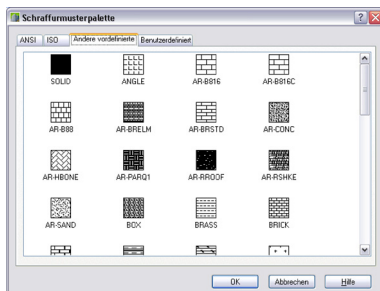


Abb. 3.5: Schraffurmenü in CAAD

Normgerechte Schraffuren sind aber - auch in architektur-spezifischen CAAD-Systemen - nur wenig zu finden. Die vergebenen Namen sind oft verwirrend und bezeichnen manchmal eher die Art der Erzeugung (z.B. „Diagonal 135° - 5mm“) als den damit darzustellenden Baustoff.

Weiterhin gibt es im Internet Drittanbieter und Foren, die zusätzlich zu den in der Software vorhandenen Füllmustern zusätzliche Muster als Ergänzungen bereitstellen (z.B. [Hatchpatterns]). Aber selbst hier lassen sich kaum die von der Bauzeichnungsnorm vorgeschriebenen Darstellungsstile finden.

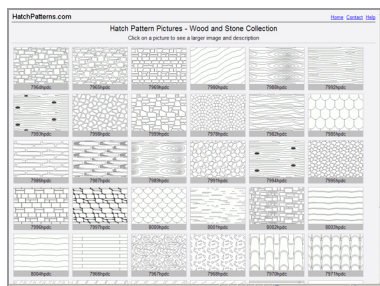


Abb. 3.6: Zusätzliche Schraffurmuster

Farbflächen und Texturen in CAD-Systemen

Eine andere Art der Flächenfüllung bei 2D-Grafiken ist das Anlegen mit Farben, Farbverläufen oder auch mit Bitmaptexturen. Da mittlerweile die aus reinen Grafikprogrammen bekannten Bildbearbeitungsfunktionen (Verändern von Helligkeit und Kontrast, Drehen und Spiegeln, Transparenzen, Filter etc.) in CAD-Systeme integriert sind, kann ein geübter Bearbeiter auf Grundlage von einfachen 2D-Grafiken Präsentationszeichnungen erstellen, die durchaus eindrucksvoll die gewünschte Materialität und Farbigkeit eines Entwurfs vermitteln.

Eine interessante Hilfestellung zur Erstellung solcher 2D-Präsentationen bietet die Software Piranesi: Ausgangspunkt ist eine



Abb. 3.7: Präsentationszeichnung in Piranesi

im 3D-CAD eingestellte Perspektive, die über ein Plug-In als EPIX-Datei (extended TIFF) exportiert wird. Dabei werden zwei zusätzliche Bildkanäle angelegt, einer als Z- oder Tiefenkanal, ein anderer als Material- oder Objekt-ID-Kanal [Richens 1997]. Durch diese Zusatzinformation vereinfacht die Software das zweidimensionale Aufbringen von räumlich gestaffelten und perspektivisch korrekt verzerrten Schraffuren oder Bitmap-Texturen auf Oberflächen bzw. auch nur einzelnen Teilflächen. Das Gesamtbild kann anschließend durch diverse Effektfiler noch grafisch aufbereitet werden [Piranesi]. Mittlerweile verschwimmen die Grenzen zu Bildbearbeitungsprogrammen jedoch immer mehr, da auch in diese immer mehr Perspektivwerkzeuge und sogar 3D-Funktionalitäten integriert werden (z.B. [Photoshop]).

Solche letztendlich collageartigen Darstellungen können immer nur rein atmosphärischer Natur sein. Sie geben also eher Aufschluss über die gewünschte Wirkung einer Oberfläche als über konkrete Materialien in der Gesamtheit ihrer Eigenschaften.

Präzise Farben in CAD-Systemen

Eine genaue Festlegung hinsichtlich der gewünschten Farbigkeit ermöglicht die Einbindung von exakten Farbpaletten wie z.B. RAL (RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., ursprgl. Reichs-Ausschuss für Lieferbedingungen) in die CAAD- oder 2D-Grafik-Umgebung [RAL digital]. Neben herstellerübergreifenden Farbsystemen werden auch vereinzelt Farbkollektionen der Farben-, Lack- oder Putzsystemhersteller als Paletten angeboten.

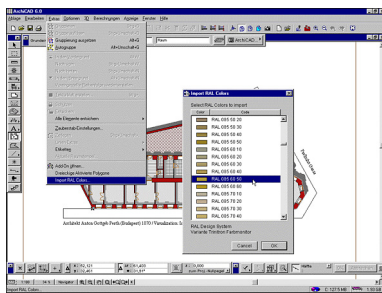


Abb. 3.8: Einbindung einer Farbpalette in CAAD

Die ausgewählten Farben werden intern für die Monitorarstellung in RGB- oder für den Druck in CMYK-Farben umgerechnet und bieten so dem Entwerfenden - bei entsprechender Farbkalibrierung des Gesamtsystems - eine genaue Aussagequalität hinsichtlich der Farbigkeit einer Oberfläche (auf die Problematik und Lösungsansätze der Kalibrierung, auf den Einfluss des Papiers, auf die Farbqualität sowie auf den bekannten Effekt, dass Farben auf kleinen Flächen anders wirken als auf großen, soll hier nicht weiter eingegangen werden).

Der Vorteil des Gebrauchs solcher konkreten Farbsysteme liegt nicht nur in der verbesserten visuellen Darstellung der Farben, sondern vor allem - durch die Codierung der Farben als genormte Angabe - in der vom Farbausdruck unabhängigen Kommunikation der Information, z.B. mit der ausführenden Firma.

Zusammenfassung

Übliche Architekturzeichnungen benutzen eine symbolische, teilweise genormte Plangrafik in Verbindung mit textlichen Anmerkungen, um eine gewünschte Materialität in Entwurf und Planung zu kommunizieren. Je nach Ziel der Darstellung kann dies entweder mittels exakter (Farb-) Angaben oder eher durch die Vermittlung der gewünschten Atmosphäre erfolgen. Die Grenzen zwischen

CAAD-Grafiken und aufwendigen Präsentationsdarstellungen in Bildbearbeitungs- und Layoutprogrammen verschwimmen dabei immer weiter.

3.1.3

Visualisierung von Material

Üblicherweise werden in der Kommunikation von Architekturdarstellungen die oben genannten, rein grafisch angelegten Pläne mittlerweile durch gerenderte Bilder - entweder direkt aus der CAAD-Software oder aber aus einer geeigneten architekturunabhängigen Modelliersoftware - ergänzt. Neben anderen Vorzügen einer durchgängigen 3D-Bearbeitung erlaubt nur eine solche dreidimensionale Arbeitsweise die visuelle Darstellung erst räumlich wirksamer und beleuchtungsabhängiger Materialeffekte, wie z.B. die Veränderung des Aussehens einer Oberfläche in Abhängigkeit von Betrachtungs- und Beleuchtungswinkel.

Einfache Materialdefinitionen

Um ein Material für eine solche Visualisierung einzustellen, werden seine grundlegenden optischen Qualitäten in einzelnen Kanälen (Farbe, Transparenz, Spiegelung etc.) beschrieben. Dies kann rein numerisch, aber auch texturbasiert oder in einer Kombination aus beidem erfolgen. Die Arbeit mit Texturen ermöglicht, grundsätzlich für die ganze Fläche eingestellte Materialeigenschaften im Detail noch über die Farbwerte einzelner Pixel zu steuern und so auch feine Strukturen oder Muster darzustellen.

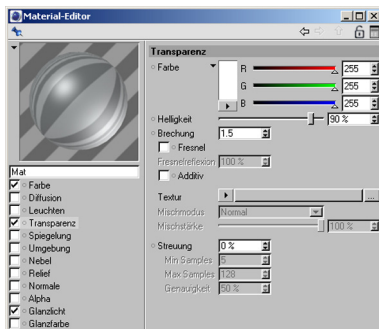


Abb. 3.9: Materialmanager Cinema 4D

Da die Flächen eines 3D-Körpers eine definierte Lage im Raum aufweisen, kann das Oberflächenmaterial im Rendervorgang realitätsnah ein in Bezug zu Betrachter und Lichtquelle winkelabhängiges Aussehen erlangen. Obwohl üblicherweise mit reinen Oberflächenmodellierern gearbeitet wird, welche die Körper mathematisch nur durch die Hüllflächen beschreiben, können auch einfache volumenabhängige Effekte (z.B. das Brechungsverhalten transparenter Materialien) berücksichtigt werden. Der Charakter eines Materials kann in Visualisierungen somit auch im Zusammenhang mit der Form eines Körpers sehr gut wiedergegeben werden.

Es sollte aber klar gesehen werden, dass die hier eingestellten Eigenschaften von Materialien allein das Ziel haben, dass das Ergebnis, also das gerenderte Bild, dem realen bzw. dem gewünschten Bild einer Oberfläche entspricht. Es werden also explizit keine „realen“ Materialeigenschaften in der Berechnung verarbeitet, sondern es wird versucht, die optischen Eigenschaften so perfekt wie möglich visuell nachzuempfinden. Je nach Software werden dafür zusätzliche Kanäle angeboten, mit denen bestimmte Effekte gesteuert werden können. Diese haben mit den realen Eigenschaften nichts zu tun und sind rein den Berechnungsalgorithmen geschuldet.



Abb. 3.10: Maxwell Material

Physikalisch-basierte Renderer

Die gleiche Einschränkung gilt auch für die sogenannten „physikalisch-basierten“ Renderengines (z.B. [Maxwellrender; Fryrender; Finalrender]). Diese erlauben zwar mittlerweile auch die Darstellung eines sehr komplexen, in der Realität vorkommenden Materialverhaltens wie z.B. winklabhängige Lichtstreuung auf und auch unter der Oberfläche (bidirectional reflection distribution function BRDF bzw. bidirectional surface scattering distribution function BSSRDF), wellenlängenbasierte Lichtstreuung (Prismeneffekt), oder sogenannte „Coating-Effekte“ (Interferenz- oder Schillereffekte durch dünne Oberflächenfilme). Die dazu notwendigerweise einzugebenden Werte haben allerdings nach wie vor wenig mit realen Kennwerten der Materialien zu tun. Die Einstellung der notwendigen Parameter bedarf somit viel Erfahrung, um den gewünschten Effekt exakt zu treffen. Prinzipiell lassen sich auch irrealen und physikalisch unmögliche Materialien definieren.

Texture Mapping

Sollen in irgendeinem der angebotenen Materialkanäle Bitmap-Texturen zur Steuerung von Oberflächeneigenschaften verwendet werden, muss definiert werden, wie ein rechteckiges Texturbild auf eine - eventuell gekrümmte - Oberfläche aufgebracht werden soll. Hierzu wird als Hilfskonstrukt ein internes Texturkoordinatensystem eingeführt, das die notwendige geometrische Verzerrung und Aufteilung des Bitmaps mathematisch beschreibt. Die Darstellung kann dann zwar entsprechend berechnet werden, allerdings wird das Ergebnis nicht immer sinnvoll aussehen (z.B. eine verwundene Fliesenstruktur).

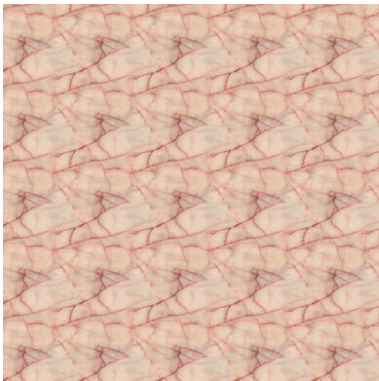


Abb. 3.11: Unnatürlich wirkende Kachelung

Bei sehr regelmäßigen Oberflächen (z.B. Fliesenmuster) können recht klein aufgelöste Texturen verwendet werden, die mehrmals nebeneinander „gekachelt“ werden, ohne dass die Stoßkanten sichtbar in Erscheinung treten. Die Erzeugung solcher „nahtlos kachelbaren“ Texturen wird durch etliche Softwaretools (z.B. [imageSynth]) unterstützt, die einen stetigen Verlauf zwischen dem linken und rechten bzw. dem oberen und unteren Bildrand berechnen.

Unregelmäßigere Materialien dagegen benötigen immer größere Bitmaps, um nicht – trotz rechnerischer Nahtlosigkeit des Bitmaps – durch die Wiederholung gleicher Oberflächenbereiche unnatürlich zu wirken. Viele Anbieter hochwertiger Texturen für Architekturvisualisierung arbeiten daher mit Bildauflösungen von 6000x6000 Pixeln und größer (z.B. [arroway]). Der Anwender muss sich aber bewusst sein, dass mit zunehmender Texturgröße der Arbeitsspeicher des Computers immer stärker beansprucht wird.

»Maxifikation - die Textur muss stark vergrößert werden um das Objekt zu bedecken wenn es nah am Betrachter liegt.

Minifikation - die Textur muss stark verkleinert werden wenn das Objekt sehr weit vom Betrachter ent-

Ein zusätzlicher Nachteil beim Einsatz von Bitmaps als Texturen liegt in der maßstabs- oder auflösungsabhängigen Darstellung des Bilds. Für die Berechnung des Ausgabebilds wird immer eine Texturinterpolation notwendig sein, da die Bildpunkte der Textur (Texel) nicht mit den Bildpunkten des Ausgabebilds übereinstimmen. Verschiedene technische Ansätze (Einsatz von Mipmaps, Fouriersynthe-

fernt ist (im Extremfall ist das Objekt dann nur noch genau 1 Pixel groß).«

[Wikipedia 2007a]

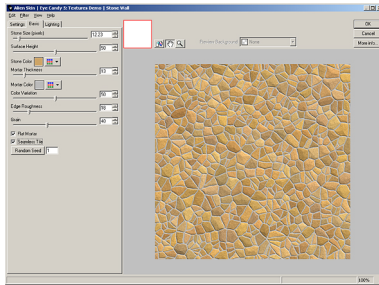


Abb. 3.12: Prozeduraler Texturgenerator

se) können die Darstellungsqualität bei der Minifikation erhöhen [Wikipedia 2007a]. Bei einer durch nahes Heranzoomen notwendig werdenden Maxifikation aber wird das Bild prinzipbedingt ab einem gewissen Grenzwert immer pixelig aussehen.

Prozedurale Materialien

Zur Umgehung der oben genannten Probleme werden die Darstellungseigenschaften von Materialien in hochwertigeren Visualisierungsprogrammen heute zunehmend prozedural definiert.

Hierbei werden einzelne Materialkanäle über mathematische Prozeduren gesteuert, es werden also parametrische Erzeugungsvorschriften formuliert und im Renderprozess durchgeführt. Es ist dabei auch möglich Hierarchien aufzubauen, also auf bereits prozedural berechnete Werte weitere Prozeduren anzuwenden. Nicht nur regelmäßige Oberflächen, sondern auch die Charakteristika von natürlichen Oberflächen lassen sich durch die Benutzung von Zufallsgeneratoren und Rauschmustern prozedural sehr gut darstellen.

Während derart generierte 2D-Texturen – gleich ob aus externen Texturgeneratoren oder auch systemintern - immer noch das Problem des korrekten Mappings mit sich bringen, kann über die Definition von 3D-Prozeduren direkt für jeden Punkt im Raum berechnet werden, wie dieser dargestellt werden soll. So entfallen prinzipbedingt die Nachteile des Texture-Mappings, ein Material ist quasi in seinem gesamten Volumen beschrieben.

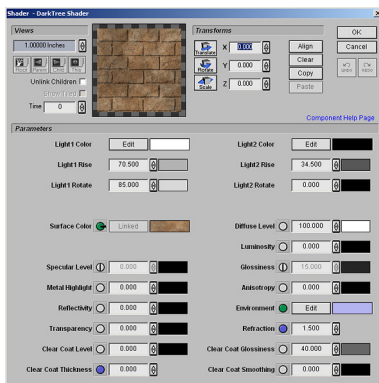


Abb. 3.13: Externe Materialdefinition in DarkTree

Je nach verwendeter Software werden unterschiedliche Materialkanäle verwendet, auf die zur Beschreibung eines Materials zugegriffen werden kann. Materialdefinitionen lassen sich daher kaum softwareübergreifend verwenden. Es gibt aber mittlerweile Anbieter, die zwar auch eigene Datenformate verwenden, diese dann aber über Plug-Ins für verschiedene Plattformen verfügbar machen (z.B. [Darksim]).

Ein anderer Weg ist, einem externen Renderprogramm nur die Geometriedaten aus CAAD- oder Modellierprogrammen zur Verfügung zu stellen, die Einstellungen für Licht und Material aber erst in diesem Programm vorzunehmen. Auch hierfür werden mittlerweile spezielle Export-Plug-Ins (z.B. für [Maxwellrender]) angeboten.

Hardware-Shader

Fast alle visuellen Materialeffekte können heute statt der langsamen Berechnung auf der CPU (Central Processor Unit) unter Rückgriff auf Hardwarebeschleunigung durch OpenGL oder DirectX auch direkt und nahezu in Echtzeit auf der Grafikkarte gerendert werden. Solche „Realtime-Shader“ werden vielfach in Computerspielen eingesetzt, wo die Optimierung der Darstellung in Echtzeit gefordert ist. Auch in der Architekturvisualisierung ist die sofortige Überprüfbarkeit des Aussehens eines eingestellten Materials natürlich von Vorteil.

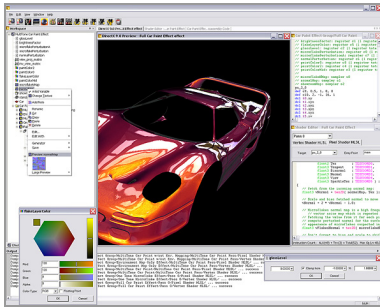


Abb. 3.14: Beschreibung von Realtime-Shadern

Anfangs wurden solche Shader noch manuell von Experten als Programm-Code in speziellen Programmiersprachen (z.B. HLSL „High Level Shader Language“ oder GLSL „OpenGL Shader Language“) geschrieben. Mittlerweile gibt es aber auch eher grafisch orientierte Programmoberflächen (z.B. [Rendermonkey; FX Composer]), die auch weniger geübten Anwendern die Definition von eigenen Materialien erleichtern.

Neben reinen Pixel-Shadern, die nur die Pixelfarbe berechnen können, stehen heute auch Vertex-Shader und Geometry-Shader zur Verfügung, die auch die Oberflächengeometrie von Objekten gezielt verändern oder sogar ergänzen können. Somit sind auch dreidimensionale Materialstruktureffekte auf Oberflächen darstellbar, ohne im Modell die Grundgeometrie ändern zu müssen.

Zusammenfassung

Zur Präsentation nach außen und zur Eigenüberprüfung im Entwurf werden in CAAD-Programmen und in externer Modelliersoftware verstärkt hochwertige Renderings eingesetzt. Sollen diese Visualisierungen nicht bewusst unklar und offen gehalten werden, lässt sich - mit etwas Erfahrung - eine äußerst realistische Darstellung von Material erzielen. Der Trend bei der Definition von Material geht eindeutig zu prozedural beschriebenen und softwareunabhängigen Formaten.

Es ist davon auszugehen, dass die visuelle Darstellungsqualität auch komplexer Materialeigenschaften zukünftig noch weiter perfektioniert wird und das Ausgabebild in Echtzeit gerendert werden kann. Der Nutzer sollte sich allerdings im Klaren sein, dass der Computer für die Darstellung nicht mit realen Materialeigenschaften arbeitet, sondern eine davon losgelöste und unabhängige mathematische Beschreibung der durchzuführenden Berechnungen benötigt. Die Eingabe solcher Daten wird allerdings zunehmend komfortabler und auch dem Laien zugänglicher.

3.1.4

Übernahme von Materialdaten in die CAD-Umgebung



Abb. 3.15: Vorgegebener Probekörper

Selbstverständlich gibt es für alle gängigen Visualisierungsprogramme umfangreiche Bibliotheken mit bereits vordefinierten Grundmaterialien. Zudem gibt es viele Drittanbieter, die speziell Architekturmaterialien als hochwertige Texturen mit mehreren Layern anbieten, die dann - mit den oben beschriebenen Problemen - manuell in verschiedenen Materialkanälen (z.B. getrennt als Farb- und Normalenmap) eingesetzt werden können.

Für die Definition komplexerer Materialien sind jedoch zusätzlich umfangreiche und nur mit Erfahrung gelingende Einstellungen zu treffen. Dabei ist es durchaus gängige Praxis, dass solche aufwendigeren Materialien von fortgeschritteneren Softwarenutzern – ob aus reiner Freude an der Machbarkeit oder zum Zwecke der Eigen-

werbung - erstellt und anschließend oftmals sogar kostenlos im Internet zur Verfügung gestellt werden.

Viele Materialeffekte sind maßstabsabhängig, daher wird üblicherweise ein Probekörper als Datei vorgegeben, der eine einheitliche Bewertung der Materialien ermöglicht (z.B. [Maxwellrender; C4D-Textures]). Die Uploader von Materialdaten sind aufgefordert, ihre Materialien zu kategorisieren bzw. stichwortartig zu indizieren, um dem Anwender eine gezielte Suche zu ermöglichen.

Hat ein Nutzer im Internet ein geeignetes Material gefunden, kann er es mit verschiedenen Techniken in seine eigene Visualisierungs-umgebung übernehmen:

Download

Der „klassische“ manuelle Download von Materialdaten aus dem Web auf den eigenen Rechner ist derzeit – neben dem Kauf von Datenträgern mit entsprechenden Texturen - noch der am weitesten verbreitete Weg beim Aufbau und der Pflege einer eigenen digitalen Materialsammlung. Die Organisation der Sammlung und das Einbinden der Daten erfolgt durch den Nutzer.

Darüber hinaus gibt es aber weitere mögliche Techniken der Veröffentlichung, Verbreitung und Übernahme von CAD-Daten. Bei der Ergänzung der eigenen Planung mit vorgefertigten 3D-Modellen ist es z.B. bereits üblich, dass aus der CAD-Umgebung direkt auf externe Webseiten mit entsprechenden Inhalten verlinkt bzw. referenziert wird. Ein Modell-Download kann dann vereinfacht und auf einen Klick reduziert werden, da die Speicherpfade bereits eingestellt sind. In der gleichen Weise könnten CAD-Systeme auch auf externe Materialdaten zugreifen, eine konkrete Umsetzung dieser Technik wurde allerdings bisher in keinem System gefunden.

Die i-drop-Technik

Die von Autodesk entwickelte i-drop-Technologie ermöglicht darüber hinaus eine direkte Übernahme von beliebigen Design-Inhalten per „drag&drop“ aus dem Web in die eigene (Autodesk-) CAD-Umgebung. Hierbei wird vom Anbieter ein XML-file (Extensible Markup Language) als „package file“ erstellt, in dem dann eine beliebige Anzahl weiterer Dateien referenziert werden können. So können nicht nur Geometriedaten von Produkten, sondern auch damit verbundene zusätzliche technische oder fachspezifische Daten in einem einzigen Vorgang übernommen werden [Autodesk 2003].

Ein sehr gutes Beispiel für solch einen sinnvollen Einsatz der i-drop-Technologie ist die Bereitstellung von umfangreichen Leuchtendaten der Firma ERCO. Jede angebotene Leuchte wird mit ihrer Geometrie, ihrer eventuellen Kinematik, ihrem Material und ihrer photometrischen Beschreibung zur direkten Übernahme bereitgestellt [ERCO].

Im Zusammenhang mit Materialdaten wurde kein Beispiel für eine Verwendung der i-drop-Technologie gefunden.

Feeds

Während der normale Download und auch das i-drop-Verfahren noch ein aktive Handlung des Nutzers erfordern, können über „Feeds“ Inhalte beliebiger Art einfach abonniert werden. Diese werden dann automatisch in regelmäßigen Abständen aktualisiert auf ein Endgerät – z.B. den PC - des Nutzers geladen.

Solche XML-basierten Feeds (RSS-Feed: Really Simple Syndication [Wikipedia 2007b] oder Atom-Feed [Wikipedia 2007c]) haben sich vor allem verbreitet durch das Angebot von Weblogs, als Newsletter oder auch in Podcasts. Die Daten werden dabei in einer XML-Datei in Rohform strukturiert und maschinenlesbar vorgehalten. Der Nutzer braucht dadurch selbst zur Information aus mehreren Quellen nicht mehr verschiedene Webseiten separat aufrufen, sondern kann über eine einzelne Oberfläche (Aggregatorprogramm oder FeedReader) die für ihn wichtigen Informationen filtern und abrufen [Wikipedia 2007b].

Die für den Maxwellrender veröffentlichten Materialdefinitionen werden mittlerweile als RSS-Feed angeboten, so dass Abonnenten immer die aktuell veröffentlichten Dateien zugespielt bekommen, ohne wiederholt aktiv danach suchen zu müssen [Maxwellrender].

Bereitstellung realer Materialien

Die bisher genannten Materialdaten beruhen allesamt nicht auf konkreten Bauprodukten spezieller Hersteller, sondern sind eher allgemein gehaltene Definitionen bestimmter Materialoberflächen. Die Sicherheit, dass es zu solchen digital definierten Materialien letztlich auch reale Produktentsprechungen gibt, ist daher nicht gegeben.

Auffallend wenige Hersteller – selbst von relativ einfach darzustellenden, planen Oberflächenmaterialien - stellen qualitativ hochwertige, kachelbare und in verschiedenen Kanälen einsetzbare Texturen ihrer Produkte zum Download zur Verfügung (Ausnahme z.B. [Appiani]). Weitergehende herstellereinspezifische Material- oder Produktdaten zum direkten Einsatz in Visualisierungssoftware wurden auf keiner der bisher besuchten Herstellerseiten gefunden. Diese Lücke versucht ein Ansatz von LightWorks zu schließen, indem in Partnerschaft und Zusammenarbeit mit Herstellern so genannte „real-world materials“ zum Download bereitgestellt werden [LightWorks].

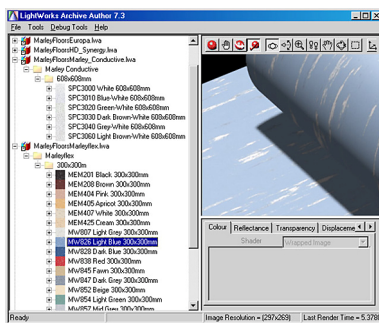


Abb. 3.16: LightWorks Authoring-Tool

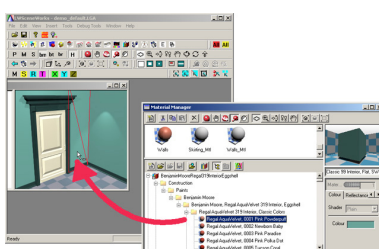


Abb. 3.17: Übernahme einer LWA-Datei in CAAD

»Real-world materials don't just stop at surfaces though. They extend into environment maps, physically-accurate lights, BRDF real-world measurements, all of which can have sizes, costs, supplier information and website details attached to them for storage inside the LWA archive, to aid in design specifications.«

[LightWorks]

Diese LWA-Dateien (LightWorks Archive) können als plattform- und softwareunabhängiges Format über Plug-Ins in verschiedene Visualisierungsprogramme übernommen werden. Als eine - in der Handhabung - einzige Datei können je nach Komplexität des Materials verschiedene Techniken (Texturen, prozedurale Materialien, Realtime-Shader) zum Einsatz kommen, um reale Oberflächen darzustellen. Zusätzlich können über ein Authoring-Tool vom Hersteller weitere Daten wie z.B. Kosten oder Lieferanteninformationen angehängt werden.

Im Sinne einer einfachen Übernahme von herstellereigenen Produkt- und Materialdaten in die CAD-Umgebung scheint dieser Ansatz sehr umfassend zu sein. Die bisher angebotenen Inhalte (Stand 04-2007) sind allerdings noch auf sehr wenige Hersteller beschränkt. Eine offensive Erweiterungsstrategie ist zudem leider nicht erkennbar.

Zusammenfassung

Rein technisch stellt es kein Problem dar, Material- oder Produktdaten maschinenlesbar und somit automatisch auswertbar bereitzustellen. Für die Verbreitung und Übernahme solcher Informationen gibt es unterschiedliche technische Verfahren.

Der Anwender kann - in der Handhabung - in einer einzelnen Datei alle für die weitere Nutzung relevanten Informationen bekommen. Bisher stellen Hersteller ihre Produkte aber nur in Ausnahmefällen für eine direkte Übernahme in CAD zur Verfügung.

3.1.5 Darstellung von Produkten in „virtual showrooms“

Wesentlich verbreiteter bei Baustoffherstellern ist dagegen die Präsentation von realen Produkten auf interaktiv zu benutzenden, webbasierten „virtual showrooms“. Solche zumeist auf Fotos basierenden Darstellungen erlauben, die in einem angegliederten Menü ausgewählten Oberflächen auch im Raumzusammenhang ansehen und visuell bewerten zu können.

Vorgegebene Raumsituationen

Für die Umsetzung einer fotobasierten Materialzuweisung ist es technisch notwendig, die zu belegenden Flächen zu maskieren bzw. freizustellen sowie die Materialtextur perspektivisch korrekt zu verzerren. Für qualitativ hochwertigere Darstellungen sollten zudem auch Schlagschatten von Möbeln und Spiegelungen auf Oberflächen berücksichtigt werden.

Viele Hersteller arbeiten daher mit vorgegebenen, bereits entsprechend aufbereiteten Fotos, die exemplarisch verschiedene Raumnutzungen und Stile abdecken. Der Nutzer braucht dann nur noch eine Farbe bzw. ein Material auswählen und dieses per Mausklick der jeweiligen Oberfläche zuweisen. Der Nachteil dabei ist natürlich, dass keine eigenen Entwurfsituationen betrachtet werden können.

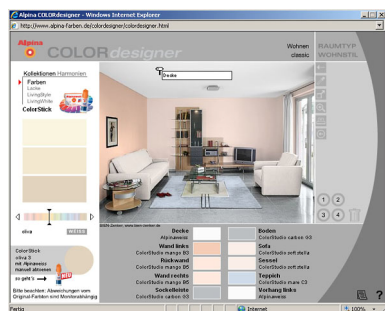


Abb. 3.18: Fotobasierter virtual showroom

Eigene Raumsituationen

Eine von einigen Herstellern verfolgte Variante ist daher, ein eigenes Foto in die Applikation laden zu können und anschließend die zu belegenden Flächen manuell mit Polygonzügen zu umranden. Zusätzlich muss dann aber auch noch die Materialtextur über ein geeignetes Perspektivwerkzeug von Hand gedreht und verzerrt werden. Diese manuelle Beeinflussung stellt eine potentielle Fehlerquelle dar.

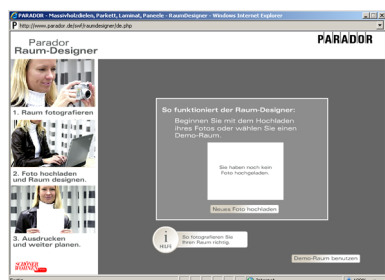


Abb. 3.19: Eigene Raumsituationen

Die visuellen Darstellungen in solchen eigenen Raumsituationen sind zudem qualitativ schlechter als bei aufwendiger aufbereiteten Fotos, da Schatten und Reflexionen auf den Oberflächen nicht berücksichtigt werden können.

Professioneller Fotoservice

Als „Mittelweg“ bleibt die Inanspruchnahme eines professionellen Fotoservices zur externen Aufbereitung eigener Fotos. Speziell für die Bodenbelagsbranche gibt es als Marketinginstrument z.B. ein Softwarepaket bestehend aus elektronischem Produktkatalog, Fotoservice und webbasiertem Präsentationstool [ESIGN]. Eigene Fotos werden durch Profis entsprechend aufbereitet und anschließend in einem internen Datenformat an einen Fachhändler gesendet. Hält dieser sein eigenes Sortiment bereits als elektronischen Produktkatalog vor, kann er seine Produkte relativ einfach innerhalb der individuellen Raumsituation virtuell präsentieren.



Abb. 3.20: easyBo Fotoservice

Showrooms auf Basis von 3D-Daten

Naheliegender erscheint auch die Präsentation von Produkten direkt in einem 3D-Modell. Der Vorteil ist hier, dass der Nutzer sich im bzw. auch durch den Raum bewegen kann, um verschiedene Blickwinkel einzunehmen. Aufwendige Maskierungsarbeiten sind nicht notwendig, verdeckte oder hinterschnittene Bereiche sowie perspektivische Verzerrungen der Oberflächen ergeben sich aus der 3D-Projektion.

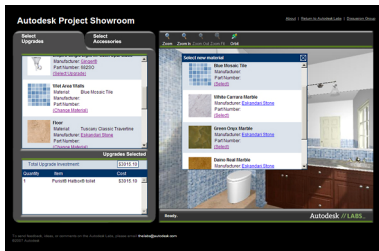


Abb. 3.21: 3D-Project Showroom

Im Prinzip können so - ähnlich wie in einem Visualisierungsprogramm - eigene Raumsituationen bemustert werden. Die Darstellungsqualität solcher 3D-Showrooms ist bisher allerdings noch wenig überzeugend.

Die Bereitstellung von Zusatzinformationen

Die vorhandene Verbindung von visueller Darstellung, Geometrie der Raumflächen und konkreten Produktinformationen ermöglicht auch die Bereitstellung weiterer Informationen. Neben Verweisen auf Produktdatenblätter mit technischen Details oder Verarbeitungshinweisen bieten einige Webseiten z.B. auf Grundlage der Nutzerangaben auch eine Berechnung von Kosten, das Erstellen von Einkaufs- oder Stücklisten oder eine regionale Händlersuche an.

Zusammenfassung

Offensichtlich suchen Hersteller von Oberflächenmaterialien nach neuen Präsentationsmöglichkeiten, die über simple 2D-Fotos in einem Katalog oder auf einer Webseite hinausgehen. Die Darstellung von Produkten im Raumzusammenhang, aber auch die mögliche Anbindung weiterer Informationen wird dabei als Marketinginstrument genutzt.

Zu hinterfragen ist sicher die derzeitige Qualität der Darstellung und der notwendige Aufwand zur Pflege solcher Instrumente (Erstellung von Materialkatalogen, Bearbeiten von Fotos etc.). Einige der im Jahr 2006 besuchten „virtual showrooms“ waren in 2007

schon nicht mehr online verfügbar. Andersherum zeigt aber gerade das Beispiel aus der Bodenbelagsbranche, dass ein sinnvoll zu betreibender Komplettservice auf solch einer Grundlage aufgebaut werden kann.

3.1.6

Augmentierte Darstellungen von Material

Alle bisher beschriebenen visuellen Darstellungen von Oberflächenmaterialien sind nicht zwangsläufig an die – in Größe und räumlicher Wahrnehmung beschränkte – Darstellung am Monitor gebunden. Digitale 3D-Modelle inklusive Materialzuweisung können auch über zusätzliche Ausgabemedien wie Stereobrillen oder Cave vermittelt werden. Allein über die räumlich wirksame und großformatige Anzeige können so weitere Aspekte der Materialien wahrgenommen und beurteilt werden.

Über solche rein virtuellen Modelle hinaus können augmentierte Darstellungen hilfreich sein, um die Materialität einer Oberfläche vor allem im Zusammenhang mit der Form beurteilen zu können. Hierbei wird im Prinzip das gewünschte Aussehen einer Oberfläche berechnet und je nach Einsatzzweck und verwendeter Technik mehr oder weniger genau auf eine reale (Modell-) Geometrie – entweder Körper oder Raumfläche – projiziert.

Augmentierte Bemusterung

Speziell für die Oberflächenbemusterung von Innenräumen kann das Verfahren einer augmentierten Bemusterung [Tonn 2007] im Vergleich zur reinen Monitorausgabe zusätzliche Bewertungsmöglichkeiten ermöglichen.



Abb. 3.22: Augmentierte Bemusterung

Mehrere Beamer projizieren dabei – farbkalibriert und geometrisch entzerrt – Materialmuster und Farbflächen großformatig auf vorhandene Raumboflächen. Durch die Größe der Musterflächen, die über das Gesichtsfeld des Betrachters hinauslaufen, und eine realitätsnahe Reaktion auf unterschiedlich einstellbare Beleuchtungssituationen kann der zukünftige Raumeindruck in gewisser Weise bereits gut vorweggenommen werden, auch wenn in der Wahrnehmung z.B. das Eigenleuchten der Wandflächen noch irritieren mag. Der Schwerpunkt dieser sowie der daran angegliederten Untersuchungen liegt allerdings auch eher in der Interaktion mit dem System und in der Einsatzmöglichkeit der Technik als schnelles Entwurfswerkzeug.

Weitere Ansätze auf dem Gebiet der augmentierten Materialdarstellungen unterscheiden sich von der oben genannten dann auch nicht nur hinsichtlich des Aufwands bei der Projektionstechnik und der damit verbundenen Genauigkeit der möglichen Darstellung, sondern auch hinsichtlich der vorgesehenen Interaktionsmöglichkeiten mit dem Modell. Einige Projekte sollen daher hier noch beispielhaft betrachtet werden.

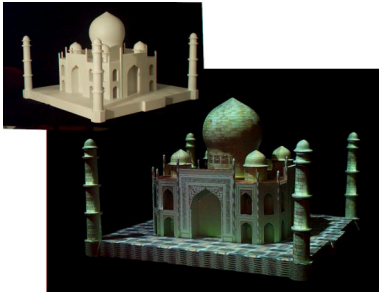


Abb. 3.23: Augmentierung eines 3D-Modells

Projekt Shader Lamps

Im Projekt „Shader Lamps“ [Raskar 2001] wird an einem Modell des Taj Mahal deutlich, dass auch auf relativ komplexe Geometrien Texturen aufprojiziert werden können. Hinterschnittene Bereiche werden dabei durch die Beleuchtung mit mehreren Projektoren erfasst.

Für die Lösung der dabei auftretenden Probleme (Farbkalibrierung, Überlappungen bei Ungenauigkeiten etc.) werden verschiedene Ansätze vorgestellt. Blickwinkelabhängige Effekte wie z.B. Glanzlichter lassen sich durch Tracking des Betrachters berechnen. Durch zusätzliches Tracking des Modells kann dieses sogar im Raum bewegt werden, ohne dass die Textur vom Modell auswandert.

Selbstverständlich wird für eine korrekte Berechnung dazu eine digitale Entsprechung des physikalischen 3D-Modells benötigt. Die Augmentierung des physikalischen Modells ist in diesem Beispiel sehr umfangreich gelöst, für die Interaktion mit dem Modell dagegen sind nur vage Ideen angedeutet.

Projekt Dynamic Texturing

Matković nutzt eine deutlich einfachere Projektion nur aus einer Richtung auf das physikalische 3D-Modell [Matković 2004]. Leichte Texturverzerrungen und die Sicht nur von einer Seite nimmt er in Kauf. Das Modell wird auch nicht getrackt, kann also nicht bewegt werden. Andersherum gibt es die Möglichkeit, ganz ohne hinterlegtes digitales 3D-Modell auszukommen, indem die Eckpunkte der zu texturierenden Flächen einfach eingemessen werden.

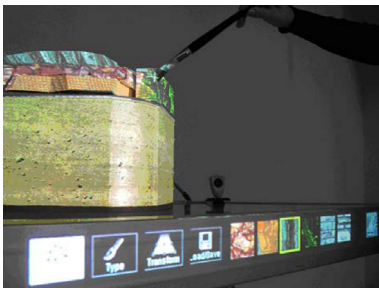


Abb. 3.24: Augmentiertes Modell mit Menüleiste

Das zu projizierende Material wird mit einem realen, getrackten Pinsel aus einem ebenfalls aufprojizierten Menü ausgewählt und quasi auf das Modell „aufgemalt“. Geometrische Manipulationen wie Drehen oder Skalieren der Texturen werden unterstützt.

Matković verspricht sich allein durch die reale Interaktion mit einem physikalischen Modell einen Mehrwert für den Entwurf, allerdings hat die Technik des Aufmalens mit einer realen Bemusterung wenig gemein.

Projekt Material Light

Saakes vereinfacht die Darstellungsqualität in seinem „Material Light“-Projekt noch einen weiteren Schritt. Auch er benutzt nur einen einzelnen Projektor, der ein 2D-Texturbild von oben auf ein weißes Papier- oder Schaummodell eines neu entwickelten Produkts wirft [Saakes 2006]. Ohne weitere Kenntnis des Systems über Form oder Lage des Modells kann so nur eine einfache, zwangsläufig verzerrte Darstellung der Oberfläche erreicht werden.



Abb. 3.25: Augmentiertes Schaummodell

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in dem intuitiven, spielerischen und manuellen Ausprobieren prinzipieller Materialalternativen. Die Auswahl der Materialien erfolgt bewusst nicht am Monitor oder

über Menüs, sondern über reale Materialmuster, die in die Hand genommen werden können und ihre Identität dem System über RFID-Tags (Radio Frequency Identification) einem entsprechendem Lesegerät mitteilen [Wikipedia 2007d]. Interessant ist dabei, dass durch den direkten Kontakt mit dem Muster der manuelle Bezug zu weiteren, z.B. haptischen Materialeigenschaften immer gewahrt bleibt.



Abb. 3.26: Materialmuster mit Marker

Projekt SARSamplingKit

Auch Kuhlmann verfolgt bei der Konzeption des „Spatial Augmented Reality Sampling Kit“ in Bezug auf den Umgang mit realen Materialmustern einen ähnlichen Ansatz [Kuhlmann 2007]. Wie im zuerst vorgestellten Projekt kommen großformatige Farb- und Materialprojektionen auf Raumflächen zum Einsatz. Für die Steuerung der Eigenschaften des projizierten Bilds (z.B. Helligkeit, Sättigung etc.) stellt Kuhlmann diverse - vorwiegend markerbasierte - Ansätze vor. Indem auch reale Materialproben durch Marker gekennzeichnet werden, kann der Anwender wiederum einen direkten Zusammenhang zwischen dem realen Material in seiner Hand und der auf die Raumfläche projizierten Textur herstellen.

Zusammenfassung

Die Augmentierung physischer Körper mit virtuellen, aufprojizierten Oberflächen kann für die Untersuchung von grundsätzlichen Materialalternativen sinnvolle Zusatzinformationen bieten. Das Verhältnis von technischem Aufwand, Darstellungsqualität und erzieltm Mehrwert erscheint derzeit allerdings noch fragwürdig. Interessant sind hingegen die neu zu entwickelnden Formen der Interaktion mit dem jeweiligen System. Die hier gemachten Erfahrungen mit geeigneten Auswahl- und Zuordnungsprozessen können sicher auch weitere Einsichten in den Materialwahlprozess insgesamt liefern.

3.1.7

Darstellung haptischer Materialeigenschaften

»Haptics can be subdivided into three areas

1. human haptics - the study of human sensing and manipulation through touch,
2. machine haptics - the design, construction, and use of machines to replace or augment human touch.
3. computer haptics - algorithms and software associated with generating and rendering the touch and feel of virtual objects (analogous to computer graphics).«

[Srinivasan 2005, S.1]

Alle bisher beschriebenen digitalen Ansätze beziehen sich nur auf eine rein visuelle Vermittlung von Informationen über Material. Obwohl der größte Anteil der sensitiven Wahrnehmung über den Sehsinn geschieht, sind aber auch die weiteren Sinne (Tasten, Hören, Riechen, Schmecken) für die Gesamtwahrnehmung eines Materials wichtig.

Gerade die „Haptik eines Materials“ wird – vor allem in dieser generellen und undifferenzierten Begrifflichkeit – oftmals angeführt als emotional wirksames und daher besonders wichtiges Kriterium bei der Materialwahl (vgl. Kapitel 1.1.4). Anschließend wird dann das „Nicht-Anfassen-Können“ von Materialien gerne als Argument gegen eine digital gestützte Materialauswahl benutzt.

Im Weiteren wird daher - zur Entkräftung oder zumindest zur Relativierung dieser Argumentationskette - beispielhaft auf einige Forschungsansätze aus dem Gebiet der „computer haptics“ verwiesen.

»griech.: *haptikos* = greifbar,
deutsch *Tastsinn*«

[Wikipedia 2006c]

Haptik

Als „haptisch“ bezeichnet man Wahrnehmungen, die auftreten, wenn man die Oberfläche eines Gegenstands berührt. Man kann dabei Berührungen, Druck und Temperaturen lokalisieren und bewerten [Wikipedia 2006c]. Der Begriff „Haptik“ umfasst also das multidimensionale Zusammenspiel unterschiedlicher Reize, der Wahrnehmung von taktilen und kinästhetischen Informationen, von Aktion des Menschen und der Reaktion des Materials. Zudem ist das Tasten fast immer ein synästhetischer Vorgang, der visuelle, akustische und auch olfaktorische Reize sowie einmal gemachte Erfahrungen in die Wahrnehmung mit einbezieht. Entsprechend vielseitig können daher auch die möglichen Ansätze sein, Haptik digital zu unterstützen.

Selbstverständlich gibt es – genauso wie auch bei den visuellen Darstellungen - immer den Unterschied zwischen dem physisch vorliegendem Material und seiner digitalen Repräsentation. Das Ziel digitaler Techniken kann auch nicht sein, ein Material perfekt zu ersetzen oder erlebbar zu machen. Sie sollten aber – gerade im Rahmen einer Unterstützung der Materialwahl - eine ausreichend sichere Basis für eine Bewertung bilden können.

Im Rahmen dieser Arbeit werden vom Grundsatz her zwei Haltungen unterschieden, wie haptische Qualitäten eines Materials mittels digitaler Techniken in ausreichender Qualität vermittelt werden können:

Force- und Touch-Feedback Interfaces

Im Architekturbüro üblicherweise benutzte Computer bieten als Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Ausgabe zunächst nur den Monitor an, die Eingabe erfolgt über Tastatur, Standard-Maus oder eventuell über Grafiktablets. Die Interaktions- und Wahrnehmungsmöglichkeiten sind durch diese Interfaces natürlich begrenzt.

Verschiedene Force-Feedback-Interfaces bieten darüber hinaus aber die Möglichkeit, Vibrationen oder Rückstellkräfte zu generieren und somit prinzipiell einige der haptisch wirksamen Wahrnehmungsebenen anzusprechen. Einfache Force-Feedback-Interfaces werden schon als Standard in der Spieleindustrie eingesetzt (z.B. Force-Feedback-Lenkräder für Autorennspiele), komplexere und genauere Geräte ermöglichen aber auch ernsthafte Anwendungen (z.B. Design, Medizin, Industrie etc.).

Solche Geräte unterstützen vor allem die grobe, kinästhetische Wahrnehmungsebene, also das aktive Betasten eines Objekts, die Erzeugung von Druck und die Wahrnehmung von Gegendruck.



Abb. 3.27: SensAble Interface

»It may never be possible to simulate the tactile impression of a fabric entirely, but it may be possible, by concentrating on the more important elements, to convey an adequately accurate impression, at least for professionals and those who are familiar with fabric technology.«

[Dillon 2000, S.67]

Gestalt	- geschmeidig - kantig	- visuell durch Umrisse, 3D - Maabewegung: von sanft bis neckelig - Betonung der Kontur bei Mouseover - Position des Objekts - akustisch: sanft bis helppeng
Oberflächen-Struktur	- glatt - raub - hakelig	- visuelle Struktur - akustisch: realistisches Geräusch bei Mouseover - glatte oder weniger Maabewegung - visuelle Zusatzeffekte: knifelige Pöfel, sanfte Schatten, 3D - bewegter Mausclanen
Temperatur	- warm - kalt - mild	- visuelle Assoziation: rot/warm, blau/kalt, Farbtemperatur - visuelle Zusatzeffekte: Dampf, Eis, etc. - akustische Assoziation: »körnliche Kälte«, »wellige Wärme«
Feuchtigkeit	- trocken - feuch - glitschig	- akustisch: realistisches Geräusch, Atmosphäre - visuelle Zusatzeffekte: Tropfen, Ringe, Spur, Glanz - glitschige Objektbewegung
Mächtigkeit	- groß - klein - fein strukturiert - massiv	- akustische Assoziation: dunkel: groß/mächtig, hell: klein/fein - visuelle Darstellung: 3D - Größenänderung des Mauszeigers - Beweglichkeit des Objekts - Verzerrung bei Drag&Drop
Härte Stetigkeit	- hart - weich - biegsam - elastisch	- akustische Assoziation: kurzes/langes Geräusch, Modulation - visuelle Zusatzeffekte: sanft/langsam/weich, hart/scharf/hart - realistische Geräusche: Abgang - dynamische Größenänderung des Mauszeigers - natürliche Objektbewegung
Masse Gewicht	- schwer - leicht - sehr leicht	- verzerrter/verschobener Objektbewegung (Drag&Drop) - visuell/akustisch: dunkel/hell - Gravitation
Fähigkeit zur Beweglichkeit	- beweglich - fixiert - klebrig	- Beweglichkeit: Drag&Drop/durch Anpassen - akustische Assoziation: Modulation bei Bewegung - ständiges/hängendes Mauszeiger
Beweglichkeit Ruhe	- vibrierend - beweglich - starr	- visuelle Zusatzeffekte: Vibration, Wabern, Wellen - akustische Assoziation/instabile Geräusche
Materialbe- schaffenheit	- holzartig - metallig - wollig	- charakteristische Materialgeräusche bei Mouseover/MouseDown - visuelle Struktur - Veränderung des Mauszeigers - visuelle Zusatzeffekte

Abb. 3.28: Zehn Dimensionen des Tastens

Taktile Interfaces ermöglichen darüber hinaus auch eine kleinmaßstäbliche, taktile Wahrnehmung – also „touch feedback“. Üblicherweise wird bei dieser Technik die Haut der Fingerkuppe durch ein elektromechanisch angesteuertes Feld von Kontaktstiften stimuliert. Die dabei erzeugte Vibrationsempfindung entspricht dem Gefühl, als wenn man mit dem Finger über eine raue Oberfläche streicht.

Mittels solcher Interfaces wird beispielsweise in der Textilindustrie bereits versucht, unterschiedliche Qualitäten von textilen Stoffen virtuell bewertbar zu machen [Haptex]. Das definierte Ziel ist wiederum nicht die vollständige Simulation des Materials.

Virtuelle Haptik

Die oben genannten – und meist noch in Entwicklung befindlichen – Interface-Techniken sind noch sehr aufwendig und auf Einzelanwendungen spezialisiert, also nicht für eine breite und universale Anwendung geeignet. Einen ganz anderen, nicht hardwarebasierten Ansatz bietet dagegen das Konzept der „Virtuellen Haptik“ [Bähren 2001].

Ausgehend von der Überlegung, dass haptisches Erleben oftmals synästhetischer Natur ist, also dass der Tastsinn durch visuelle oder akustische Reize unterstützt oder sogar getäuscht werden kann, liegt der Versuch nahe, die dem Standard-PC zur Verfügung stehenden Mittel (Bild und Ton) auszunutzen, um haptische Qualitäten auf indirekte Weise zu transportieren.

Ein Beispiel für die – oft sicherlich unbewusst genutzte – Umsetzung dieser Idee ist vielleicht die leicht übertriebene Stärke von Relief- oder Bumpmaps in Visualisierungen: Wird die Stärke eines Reliefs „richtig“ eingestellt, wirkt das gerenderte Bild schnell flach und langweilig, durch die Übertreibung der Reliefhöhe hingegen kann die Rauigkeit einer Oberfläche – und somit in Teilen auch die zu erwartende haptische Qualität – rein visuell vermittelt werden.

Zusammenfassung

Eine digitale Repräsentation kann niemals die eigene Erfahrung des realen Materials ersetzen. Es gibt aber verschiedene digitale Techniken, die Bewertung eines Materials auch ohne das Vorliegen von Materialproben zu ermöglichen, insbesondere auf Grundlage dessen, dass auf den Erfahrungsschatz des Nutzers zurückgegriffen werden kann. Das Ziel digitaler Materialdarstellungen sollte daher sein, eine derartige Qualität der Darstellung zu erreichen, dass diese Bewertung auf sicherer Grundlage erfolgen kann.

Wie sehr und welche digitalen Techniken bei der Beurteilung von Oberflächen zum Einsatz kommen werden, hängt dabei sicher vom Verhältnis der gewonnenen Zusatzinformation in Bezug auf den nötigen Mehraufwand ab. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass zukünftig immer einfacher zu bedienende Systeme eine immer höhere Qualität der Darstellung erzielen. Eine darüber hinausgehende Unterstützung des Auswahlprozesses ist allerdings durch reine Darstellungstechniken nicht zu erwarten.

3.2 Digital gestützte Materialsuche

»Suchen ist die Tätigkeit oder der Versuch, ein Ding nach bestimmten Kriterien zu finden.

Finden ist, neben dem erfolgreichen Ergebnis einer Suche, auch entdecken, also der Zugang zu etwas, das man nicht gekannt und folglich nicht gesucht hat.«

[Wikipedia 2007e]

Die reine Darstellung von Material in einer der oben beschriebenen Formen – ob alphanumerisch, symbolhaft oder mehr oder weniger perfekt simuliert – ermöglicht mittelbar, einige der Eigenschaften auch eines nicht physisch vorliegenden Materials wahrnehmen zu können. Der Nutzer kann so nur auf der Grundlage vorhandener eigener Erfahrung zu einer Bewertung der Oberflächen kommen. Darüber hinaus gibt die alleinige Darstellung eines Materials aber keine fachliche Hilfestellung bei der Suche und der Auswahl und Beurteilung geeigneter Oberflächen, der Planer bleibt in seinem Urteil auf sich selbst gestellt.

Im Weiteren werden beispielhaft verschiedene Systeme oder Ansätze angeführt, die den Nutzer durch Abbildung von Fachwissen zu einer „geeigneten“ Oberfläche bzw. einem Material hinführen, ihm dabei zusätzliche Informationen über Materialeigenschaften geben können und ihm so auch eine fachliche Bewertung gewählter Oberflächen ermöglichen.

3.2.1 Suche nach harmonischen Farbkonzepten

Eine große Rolle bei der Gestaltung von Oberflächen spielen die optischen Eigenschaften eines Materials (vgl. Kapitel 1.1.1), insbesondere ihre Farbigkeit. Für das ästhetische Empfinden ist es wichtig, dass ein harmonischer Gesamteindruck vorherrscht. Wichtig bei der Erstellung eines Farbkonzepts ist daher nicht nur die Betrachtung einer einzelnen Fläche, sondern insbesondere das Zusammenspiel mehrerer Flächen auch unterschiedlicher Materialgruppen oder Produktfamilien.

Um zu einem farbharmonischen Miteinander zu kommen, müssen als Voraussetzung unterschiedliche Farbsysteme aus verschiedenen Produktzweigen möglichst exakt aufeinander abgebildet werden können. Erst dann kann eine weitergehende fachliche Hilfestellung zu harmonischen Farbkonzepten angeboten werden. Einige existierende Werkzeuge im Umgang mit beiden Problemen werden im Folgenden vorgestellt:

Umrechnung verschiedener Farbsysteme

Zur genauen Kennzeichnung und Beschreibung von Farben sind in der Architektur – je nach Medium oder Anwendung - verschiedene Systeme parallel gebräuchlich.

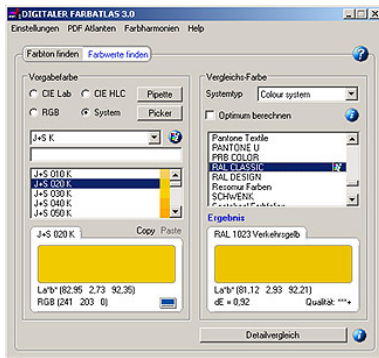


Abb. 3.29: Digitaler Farbatlas

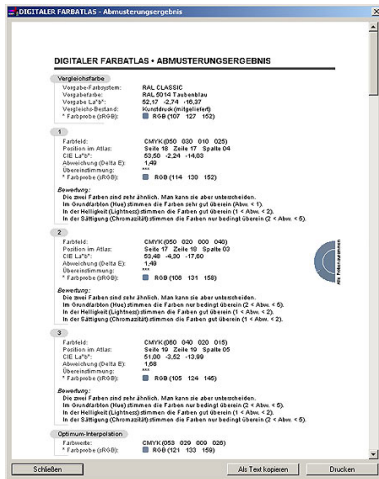


Abb. 3.30: Bewertung des Farbabstands

Farben für Monitor und Drucker werden als RGB- bzw. CMYK-Wert angegeben. Diese können dabei aus technischen Gründen nicht alle vom Menschen wahrnehmbare Farben umfassen und sind daher auf das jeweilige Medium beschränkt.

Das von der CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) festgelegte Cie-L*a*b*-System dagegen erlaubt, alle überhaupt wahrnehmbaren Farben exakt zu beschreiben [Wikipedia 2008a]. Es wird daher in der Industrie als Standard- oder Referenzsystem benutzt. Allerdings ist für den Nutzer aus den drei Werten L, a und b ohne Hilfsmittel nicht direkt eine Farbe vorstellbar.

Andere genormte Systeme wie RAL oder NCS (Natural Color System) arbeiten daher mit Farbnamen oder leicht zu verstehenden Codierungen [Wikipedia 2008b; Wikipedia 2008c].

Letztlich bieten auch Hersteller von Farben und Lacken meist noch eigene Farbsysteme und -bezeichnungen.

Will der Planer ein Gesamtfarbkonzept auch über verschiedene Materialfamilien hinweg umsetzen, muss er zwangsläufig mit mehreren Farbsystemen umgehen. Er kann dabei Farben eines Systems in Farben eines anderen Systems softwaregestützt umrechnen lassen (z.B. mit [Digitaler Farbatlas]). Da die Herstellersysteme aber nicht stufenlos aufgebaut sind (z.B. hat „RAL DESIGN“ nur 1688 Farbabstufungen), wird zum nächstbesten Farbton häufig eine kleine Abweichung wahrnehmbar sein. Diese kann nach [DIN 2006] im CIE-L*a*b*-System als Farbabstand ΔE berechnet und anschließend z.B. durch die oben genannte Software hinsichtlich ihrer Wahrnehmbarkeit bewertet werden.

Anerkannte Farbharmonien

Zwei oder mehr Farben auf einer Oberfläche treten immer in Beziehung zueinander. Farben können dabei mehr oder weniger harmonisch miteinander wirken bzw. kontrastieren. Anerkannte Harmonien entstehen beispielsweise, wenn Farben sich nur in Farbton, Sättigung oder Helligkeit unterscheiden, während die jeweils anderen Werte gleich bleiben.

Eine Unterstützung bei der Suche solch harmonischer Farbkonzepte findet man bereits in vielen einfachen Grafik-Programmen, bei denen passend zu einer gewählten Farbe weitere, mehrfach abgestufte Farbreihen oder -paletten angezeigt werden. Nutzt man im Farbwurf die vorgeschlagenen Farbwerte, kann man leicht zu einem harmonischen Ganzen kommen.

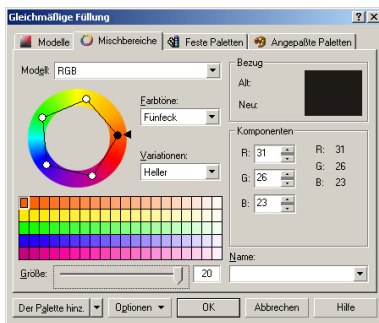


Abb. 3.31: Farbpalette in CorelDraw

Berücksichtigung der wirksamen Flächengröße

Rein auf Druckausgabe orientierte Desktop-Publishing-Programme berücksichtigen allerdings nicht die unterschiedliche Wirkung von Farben auf verschiedenen großen Flächen. Für eine Anwendung in der Architektur, wo mitunter sehr große, zusammenhängende Flächen mit einer Farbe belegt werden, sollte dieser Effekt aber bedacht werden. Üblicherweise werden große Flächen eher mit hellen und wenig gesättigten Farben angelegt, kleinere Flächen können dagegen mit kräftigeren Farben akzentuiert werden.

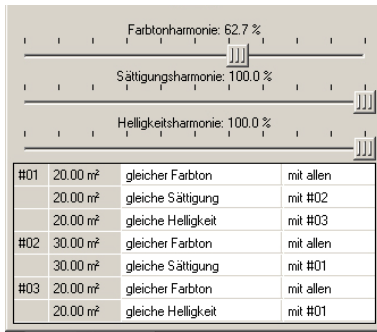


Abb. 3.32: Farbwähler in colored architecture

Die Software Colored Architecture von Tonn setzt dagegen als Instrument zur Erstellung eines Farbkonzepts für Architekturanwendungen direkt auf ein digitales 3D-Gebäudemodell auf [colored architecture]. Daher sind die Größen der ausgewählten Flächen bekannt. Unter Rückgriff auf diese Geometrieinformationen kann auch diese – von Munsell in seiner Farbenlehre [Munsell 1969] formulierte Harmonieregel – berücksichtigt werden [Tonn 2005].

Tonn unterstützt zudem noch weitere anerkannte Harmonie- und Farbauswahlregeln (z.B. nach Itten oder nach Nemcsics). Er ermöglicht in seinem Farbwähler für ausgewählte Flächen, den gewünschten Grad solcher Harmonien über Schieberegler einzustellen. Colored Architecture stellt dadurch ein umfangreiches Werkzeug speziell für eine raumbezogene Farbplanung dar.

Farbige Materialien und Produkte

Viele Flächen in der gebauten Umwelt erhalten ihre Farbigkeit nicht durch aufgetragene Farben oder Lacke, sondern allein aus dem verwendeten Material oder Produkt heraus. Nicht jedes Oberflächenmaterial ist dabei stufenlos in jedem Farbton herstellbar oder erhältlich. Erschwerend kommt hinzu, dass viele – gerade natürliche – Materialien eine oft unregelmäßige Musterung aus mehreren Farbtönen aufweisen. Ein von diesen Tatsachen unabhängig formuliertes Farbkonzept wird daher immer vor dem Problem der möglichen Umsetzung stehen.

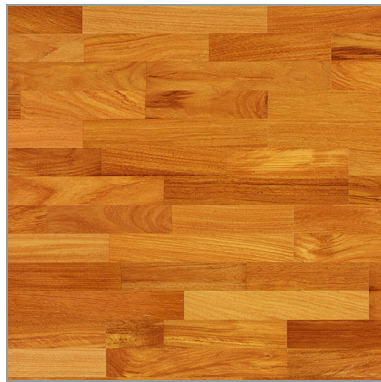


Abb. 3.33: Unregelmäßiger Holzboden

Die Lösung dieses Dilemmas kann prinzipiell in zwei Richtungen erfolgen: entweder der Planer greift zur Formulierung eines harmonischen Farbkonzepts nur auf die angebotenen - und hinsichtlich ihrer Wirkung speziell zusammengestellten - Kollektionen der Hersteller zurück, oder aber er muss versuchen, ein seinen Planungen farblich möglichst nahe kommendes Produkt zu finden.

Rückgriff auf Produkt-Kollektionen

Viele Hersteller bieten ihre - in technischer Hinsicht ansonsten identischen Produkte - in mehreren harmonisch aufeinander abgestimmten Farben an. Unabhängig davon, was man von solchen - teilweise eigenwillig interpretierten - „Trendlinien“ halten mag, können Kombinationen mehrerer solcher Artikel einer Kollektion prinzipiell zu einem harmonischen Eindruck beitragen (z.B. Muster aus verschiedenfarbigen Fliesen).

Eine Umsetzung auch materialübergreifender Farbkonzepte allerdings ist so nicht möglich, da exakte und somit vergleichbare Farbwerte zumeist nicht angegeben werden. Der Einsatz beschränkt sich somit vorwiegend auf begrenzte und materialhomogene Flächen.



Abb. 3.34: Abgestimmte Produkt-Kollektion

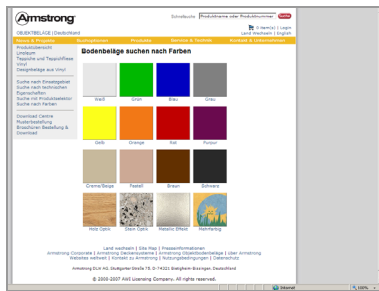


Abb. 3.35: Farbauswahl auf Herstellerwebseite

Suche nach passend farbigen Produkten

Auch der zweite denkbare Weg, nämlich die einem zunächst unabhängig aufgestellten Farbkonzept nachfolgende Suche nach passenden Produkten, wird oft durch die unzureichende Angabe von genauen Farbwerten behindert. Einige Hersteller bieten zwar als Funktion auf ihren Webseiten eine Produktsuche speziell nach Farben an, die angebotenen Untergliederungen sind jedoch oftmals recht grob (z.B. „rötlich“, „gelblich“ etc.). Die Zuordnung der Artikel zu den einzelnen Kategorien ist zudem nicht immer nachvollziehbar, da gerade unregelmäßig gemusterte Oberflächen nicht immer objektiv bewertet und einsortiert sind.

Zusammenfassung

Die Erstellung harmonischer Farbkonzepte auch für Architekturanwendungen kann durch den Computer prinzipiell bereits gut unterstützt werden. Eine solche Planung anschließend jedoch mit angebotenen Bauprodukten auch konkret umzusetzen, wird erschwert durch die zumeist nicht vorhandene Angabe exakter Farbwerte durch die Hersteller. Unregelmäßig farbige Materialien werden meist manuell - und somit subjektiv - bestimmten Farbkategorien zugeordnet. Zudem bieten Hersteller auf ihren Webseiten zumeist zu grobe Suchmöglichkeiten.

3.2.2

Suche in Werkstoff-Datenbanken

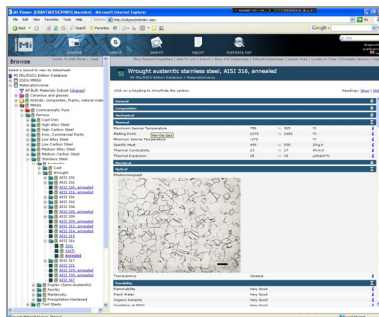


Abb. 3.36: Granta Design CES Selector

Bei der Umsetzung einer Planung werden zur Festlegung konkreter Ausführungsmaterialien und -produkte neben den oben genannten Angaben zur Farbe noch viele weitere technische Informationen über diese benötigt. Diese lassen sich auf verschiedenen Wegen ermitteln.

Zur detaillierten Information über bestimmte Werkstoffe lässt sich beispielsweise – teilweise online - auf eine große Anzahl von Materialdatenbanken (siehe Anhang A.6) zurückgreifen, die teilweise jedoch auf branchenspezifische Datensätze (z.B. nur Kunststoffe) begrenzt sind. Je nach Ausrichtung dieser Datenbanken können neben allgemeinen Daten wie z.B. bildlichen Darstellungen auch physikalische oder chemische Eigenschaften einzelner Werkstoffe, ökologische Indizes, Preise, Informationen über Hersteller oder mögliche Verarbeitungstechniken abgerufen werden.

Üblicherweise ermöglichen solche Datenbanken einen Zugriff auf einzelne Materialien über eine hinterlegte Klassifikationshierarchie oder aber über eine Stichwortsuche. Die Anzeige der gewünschten Daten in Tabellenform erlaubt anschließend einen exakten Zugriff auf die entsprechenden Eigenschaften der Materialien.

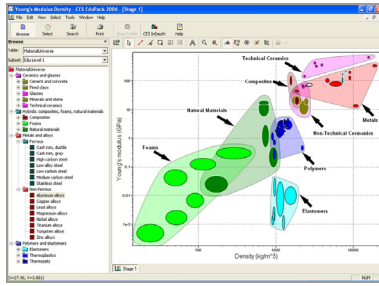


Abb. 3.37: Granta Design Edu Pack

Zusätzliche Darstellungsformen der Daten wie z.B. das Auftragen einzelner Eigenschaften in einem Balkendiagramm oder als Punktwolken innerhalb eines Koordinatensystems ermöglichen darüber hinaus einen Vergleich mehrerer Werkstoffe untereinander und können so zur Einordnung des Materials in einen Gesamtzusammenhang beitragen. Je nach Komplexität der auf die hinterlegten Rohdaten zugreifenden Programme können anschließend z.B. durch Variationen mehrerer Parameter umfangreiche Analysen über mögliche Einsatzbereiche durchgeführt werden.

Zusammenfassung

Die hier gemeinten Datenbanken halten vorwiegend technische Informationen über noch unverarbeitete Werkstoffe bereit. Sie wenden sich dadurch eher an Hersteller zukünftiger Produkte oder an Produkt-Designer, für die der Herstellungs- oder Verarbeitungsprozess eine größere Rolle im Design spielt. Für die in der Architektur eher anwendungsorientierte Auswahl von Materialien und Bauprodukten sind sie aufgrund der in dieser Richtung begrenzten Inhalte und Zugangsmöglichkeiten dagegen weniger gut nutzbar.

3.2.3

Unterstützung der Produktsuche

Eine solche vorwiegend an Architekturanwendungen orientierte Suche nach geeigneten Materialien oder Produkten kann eher durch Systeme, die produkt- oder herstellerorientiert ausgerichtet sind, unterstützt werden.

Als für einen bestimmten Einsatzzweck „geeignet“ gelten alle Materialien, die an sie gestellte Anforderungen erfüllen. Die an dieser Stelle aufgeführten Werkzeuge, die diese Suche unterstützen sollen, müssen also jeweils die Möglichkeit aufweisen, fachlich fundierte Kriterien oder Beschränkungen irgendwie vorab zu formulieren. Die einfache Eingabe eines Suchbegriffs (z.B. „Fliese“) bei einer allgemeinen Internet-Suchmaschine soll hier dagegen nicht betrachtet werden, auch wenn dies selbstverständlich ein möglicher Einstieg in eine weitere Suche nach Bauprodukten sein kann.

Suche nach prinzipiellen Materialalternativen

Mehrere – teilweise kostenpflichtige - Datenbanken im Internet (siehe Anhang A.6), deren Betreiber meist die beschriebenen Werkstoff- oder Materialagenturen (vgl. Kapitel 2.2.1) sind, ermöglichen eine Suche nach prinzipiellen Materialalternativen. Sie können also vorwiegend als Quelle der Inspiration verstanden werden.

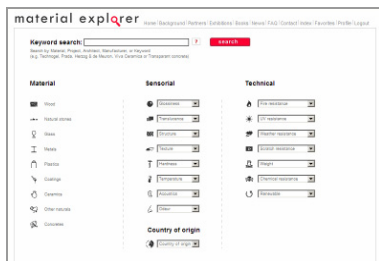


Abb. 3.38: materialexplorer

Ihnen liegen thematisch und stofflich äußerst breit angelegte, inhomogene und nicht nur aufs Bauwesen beschränkte Materialsammlungen zugrunde. Die Kategorisierung der einzelnen Produkte und Indizierung für die Suche wird vom Betreiber manuell / redaktionell auf Grundlage seiner eigenen Bewertungsmaßstäbe oder seiner Einschätzung durchgeführt. Je nach Betreiber und Ausrichtung der

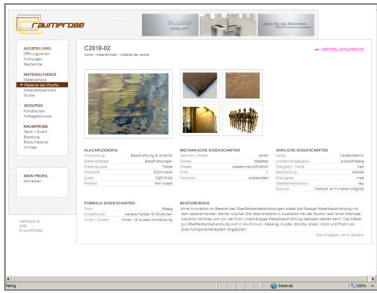


Abb. 3.39: raumProbe

Webseiten unterscheiden sich dann auch die dabei angelegten Kategorien, die Zuordnung der Produkte zu den einzelnen Kategorien und auch die Möglichkeiten einer individuellen Eingrenzung der Suche. Neben einer Stichwortsuche, die schnellen Zugriff auf bereits bekannte Produkte bietet, lassen sich verschiedene sinnliche oder technische Eigenschaften - meistens in relativ grober Unterteilung – definieren. Bei einigen Seiten lassen sich zudem übliche Anwendungsgebiete (z.B. „Ladenbau“) eingrenzen.

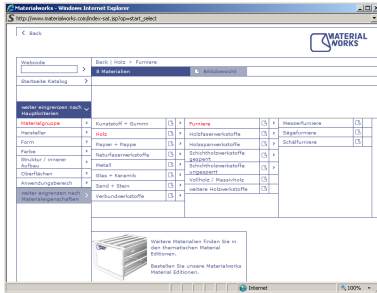


Abb. 3.40: Materialworks

Das Suchergebnis beinhaltet - neben Kurzbeschreibungen der Produkte (inkl. Abbildung) - dann meistens einen Verweis auf die Webseite der Hersteller, wo der Nutzer dieser Datenbanken anschließend weitere detailliertere Informationen einholen kann. Die Datenbank selbst informiert den Nutzer also nur auf einem grundsätzlichen Niveau über mögliche Alternativen.

Materialgruppenspezifische Suche

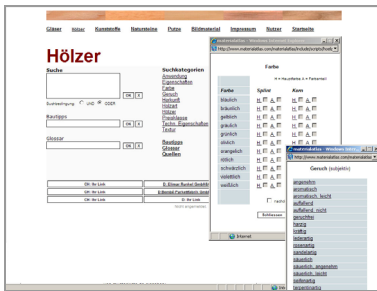


Abb. 3.41: Materialatlas

Bei ähnlichen Datenbanken, die sich jedoch im Unterschied dazu nur auf eine bestimmte Materialkategorie (z.B. „Hölzer“) beschränken, lassen sich naturgemäß die Suchanfragen wesentlich detaillierter formulieren, da auch materialspezifische Eigenschaften (z.B. „Maserungsart“) berücksichtigt werden können.

Die gewünschten Ergebnisse sind dann auch weniger grundsätzlicher Natur. Der Nutzer erwartet stattdessen zu Recht auch vertiefende und umfangreiche Informationen zum Suchergebnis (z.B. zu einer speziellen Holzart).

Suche nach Herstellern

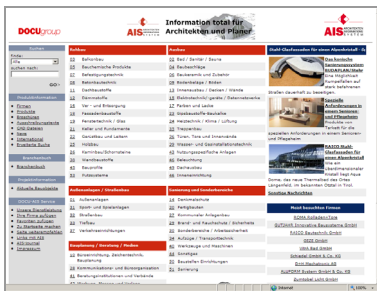


Abb. 3.42: Architekten Informations System

Eine vom Ansatz her andere Möglichkeit, die Suche nach geeigneten Produkten fachlich einzugrenzen, besteht darin, in entsprechenden Datenbanken direkt bauteilbezogen nach Herstellern von Bauprodukten oder verarbeitenden Betrieben zu suchen.

Üblicherweise erfolgt hier die Suche nach hierarchisch gegliederten Produktgruppen (z.B. angelehnt an das Standardleistungsbuch Bau STLb) oder über eine einfache Schlagwortsuche nach Produktgruppen, Produkt- oder Firmennamen. Durch die teilweise vorhandene Option einer regionalen Eingrenzung der Suche kann eine solche Webseite dann sogar als eine Art „Branchenbuch“ agieren.

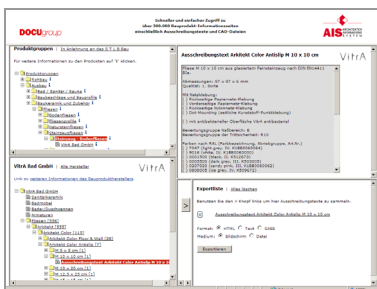


Abb. 3.43: AIS Ausschreibungsmanager

Das Suchergebnis ist ebenfalls entweder ein Verweis auf die entsprechende Webseite des Herstellers (oder auch mehrerer Hersteller) oder aber bereits direkt die gewünschte Produktinformation, die zudem durch zugehörige Ausschreibungstexte oder CAD-Dateien ergänzt sein kann.

Solche Webseiten, die eine Herstellersuche ermöglichen (siehe Anhang A.6), verstehen sich offensichtlich vor allem als Marketing-

plattform für Hersteller und Verarbeitungsfirmen. Jene müssen dabei für den Eintrag – je nach Umfang der unterstützten Funktionen – entsprechende Gebühren entrichten. Die Suche dagegen ist – teilweise jedoch erst nach Registrierung – kostenlos.

Ein Nachteil ist daher - neben der sehr kommerziellen Aufmachung solcher Webseiten (z.B. Bannerwerbung, Notwendigkeit der Registrierung mit anschließender Adressverwertung) - die deutliche Bevorzugung großer und finanzkräftiger Firmen. Kleinere Firmen mit innovativen, aber vielleicht noch nicht im Bauwesen zugelassenen Produkten, werden dagegen prinzipbedingt nicht gefunden.

Suche auf Herstellerwebseiten

Die endgültige Information über Materialien und Bauprodukte findet sich zumeist erst auf den Webseiten der jeweiligen Hersteller. Die dort angebotenen Daten unterscheiden sich extrem hinsichtlich Qualität und Umfang, aber auch in Bezug auf die Unterstützung einer zielgerichteten Suche.

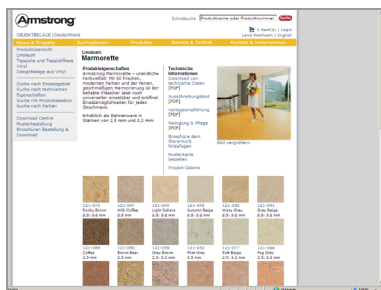


Abb. 3.44: Produktsuche auf Herstellerwebseiten

Üblich ist die Darstellung der Produkte bzw. ganzer Produktreihen zunächst mit Fotos. Sinnvoll erscheint hier die Vorgehensweise, mit kleineren Bildern zunächst eine Gesamtpalette als Übersicht zu zeigen, zusätzlich aber die Möglichkeit zu bieten, angewählte Oberflächen auch in einer größeren Auflösung anzeigen zu lassen. Eine orthogonale Aufsicht auf ein Material ermöglicht meist eine objektivere Einschätzung als eine perspektivische Darstellung des Produkts im Raumzusammenhang. Zudem kann so das Bild prinzipiell als Textur in Visualisierungsprogrammen eingesetzt werden.

Da hier konkrete Produkte offeriert werden, können die mitgelieferten Informationen sehr detailliert sein. Technische Daten, Ausschreibungstexte, aber auch Verlege- oder Pflegehinweise werden oft zusätzlich als Textdokument zum Download bereitgestellt. Manche Hersteller bieten zudem interaktive Mengen- oder Preisberechnungen, Kontaktformulare zur Angebotserstellung oder Musterbestellmöglichkeiten an.



Abb. 3.45: Vorwerk Teppichboden-Assistent

Neben dieser einfachen visuellen Produktübersicht und -auswahl kann die Suche oft vorab nach weiteren Kriterien eingegrenzt werden. Neben dem Aspekt „Farbe“ können oft auch spezielle technische Eigenschaften als Suchkriterium ein- oder ausgeschlossen werden.

Teilweise wird der Nutzer dabei durch ein mehrstufiges und nicht immer eindeutiges Auswahlverfahren geführt. Während z.B. eine Auswahl nach Einsatzbereichen aufgrund möglicher technischer Hintergründe noch nachvollziehbar bleibt, beruht eine Eingrenzung der Ergebnisse auf Basis von „Stil“ oder gar „Lifestyle“ zu sehr auf einer subjektiven Zuordnung durch den Hersteller.

Zusammenfassung

Es gibt - bezogen auf Inhalt, Umfang und Qualität der Information - verschiedene Ansätze, die Suche und die Auswahl von Materialien

zum Einsatz in der Architektur durch entsprechende Datenbanken zu unterstützen. Der Nutzer muss sich allerdings im Vorfeld seiner Suche im Klaren sein, ob er eher durch innovative Materialien inspiriert werden will oder die Sicherheit zugelassener Bauprodukte benötigt, ob er eher technische Details abfragen will oder doch der sinnlich-ästhetische Aspekt im Vordergrund stehen soll.

Um eine Vergleichbarkeit verschiedener Produkte untereinander zu ermöglichen, ist es prinzipiell notwendig, dass die Hersteller notwendige Informationen so umfassend wie möglich bereitstellen. Dieses Selbstverständnis ist jedoch leider noch wenig ausgeprägt. Der Suchende ist daher - indem er sich z.B. auf redaktionell betreute Datenbanken einlässt - entweder auf eine manuelle und somit subjektive Bewertung durch Dritte angewiesen, oder aber er muss sich selbst durch unzählige individuell gestaltete Herstellerwebseiten durcharbeiten, um zu den erwarteten Informationen zu kommen. Die Nutzung der genannten Datenbanken bedeutet zumeist eine reine Negativauswahl, also das Aussortieren „ungeeigneter“ Materialien. Die Ergebnisse der Suche, die durch die Formulierung der Suchanfrage nicht ausgeschlossen wurden, werden anschließend ohne weitere inhaltliche Differenzierung oder Bewertung einfach linear und ohne Kontext aufgelistet. Je stärker der Kreis der „geeigneten“ Materialien durch weitere Anforderungen eingegrenzt wurde, desto weniger Ergebnisse werden ausgegeben. Eine etwaige Rangfolge der Alternativen ist nicht gegeben, und welches Kriterium zum Ausschluss eines Produkts geführt hat, ist am Ergebnis nicht mehr nachvollziehbar. Eine deutliche Unsicherheit, mit dem geleisteten Aufwand wirklich das „optimale“ Ergebnis erzielt zu haben, steht also im Raum.

3.2.4

Studien zu einer umfassenderen Materialwahl

»Material selection is not only about material information. In selecting, there is a constant interchanging consideration of product, material and technology information required.«

[Bezooyen 2002, S.2]

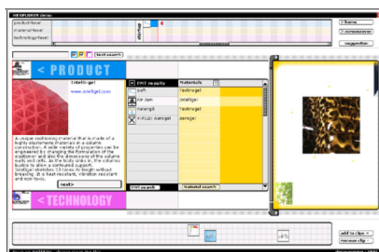


Abb. 3.46: Mock-up material explorer

Einen vom Prinzip her deutlich umfassenderen Ansatz zur Suche geeigneter Materialien als existierende Materialdatenbanken beschreibt die Studie zum Material Explorer [Bezooyen 2002].

Da der Materialwahlprozess, also die schrittweise Eingrenzung des Kreises der möglichen Materialien, bestenfalls nach verschiedenen, sich gegenseitig ergänzenden Strategien abläuft (vgl. Kapitel 2.3), sollte eine Software zur Unterstützung des Auswahlprozesses auch alle diese Ebenen bereitstellen. Eine alleinige Bereitstellung von technischen oder sinnlichen Informationen über Materialien – und seien diese noch so umfangreich – ermöglicht eben doch zunächst nur ein analytisches und somit auf einen Aspekt eingeschränktes Vorgehen.

Das in dieser Studie vorgeschlagene Arbeiten mit Bildern des Materials, aber auch mit Produkten aus eben diesem Material ermöglicht dagegen neben der visuellen Einschätzung der Materialität vor allem das Denken in Analogien, das Unterstützen von Assoziationsketten.

Gleichzeitig zum eigentlich betrachteten Produkt werden auch weitere Materialien mit ähnlichen Eigenschaften in frei auswählbaren Kriterien angezeigt. Dem Nutzer wird so ermöglicht, zu jedem Zeitpunkt die Betrachtungsebene und den Fokus seiner Suche zu wechseln.

Als weitere Unterstützungstechnik wird zudem ein „clipboard“ angeboten, auf dem der Nutzer interessante oder in die nähere Auswahl genommene Materialien temporär ablegen kann und so im Blick behält. Eine Zeitleiste, die nachträglich Auskunft gibt über den zurückgelegten Weg und den jeweiligen Schwerpunkt der Suche, kann ein aufschlussreiches Feedback über die eigene Vorgehensweise geben.

Fazit

Obwohl v. Bezooen als Produkt-Designer in seiner Studie relativ großen Wert auf technologische Verarbeitungsprozesse legt, lassen sich Parallelen auch für die Materialwahl in der Architektur ableiten:

Die gleichberechtigte Berücksichtigung technischer und sinnlicher Kriterien, die von Schritt zu Schritt freie Wahl der bevorzugten Selektionsmethode, das durch „clipboard“ und Zeitleiste unterstützte iterative Erforschen des Datenbestands sowie die frei veränderbare und insgesamt sehr visuell orientierte Programmoberfläche stellen mehrere interessante und verfolgenswerte Alternativansätze zu bestehenden Datenbanken dar.

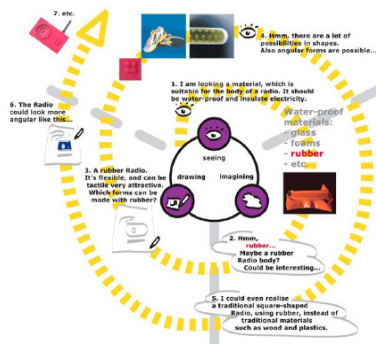


Abb. 3.47: nichtzielgerichtete Suche

3.3

Digitale Individualisierung von Material

»Die bisherige Möglichkeit, aus einer Vielzahl an Produktvarianten auszuwählen, ist heute alleine nicht mehr ausreichend. Der Kunde möchte über das Standardangebot an Varianten hinaus maßgeschneidert Produkte und Systemlösungen bestellen.«

[Wikipedia 2007f]

»Die individualisierte Massenfertigung bzw. Mass Customization ist ein Fertigungskonzept, in dem einerseits die Vorzüge der Massenproduktion [...] genutzt werden, andererseits dem wachsenden Wunsch des Kunden nach Individualisierung seines Produktes Rechnung getragen wird.«

[Wikipedia 2007g]

In die entgegengesetzte Richtung als die oben beschriebene Suche nach geeigneten Materialien oder Produkten geht die – innerhalb eines vorgegebenen Rahmens - nach Kundenwünschen individuell herstellbare oder modifizierbare Oberfläche. Gerade der Bereich der individualisierten Massenanfertigung (mass customization) wird durch digitale Techniken stark vereinfacht.

Besonders verbreitet und einfach zu realisieren ist eine solche Individualisierung bei Oberflächen, die aus vielen kleinen vorgegebenen Bestandteilen zusammengesetzt werden. Die individuelle Beschreibung solcher Bauteile lässt sich durch entsprechende Konfi-

guratoren gut unterstützen. Einige einfache Anwendungen zur Unterstützung kundenspezifischer Beschreibungen von Oberflächen sollen hier als Beispiele für diesen Trend genannt werden.

Etwas anders gelagert ist dagegen die Erstellung von ganz individuellen Unikaten, da diese oftmals eine noch deutlich komplexere Maschinenansteuerung erfordert. Dennoch findet auch diese durch sinkende Preise zunehmend Verbreitung. Ein Beispiel aus der Baubranche, Oberflächen individuell herzustellen, soll hier der Vollständigkeit halber und als Ausblick auf eventuelle zukünftige Entwicklungen ebenfalls aufgeführt werden.

Produktkonfiguratoren

Gerade Oberflächen, die aus einer Vielzahl kleiner Elemente zusammengesetzt werden (Mauerwerk, Terrazzo, Teppich, Keramikmosaik), erlauben trotz Rückgriffs auf eine nur begrenzte Anzahl an Ausgangselementen (Mauersteine, Zuschlagstoffe) eine nahezu unendliche Variationsmöglichkeit.

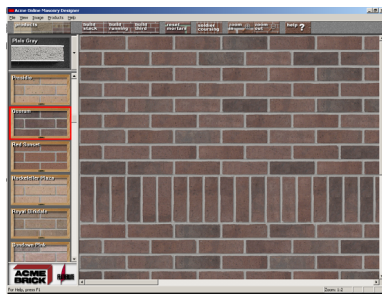


Abb. 3.48: Acme Online Masonry Designer

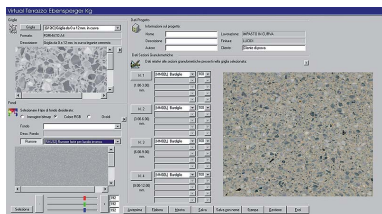


Abb. 3.49: Virtual Terrazzo

Das Aussehen einer solchermaßen individuell einstellbaren Materialoberfläche kann durch digitale Produktkonfiguratoren (siehe Anhang A.6) relativ einfach vorweggenommen werden. Ausdrückliches Ziel der hier vorgestellten Anwendungen ist allerdings zunächst nur ein Bild als Diskussions- und Entscheidungsgrundlage für den Nutzer. Die aus anderen Branchen (Fahrzeuge, Bekleidung) bekannte Datenweitergabe vom Konfigurator direkt zur individuellen Fertigung des Produkts ist hier derzeit noch nicht implementiert, technisch jedoch im Prinzip ohne weiteres möglich.

Ein Beispiel für eine solche Weiternutzung der Daten speziell im Bereich Material ist eine Software, die ermöglicht, Autolacke zunächst am Rechner nach visuellen Kriterien einzustellen. Die Zusammensetzung des Lacks wird dann aus dem gewünschten Erscheinungsbild auf Basis der Simulation abgeleitet [Formula II].

Individualmuster

Viele Materialoberflächen lassen sich auch durch den Einsatz digitaler Drucktechniken auf verschiedenen Trägermaterialien oder durch eine computergestützte Ansteuerung von Fräs-, Web- oder Knüpfmaschinen auf Grundlage eigener Muster und Fotos einfach und relativ preisgünstig individualisieren. Dabei müssen die durch den Kunden bereitgestellten CAD- oder Bilddateien nur noch vom Hersteller in einem Zwischenschritt aufbereitet werden, so dass die jeweiligen Maschinen mittels spezieller Software angesteuert werden können.

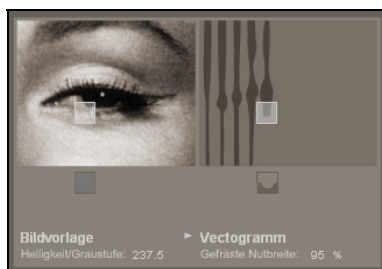


Abb. 3.50: Vectogramm

Nicht nur das Aussehen einer Oberfläche kann durch solche Verfahren individualisiert werden, sondern auch die akustischen oder haptischen Qualitäten, z.B. durch Aufbringen einer entsprechenden Struktur (z.B. [Texsus]). Die Grenze zu einer kompletten rechnergestützten Herstellung ganzer Bauteile ist dann eigentlich nur noch eine Frage des Maßstabs.

Zusammenfassung

Auch im Bauwesen greift das Konzept der individuellen Massenfertigung durch den Einsatz von Digitaltechniken langsam um sich. Das heutige Spektrum reicht von einfachen Konfiguratoren, die das Aussehen einer Oberfläche vorwegnehmen, bis hin zu rechnergesteuerten Maschinen, die eine solche individuelle Oberfläche dann auch herstellen können. Eine weitere Zunahme solcher Techniken - wie aus anderen Branchen bekannt - ist aufgrund sinkender Preise anzunehmen.

3.4 Der integrierte Gesamtprozess

»Eine durchgehende und zugleich sinnvolle digital gestützte Planungstätigkeit existiert noch nicht.

Viele arbeiten daran.

Wir auch.«

[InfAR 2007]

Der gesamte Prozess, um von einer ersten Idee zu einer Entscheidung für ein bestimmtes Oberflächenmaterial zu kommen, ist – wie viele andere Entwurfsentscheidungen auch – vor allem durch unzählige Brüche im Ablauf und fehlende Durchgängigkeit bei den benutzten Techniken und Programmsystemen gekennzeichnet. Jeder dieser Brüche erzeugt natürlich einen gewissen Reibungsverlust und stellt eine potentielle Fehlerquelle dar. Das Ziel der Entwicklung im Bereich Unterstützung der Materialwahl sollte daher ein durchgehender und integrierter Gesamtprozess sein.

3.4.1 Zusammenfassung der Problemstellung

Üblicherweise gibt es keinen definierten Zeitpunkt, an dem die Materialwahl getroffen wird, vielmehr entwickelt sich diese Entscheidung schrittweise und nicht immer geradlinig. Entsprechend sollte der Zugriff auf Materialdaten in unterschiedlichen Detaillierungsgraden möglich sein.

Die Aktualität und notwendige Breite der Information über mögliche Materialien und Produkte ist dabei nur durch einen großen Pflegeaufwand einer eigenen analogen und digitalen Sammlung zu gewährleisten. Andernfalls ist der Nutzer im Anwendungsfall auf eine zeitaufwendige und zudem nicht immer zielführende manuelle Suche in sehr uneinheitlich aufgemachten Webseiten angewiesen.

Auf jenen Seiten werden einzelne Suchergebnisse meistens durch einfaches Auflisten ohne weiteren Zusammenhang und ohne Nachvollziehbarkeit der Ausschlusskriterien dargestellt. Ein detaillierter und begründbarer produkt-, hersteller- oder gar materialübergreifender Vergleich verschiedener Alternativen ist dadurch kaum möglich.

Um zu einer optimalen Materialauswahl zu gelangen, sollten unterschiedliche und ständig wechselnde Strategien verfolgt werden können. Die meisten der vorgestellten digitalen Ansätze oder Webseiten unterstützen jedoch einseitig jeweils nur eine einzelne Methode, so dass der Nutzer zwischen den Anwendungen oder Seiten springen muss.

Es existiert zudem keine durchgehende digitale Planungsumgebung. Selbst wenn der Entwurf als umfassendes Gebäudeinformationsmodell vorliegt, können die bereits vorhandenen Informationen im Wahlprozess nicht nahtlos weiter genutzt werden. Materialien, die vielleicht in Frage kommen, können andersherum nicht direkt im eigenen Entwurf kontrolliert werden bzw. nach erfolgter Wahl mit ihren dann bekannten Eigenschaften im Gebäudemodell für weitere Zwecke (Visualisierung, Simulationen, Kostenermittlung) weiterverwendet werden.

Letztendlich bedeutet jeder dieser Brüche einen Reibungsverlust im gesamten Entwurfsprozess. Jeder aufgrund fehlender Durchgängigkeit doppelt zu gehende Schritt stellt eine potentielle Fehlerquelle dar. Allerdings finden sich in den betrachteten und vorgestellten Einzellösungen viele interessante Ansätze, die im Querschnitt vor allem die breiten technischen Möglichkeiten bei der Anwendung von digitalen Techniken im Zusammenhang mit der Materialwahl zeigen und in ihrer Summe zu einer Verbesserung der bestehenden Situation beitragen könnten.

3.4.2

Vision eines zukünftig möglichen Gesamtprozesses

Zur Überwindung der bestehenden Missstände soll abschließend eine Gesamtstrategie formuliert werden, wie der Prozess der Material- und Produktauswahl in den Entwurfs- und Planungsprozess besser eingebunden werden könnte.

Ausgangspunkt

Zur Vermeidung von Brüchen und Inkonsistenzen wird propagiert, alle vorhandenen Daten über ein Bauwerk in einem einzigen Gebäudeinformationsmodell (BIM) zusammenzuführen. Die im Modell enthaltenen Informationen können so theoretisch durch verschiedene angegliederte Werkzeuge genutzt und das Modell anschließend durch die Ergebnisse dieser Werkzeuge wiederum erweitert werden.

Bezogen auf die Materialwahl könnte der Ablauf dann folgendermaßen aussehen:

Auslesen vorhandener Informationen

Alle Bauteile sind im Gebäudeinformationsmodell zunächst hinsichtlich Geometrie und Lage festgeschrieben, zudem können aber auch bereits Raumfunktionen, erste Farbvorstellungen oder Materialangaben fixiert sein.

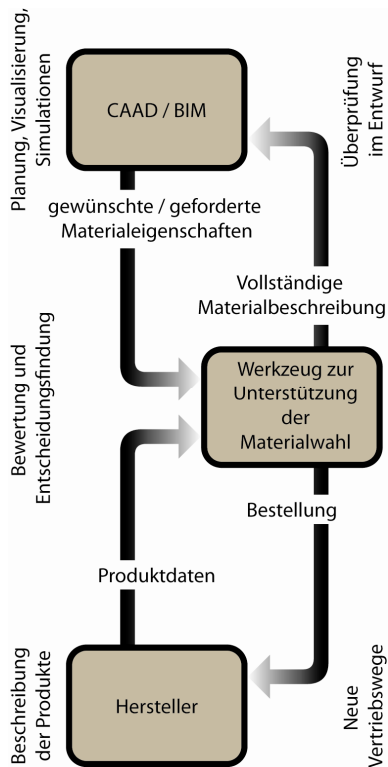


Abb. 3.51: Ablauf eines integrierten Gesamtprozesses

Angegliederte Tools (z.B. Colored Architecture) können auf Grundlage dieser Daten helfen, ein Farbkonzept zu entwickeln. Andere Simulationstools können z.B. Aussagen über notwendige akustische oder thermische Eigenschaften liefern. Aufgesetzte Expertensysteme könnten zudem allein aus den Raumfunktionen sowie der Lage von Bauteilen eine Vielzahl technischer Anforderungen an bestimmte Oberflächen ableiten.

Je nach Zeitpunkt der Materialwahl sind viele gewünschte sowie geforderte Eigenschaften der betrachteten Oberflächen also bereits relativ umfangreich beschrieben. Diese Informationen könnten als Input direkt für ein Materialauswahl-Werkzeug übernommen, dort aber selbstverständlich auch noch manuell ergänzt oder verändert werden.

Auslesen von Produktdaten

Auf der anderen Seite könnten Daten über angebotene Materialien oder Produkte von den Herstellern auf ihren Webseiten in einem standardisierten Format und (z.B. über XML) maschinenlesbar und -interpretierbar bereitgestellt werden. Ebenso könnten solche Informationen vom interessierten Nutzer zielgerichtet als Feed abonniert werden.

Ein automatischer Abgleich der oben formulierten Anforderungen an die Oberflächen mit den Eigenschaften aller durch entsprechende Suchmaschinen gefundenen oder zugesendeten Materialien wäre so prinzipiell möglich.

Materialbewertung- und -auswahl

Um die gefundenen Materialien hinsichtlich der an die Oberfläche gestellten Anforderungen auch bewerten zu können, müssen vorher allerdings die anzuwendenden Bewertungskriterien aufgestellt und beziffert werden. Wie eine solche Bewertungsmethode im Detail aussehen kann und wie ein entsprechendes Werkzeug sinnvoll ausgestaltet werden sollte, ist der eigentliche Schwerpunkt dieser Arbeit und wird in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

Das Ergebnis eines solchen Werkzeugs sollte letztlich die Festlegung eines oder aber die nähere Betrachtung mehrerer denkbarer Materialien sein.

Überprüfung des Materials im Entwurf

Die Informationen über das gewählte Material könnten anschließend aber auch wieder in das Gebäudemodell zurückgeschrieben werden, so dass das Material im eigenen Entwurf visuell, aber selbstverständlich auch in allen anderen angegliederten Simulationstools in seinen Auswirkungen überprüft werden kann.

Diese Überprüfung kann dann zur Erkenntnis führen, dass das gewünschte Material doch noch nicht das „optimale“ darstellt. Nach einer entsprechenden Modifizierung der Anforderungen könnte der Auswahlprozess auf dieser Basis erneut ablaufen. Durch iteratives Durchlaufen solcher Schleifen käme man – wie in den anderen

Entwurfefeldern auch – irgendwann zur endgültigen Materialentscheidung.

Nutzung weiterer Daten

Gerade durch die Verbindung mit allen Informationen aus dem Gebäudemodell (z.B. durch eine Mengen- und Massenermittlung) könnten sich durch das Bereitstellen von Ausschreibungstexten oder Kennwerten zur Kostenkalkulation - nicht nur für den Planer, sondern auch für die Hersteller viele weitere positive Effekte ergeben. Eine auf den Bauort bezogene regionalspezifische Hersteller- und Händlersuche oder ein Angebot zur Online-Material-Bestellung könnte so z.B. völlig neue Vertriebswege und Geschäftsfelder erschließen helfen.

Fazit

Das oben skizzierte Szenario beschreibt zunächst einmal nur einen theoretischen Weg, wie der Prozess der Materialwahl in einen – wünschenswerten - durchgehenden digitalen Entwurfsprozess integriert werden kann. Computer mit immer größerer Rechenleistung, die zunehmende Verbreitung schneller Internetverbindungen sowie Fortschritte in der plattformübergreifenden Formulierung und der immer perfekteren Echtzeit-Darstellung von Materialien lassen den Weg aber zumindest technisch schon heute realisierbar erscheinen.

Zur wirklichen Umsetzung müsste allerdings bei den Herstellern die Erkenntnis reifen, dass eine umfassende, standardisierte und kundenfreundliche Produktinformation einen Wettbewerbsvorteil bedeutet und neue Geschäftsfelder eröffnen kann. Auch wenn bei den Baustoffherstellern die Anbieterstruktur deutlich kleinteiliger ist, könnte als Beispiel der Zusammenschluss vieler Firmen aus der Leuchtenindustrie dienen: Diese begreifen die Förderung und Erstellung einer gemeinsamen Lichtberechnungssoftware [Dialux] sowie das dadurch ermöglichte Bereitstellen standardisierter Produktdaten als Marketinginstrument.

Die Anwendung der oben formulierten Gesamtstrategie könnte helfen, einige der ausgemachten Nachteile des bisher üblichen Materialwahlprozesses zu beheben. Selbstverständlich behalten aber auch bestehende Techniken wie z.B. das Nutzen realer Materialmuster weiterhin ihre Berechtigung. Bestenfalls können sich die verschiedenen Ansätze gegenseitig sinnvoll ergänzen.

Das gesetzte Ziel dieser Arbeit ist die Unterstützung der Material- und Produktauswahl, indem die Entscheidung für ein Produkt plausibel und nachvollziehbar getroffen werden kann. Entscheidend hierfür wird die Ausgestaltung und Durchführung des Auswahlprozesses sein. Die folgenden Teile der Arbeit legen daher ihren Fokus auf die Möglichkeiten der Unterstützung dieses eigentlichen Bewertungs- und Auswahlprozesses.

II Die Entscheidungskriterien

4

Unterteilung der Entscheidungskriterien

»Der Entscheid wird durch den oder die Entscheidungsträger nach objektiven und subjektiven Entscheidungskriterien gefällt.«

[Wikipedia 2006d]

Der zweite Hauptteil der Arbeit geht in den Kapiteln 4 und 5 der Frage nach, welche Kriterien die Entscheidung für oder auch gegen ein bestimmtes Material beeinflussen. Um den Umgang mit diesen Kriterien zu erleichtern, sollen diese zudem in eine inhaltlich sinnvolle und logische Struktur gebracht werden.

Zunächst wird dargelegt, wer die Kriterien aus welcher Motivation heraus festlegt (Kapitel 4.1). Daraus ergibt sich eine unterschiedliche Relevanz der Kriterien, so dass sich diese in zwei in Folge unterschiedlich zu behandelnde Gruppen unterteilen lassen (Kapitel 4.2). Anschließend werden bestehende Materialklassifikationssysteme mit ihren jeweiligen Einschränkungen beschrieben, um die Notwendigkeit der Formulierung einer – für die Zwecke dieser Arbeit – eigenen Ordnung von Kriterien zu zeigen (Kapitel 4.3).

Darauf aufbauend werden die Kriterien, die in den Entscheidungsprozess hineinfließen können, im Detail beschrieben (Kapitel 5).

4.1

Beteiligte an der Auswahl

»Berufsaufgabe der Architekten ist die gestaltende, technische, wirtschaftliche, ökologische und soziale Planung von baulichen Anlagen.

Zu den Berufsaufgaben der Architekten aller Fachrichtungen gehören auch die Beratung, Betreuung und Vertretung des Auftraggebers hinsichtlich der mit der Planung und Realisierung eines Vorhabens zusammenhängenden Angelegenheiten sowie die Koordinierung und Überwachung der Ausführung.«

[AKThü 2005, §3]

Die Planung eines Bauwerks erfolgt üblicherweise auf Grundlage eines Vertrags zwischen einem Planer und dessen Auftraggeber. Die finalen Ziele jeder Planung sind die Genehmigungsfähigkeit und die Errichtung des geplanten Bauwerks.

Somit lassen sich prinzipiell drei an der Planung beteiligte Gruppen ausmachen, die Einfluss auf die Materialwahl nehmen können:

Planer

Der Architekt wird in der Öffentlichkeit oft - sehr verkürzt - ausschließlich als „Gestalter“ gesehen, der nur für den eigentlichen „Entwurf“ verantwortlich ist, also vorwiegend gestalterische Aspekte verfolgt. Allerdings muss er gleichberechtigt auch funktionale, technische und wirtschaftliche Anforderungen an das Gebäude erfüllen.

»HOAI §15 Leistungsbild Objektplanung für Gebäude

[...]

LP 3 Entwurfsplanung (System- und Integrationsplanung)

[...] Durcharbeiten des Planungskonzepts [...] unter Berücksichti-

gung städtebaulicher, gestalterischer, funktionaler, technischer, bauphysikalischer, wirtschaftlicher, energiewirtschaftlicher [...] und landschaftsökologischer Anforderungen unter Verwendung der Beiträge anderer an der Planung fachlich Beteiligter bis zum vollständigen Entwurf.

Integrieren der Leistungen anderer an der Planung fachlich Beteiligter.«

[BGBl 2001]

Je nach Komplexität des Bauwerks ist er bei der Planung dann auch auf die Integration der Beiträge weiterer Fachplaner wie Tragwerksplaner, Bauphysiker, Lichttechniker, Energieberater etc.) angewiesen. Jeder dieser Beteiligten wird – je nach Disziplin – weitere, dann zumeist technische, Anforderungen an bestimmte Oberflächen stellen, die in der Planung beachtet werden müssen.

Zudem sollte der Architekt vertragsgemäß die Interessen seines Auftraggebers vertreten, sich also auch die von diesem formulierten Planungswünsche zu Eigen machen.

Auftraggeber

Unabhängig davon, ob der Auftraggeber als klassischer Bauherr oder eher als anonymen Investor auftritt, wird er üblicherweise die Wahl einer bestimmten Oberfläche durch Wünsche (z.B. durch Gestaltungsrichtlinien im Rahmen einer Corporate Architecture) und Anforderungen (z.B. technische Vorgaben aufgrund der späteren Nutzung) beeinflussen.

Die Interessen des Auftraggebers müssen sich dabei nicht unbedingt mit denen des Planers decken (z.B. kann er der Einhaltung einer maximalen Preisvorgabe deutlich höhere Priorität einräumen). Als Beauftragender der Baufirmen hat der Auftraggeber die letztendliche Entscheidungshoheit.

Baubehörden

Das Ziel der Planung ist die Umsetzung derselben, daher muss sie selbstverständlich genehmigungsfähig sein. Neben der Bauordnung müssen dafür auch technische Baubestimmungen, Arbeitsstättenverordnung und -richtlinie sowie berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit eingehalten werden.

Die dort formulierten Anforderungen an Oberflächen sind zwar teilweise sehr grundsätzlicher Natur (*»Gebrauchstauglichkeit«* [TMBV 2004]) und schwammig (*»leicht zu reinigen«* [BGBl 2004]), sie können aber auch genaue Materialbeispiele vorgeben (z.B. *»keramische Fliesen und Platten«* [BGZ 2003]).

Eine Vielzahl von Normen regelt darüber hinaus für einzelne Bauteile detailliert technische Anforderungen, die durch die Produkte eingehalten werden müssen, damit diese überhaupt angewendet werden dürfen.

Als Gesamtverantwortlicher für die Planung und Umsetzung und als Koordinator der Einzelbelange ist letztendlich der Architekt für die Formulierung und Einhaltung aller die Materialwahl betreffenden Wünsche und Anforderungen zuständig.

»Bauprodukte dürfen nur verwendet werden, wenn bei ihrer Verwendung die baulichen Anlagen [...] gebrauchstauglich sind.«

[TMBV 2004, §3 (2)]

»Die Oberflächen der Fußböden, Wände und Decken müssen so beschaffen sein, dass sie den Erfordernissen des Betriebes entsprechen und leicht zu reinigen sind.«

[BGBl 2004, 1.5 (1)]

»In Arbeitsräumen und -bereichen mit Rutschgefahr müssen rutschhemmende Bodenbeläge eingesetzt werden. Je nach Anforderung können dies feinraue, raue oder profilierte Bodenbeläge erfüllen, z.B. [...]«

[BGZ 2003, 3.1]

4.2 Unterteilung der Kriterien nach Relevanz

»Die Bedeutsamkeit (Relevanz, Wichtigkeit) ist ein Maß dafür, wie stark eine Sache die Realität beeinflusst [...].

Die Bedeutsamkeit hängt stets stark vom Kontext ihrer Interpretation ab. Sie steht für das Gewicht des Objektes gegenüber anderen Objekten in einem definierten Kontext: je höher das Gewicht, desto mehr muss man diesem Objekt Beachtung schenken, und desto größer wären die Auswirkungen, wenn man dieses Objekt verändert. Was in einem Kontext relevant ist, kann in einem anderen also unwichtig sein.«

[Wikipedia 2007h]

Wie aus den oben verwendeten Begriffen „Wünsche“ und „Anforderungen“ bereits ersichtlich ist, können sich die Kriterien hinsichtlich ihrer Relevanz unterscheiden. Dabei kann die Wichtigkeit eines Kriteriums zwischen den beiden Extremen „absolut wichtig“ und „völlig unwichtig“ schwanken.

Für den weiteren Umgang mit den Kriterien müssen zwei logische Gruppen betrachtet werden:

4.2.1 Absolut wichtige KO-Kriterien

KO-Kriterien legen bei ihrer Erfüllung eine Entscheidung unabhängig von anderen Kriterien fest [Wikipedia 2006e].

Im Falle der Materialwahl handelt es sich immer um die Entscheidung für den sofortigen Ausschluss eines Materials aus der Gruppe der möglichen und weiter untersuchten Materialien - und zwar unabhängig davon, wie sich das Material in allen anderen Kriterien darstellt. Dabei ist es nur eine Frage der Formulierung, ob es sich um Anforderungen handelt, die auf jeden Fall erfüllt werden müssen (z.B. die in der Bauordnung geforderte „Gebrauchstauglichkeit“) oder um Eigenschaften, die auf gar keinen Fall vorhanden sein dürfen (z.B. „Brennbarkeit“). Zudem ist es für den weiteren Umgang mit solchen Kriterien gleich, ob die Anforderung durch ein Gesetz formuliert wird oder ob der Planer bestimmte Eigenschaften individuell für sich (z.B. „Es soll auf jeden Fall Holz verwendet werden.“) als KO-Kriterium festlegt.

Für KO-Kriterien muss nur ein einziger Wert definiert werden, der bei Nichteinhaltung zum Ausschluss des Materials aus der weiteren Betrachtung führt. Die Relevanz von KO-Kriterien ist also absolut.

4.2.2 Relativ wichtige Kriterien

Ganz im Gegensatz dazu impliziert die nur relative Relevanz aller anderen Kriterien geradezu, dass - auch wenn diese nicht oder nicht vollständig erfüllt sind - ein Material dennoch gewählt werden kann, z.B. wenn es alle anderen Kriterien optimal erfüllt.

Wiederum macht es von der Logik her keinen Unterschied, ob es sich bei der Formulierung eines solchen Kriteriums inhaltlich um eine Soll-Vorschrift aus einer technischen Baubestimmung oder nur um einen vom Bauherrn geäußerten Wunsch handelt. Der Unterschied liegt hier nur in der Stärke der individuellen Gewichtung, die diesem Kriterium zugeschrieben wird. Es kann sich zudem um Kriterien handeln, die nicht eindeutig definiert sind (z.B. „Das Material sollte preisgünstig sein.“) oder ob sie Eigenschaften mit fließenden Grenzen aufweisen (z.B. ein bestimmter Farbton).

Für die weitere Bewertung aller hier betrachteten Kriterien sind also immer zwei Werte notwendig: die Benennung der gewünschten Eigenschaft und zusätzlich eine Aussage darüber, wie wichtig die Einhaltung dieses Kriteriums sein soll, bzw. unter welcher Voraussetzung auch davon abgewichen werden kann. Die Relevanz der Kriterien, die nicht als KO-Kriterium gelten, ist also immer nur relativ.

4.3 Material-Klassifikation

»Classification has a key role in design. Design involves choice, and choice from enormous range of ideas and data among them, the choice of materials and processes. Classification is closely linked to indexing, a central activity for both information retrieval and selection. But to be efficient, the classification and indexing must be adapted to the nature of the population of objects that are to be classified and the purpose of the search.«

[Ashby 2002, S.117]

»Classification is the first step in bringing order into any scientific endeavor. [...] Classification segregates an initially disordered population into groups that in some way have significant similarities. These groups can be further subdivided by seeking finer levels of similarities within each. The success of the great classification systems relies on the choice of relevant attributes and the judgment of what is "significantly similar."«

[Ashby 2002, S.117]

Die Suche nach Kriterien und Merkmalen, welche relevant sind für die Entscheidung für ein Material, führt - über die Frage nach der Natur der jeweiligen Materialien - zum Wunsch, diese auch sinnvoll indizieren und klassifizieren zu können. Ashby sieht in einer solchen Ordnung ein zentrales Element im Informations- und Auswahlprozess: Hat man z.B. ein bereits in weiten Teilen geeignetes Material gefunden, erscheint es sinnvoll, ähnliche Materialien der gleichen Familie einer näheren Betrachtung zu unterziehen und zu schauen, ob diese vielleicht noch besser geeignet sind.

Damit eine Klassifikation innerhalb eines Auswahlprozess sinnvoll zum Tragen kommen kann, muss sie die Natur der klassifizierten Objekte im Hinblick auf das Ziel der Suche abbilden. In Bezug auf Materialien werden von Addington z.B. folgende Klassifikationssysteme genannt [Addington 2005]:

4.3.1 Traditionelle Klassifikationssysteme

Das Aufstellen einer Klassifizierung beruht auf einer Festlegung der für den jeweiligen Zweck für wichtig erachteten und dabei signifikant in Erscheinung tretenden Eigenschaften. Die folgenden Systeme

me sind daher - obwohl es immer um die Ordnung von Materialien geht - grundsätzlich unterschiedlich aufgebaut.

»The material science approach to classification goes directly to the core understanding of the basic internal structure of materials.«

[Addington 2005, S.22]

»Materials in the engineering realm are chosen based on what they can do, how they behave and what they can withstand.«

[Addington 2005, S.23]

»In many design fields the material is chosen long before performance criteria are defined and as such the process tends to be artefact-driven.«

[Addington 2005, S.27]

»Architectural building codes and standards, for example, often supersede performance criteria in an attempt to simplify the selection process and remove liability for performance failures. [...] This system is intended to remove the decision-making responsibility from the architect, and as such, it is less about informed choice and optimization and more about specification and standardization. The result is information, not knowledge.«

[Addington 2005, S.25]

Materialwissenschaften

Das von der Materialwissenschaft verfolgte Ziel ist, im Kern zu verstehen, warum sich bestimmte Materialien entsprechend verhalten. Das Ziel ist vor allem, anschließend gezielt Materialien verändern oder herstellen zu können. Der Blick konzentriert sich daher mittlerweile auf den subatomaren Bereich. Eine spätere Anwendung in der Architektur spielt für diese Klassifizierungssysteme keine Rolle.

Ingenieurwesen

Weniger grundlagenbasiert als vielmehr anwendungsorientiert ist dagegen die Sicht eines Ingenieurs. Dieser kann sich bei seinem üblichen Materialwahlprozess auf viele branchenspezifische Klassifikationssysteme berufen, die es ihm durch Berücksichtigung vorwiegend physikalisch-chemischer Kriterien erleichtern, den Fokus auf nur wenige geeignete Materialien einzuengen und anschließend aus diesen zu wählen.

Den Ingenieur interessieren vorwiegend die technischen Eigenschaften von Konstruktionsmaterialien. Auch die ingenieurspezifischen Klassifikationssysteme sind daher für den Architekten bei der Suche nach geeigneten Oberflächen von geringer Bedeutung.

Produkt-Designer

Im Produkt-Design werden zumeist industriell herstellbare Massenprodukte entworfen. Dadurch rücken bei der Auswahl geeigneter Materialien die Produktionsprozesse mit ihren Anforderungen und Beschränkungen stärker in den Vordergrund. Auch verschiedene Herstellungsverfahren können daher für die Auswahl eines Materials geeignete Kategorien bilden.

Im Bauwesen werden im Gegensatz dazu jedoch vorwiegend Unikate entwickelt. Auch eine Ordnung von Materialien nach ihren Verarbeitungsprozessen erscheint daher für die Auswahl im Sinne dieser Arbeit nur wenig Hilfestellung zu geben.

Architekten

Recht pragmatisch kann im Prinzip der Architekt agieren, der - und sei es aus Haftungsgründen - rein bauteilbezogen nur aus für den jeweiligen Einsatzbereich zugelassenen Bauprodukten auswählt. Einige der in Kapitel 3.2.3 vorgestellten Datenbanken unterstützen z.B. den Zugang zu Materialien allein über die Eingabe des zur Anwendung kommenden Bauteils. Ist die prinzipielle technische Einsatzmöglichkeit bereits über die Zulassung sichergestellt, kann sich der Planer auf die ihm vertraute gestalterische Eigenschaftsebene der Produkte konzentrieren.

Eine Klassifikation von Materialien nach ihrer möglichen bauteilbezogenen Nutzung wird im Ergebnis allerdings zu funktionierenden, jedoch nicht gerade zu innovativen Standardlösungen führen.

»In general, we will see that each material system adopts a particular point of view that is useful to a particular construct of the field and/or for a particular application. The construct may have no overlap or applicability for another group.«

[Addington 2005, S.22]

Zusammenfassung

Die hier genannten bestehenden Klassifikationsmodelle sind in der Praxis anwendbar und haben daher in ihren individuellen Bereichen durchaus ihre Berechtigung. Allerdings beruhen sie allesamt auf einem jeweils sehr spezifischen und somit oft stark eingegengten Blickwinkel. Für einen multikriteriellen und multimodalen Ansatz, wie er in dieser Arbeit verfolgt werden soll, erscheinen sie daher weniger geeignet.

4.3.2

Eine Alternative zu starren Klassifikationssystemen

Da ein unvoreingenommener und umfassender Zugang bei der Materialsuche ermöglicht werden soll, können die traditionellen Systeme mit ihrer Konzentration auf wenige fachspezifische Aspekte nicht eingesetzt werden. Anstelle starrer Klassifikationssysteme sind eher flexible Ansätze gefragt.

Insbesondere jene Material-Agenturen, die sich als Inspirationsquellen für innovative Produkte bzw. für einen unkonventionellen Einsatz bekannter Materialien verstehen (vgl. Kapitel 2.2.1), stehen bei der Erstellung ihrer Sammlung, Webseiten oder Buchveröffentlichungen ebenfalls vor der Problematik, ein extrem breites Spektrum an möglichen Kriterien und Material-Eigenarten in einer eigenen Systematik abbilden zu müssen. Sie können daher einen gewissen Anhaltspunkt geben, welche Alternativen zu den traditionellen Klassifikationssystemen bestehen könnten.

Suchmasken in freien Materialdatenbanken

Betrachtet man die Suchmöglichkeiten in solchen bestehenden Materialdatenbanken (siehe Anhang A.6), fällt auf, dass diese - neben einer relativ grob unterteilten Werkstoffkategorie - nicht nur eine Mischung aus sinnlichen und technischen Kriterien anbieten, sondern teilweise auch eine Suche nach frei formulierten Kategorien wie z.B. Anwendungsmöglichkeiten, formalen Kriterien oder Herkunftsland ermöglichen. Diese verschiedenen Eigenschaften werden zwar - optisch - in der Suchmaske zu inhaltlichen Gruppen zusammengefasst, in der Ausführung der Suchanfrage allerdings finden sie unabhängig voneinander bzw. gleichberechtigt nebeneinander Berücksichtigung.

»The materials are organized similarly to the broad composition categories that sit at the top of the material science classification system, but are without the inductive lower layers that serve to explain the material.«

[Addington 2005, S.28]

Material	Sensorial	Technical
Plastics	<ul style="list-style-type: none"> ● Glossiness Satin ■ Translucence 50-100 % □ Structure Open ◀ Texture Coarse 	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Fire resistance Strong ✱ UV Resistance Good ✱ Weather resistance Good ■ Scratch resistance Good □ Weight Light ✱ Chemical resistance Good □ Renewable No
Country of origin	<ul style="list-style-type: none"> T Hardness Hard W Temperature Warm A Acoustics Moderate U Odour None 	
New Zealand		

Abb. 4.1: Suchmöglichkeit im materialexplorer

»While this is intended to break the hegemony of the currently over-specified process of material selection that abounds in the design fields, there is little contextualization of the categories.«

[Addington 2005, S.28]

Fazit

In letzter Konsequenz führt dieser Ansatz eher zum genauen Gegenteil von Materialklassen, nämlich zu unabhängig nebeneinander stehenden Material- oder Produkt-Individuen, die sich allein über ein gleichzeitiges Einhalten gewünschter Kriterien als eine lose Gruppe möglicher Materialien qualifizieren. Dieser Ansatz, mögliche Produkte weder bauteil- noch materialgruppenspezifisch, son-

»The only way to describe the material is to consider it as a system capable of performance: thus we shall speak of a "material," not by defining "what it is," but describing "what it does."«

[Manzini 1989, S.29]

dem allein über eine individuelle Definition einer Vielzahl mehr oder weniger zu erfüllender Eigenschaften aus der Menge aller Materialien herauszufiltern, bildet dabei die Erkenntnis ab, dass die traditionellen Grenzen zwischen Materialien durch neue Herstellungsverfahren und Produkte immer weiter verschwimmen (vgl. Kapitel 1.1.3). Relevant ist nicht mehr die Frage nach dem Material an sich, sondern danach, wie es sich verhält und wie es wahrgenommen wird.

Unter dieser Voraussetzung wird eine Materialsuche sicherlich zu teilweise unerwarteten Ergebnissen führen, da vielleicht Materialien in Gruppen zusammengefasst werden, die auf den ersten Blick eher wenige Gemeinsamkeiten zu haben scheinen. Allerdings kann gerade das Erkennen auch vorher nicht gesehener Zusammenhänge zu innovativen Lösungen inspirieren, welche in der Architektur ausdrücklich auch gewünscht sind.

Für das weitere Vorgehen wird dieser wenig traditionelle Weg verfolgt, bei dem alle Kriterien prinzipiell gleichberechtigt und unabhängig in die Materialwahl einfließen können.

5

Kriterien bei der Materialwahl

»Ein Kriterium ist ein Merkmal, das bei einer Auswahl zwischen Personen oder Objekten (Gegenständen, Eigenschaften, Themen, usw.) relevant für die Entscheidung ist.«

[Wikipedia 2006f]

Im Folgenden wird eine Vielzahl von denkbaren und notwendigen Kriterien aufgeführt, die zu einer Beschreibung von Materialien und Oberflächen allgemein verwendet werden (Kapitel 5.1). Diese Zusammenstellung der Kriterien beruht auf einer nicht im Einzelnen referenzierbaren Querschnittsbetrachtung von verbreitet angewandten Materialbeschreibungen in Büchern, Fachzeitschriften und auf Webseiten, von notwendigen Parametern zur Materialdefinition in verschiedenen Computerprogrammen, von wahrnehmungspsychologischen Untersuchungen sowie von Produktdatenblättern aus mehreren Materialkategorien.

Ein Anspruch auf Absolutheit oder Vollständigkeit kann und soll dabei nicht erhoben werden. Andere Nutzer und einzelne Branchen mögen eigene Schwerpunkte setzen, eine feinere Untergliederung wählen, eine andere Begrifflichkeit verwenden oder auch weitere branchenspezifisch notwendige Kriterien anführen. Entscheidend für das weitere Vorgehen ist die hier vorgeschlagene strukturelle Logik. Zusätzlich eingefügte Unterkriterien oder etwas andere Unterteilungen würden das Ergebnis einer Suche nur graduell verschieben, aber nicht grundlegend verändern

»Um dem Wunsch der Praktiker nach realistischeren und anwendbaren Entscheidungsunterstützungsmethoden zu entsprechen und die beschränkte Informationsverarbeitungskapazität bzw. die eingeschränkte Rationalität eines Entscheiders zu berücksichtigen, wird häufig vorgeschlagen, bei Vorliegen sehr vieler Ziele diese in einem hierarchisch aufgebauten Zielsystem zu strukturieren.«

[Eickemeier 2002, S.389]

Eine hierarchische Strukturierung der Kriterien und die anschließende Darstellung in einem Baumdiagramm (Kapitel 5.2) sollen helfen, sich über die relative Wertigkeit der Kriterien und ihrer Beziehungen zueinander klar zu werden. Durch das Gruppieren aller Kriterien in kleinere und überschaubarere Einheiten kann die Komplexität der Materialentscheidung etwas verringert werden.

Aus der Gesamtsicht auf alle genannten Einzelkriterien wird abschließend das letztlich ausschlaggebende Gesamtkriterium definiert (Kapitel 5.3).

5.1

Festlegung der Kriterien

»In practice there is no set procedure for generating the objectives, criteria, and activities to be included in a hierarchy or even a more general system. It is a matter of what objectives we choose to decompose the complexity of that system.«

[Saaty 1990, S.14]

Es gibt keine „objektive“ oder unabhängige Quelle, die vorgibt, welche Kriterien bei der Materialwahl in der Architektur angewen-

det werden. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als diese individuell bzw. speziell für diese Arbeit festzulegen. Selbstverständlich muss diese Festlegung im Einzelnen fachlich begründet werden. Die Kriterien sollen sinnvoll anwendbar sein. Es wird daher darauf geachtet, dass es sich um möglichst allgemeingültige (also nicht materialspezifische) Eigenschaften handelt, die zudem durch konkrete Zahlwerte hinterlegt werden können und somit im Prinzip „objektivierbar“ sind.

»One must prioritize very carefully the highest levels of the hierarchy because it is there that consensus is most needed since these priorities drive the rest of the hierarchy. In each level one must ensure that the criteria represented are independent or at least are sufficiently different, and that these differences can be captured as independent properties in the level.«

[Saaty 1990, S. 30]

Im Vorgriff auf das im dritten Hauptteil dieser Arbeit vorgeschlagene Bewertungsverfahren werden die im Folgenden angeführten Kriterien bereits inhaltlich gegliedert. Vorgeschlagen werden vier deutlich unterscheidbare Hauptkategorien (sinnlich, technisch, ökonomisch und ökologisch) und weitere darunter liegende Gruppen. Einige Materialeigenschaften können dabei auch gleichzeitig unter verschiedenen Gesichtspunkten, die sich gegenseitig beeinflussen, wichtig sein (z.B. der sinnliche Aspekt „Farbe“ und der technische Aspekt „Lichtreflexionsgrad“). Dennoch können sie unabhängig voneinander betrachtet werden, der Zugang sollte über beide Wege möglich sein.

5.1.1

Sinnliche Kriterien

*»Der Mensch nimmt die Umwelt mit seinen 6 Sinnen wahr.
visuell (Sehsinn)
akustisch (Hörsinn)
haptisch (kinästhetisch Tiefensensibilität) / taktil (Tastsinn)
olfaktorisch (Geruchssinn)
gustatorisch (Geschmackssinn)
vestibulär (Gleichgewichtssinn)«*

[Wikipedia 2007i]

Durch eine bewusste Gestaltung der Oberflächen kann der Planer die Intention seiner Architektur unterstützen (vgl. Kapitel 1.1). Die Materialien wirken dabei auf alle Sinne und schaffen so die gewünschte Atmosphäre.

Viele Qualitäten eines Materials werden synästhetisch als Gesamtheit empfunden (z.B. ein „warmes Material“), dabei beruhen sie zumeist auf konkreten Materialeigenschaften, die auch unter rein technischen Gesichtspunkten gesehen werden könnten (z.B. „Wärmeableitungswiderstand“).

Um sicherzustellen, dass einerseits zwar mit der Sprache eines Gestalters gesprochen werden kann, andererseits aber auch der notwendige Grad an Objektivierbarkeit eingehalten werden kann, wird eine nach den aufnehmenden Sinnen wahrnehmbarer Einzelaspekte getrennte Auflistung der sinnlichen Kriterien vorgeschlagen:

Optik

»Etwa 90 % der Informationsreize eines Menschen basieren auf dem Sehsinn. Somit verwundert es kaum, dass die Optik normalerweise das erste Entscheidungskriterium für die Auswahl eines Baustoffs darstellt. Insbesondere die Oberfläche - von glänzend bis matt, von hell bis dunkel, von homogen bis texturiert - schafft die Grundlage der architektonischen Wirkung.«

[Hegger 2006, S.652]

Der Sehsinn ist - gerade weil er als Fernsinn funktioniert - für die Architekturwahrnehmung der wichtigste Kanal. Darunter spielt wiederum die Farbigekeit einer (Raum-) Oberfläche eine besonders große Rolle, da sie - über eine Veränderung der Farbtemperatur des von ihr reflektierten Lichts - großen Einfluss ausübt auf die gesamte Lichtstimmung und die dadurch erzeugte Atmosphäre (Farbpsychologen nutzen so z.B. im Krankenhausbau den Einsatz von Farben zur gezielten Unterstützung von Heilungsprozessen). Eine zusätzliche getrennt mögliche Betrachtung von Farbton, Helligkeit und Sättigung erleichtert dabei die exakte Beschreibung von Farbwerten und die Anwendung anerkannter Harmonieregeln.

Der Glanz, der letztendlich von der Glattheit der Oberfläche im mikroskopischen Maßstab (im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts) abhängt [Wikipedia 2008d], bestimmt das Spiegelungsverhalten des Materials. Besonders glänzende Oberflächen wirken als perfekter Spiegel und können so z.B. lebendige Lichtreflexe erzeugen, matte dagegen streuen auftreffendes Licht in alle Richtungen und wirken dadurch eher stumpf.

Transparenz/Transluzenz als Eigenschaft, durch ein Material hindurchzusehen bzw. Licht hindurchzuleiten, ist - insbesondere durch die Möglichkeit einer auch metaphorischen Verwendung - in moderner Architektur ein nicht wegzudenkendes Kriterium: Transparente Materialien können einen Raumabschluss schaffen und dennoch eine (Blick-) Beziehung durch die Grenze hindurch ermöglichen. Der Transparenzgrad eines Materials kann allerdings je nach Blickwinkel auf die Oberfläche zum Teil erheblich variieren, z.B. durch den Fresnel-Effekt aufgrund verschiedener Dichten bei Glas oder durch die räumliche Struktur bei Geweben. Eine Berücksichtigung auch dieses Effekts erscheint recht komplex.

Vor allem natürliche Materialien, aber auch viele künstliche Oberflächen weisen durch einen Wechsel in ihrer Farbigkeit eine deutliche Textur (oder auch Musterung, Maserung, Sprengelung) auf. Dadurch erhalten sie als gern eingesetzte Qualität zumeist eine größere Lebendigkeit als homogenere Flächen.

Problematisch für den Gebrauch der Textur als Kriterium ist allerdings, dass die Wahrnehmung einer Textur stark vom Betrachtungsabstand abhängt. Bei zu großer Blickentfernung kann - bedingt durch das maximale Auflösungsvermögen des Auges - die Textur zu einem dann gemischten Farbwert verschwimmen. Andersherum kann die Wahrnehmung eines in sich homogenen Materials aufgrund der Verlegung in kleinen Elementen, z.B. durch ein regelmäßiges Fugenraster, mit einer die Wahrnehmung bestimmenden Struktur überlagert werden.

Ein weiteres Problem ist eine äußerst breite und dadurch uneinheitliche Begrifflichkeit bei der Beschreibung von visuellen Texturen [Bhushan 1997]. In mehreren empirischer Untersuchungen [Hollins 1993; Picard 2003; Rao 1993] haben sich allerdings wenige unabhängig voneinander wahrnehmbare Dimensionen herauskristallisiert (Form der Primitiva, Kontrast, Gerichtetheit, Grobheit, Regelmäßigkeit). Diese ermöglichen eine relativ konkrete Beschreibung von Texturen.

Akustik

Bei der Betrachtung der akustischen Eigenschaften eines Materials muss unterschieden werden zwischen der Wirkung des Gesamtbauaufbaus auf die Raumakustik (z.B. Reduzierung der Schallreflexion durch inneren Schichtaufbau einer Akustikdecke) und dem eigenen Klang eines Materials, wenn es angeschlagen wird. Während ersteres ein technisch zu betrachtendes Kriterium darstellt (und entsprechend dort aufgeführt wird), interessiert der Klang eher als gestal-

terisches Merkmal. Dieser Klang von Materialien lässt sich beschreiben durch die beiden Parameter Tonhöhe (Frequenz) und Klarheit (Dämpfung) [Ashby 2002, S. 72].

Haptik

Im Zusammenhang mit den emotionalen Qualitäten eines Materials wird oft das haptische Erleben herausgestellt. Auch wenn einem aktiven „Begreifen“ z.B. im Produkt-Design wesentlich höhere Bedeutung zugemessen wird, sollte nicht unterschätzt werden, dass auch in der Architektur viele Oberflächen - zumindest mittelbar - in ihren haptischen Eigenschaften erlebt werden.

Als gestalterisch relevant sind hier vor allem diejenigen Materialeigenschaften zu nennen, die durch taktile Wahrnehmungen (über die Hautoberfläche) erlebt werden können. Oberflächen in der Architektur erfordern dabei wegen ihrer eigenen Leblosigkeit ein „aktives Erforschen“ durch den Wahrnehmenden.

Als objektivierbare Kriterien, die zudem durch technische Eigenschaften hinterlegt sind, lassen sich so zumindest die Härte, das Wärmeableitungsvermögen und die Rauheit einer Oberfläche angeben.

Olfaktorik / Gustatorik / Vestibularsystem

Geruchs- und Geschmackssinn sind in der Architekturwahrnehmung eines Normalnutzers sicherlich nachrangig zu sehen. Zwar tauchen in manchen Materialbeschreibungen Begriffe wie „riecht künstlich/chemisch“ oder „materialspezifisch“ auf, ohne eine objektive oder bezifferbare Bewertungsmöglichkeit stehen solche Aussagen aber in keinem Zusammenhang und sind somit als vergleichendes Kriterium eher wertlos.

Auch der Gleichgewichtssinn lässt sich nicht allein durch die Materialität einer Oberfläche ansprechen. Er liefert daher ebenfalls kein im Sinne dieser Arbeit brauchbares Kriterium.

Materialart

Jenseits der oben beschriebenen Wahrnehmung über die Sinne gibt es nach Böhme zudem ein »*leibliches Spüren*«, ein »*atmosphärisches Erleben*« der »*ästhetischen Qualität*« eines Materials [Böhme 1994]. Dieser »*Charakter*« wird einem Material oft individuell (je nach Erfahrung) und in Abhängigkeit vom kulturellem Hintergrund oder auch wechselnder Moden zugeschrieben. Die Verwendung eines bestimmten Materials „an sich“ kann also schon einen eigenen Wert darstellen.

Die hier genannte Eigenschaft „Materialart“ ist also nur bedingt ein objektives Kriterium, für eine gestalterisch begründete Suche kann es aber dennoch wichtig sein. Problematisch in der Umsetzung wird allerdings das zunehmende Verschwimmen klarer Grenzen zwischen einzelnen Materialkategorien sein.

»Der Charakter eines Materials wird nach der Atmosphäre bezeichnet, die von ihm ausgeht, und diese kann beim gleichen Charakter von Qualitäten herrühren, die ganz verschiedenen Sinnesbereichen angehören. Deshalb spricht man von synästhetischen Charakteren.

Von synästhetischen Charakteren sind die gesellschaftlichen Charaktere der Materialien zu unterscheiden. [...] Wichtig ist, daß diese Charaktere kulturellem Wandel und sogar der Mode unterliegen.«

[Böhme 1994, S.84-85]

Zusammenfassung

Bei den oben genannten sinnlichen Kriterien ist es im Prinzip möglich, gestalterische Qualitäten von Materialien, die zur Unterstützung einer Entwurfsintention bewusst eingesetzt werden können, mit konkreten Werten zu beschreiben.

Selbstverständlich bedeutet eine solche Aufschlüsselung für den Nutzer, seine ansonsten vielleicht eher unscharfe und sehr subjektive Gesamtwahrnehmung eines Materials hinsichtlich dieser Einzelkriterien differenzieren zu müssen. Dabei erscheint es auf den ersten Blick nicht ganz einfach, seine Wünsche klar und eindeutig zu beschreiben, abzugrenzen oder gar zu beziffern. Wie eine Übertragung dieser Wünsche in konkrete Werte dennoch unterstützt werden kann, wird in Kapitel 6.2 beschrieben.

5.1.2

Technische Kriterien

Die technischen Anforderungen an eine Oberfläche, die ja auf gesetzlichen Grundlagen und Normungen beruhen, erscheinen auf den ersten Blick im Vergleich zu den sinnlichen Eigenschaften objektiver und vor allem eindeutiger anzuwenden. Für eine produktübergreifende Vergleichbarkeit stellt es allerdings ein großes Problem dar, dass viele Begriffe und Verfahren jeweils für nur eine Produktgruppe (z.B. „Reibechtheit“ bei Teppichen) oder unterschiedlich je nach Anwendung (z.B. Bestimmung des Brandverhaltens je nach Einbaulage des Bauteils) geregelt sind.

Es ist also für das Ziel einer übergreifenden Vergleichbarkeit notwendig, sehr umfangreiche und kleinteilige Kennwerte unterschiedlicher Produktgruppen unter sinnvollen, neutraleren Formulierungen hierarchisch zusammenzufassen, ohne dass dies allzu sehr auf Kosten von Genauigkeit oder Richtigkeit geht. In diesem Zusammenhang ergibt sich die Frage, ob Kriterien nutzerfreundlich - bezogen auf die reine Anwendbarkeit eines Produkts - formuliert werden können und sollen (z.B. „Stuhlrolleneignung“ bei Böden) oder ob vielmehr ein konkret hinterlegter Kennwert interessiert (z.B. „Brinell-Härte“ bei Holz). Die Lösung, wiederum beide Zugangsmöglichkeiten zu ermöglichen, wird auch hier dazu führen, dass das doppelt belegte Kriterium eventuell ein größeres relatives Gewicht bekommt. Ist dies dem Nutzer jedoch bewusst, kann er bei der Gewichtung entsprechend handeln.

Die technischen Eigenschaften können nach ihrer inhaltlichen Richtung in verschiedene Gruppen unterteilt werden. Vorgeschlagen werden die Kategorien „Konstruktion“ und „Bauphysik“, die beide eher bei der konstruktiv richtigen Erstellung eines Bauwerks eine Rolle spielen, sowie die beiden Gruppen „Nutzung“ und „Beständigkeit“, welche eher Aussagen zur späteren Gebrauchstauglichkeit bereithalten. Erstere erfordern und ermöglichen zumeist genaue Angaben spezifischer Kennwerte, bei letzteren interessiert dagegen eher, ob eine bestimmte Eigenschaft für die Anwendung erfüllt ist oder nicht.

Für jede Gruppe werden zur Verdeutlichung der gewählten Unterteilung beispielhaft einige Einzelkriterien genannt. Diese Auswahl ist selbstverständlich erweiterbar.

Konstruktion

Unter dieser Kategorie können vorwiegend physikalische und mechanische Eigenschaften aufgeführt werden, die eine ordnungsgemäße Erstellung eines Bauwerks ermöglichen.

Speziell für Fußbodenaufbauten, aber auch in anderen konstruktiven Zusammenhängen kann die (minimale) Aufbauhöhe des Produkts ein entscheidendes Kriterium sein. Darin eingeschlossen werden kann die übliche und notwendige Unterkonstruktion (z.B. Mörtelbett unter Fliesen), weitere nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit der Oberfläche stehende Schichten (z.B. Trittschalldämmung) hingegen nicht.

Für statische oder schalltechnische Belange kann das Flächengewicht oder bei nicht flächig verbauten Materialien auch die Rohdichte ein wichtiges Kriterium sein.

Andere konstruktive Eigenheiten wie z.B. Verlegeart (Platten, Bahnen, Fliesen) oder Verlegetechniken (Kleben, Mörtelbett) können zwar ebenfalls den Ausschlag für oder gegen einen bestimmten Fußboden geben, sie sind aber sehr speziell und nicht in dem Sinne zu bewerten, dass eines davon besser geeignet ist als ein anderes. Sie werden hier daher nicht weiter berücksichtigt.

Je nach Beanspruchungsart und -richtung von Bauteilen können weiterhin eine hohe Reißfestigkeit und ein großes Dehnungsvermögen relevant werden. Andere Eigenschaften wie Härte oder Druckfestigkeit dagegen sind eher für die eigentlichen Konstruktionsbaustoffe und weniger für die bekleidenden Schichten interessant.

Bauphysik

Für die bauphysikalisch korrekte Ausführung einer Konstruktion sind zusätzlich weitere Materialeigenschaften gefragt, die auch die Oberflächenmaterialien betreffen:

Für den Schutz gegen Durchfeuchtung interessiert entweder der Wasserdampfdiffusionswiderstand oder die Wasserundurchlässigkeit. Beide Werte beziehen sich dabei direkt auf die Schichtdicke des Produkts in der Anwendung.

Der Wärmedurchgang wird durch den Wärmedurchlasswiderstand (oder als Kehrwert der Wärmedurchlasskoeffizient) eines Produkts bestimmt und hängt ebenfalls von der Schichtdicke ab. Das manchmal aufgeführte Kriterium „Fußwärme“ eines Bodenbelags zur Beschreibung der damit verbundenen Behaglichkeit hängt von diesen Werten ab, es müssen allenfalls entsprechende Grenzwerte zur Einordnung definiert werden.

Oberflächen sind auch akustisch wirksam. Zur schalltechnischen Verbesserung eines Raums müssen Luftschall und Körperschall aufgrund ihrer unterschiedlichen Ausbreitungswege getrennt betrachtet werden. Die benötigten Werte sind Schallreflexionsgrad und Schalldämmmaß.

Hinsichtlich des Brandverhaltens lassen sich Materialien in verschiedene Brennbarkeitsklassen unterteilen. Eine Einteilung ganzer Bauteile in bestimmte Feuerwiderstandsklassen hingegen hängt sehr von der Einbausituation und der zu erfüllenden Funktion des Bauteils ab. Als rein materialspezifisches Kriterium im Rahmen dieser Aufstellung ist dies daher nicht geeignet.

Zur Einhaltung von Leuchtdichten und Blendfreiheit z.B. im Sinne der Arbeitsstättenverordnung kann vom Lichtplaner zudem ein bestimmter Reflexionsgrad von Oberflächen verlangt werden. Dieser rein technisch betrachtete Wert korreliert dabei direkt mit den gestalterischen Aspekten Farbe und Glanzverhalten.

Nutzung

Durch die Art einer späteren Raumnutzung werden weitere konkrete Anforderungen an Raumbooberflächen, insbesondere an Fußböden, gestellt. Für einen möglichen Einsatz eines Produkts ist dabei einzig relevant, ob es diese Kriterien erfüllt oder nicht. Üblicherweise werden daher für viele Produkte die Einsatzmöglichkeiten oder -bereiche einfach angegeben.

In normalen Funktionsbereichen kann bereits z.B. eine Eignung für Fußbodenheizung, Stuhlrollen oder Treppen erforderlich sein. Spezial-Funktionsbereiche (Küchen, Labore) können darüber hinaus aber auch bestimmte rutschhemmende, ableitfähige oder fungistatische bzw. bakterio-statische Oberflächen verlangen.

Die genannten Eigenschaften stehen inhaltlich unabhängig auf der gleichen Hierarchiestufe nebeneinander, sie erfordern auch keine weitere Untergliederung.

Beständigkeit

Eine Aussage zur Haltbarkeit einer Oberfläche wird für einzelne Bodenbelagsarten durch Klassifizierung bestimmter Beanspruchungsbereiche versucht. Die Untergliederung der Nutzungen in Wohnen, Gewerbe und Industrie sowie eine Angabe zu erwartender Beanspruchungen in einzelnen Bereichen erscheint dabei sinnfälliger [DIN 2005].

Ein anderer, parallel anwendbarer Weg ist, die Beständigkeit gegenüber einzelnen äußeren Einflüssen im Detail anzugeben. Nennen lassen sich hier z.B. Chemikalien, Flecken, Frost, Hitze, Licht, Mineralöl, Temperaturwechsel oder Zigarettenlut.

Zusammenfassung

Damit einzelne Materialien in der Architektur eingesetzt werden können, müssen sie - je nach Ort der Anwendung - vielfältigen technischen Kriterien genügen. Diese können durch gesetzliche Vorgaben, fachplanerische Erfordernisse oder auch durch die spätere Nutzung formuliert sein.

Eine Beschreibung der Produkteigenschaften kann dabei entweder über genaue Kennwerte oder aber über die Eingruppierung in typische oder zugelassene Anwendungsbereiche erfolgen. Anforderungen, die nicht exakt definiert sind (z.B. „Pflegeleichtigkeit“) oder sich nur auf einzelne Produktparten beziehen (z.B. „Glasureabrieb“ bei Fliesen), entziehen sich zunächst einer vergleichenden Wertung.

5.1.3

Ökonomische Kriterien

Einzelne Materialalternativen ökonomisch und ökologisch zu bewerten ist nicht einfach. Einerseits müssen zukünftige Entwicklungen, also sehr viele auf Schätzwerten oder Annahmen beruhende und daher nicht immer exakt zu beziffernde Einzelfaktoren in die Betrachtung einbezogen werden. Andererseits beziehen sich bekannte Verfahren und Programme zur Lebenszyklusanalyse üblicherweise auf ein komplettes Bauelement statt nur auf die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete letzte Oberflächenschicht. Eine Zuordnung zu einem einzelnen Material wird dadurch erschwert.

Für die Beurteilung von Stoffströmen und Umweltauswirkungen gibt es in verschiedenen Branchen unterschiedliche Ansätze. Die folgende grundsätzliche Aufstellung von ökonomischen und ökologischen Einzelkriterien, welche insgesamt Einfluss auf eine Gesamtbewertung haben, ist angelehnt an die Software LEGEP (Lebenszyklus Gebäude Planung), da diese speziell für Bauwerke eine Bewertung von Kosten und Umweltauswirkungen nach der Bauelementmethode erlaubt [LEGEP].

Erstellung

Die Kosten für die Erstellung eines Bauwerks können im Rahmen der Kostenplanung bereits bauelementbezogen ermittelt werden. Die hier nutzbaren Werte (z.B. [Sirados]) beruhen auf bereits abgerechneten Bauleistungen und müssen zur Aktualisierung laufend fortgeschrieben werden. Bei den benutzten Feinelementen werden zwar ermittelte Kosten für einzelne Schichten angesetzt, allerdings kann die Änderung einer Oberfläche auch Auswirkungen auf die Gesamtkonstruktion mit sich ziehen. Die Zuordnung der Kosten zum betrachteten Oberflächenmaterial ist also nicht ganz eindeutig.

Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass prinzipbedingt so nur Daten zu bekannten und üblicherweise eingesetzten Materialien erhältlich sind. Kosten zu innovativen Produkten können daher nur

individuell über Materialpreis und angebotene Verarbeitungskosten angesetzt werden.

Nutzung

Einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtkosten kann - da anfallende und sich wiederholende Posten über die gesamte Nutzungsdauer summiert werden - je nach Nutzungsdauer auch der Betrieb eines Bauwerks haben.

Von den Nutzungskosten im Hochbau sind zur Beurteilung von Materialien die Posten »Reinigung und Pflege«, »Inspektion und Wartung« sowie »Instandsetzung« ausschlaggebend [DIN 2007]. Gerade diese Werte unterliegen jedoch durch sehr variabel ansetzbare Durchführungs-Zyklen einer großen Schwankungsbreite. Die Datenbasis der Datenbank LEGEP beruft sich daher bei der Formulierung mehrerer Standardvarianten auf Erfahrungswerte von Pflege- und Wartungsfirmen, Empfehlungen von Herstellern oder auf Angaben im „Leitfaden nachhaltiges Bauen“ [BMVBS 2001].

Der manchmal in Produktdatenblättern verwendete Parameter „Beanspruchungsklasse“ erlaubt dem Planer zwar auch eine prinzipielle Einordnung hinsichtlich zu erwartender Folgekosten, die getrennte Betrachtung - wie oben beschrieben - erlaubt jedoch eine genauere Bewertung durch die Möglichkeit einer nutzungsspezifischen Anpassung der Einzelfaktoren.

Entsorgung

Am Ende der (technisch möglichen oder planerisch gewollten) Lebensdauer eines Oberflächenmaterials muss dieses entfernt und entsorgt werden.

Auch die dabei anfallenden Kosten sind noch in den Gesamtkosten eines Materials zu berücksichtigen. Sie können getrennt nach Rückbau (sofern nur das fragliche Bauteil entfernt wird) und den nachfolgenden Deponiemöglichkeiten erfasst und bewertet werden.

Zusammenfassung

Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks ist derzeit Gegenstand vieler Forschungstätigkeiten. Eine solche Betrachtung ermöglicht - im Vergleich zum alleinigen Blick auf die Materialpreise - die Suche nach der auch langfristig günstigsten Alternative.

Im Prinzip werden die genannten Kriterien für eine ökonomische Betrachtung von Materialalternativen relevant. Durch große Unterschiede in dem Umfang der verwendeten Daten, der Schwerpunktsetzung und der verwendeten Methoden fehlt es bisher allerdings noch oft an vergleichbaren Werten, insbesondere für neue Produkte.

5.1.4**Ökologische Kriterien**

»Der Grundsatz der Nachhaltigkeit bedeutet im Bauwesen, dass in allen Phasen des Lebenszyklus von Gebäuden - von der Planung und Herstellung über die Nutzung und Erneuerung bis zum Rückbau - eine Minimierung des Verbrauchs von Energie und Ressourcen [...] angestrebt wird.«

[Rudolphi 2005, S.22]

Sehr ähnlich der ökonomischen Bewertung - und auch inhaltlich mit dieser eng verbunden - kann ein Material hinsichtlich seiner ökologischen Auswirkungen beurteilt werden. Wiederum beruht eine Einschätzung auf einer Vielzahl von Einzelfaktoren, deren konkrete Werte vom Schwerpunkt und der gewählten Untersuchungsmethode abhängen.

Anders als bei der Kostenbetrachtung hat der Architekt allerdings üblicherweise weniger Fachkenntnis, einzelne Faktoren (z.B. Auswirkungen bestimmter Schadstoffe auf die Umwelt) qualitativ zu bewerten. Es bleiben ihm zudem nach der Erstellung eines Bauwerks kaum noch Möglichkeiten, einzelne Punkte gezielt zu beeinflussen. Sinnvoll sind für ihn daher eher Daten, die den gesamten Lebenszyklus eines Produkts in einer zusammenfassenden Form abbilden. Eine Aufschlüsselung der ökologischen Aspekte z.B. getrennt nach Stoffmasse, Primärenergieeinsatz, Treibhaus- und Versauerungspotential, wie sie in der Datenbank LEGEP vorgenommen wird, erscheint für die Zwecke dieser Arbeit bereits zu umfangreich. Üblicher in der Argumentation eines Architekten (wenn auch unschärfer) sind hingegen z.B. Angaben zur Recyclebarkeit oder auch zur Herkunft eines Materials. Diese Kriterien ermöglichen auch dem Laien zumindest eine grobe Bewertung verschiedener Alternativen.

5.1.5**Subjektive Kriterien**

»Die normative Entscheidungstheorie sucht nach Kriterien rationalen Entscheidens und will Hilfestellungen für die Frage geben, wie man in einer gegebenen Situation vernünftigerweise entscheiden soll. Dazu muss sie einige vereinfachende Modellannahmen treffen, so muss sie beispielsweise vom Axiom der Rationalität des Entscheiders ausgehen.«

[Wikipedia 2006d]

Alle bisher aufgeführten Kriterien ermöglichen es im Prinzip, ein Material „objektiv“ zu beschreiben. Es wurde somit ein umfassender, hierarchisch strukturierter Kriterienkatalog (siehe Kapitel 5.2) zusammengetragen, der es - durch Nutzung eines Werkzeugs zur Materialbewertung - innerhalb eines integrierten Gesamtprozesses (vgl. Kapitel 3.4.2) ermöglichen soll, das für die jeweilige Entwurfsintention am besten geeignete Material herausfinden zu können.

Dieser Gedanke setzt selbstverständlich voraus, dass der individuelle Nutzer rational vorgeht. Er sollte also nicht nur seine Wünsche und Anforderungen der Situation entsprechend vernünftig formulieren, sondern sich auch unvoreingenommen den (Zwischen-) Ergebnissen der Suche öffnen und diese als denkbare Alternative akzeptieren.

Es ist jedoch bekannt, dass über ein solches rationales Vorgehen hinaus immer auch zahlreiche irrationale oder zumindest sehr subjektive Kriterien die Entscheidung für ein bestimmtes Material beeinflussen: Der Planer kann z.B. bereits für ein bestimmtes Material voreingenommen sein, weil er es in einer Fachveröffentlichung gesehen hat, weil ein berühmter Kollege dies irgendwo gewinnbringend eingesetzt hat oder weil er schlichtweg Lust hat, einmal etwas mit diesem speziellen Baustoff ausprobieren zu wollen. Er kann

auch bereits gute Erfahrungen mit einem Material gemacht haben, sich auf eine bestimmte Architektursprache spezialisiert haben oder einfach nur freundschaftliche bzw. enge geschäftliche Kontakte zu Herstellern, Baustoffhändlern oder verarbeitenden Firmen pflegen. Es kann also durchaus sein, dass selbst ein „objektiv“ besser geeignetes Material am Ende doch nicht gefragt ist.

Rein mathematisch ließen sich auch die subjektiven Kriterien relativ einfach z.B. durch individuelle Bewertungszahlen abbilden. Dadurch wäre es durchaus denkbar, jene auch neben den „objektiven“ Eigenschaften in die vorgeschlagene Bewertungsstrategie mit einzu beziehen. Allerdings würde dies voraussetzen, dass jeder Nutzer zunächst - mit entsprechendem Aufwand - alle Materialien auf Basis seiner individuellen Ausgangslage mit eigenen Bewertungszahlen indizieren müsste, um anschließend zu einem für ihn aussagekräftigen Ergebnis zu kommen. Im Rahmen dieser Arbeit werden solche subjektiven Beweggründe, die sich einer allgemeingültigen und automatisierbaren Betrachtung entziehen, daher nicht weiter berücksichtigt.

5.2

Hierarchische Struktur

»A hierarchy [...] is a more or less faithful model of a real-life situation. «
[Saaty 1990, S.17]

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz, Materialien detailliert auf Basis sehr vieler Einzelkriterien zu charakterisieren, mag für den oft zu generalistischen Betrachtungen neigenden Architekten vielleicht ungewohnt sein. Stattdessen muss er die eigenen Wünsche und Anforderung nach klar abgegrenzten Eigenschaften abfragen, also sehr analytisch vorgehen.

Diese Arbeit kann allerdings etwas erleichtert werden, indem die einzelnen Bewertungskriterien einmal in ihrer Beziehung zueinander im Rahmen einer Gesamtübersicht dargestellt werden. Wie bereits angemerkt, bewegen sich die vielen einzeln zu betrachtenden Kriterien unter fachlich begründeten Gesichtspunkten nicht alle auf der gleichen hierarchischen Ebene. Die inhaltlichen Zusammenhänge, die dem vorgeschlagenen Bewertungsmodell - auch auf verschiedenen Betrachtungsebenen - innewohnen, lassen sich somit gut in einer Baumstruktur abbilden:

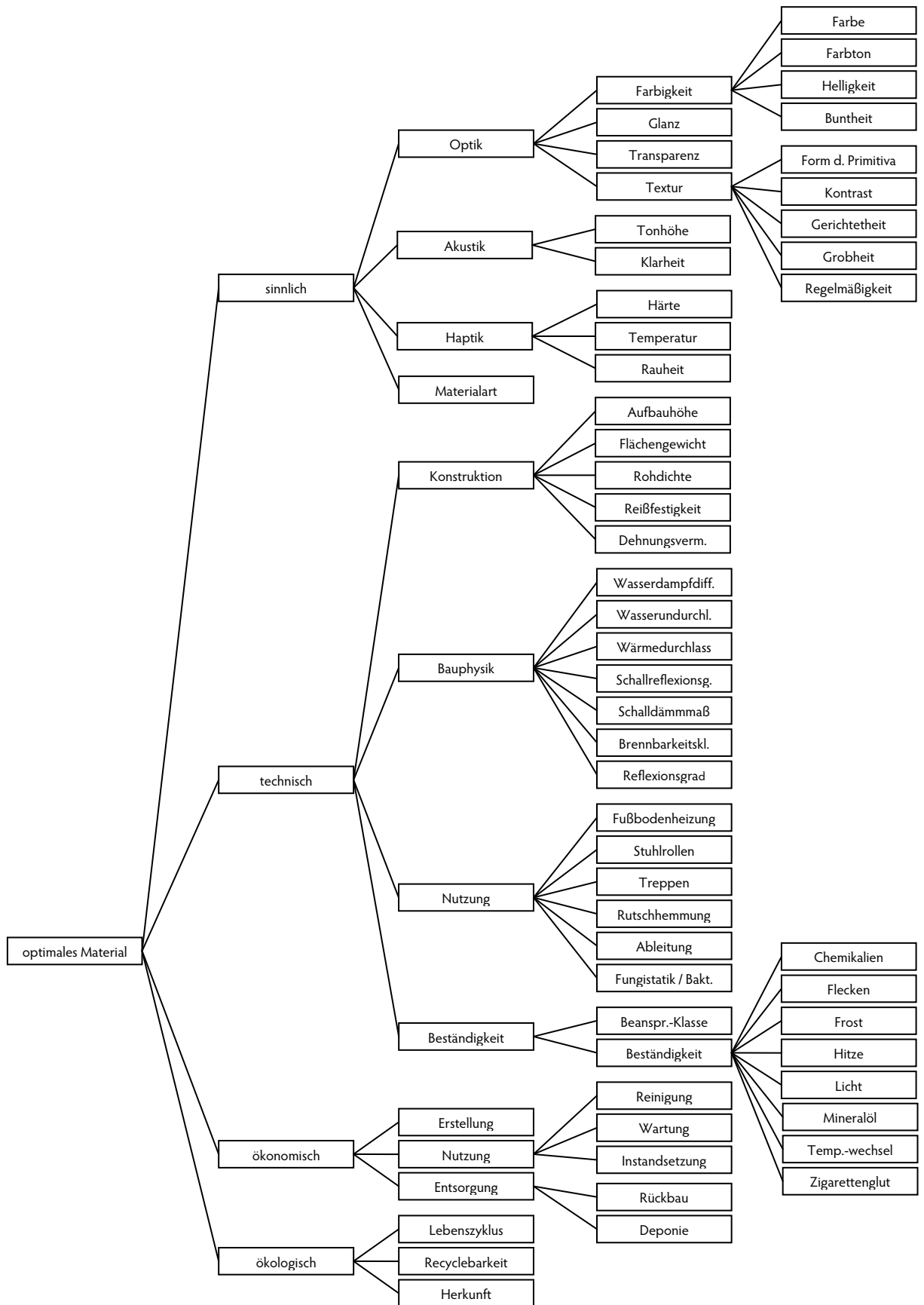


Abb. 5.1: Kriterienbaum

Neben dem schnellen Überblick, welche Parameter mit welchen anderen wie in Beziehung stehen, erleichtert eine solche Struktur im Weiteren die leichtere und dennoch genauere individuelle Gewichtung der Einzelkriterien (siehe Kapitel 6.3), da im direkten Vergleich innerhalb eines Knotens immer nur wenige Eigenschaften parallel betrachtet werden müssen. Das Ergebnis der eigenen Einschätzung kann somit genauer ausfallen. Werden Eigenschaften, die in mehrere Kategorien einfließen, in all diesen als wichtig erachtet, erhöht sich deren relative Wichtigkeit entsprechend (siehe Kapitel 6.5). Die Hierarchisierung erlaubt zudem, zusammengehörende Gruppen von Eigenschaften (z.B. alle gestalterischen Aspekte) gegenüber anderen durch einen einzigen Vorgang anders zu gewichten, was insbesondere im Rahmen der dynamischen Untersuchung des Ergebnisses (siehe Kapitel 7.3) einen großen Vorteil darstellt.

5.3

Definition des ausschlaggebenden Kriteriums

»The key to the application of multi-objective optimization to architectural scenarios is the simple fact that, in most situations, we know what the object needs to do, we generally know what the geometry needs to be but we do not yet know which material best satisfies the set of requirements. In these cases, multi-objective optimization becomes a powerful way to select materials.«

[Fernandez 2006, S. 270]

Bisher ist durch die oben aufgeführten Kriterien nur gezeigt worden, welche Inhalte (es gibt selbstverständlich je nach Anwendungsfall noch weitere) die Entscheidungsfindung des Architekten irgendwie beeinflussen können und wie diese strukturell zusammenhängen.

Wie aber können die einzelnen Eigenschaften in die planerische Bewertung und Entscheidung konkret Eingang finden? Wie können so unterschiedliche Punkte wie gestalterische, technische, ökonomische und ökologische Kriterien gegeneinander aufgerechnet werden? Was wird letztlich den endgültigen Ausschlag geben für die Wahl eines bestimmten Materials?

„Der Planer wird sich für das Material entscheiden, welches möglichst genau dem entspricht, was er sucht.“

Dieser zunächst fast banal erscheinende Satz beschreibt - gerade in seiner Verkürzung und Verdichtung - sehr gut, wie der Architekt sich auf ein bestimmtes Material festlegt:

Die übliche Vorgehensweise des Architekten

Zunächst einmal wird der Planer definieren müssen, was er zur Lösung seines „Entwurfsproblems“ eigentlich sucht. Das bedeutet, er wird irgendwie - unter Berücksichtigung seiner Wünsche, Erfahrungen und externen Anforderungen - für sich ein „virtuelles“ Idealmaterial mit für diesen Einsatzzweck optimalen Eigenschaften formulieren.

» [...] each bubble represents a step in the design process [...] It is important to get into the initial bubble - to confront the problem.«

[Ashby 2002, S.35]

Da aber nicht unbedingt davon ausgegangen werden kann, dass er ein Material findet, welches exakt alle die von ihm gesuchten Eigenschaften aufweist, wird er anschließend sinnvollerweise dasjenige Produkt auswählen, welches ihm in einer zusammenfassenden Gesamtsicht optimal erscheint. Er wird also das Material wählen, welches - unter Berücksichtigung der von ihm als mehr oder weniger wichtig erachteten Punkte - dem ursprünglich formulierten Idealmaterial am nächsten kommt, diesem also in der Summe am ähnlichsten ist.

Minimierung der Unähnlichkeit

Mathematisch ausgedrückt wird er sich in seiner Auswahlstrategie also das Ziel setzen, diese Gesamtähnlichkeit des gewählten Materials zu seinem Idealmaterial zu maximieren. Andersherum formuliert (und im Weiteren aus mathematischen Gründen auch nur noch so verwendet) ist sein Ziel, die Unähnlichkeit zum gesuchten Material zu minimieren.

Um alle Materialien in eine Rangfolge bringen zu können, muss er zur Bewertung also nicht mehr im Detail den gesamten Hierarchiebaum, sondern nur noch einen einzigen daraus abgeleiteten Wert „Unähnlichkeit“ heranziehen.

Dabei kann es vorkommen, dass mehrere durchaus unterschiedliche Materialien im Verhältnis zum „virtuellen“ Material dennoch als gleich unähnlich berechnet werden: Ein Material, was in einem bestimmten Kriterium vielleicht weniger geeignet ist, kann ja in den anderen umso besser passen und so rechnerisch einen Ausgleich schaffen. Inhaltlich bedeutet dies, dass in der Gesamtsicht gleich bewertete Materialien letztlich auch gleich gut geeignet sind, auch wenn sie vielleicht andere Eigenschaften aufweisen.

Dies kann dann dazu führen, dass der Planer noch einmal seine Suche überdenkt, also z.B. die Gewichtung der einzelnen Kriterien nachjustiert. Oder aber er wählt - vielleicht aus subjektiven und nicht abgebildeten Gründen - einfach eines der gleich bewerteten Materialien aus, im Wissen, dass dieses genauso gut geeignet ist wie die anderen.

Zusammenfassung

Das Ziel des Planers ist letztlich die Minimierung der Gesamtunähnlichkeit eines Materials zu einem von ihm gesuchten und beschriebenen Idealmaterial. Bei der Berechnung dieses einen Werts „Unähnlichkeit“ müssen selbstverständlich alle berücksichtigten Einzelkriterien mit ihrer individuellen Gewichtung abgebildet sein. Außerdem muss die Möglichkeit bestehen, einzelne Aspekte als absolut wirkende KO-Kriterien (vgl. Kapitel 4.2.1) festlegen zu können. Auf Grundlage dieses einen Wertes sollen mögliche Materialien beurteilt werden.

Eine Möglichkeit, wie dieses Ziel - speziell im Hinblick auf die in diesem Kapitel vorgeschlagenen Kriterien - mathematisch umgesetzt werden kann, wird im nun folgenden dritten Hauptteil der Arbeit beschrieben.

III Das Verfahren

6

Ranking aller Materialien

»Eine Rangordnung (auch Rangfolge, Rangliste, Ranking) ist das Ergebnis einer Sortierung von mehreren vergleichbaren Objekten, die mit einer vergleichenden Bewertung einhergeht. Rangordnungen ermöglichen es beispielsweise, komplexe Informationsangebote nach bestimmten Kriterien zu bewerten und eine Auswahl zu treffen.«

[Wikipedia 2007j]

»Modelle sind durch einen Abstraktionsprozeß gewonnene Abbildungen komplexer Systeme.«

[Weber 1993, S. 6]

Der dritte Hauptteil der Arbeit beschreibt ein mögliches mathematisches Modell, in welchem die Gesamtheit der Materialwahl abgebildet wird. Durch die Nutzung des Modells kann die oben beschriebene Kenngröße „Unähnlichkeit zum gesuchten Material“ berechnet werden. Anschließend können Materialien auf dieser Grundlage in eine Rangfolge gebracht werden.

Wenn als Ergebnis eine stabile Reihenfolge erstellt werden kann, lässt sich eine optimale Materialwahl treffen.

Damit die Unähnlichkeiten nach dem obigen Modell berechnet werden können, müssen allerdings einige Voraussetzungen erfüllt sein:

Systemseitig müssen die Materialeigenschaften in „objektiven“ Zahlwerten vorliegen oder in solche Werte umgewandelt werden können (Kapitel 6.1).

Nutzerseitig muss ebenfalls in Zahlwerten definiert werden können, was genau gesucht wird, und zwar hinsichtlich des Zielwerts im jeweiligen Kriterium (Kapitel 6.2) als auch bezogen auf die Kriterien-gewichtung (Kapitel 6.3).

Sind die ersten beiden Voraussetzungen erfüllt, lässt sich bereits die Unähnlichkeit zunächst für jedes Einzelkriterium berechnen (Kapitel 6.4). Unter Berücksichtigung der individuellen Gewichtung können diese anschließend in einem einzigen Gesamtwert zusammengefasst werden (Kapitel 6.5). Dieser wird zur Erstellung der Rangfolge herangezogen.

Das beschriebene Vorgehen wird abschließend hinsichtlich der Methode und der zu erwartenden Ergebnisse diskutiert (Kapitel 6.6).

6.1

Daten vorliegender Materialeigenschaften

»In weit aufgefaßtem Sinne bezeichnen Daten Gruppen nicht zufälliger Symbole, die Vorgänge oder Zustände darstellen.«

[Weber 1993, S.8]

Diejenigen Einzelkriterien, die überhaupt Einfluss nehmen auf die Entscheidung für ein bestimmtes Material, wurden bisher nur mit Worten benannt (vgl. Kapitel 5.1). Um diese aber auch hinsichtlich ihrer Auswirkung zahlenmäßig bewerten zu können, müssen sich die

möglichen Ausprägungen dieser Kriterien auch anhand konkreter Daten beziffern lassen.

Für jedes Kriterium muss dabei individuell festgelegt werden, in welcher Form dieses in entsprechenden Daten dargestellt werden soll.

6.1.1

Das Spektrum möglicher Daten

In Realität wahrgenommene (Material-) Eigenschaften lassen sich durch abstraktere Daten abbilden. Je nach inhaltlicher Ausprägung des jeweiligen Kriteriums können dabei verschiedene Arten von Daten zur Anwendung kommen, die dadurch unterschiedlich detailierte Aussagen in der Bewertung erlauben und bei der nachfolgenden Berechnung der Unähnlichkeit auch unterschiedlich behandelt werden müssen:

Unterscheidung zwischen qualitativen und quantitativen Daten

Qualitative Daten erlauben allein Aussagen über die Art, nicht jedoch über die genaue Höhe der Ausprägung eines Kriteriums. Sie beruhen auf nichtmetrischen Skalen. Demgegenüber sind für eine genaue Bezifferung der Ausprägung eines Attributs quantitative Daten und metrische Skalen notwendig.

Je nach Niveau, das letztlich abgebildet werden kann, können bei Daten folgende Messskalen zur Anwendung kommen [Basalaj 2001]:

Nominale / Binäre Daten

Nominalskalen bieten die schwächste Form einer qualitativen Aussage über Attribute, da hier nur festgelegt werden kann, ob ein Element zu einer bestimmten vorher definierten - und eindeutig von anderen abgegrenzten - Kategorie gehört oder eben nicht. Eine darüber hinausgehende Bewertungsmöglichkeit oder eine Vergleichbarkeit ist nicht gegeben.

Das Kriterium Materialart beruht z.B. auf einer nominalen Datenstruktur: Es lassen sich mehrere Materialkategorien definieren (Holz, Glas, Metall, Stein etc.), in welche dann die vorliegenden Materialien im Prinzip eingeteilt werden können (Hybride Produkte aus mehreren Grundmaterialien können gleichzeitig auch mehreren Kategorien angehören).

Binäre Skalen als Sonderform der Nominalskalen reduzieren die Anzahl möglicher Kategorien auf nur zwei.

Ein Beispiel hierfür ist die Stuhlrolleneignung eines Fußbodens: Entweder das Material ist für die geforderte Anwendung geeignet oder eben nicht.

Ordinale Daten

Eine bereits weitergehende qualitative Bewertung erlaubt die Verwendung von Ordinalskalen, die eine (nicht zwangsläufig linear

abgestufte) Rangfolge von Attributen abbilden und somit auch vergleichende Aussagen ermöglichen. Solche Skalen sind sinnvoll anwendbar bei Eigenschaften, die sich in eindeutig unterscheidbare, aber ungleichwertige Klassen untergliedern lassen. Auch wenn keine exakten Kennwerte vorliegen, können diese Klassen ausreichen, um z.B. Mindestanforderungen zu formulieren und überprüfen zu lassen.

Ein Beispiel einer solchen Skala ist die Unterteilung von Materialien in Brennbarkeitsklassen aufgrund genormter Prüfverfahren: Die genauen Ergebnisse der Prüfungen sind für die Frage eines Einsatzes letztlich für den Anwender nicht weiter relevant, so lange die mindestens geforderte Brennbarkeitsklasse eingehalten wird. Es können also z.B. auch nichtbrennbare Materialien verbaut werden, wenn mindestens Schwerentflammbarkeit gefordert ist.

Quantitative Daten

Eine exakte Bezifferung vorliegender Eigenschaften und die entsprechende Berechnung der Unähnlichkeit zwischen zwei Elementen sind erst innerhalb quantitativer Skalen möglich. Verwendet werden können dabei Intervallskalen, die nur exakte Abstände oder Relationen zwischen zwei Werten messen, oder aber Ratioskalen, die auch absolute Werte bezogen auf einen definierten Nullpunkt liefern.

Viele Materialeigenschaften lassen sich in solchen quantitativen Daten angeben, wobei es keinen Unterschied macht, ob der Wertebereich insgesamt begrenzt ist (z.B. Transparenz von 0-100%) oder ob er unbegrenzt ist (z.B. Kosten prinzipiell nach oben offen).

Heterogene Daten

Bestehen Eigenschaften aus mehreren voneinander unabhängigen Einzelkomponenten, muss man mit heterogenen Daten arbeiten. Die Abbildung solcher Eigenschaften in heterogenen Daten bedarf dabei immer einer individuellen und fachlich begründeten Betrachtung des Einzelfalls.

Das zu berechnende Gesamtkriterium „Unähnlichkeit“ z.B. ist letztlich ein heterogener Wert und ergibt sich aus ganz vielen Einzelkriterien, die - zudem noch unterschiedlich stark je nach vorher festgelegter Relevanz - in den eigentlichen Wert einfließen. Aber auch das Einzelkriterium „Farbe eines Materials“ muss schon als ein solch heterogener Wert betrachtet werden, da sich Farben nur in einem aus drei Dimensionen bestehenden Farbraum (z.B. RGB oder HSV) verorten lassen, also drei voneinander unabhängige Komponenten aufweisen. Zudem kommt in der Wahrnehmung noch erschwerend hinzu, dass Materialoberflächen in den seltensten Fällen einen einheitlichen Farbwert aufweisen. Diese Oberfläche kann nicht einmal nur in einem einzigen Wert „Farbe“ erfasst werden, sondern setzt sich aus mehreren Einzelfarbwerten zusammen.

Fazit

Konkrete Materialeigenschaften müssen, um sie in eine Berechnung einbeziehen zu können, in Daten dargestellt werden. Je nach Kriterium können dabei unterschiedliche Datenarten zum Tragen kommen. Allerdings zeigen insbesondere die Beispiele „Brennbarkeitsklasse“ und „Farbe“ deutlich, dass die Daten, die der weiteren Berechnung zugrunde gelegt werden sollen, nicht objektive Natur eines Materials sind, sondern immer nur eine sinnvolle, fachlich begründete Abbildung dieser materialimmanenten Natur darstellen können.

Zur Erlangung nutzbarer Daten muss also zum einen geklärt werden, auf welchem Weg diese erzeugt werden können, zum anderen muss definiert werden, in welcher Skala die Materialeigenschaften abgebildet werden sollen.

6.1.2

Mögliche Wege der Datenerzeugung

Für den Planer ist es - im Rahmen des vorgestellten Gesamtprozesses (vgl. Kapitel 3.4) bzw. als Nutzer des dort vorgeschlagenen Werkzeugs - für die Entscheidungsfindung allein wichtig, welche Eigenschaften ein Produkt aufweist. Es ist dagegen nicht mehr relevant, durch welches Prüfungsverfahren oder nach welcher Norm bestimmte Werte ermittelt werden. Unter „Datenerzeugung“ soll daher an dieser Stelle nur die Umwandlung bereits bekannter und in irgendeiner Form vorliegender Materialkennwerte verstanden werden, nicht aber deren ursprüngliche Messung.

Zudem ist das erklärte Ziel dieser Arbeit, vor allem die Möglichkeiten der digitalen Materialauswahlwerkzeuge zu verbessern (vgl. Kapitel 1.3.1). Grundlage für die Materialbewertungen und -entscheidungen können und sollen daher zunächst nur die Informationen sein, die auch heute schon prinzipiell auf Webseiten der Hersteller zur Verfügung stehen.

Zur Nutzung dieser Informationen als Daten zu vergleichenden Bewertungskriterien stehen dann mehrere Wege offen:

Direkte Übernahme bereits vorhandener Daten

Am einfachsten ist es, wenn Materialeigenschaften bereits in der gleichen Form existieren, wie sie später benötigt werden - und zwar hinsichtlich der Skala als auch der Metrik. Dieses trifft vor allem auf die technischen Kriterien zu (vgl. Kapitel 5.1.2), die vom Hersteller in Produktdatenblättern veröffentlicht werden.

Die einzige Hürde bildet bei solchen Kennwerten eigentlich nur noch das automatische Auslesen der Daten, da diese zumeist nur als uneinheitlich strukturierter Fließtext im pdf-Format oder als reiner html-Text publiziert werden. Eine Bereitstellung der vorhandenen Werte in XML (Extensible Markup Language) dagegen würde er-

Parameter	Norm	Einheit	Wert
Art der Herstellung	ISO 2424		Nadelvlies
Musterung / Gestaltung			mehlen
Oberflächengestaltung	ISO 2424		großtaugend
Abmessungen		cm	200 Bahnen
Art der Verfestigung			vollimprägniert
Rückenausrüstung	ISO 2424		PES / Spunbond
Faserzusammensetzung der Nutzschrift		%	100 PA
Gesamtdicke	ISO 1785	mm	6,5
Dicke der Nutzschrift	ISO 1785	mm	3,5
Flächengewicht	ISO 8543	g/m²	1350
Faserensatzgewicht der Nutzschrift	Herstellerang.	g/m²	750
Flächengewicht der Nutzschrift	EN 984	g/m²	860
Aufblähgeschwindigkeit	ISO 8335	hV	< 2,0
Durchgangswiderstand	ISO 10965	Ohm	≤ 1 x 10 ²
Oberflächenwiderstand	ISO 10965	Ohm	-
Benutzbereich	EN 1470	Klasse	Objektbereich 33 - stark
Zusatz-Einstufung	RAL	Klasse	extrem robust
Kontaktklasse	EN 1470	Klasse	LC 1
Trittschallverbesserungswert	ISO 140-8	dB	22
Schallabsorption α _w	ISO 354	in einem halbkugelförmigen Feld	0,20
Wärmedurchlasswiderstand	ISO 8302	in K/W	0,12
Brandverhalten	EN 13501-1	Klasse	B ₁ , s1*

Abb. 6.1: Produktdatenblatt

lauben, diese zusätzlich mit frei deklarierbaren XML-Tags auszuzeichnen, so dass die Daten durch entsprechende Software automatisch interpretiert werden könnten [W3C 2002]. Die notwendige Technik hierzu soll an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden, könnte aber auch bei den folgenden Erzeugungswegen entsprechend zur Anwendung kommen.

Umwandlung bereits vorhandener Daten in Klassen

Einige Kennwerte können anstelle einer exakten quantitativen Einteilung besser in ordinalen Skalen erfasst werden. Dies bedeutet zwar einen gewissen Verlust an Detailinformation über das jeweilige Kriterium, ermöglicht aber andererseits vielleicht überhaupt erst einen sinnvollen Zugang zu bestimmten Daten. Die detaillierteren Daten können zusätzlich für eine spätere tiefer gehende Information mitgeführt werden.

Vorliegende exakte Daten können dabei durch ihre Relation zu festgelegten Wertegrenzen bestimmten Klassen zugeordnet werden. Diese Grenzen sollten in ihrer Definition selbstverständlich typische Wertebereiche oder signifikante Verteilungen abbilden. Eine solche Umwandlung quantitativer Daten in Ordinalskalen kann vor allem dann hilfreich sein, wenn vorhandene Methoden zur Messung von Werten uneinheitlich, ungenau, oder unverhältnismäßig aufwendig sind oder aber eine exakte Angabe keinen deutlichen Mehrwert darstellt.

Manche Materialeigenschaften lassen sich nur materialspezifisch messen und sind somit nicht direkt mit entsprechenden Werten anderer Materialkategorien vergleichbar:

Der Transparenzgrad von Glas z.B. lässt sich exakt eigentlich nur in einer Funktion in Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel beschreiben (Fresnel-Effekt). Die Zuordnung eines einzigen Werts „Transparenz“ bedeutet daher zunächst einen Verlust an Detailinformation. Allerdings erlauben aber auch Drahtgewebe und Lochbleche eine gewisse Durchsicht, die jedoch vielleicht eher über den prozentualen Lochanteil beschrieben wird. Eine Vergleichbarkeit des Transparenzgrads auch über Materialgruppen hinweg kann dann dennoch ermöglicht werden, wenn diese unterschiedlichen Werte in Klassen abgebildet werden. In diesem Fall könnte z.B. eine relativ grobe Klassifizierung (z.B. Transparenz in drei Klassen 0%, 0-50%, 50-100%) zum Tragen kommen, auch wenn dies zu Lasten genauerer Werte (z.B. für einen Detailvergleich verschiedener Glasarten) geht.

Manchmal können genaue Werte den Nutzer sogar hinsichtlich seiner eigenen Bewertungsmöglichkeit überfordern:

Verbreitet ist z.B. die Unterteilung des Glanzverhaltens eines Materials in „matt“, „seidenmatt“ und „glänzend“. Eine nur nach aufwendiger Messung mögliche exakte Angabe von z.B. 57% Glanz wäre hingegen ein Wert, der - trotz seiner scheinbaren Detailgenauigkeit - für den Nutzer keine einfach zu interpretierende Aussage darstellt, da er diese Zahl in keinen ihm bekannten Zusammenhang

stellen kann. Liegt der genaue Wert von 57% aus Messungen für andere Zwecke allerdings bereits vor, kann dieser für die Klassifikation des Materials in „seidenmatt“ verwendet werden und so dem Nutzer eine hinreichende und ihm verständliche Einschätzung des Materialverhaltens ermöglichen.

Ableitung von Daten aus Pixelbildern

Üblicherweise versuchen Materialhersteller, mittels Fotos auch einen optischen Eindruck ihrer Produkte zu vermitteln. Dieses kann perspektivisch verzerrt im Raumzusammenhang erfolgen (vgl. Kapitel 3.1.5) oder aber durch orthogonale Bilder eines repräsentativen Ausschnitts der Materialoberfläche. Letzteres wurde bereits in Hinblick auf eine mögliche Verwendung als Textur in Visualisierungen favorisiert.

Unverzerrte und gleichmäßig ausgeleuchtete, also neutrale Fotos von Materialien können aber auch eine Quelle für die Erzeugung von Daten zu Farbe und Textur der Oberfläche darstellen. Das zahlenmäßige Auswerten der Pixelbilder stellt dabei nicht nur diese Daten überhaupt erst für die Berechnung zur Verfügung, sondern kann in der weiteren Datenhaltung eine enorme Reduktion im Vergleich zur Arbeit mit den originalen Bilddaten bedeuten:

Die in einem Bild zunächst sehr komplexen Informationen über die Farbigkeit eines Material lassen sich z.B. stark reduzieren, da das menschliche visuelle System in einer ersten Betrachtung nicht die feinen Details, sondern als Mittelwerte nur wenige dominante Farben wahrnimmt [Mojsilović 2000 a]. Farben, die weniger als 5% der Fläche eines Bildes ausmachen, werden sogar überhaupt nicht mehr separat wahrgenommen. Daher kann die Bildinformation für die Zwecke eines Farbvergleichs ohne großen Informationsverlust durch maximal 20 Farbwerte anstelle eines hochaufgelösten Bilds codiert werden. Eine Berücksichtigung nur dieser dominanten Farben liefert bereits bei der Suche nach ähnlichen Bildern in Bilddatenbanken gute Ergebnisse, insbesondere wenn dieses Vorgehen jeweils auf einzelne Bildsegmente angewendet wird [Mojsilović 2000 b]. Für die Beschreibung der Farbe einer Materialoberfläche reicht es dagegen, das Bild als Ganzes zu analysieren, so dass man sogar mit einer noch deutlich kleineren Anzahl von extrahierten Farbwerten auskommen kann (siehe Anhang B.1).

Auch die Textur eines Materials kann prinzipiell durch bildanalytische Verfahren automatisch beschrieben werden. Allerdings gibt es weder einheitliche Begriffe noch eindeutig abgrenzbare Grenzwerte zur Beschreibung einer Textur. Durch entsprechende Analysemethoden können aber statistische Werte zu einigen die Textur beschreibenden Eigenschaften ermittelt werden (vgl. Kapitel 5.1.1). Da verschiedene Texturen eine signifikante Verteilung in diesen Werten aufweisen, ermöglichen sie eine Einordnung in voneinander abgegrenzte Klassen [Miene 1997]. Je größer diese Klassifizierung vorgenommen wird, desto eindeutiger lässt sich eine Textur einer bestimmten Klasse zuordnen.

Das Aussehen einer Materialoberfläche ist maßstabsabhängig: Unregelmäßigkeiten in Farbe und Textur verschwimmen z.B. ab einem gewissen Betrachtungsabstand zu einem Durchschnittswert bzw. es erfolgt ein Wechsel in der Wahrnehmung zwischen Mikro- und Makrotextur, also z.B. von einer marmorierten Fliese zum Fugenbild. Um auf Basis von Pixelbildern eine Vergleichbarkeit der Daten untereinander zu gewährleisten, müssen die Bilder daher immer einen jeweils gleich großen Ausschnitt aus der Materialoberfläche darstellen. Zudem sollte natürlich ein repräsentativer Bereich abgebildet sein, der die charakteristischen Eigenschaften eines Materials (so wie es in normalem Einbauzustand durch einen Betrachter wahrgenommen wird) umfasst.

Für in der Architektur eingesetzte Produkte erscheint z.B. eine abgebildete Fläche von einem Quadratmeter ausreichend: Dieser würde in den meisten Fällen bereits zahlreiche Merkmale und Eigenheiten natürlicher Oberflächen sowie die Art der Verlegung bzw. das Fugenbild handelsüblicher Element-Formate erfassen.

Die Qualität der erzeugten Daten hängt verständlicherweise direkt von der Qualität der Fotos ab. Eine zu geringe Auflösung, technisch bedingte Farbabweichungen oder eine schlechte Ausleuchtung lassen sich nicht kompensieren, ohne das Ergebnis in seiner Aussage zu verfälschen. Bei der Ermittlung einiger Texturparameter können zwar noch - je nach verwendetem Algorithmus notwendige - Bildmanipulationen wie z.B. eine Kontrasterhöhung angewendet werden, ohne das Ergebnis negativ zu beeinflussen [Miene 1997, S.15]. Für die Extraktion der Farbwerte dagegen darf das Originalbild - bis auf die oben beschriebene Reduktion der Farbanzahl auf die dominanten Werte - in seinen Tonwerten nicht grundlegend verändert werden.

Diese Problematik ist aber nicht der hier beschriebenen automatischen Datenerzeugung zuzuschreiben. Auch die bisher übliche Vorgehensweise - nämlich der rein visuelle Vergleich verschiedener Oberflächen nur anhand der Pixelbilder - beruht allein auf den vom Hersteller veröffentlichten digitalen Daten.

Rückgriff auf zusätzliche Informationsquellen

Eine weitere Quelle für Daten kann durch die Verbindung mit externen Anbietern von Informationen erschlossen werden. Gerade zu ökonomischen und ökologischen Eigenschaften von Materialien gibt es zahlreiche unabhängige und auf diese Kriterien spezialisierte Datenbanken, die produktübergreifend Informationen über Materialien und Bauweisen vorhalten.

Rudimentär vorliegende Herstellerdaten wie z.B. die Angabe der Holzart eines Parketts können so mit zusätzlichen Daten wie üblichen Kosten für Erstellung, Nutzung und Entsorgung oder auch Lebenszyklusbetrachtungen erweitert werden.

Auch wenn diese Kennwerte bei unterschiedlichen Produkten gleicher Materialart dann natürlich identisch sind, erlaubt diese Vorgehensweise zumindest das Einbeziehen dieser Kriterien in die Gesamtbewertung prinzipiell möglicher Materialalternativen. Liegen

für einzelne Materialien individuelle und produktspezifische Angaben vor, können diese auf diese Weise mit den angesetzten Durchschnittswerten der jeweiligen Materialkategorie in Beziehung gesetzt werden.

Nicht ermittelbare Daten

Insbesondere bei der ja intendierten Berücksichtigung innovativer, vielleicht noch gar nicht für das Bauwesen zugelassenen Materialien, aber teilweise auch bei bereits bekannten Produkten, ist davon auszugehen, dass nicht alle zur Bewertung notwendigen Daten vorliegen oder aus anderen Quellen abgeleitet werden können. Eine manuelle und individuelle Dateneingabe ist in einem solchen Fall auszuschließen, da aufgrund der großen Zahl der Materialien der hier verfolgte Weg die automatische Datenerzeugung aus vorliegenden Informationen ist. Das Fehlen von Daten muss dann letztlich akzeptiert werden.

Für die Gesamtbewertung eines Materials muss allerdings festgelegt werden können, wie mit dem Umstand fehlender Daten umgegangen werden soll. Zwischen den Extrempositionen „Ignorieren fehlender Daten in der Bewertung“ und „Wertung des Fehlens als abschließendes KO-Kriterium“ sind alle Abstufungen denkbar und darstellbar.

Die verschiedenen Umgangsformen mit fehlenden Daten werden hinsichtlich der möglichen mathematischen Umsetzung und in ihren Auswirkungen in Kapitel 6.5.2 näher ausgeführt.

Zusammenfassung

Im Rückgriff auf bereits vorhandene Hersteller-Informationen über Produkte wurden je nach Art dieser Daten und ihrer Verfügbarkeit verschiedene technische Wege vorgestellt, wie diese in für die Berechnung der Unähnlichkeit nutzbaren Daten hergeleitet und abgebildet werden können. Das Spektrum reicht von einer direkten Übernahme bestehender Werte über statistische Auswerteverfahren bis hin zu einem Rückgriff auf externe Datenquellen.

6.1.3

Skalenniveau der Entscheidungskriterien

Zusätzlich muss jedoch für jedes Kriterium individuell festgelegt werden, auf welchem Skalenniveau (nominal, ordinal, quantitativ) die Daten sinnvollerweise erzeugt werden sollen. Da auch diese Unterteilungen als Teil des Modells nicht „objektiv“ oder „material-immanent“ sind, bedarf es wiederum für jedes Kriterium einer fachlichen und inhaltlichen Begründung.

Generell ermöglicht eine quantitative Skala eine genauere Bewertung als eine ordinale und diese wiederum eine höhere als eine nominale oder binäre. Es erscheint daher auf den ersten Blick nahezuliegen, jeweils die bestmögliche Skala anzustreben. Andererseits muss aber bei der Festlegung der zum Tragen kommenden Skalen

neben der Verfügbarkeit auch die Notwendigkeit und die Aussagekraft exakter Daten berücksichtigt werden. Viele Materialeigenschaften lassen sich z.B. noch relativ einfach in sehr groben Klassen abbilden, erfordern aber einen - für die Zwecke einer schnellen und frühzeitigen Alternativenermittlung - unverhältnismäßig hohen Aufwand bei der Datenerzeugung, wenn genauere Werte verwendet werden sollen. Auch in Anlehnung an bestehende Datenbanken von Materialagenturen (vgl. Kapitel 3.2.3) werden in diesen Fällen die größeren Unterteilungen bevorzugt.

Im Einzelnen werden für die genannten Kriterien folgende Skalen vorgeschlagen:

Sinnliche Kriterien

Der Mensch ist in der Lage, feinste Farbabstufungen (ab $\Delta E \approx 1$, vgl. Kapitel 6.4.2) zu unterscheiden und auszumessen [Wikipedia 2008e]. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, alle wahrnehmbaren Farben in CIE-L*a*b* eindeutig zu codieren und einen sehr großen Teil davon auch am Monitor darzustellen [Wikipedia 2008a]. Findet eine Festlegung des Farbkonzepts schon in frühen Planungsphasen statt, lassen sich auch vielleicht zunächst intuitiv eingestellte Farben aus der CAD-Planung exakt ausmessen und einfach übernehmen. „Farbton“, „Helligkeit“ und „Buntheit“, und im Zusammenspiel dieser drei Komponenten die „Farbe“, müssen und können also exakt quantitativ betrachtet werden.

Anders verhält es sich mit den anderen optischen Eigenschaften, da hier der menschliche Wahrnehmungsapparat weniger gut differenzieren kann bzw. die Ermittlung oder Beschreibung exakter Werte unverhältnismäßig aufwendig erscheint.

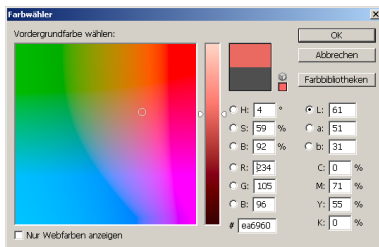


Abb. 6.2: üblicher Farbwähler

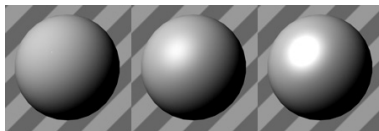


Abb. 6.3: Glanz

Genauere Werte für „Glanz“ lassen sich nur mit viel Aufwand ermitteln. In Anlehnung an die übliche Begrifflichkeit werden daher folgende ordinalen Abstufungen vorgeschlagen:
„matt“ - „seidenmatt“ - „glänzend“



Abb. 6.4: Transparenz

Das reale Verhalten im Kriterium „Transparenz“ lässt sich wegen der Abhängigkeit des Transparenzgrads vom Betrachtungswinkel bzw. aufgrund der verschiedenen Arten von Angaben nicht als einfache Zahl beschreiben. Wegen der Vergleichbarkeit auch über Materialgrenzen hinweg bieten sich diese Werte an:
0% „opak“ - 0-50% „transluzent“ - 50-100% „transparent“

Die Klassifizierung einer Oberflächentextur einer lässt sich recht gut durch statistisch ermittelbare Texturparameter automatisieren. Welche Parameter mit welchen Klassen korrelieren, kann durch eine Signifikanzanalyse speziell für übliche Oberflächentexturen mit einer definierten Auflösung ermittelt werden [Miene 1997, S.150]. Die Einordnung einer Textur durch den Menschen ist dagegen schwierig, da dieser durch Einschränkungen seines visuellen Systems nicht immer in der Lage ist, klare Grenzen zwischen den einzelnen

Klassen zu ziehen [Miene 1997, S.23-24]. Zwischen den recht eindeutigen Extremwerten wird daher ein neutraler Mittelwert vorgeschlagen, um auch solche unentscheidbaren Fälle abbilden zu können.

Für die Zwecke dieser Arbeit werden - unter Verwendung der Beschreibungen von [Miene 1997, S. 7-8] - bei den Textureigenschaften die folgenden, zumeist dreiteiligen Abstufungen vorgeschlagen:



Abb. 6.5: Form der Primitiva

Texturen können sich anhand der Form der Primitiva unterscheiden. Weisen sie vorwiegend Linien oder Striche - unabhängig von Länge, Orientierung oder Gradlinigkeit - auf, so gelten sie als „linienhaft“. Sind die Primitiva dagegen eher kürzer und unregelmäßig geformt, so gilt die Textur als „fleckig“ bzw. „gesprenkelt“. Sind die Flecken sogar so groß, dass einzelne homogene Flächen erkennbar werden, so ist die Textur „mehrflächig“. Vollständig homogene Oberflächen, bei denen einzelne Primitiva ganz fehlen, sind „einflächig“.



Abb. 6.6: Kontrast einer Textur

Weisen die Kanten der Primitiva zueinander vorwiegend große Differenzen in den Graustufenwerten auf, so gilt eine Textur als „kontrastreich“. Im Gegensatz dazu gibt es „kontrastarme“ Texturen, bei denen die Grenzen einzelner Primitiva wenig klar hervortreten. Zwischen beiden Extremen wird ein Mittelwert vorgeschlagen.



Abb. 6.7: Gerichtetheit einer Textur

Lassen sich deutlich eine oder auch mehrere Richtungen bei einer Textur ausmachen, so kann diese als „gerichtet“ beschrieben werden (im Prototyp wird allerdings bereits bei zwei gleichwertigen Richtungen, z.B. bei Quadratfliesen, der neutrale Mittelwert zugewiesen). Im Gegensatz dazu weisen „ungerichtete“ Texturen keine erkennbare Orientierung auf.



Abb. 6.8: Grobheit einer Textur

Insbesondere die Grobheit einer Textur muss immer in Bezug auf ihre Gesamtgröße gesehen werden. „Fein“ ist eine Textur, wenn die Primitiva relativ klein sind und entsprechend nahe beieinander liegen, „grob“ dagegen, wenn eher große und weiter voneinander entfernte Primitiva zum Tragen kommen.



Abb. 6.9: Regelmäßigkeit einer Textur

Das letzte, statistisch gut zu untersuchende Kriterium zur Beschreibung einer Textur ist ihre Regelmäßigkeit: Lässt sich in der Textur ein wiederkehrendes Muster erkennen, so gilt sie als „regelmäßig“, entsprechend ungeordnete und in ihrer Größe stark variierende Primitiva erzeugen ein „unregelmäßiges“ Aussehen.

Die akustischen und ebenso die genannten haptischen Eigenschaften eines Materials hängen direkt von messbaren oder exakt angebbaren physikalischen Kennwerten ab. Die genaue Angabe in qualitativen Skalen erscheint somit zunächst einfach. Allerdings sind diese konkreten Werte nicht unmittelbar an Erfahrungswerte des Menschen gekoppelt, so dass die Einschätzung eines Werts ohne Vergleichszahlen schwierig ist. Daher kann es wiederum sinnvoller

sein, stattdessen mit Klassen zu arbeiten, in die die Materialien dann anhand ihrer konkreten Kennwerte eingeordnet werden.

$$P = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Formel 6.1: Wahrgenommene Tönhöhe

Die wahrgenommene Tönhöhe (Pitch P) beim Anschlagen einer Oberfläche hängt vom Verhältnis von Elastizitäts-Modul E zur Rohdichte ρ eines Materials ab [Ashby 2002, S.86]. Je kleiner der Wert für P , desto tiefer klingt ein Material. Eher weiche und dabei dichte Materialien klingen also „tief / dunkel“, härtere oder weniger dichte dagegen eher „hoch / hell“. Zwischen diesen Extremen (deren Grenzen für die Zwecke dieser Arbeit anhand des ganzen Spektrums aller denkbaren Bauprodukte noch definiert werden müssten) liegen mittlere Werte.

$$L = \frac{1}{\eta}$$

Formel 6.2: Klarheit des Klangs

Die Klarheit (Luminanz L) des Klangs beim Anschlagen der Oberfläche hängt direkt umgekehrt proportional vom Dämpfungsbeiwert η des Materials ab [Ashby 2002, S.86]. Ist der Wert klein, so klingt es eher „dumpf / gedämpft“, ist er groß, dann klingt es „klar / brillant“. Wiederum müsste sich die Definition der Grenzwerte an der Betrachtung aller Bauprodukte orientieren.

$$S = EH$$

Formel 6.3: Gefühlte Weichheit

Die Härte (Hardness H) ist die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegen Ritzen oder Eindrücken. Entsprechend wird sie als technische Eigenschaft - je nach Materialgruppe - durch verschiedene Verfahren gemessen, z.B. durch „gegenseitiges Ritzen nach Mohs“, „Eindrücken einer Prüfkugel nach Brinell“, „Eindrücken einer Diamantpyramide nach Vickers“ usw. [Wikipedia 2008f]. Die jeweils ermittelten Werte können auf Basis von Vergleichsmessungen ineinander umgerechnet werden. Die gefühlte Weichheit (Softness S) hingegen hängt auch direkt proportional von dem elastischen Verhalten eines Materials, also seinem Elastizitätsmodul, ab [Ashby 2002, S. 68].

Als sinnlich erfahrbare Eigenschaft steht die Einordnung als Reaktion auf ein aktives Begreifen einer Oberfläche im Vordergrund. Gibt ein Material deutlich nach (z.B. Teppichboden), so kann es als „weich“ gelten, ist es gegenüber einer normalen mechanischen Einwirkung durch einen Menschen hingegen absolut beständig, so ist es „hart“. Dazwischen bewegen sich wieder Materialien „mittlerer“ Härte.

$$Q = \sqrt{\rho\lambda C_p} * \sqrt{t}$$

Formel 6.4: Gefühlte Wärme

Ob sich ein Material „warm“ oder „kalt“ anfühlt, hängt von der Größe des Wärmestroms Q durch die Hautoberfläche ab. Dieser hängt materialspezifisch ab von der Rohdichte ρ , der Wärmeleitfähigkeit λ sowie von der spezifischen Wärme C_p und der Dauer t im jeweiligen Versuchsaufbau [Ashby 2002, S. 85].

Ausgehend von dem Normalzustand, dass Raumboberflächen eine Temperatur haben, die niedriger ist als die Körpertemperatur des Menschen, bedeutet dies, dass sich Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit und hoher Dichte „kalt“, die mit geringer Leitfähigkeit und Dichte jedoch „warm“ anfühlen [Wikipedia 2006g].

Auch wenn die „Wärmeleitfähigkeit“ als physikalischer Kennwert genau ermittelt werden kann, ist die vom Menschen empfundene

Temperatur immer abhängig von den jeweiligen Randbedingungen. Eine absolute Temperaturmessung ist dem Menschen somit nicht möglich. Eine Aufteilung in die eher groben Kategorien „warm“, „mittel“ und „kalt“ erscheint für die Zwecke dieser Arbeit auszureichen.

Auch die Rauheit kann als technischer Kennwert gemessen werden, wiederum gibt es dafür diverse - von der Art der Oberfläche abhängige - Messverfahren [Wikipedia 2008g]. Die Verfahren und Geräte sind jedoch eher auf technisch relevante Rauheiten von Gleit- oder Sichtflächen, also auf äußerst kleine Werte, ausgelegt. Auch die Angabe einer Körnung, wie sie z.B. bei Schleifpapier angewendet wird, kann mit abbildbaren Strukturen von rund 1/100mm bis 1mm noch nicht das gesamte Spektrum der denkbaren Oberflächenmaterialien abdecken [Wikipedia 2008h].

Stattdessen stehen in der Architektur extrem „raue“ (wie z.B. Putzoberflächen) den „glatten“ Materialien (z.B. Metallflächen) gegenüber. Dazwischen können Oberflächen „mittlerer“ Rauheit liegen, deren Struktur deutlich ertastbar ist. Die Abstufung kann nicht linear erfolgen, da bereits kleine Rauheiten empfunden werden können. Für eine feinere Abstufung fehlt wiederum die Fähigkeit des Menschen, die Rauheit als absoluten Wert zu fühlen und zu beziffern.

Die Materialart lässt sich in Nominalskalen beschreiben. Einzelne Materialarten stehen ohne Wertung nebeneinander, zusammengesetzte Materialien können zu mehreren Gruppen gehören oder als „zusammengesetzt“ ausgewiesen werden.

Die folgenden vorgeschlagenen Kategorien beruhen auf einer Querschnittsbetrachtung über die Angaben der Materialart in verschiedenen Büchern und auf Webseiten, die als Inspirationsquelle genutzt werden können (siehe Anhang A.6):

„Estrich“ - „Farben / Lacke“ - „Gewebe“ - „Glas“ - „Holz“ - „Holzwerkstoff“ - „Keramik“ - „Kunststoff“ - „Linoleum“ - „Metall“ - „Naturmaterialien“ - „Pappe / Papier“ - „Stein“ - „Stoff“ - „Teppich“ - „Terrazzo“ - „Zusammengesetzte Materialien“

Technische Kriterien

Die folgenden, technischen Kriterien existieren bereits in einer objektiven Form. Weil dadurch weniger Interpretations- und Definitionsarbeit notwendig ist, können sie zusammenfassend und weniger im Detail beschrieben werden.

Die konstruktiven und bauphysikalischen Werte liegen dabei größtenteils in quantitativer Form vor. Sie werden aber auch in Berechnungen oder Nachweisen in dieser Genauigkeit benötigt (Ausnahme: Brennbarkeitsklassen). Sie sollten daher in dieser exakten Form übernommen werden, damit sie so in die Bewertung eines Materials einfließen können.

Die Angaben zur Eignung für bestimmte Nutzungen oder zur Beständigkeit eines Materials hingegen werden üblicherweise in binä-

ren Skalen gemacht (Ausnahmen: Rutschhemmung und Beanspruchungsklasse in Ordinalskala). Hier geht es nur darum, ob das Kriterium erfüllt wird oder nicht. Auch hier kann diese Datenart mit ihren Werten "trifft zu" oder „trifft nicht zu“ direkt übernommen werden.

Ökonomische Kriterien

Der Architekt ist gewohnt, mit Erstellungskosten umzugehen, die auf die jeweilige Abrechnungseinheit eines Bauteils bezogen sind. Im gleichen Bezugsrahmen wird er auch in der Lage sein, Nutzungs- und Entsorgungskosten beurteilen zu können.

Konkrete Werte zu den Einzelposten werden üblicherweise als „Von-Bis-Angaben“ oder als Durchschnittswerte über eine große Anzahl berücksichtigter bzw. abgerechneter Projekte - je nach Quelle auf den Cent genau - berechnet und anschließend in der Kostenplanung mit diesen exakten Werten eingesetzt. Die Nutzung solcher exakten quantitativen Daten auch in der Bewertung der ökonomischen Kriterien ist daher einfach umsetzbar und naheliegend.

Ökologische Kriterien

Wie bereits dargestellt, hat der Architekt - im Gegensatz zu ökonomischen Dingen - üblicherweise nicht nur weniger Detailkenntnis in ökologischen Bewertungsfragen, sondern auch wesentlich geringere Einflussmöglichkeit auf diese Kriterien (vgl. Kapitel 5.1.4). Es wurden daher bereits statt detaillierter Unterpunkte die übergeordneten Kriterien „Lebenszyklus“ und „Recyclebarkeit“ als Entscheidungskriterien formuliert. Diese können dementsprechend natürlich auch nicht mit exakten Werten angegeben werden, sondern nur in zusammenfassenden und groben Kategorien. Auf dieser Grundlage ist dann lediglich eine tendenzielle Bewertung möglich.

Die Herkunft eines Produkts lässt sich nicht in eine Rangfolge bringen, da ja nicht zu klären ist, welches Herkunftsland nun ökologisch „besser“ ist als ein anderes. Es handelt sich also um eine Nominalskala, deren Inhalte zunächst wertfrei nebeneinander stehen. Denkbar sind hier - im Gegensatz zur Theorie, dass sich die Kategorien nicht überschneiden dürfen - neben Elementen wie z.B. „Deutschland“ oder „Italien“ auch umfassende Gruppen wie z.B. „Europa“, die eine weniger detaillierte Einordnung erlauben.

Zusammenfassung

Real vorliegende Materialeigenschaften können in verschiedenen Arten von Daten abgebildet werden. Diese Abbildung kann - notfalls im Rückgriff auf zusätzliche externe Quellen - für alle genannten Kriterien (vgl. Kapitel 5) automatisch auf Grundlage der von den Herstellern zur Verfügung gestellten Produktdaten erfolgen. Vorher muss auf Basis der vorliegenden Daten und des später erforderlichen Umgangs allerdings definiert werden, welches Skalenniveau jeweils zum Tragen kommen soll. Hierzu wurden - insbesondere für die sinnlichen Kriterien - fachlich und inhaltlich begründete Vorschläge gemacht.

Damit ist als erstes die notwendige systemseitige Voraussetzung erfüllt, um alle Materialien hinsichtlich des Kriteriums „Gesamtunähnlichkeit zum gesuchten Material“ berechnen zu können, nämlich das Vorliegen „objektiver“ Daten (vgl. Kapitel 6).

6.2 Festlegung des Zielwerts

»Der Begriff Ziel (griechisch τέλος [telos], lateinisch finis, englisch objective, goal) bezeichnet einen [...] angestrebten Zustand (Zielvorgabe).«

[Wikipedia 2007k]

Die zweite, diesmal jedoch auf Seite des Nutzers zu erfüllende Voraussetzung für die Berechnung der Unähnlichkeit ist, dass die gewünschte oder geforderte Ausprägung der Materialeigenschaften, also der genaue Wert, durch den Nutzer definiert werden kann. Um eine Vergleichbarkeit zwischen dem Idealmaterial und den vorliegenden Materialien zu gewährleisten, ist es notwendig, dass die gesuchten Werte letztlich in der gleichen Skala und Metrik vorliegen wie die Daten der vorhandenen Materialien.

An dieser Stelle soll nicht weiter diskutiert werden, wie der Planer darin unterstützt werden kann, diese Werte zu finden (etwa durch Programme zur Unterstützung der Farbwahl oder durch Simulationssoftware). In diesem Abschnitt wird vielmehr der Frage nachgegangen, auf welchen Wegen und in welcher Form diese vom Planer formulierten Eigenschaften des gesuchten Idealmaterials dem System mitgeteilt bzw. wie diese Eingabe durch eine entsprechende Interfacegestaltung sinnvoll unterstützt werden kann.

6.2.1 Übernahme vorhandener Werte

Einige Werte zur Beschreibung des gesuchten Materials sind bereits in der existierenden CAAD-Planung vorhanden. Diese können durch Auslesen der Information im Prinzip direkt in das Werkzeug übernommen werden, so dass Inkonsistenzen zwischen den Systemen verhindert werden. Andere Werte können bereits aus vorangegangenen Suchläufen vorliegen, sie brauchen dann selbstverständlich nicht für jeden Suchvorgang manuell neu eingegeben werden. Diese Weiternutzung vorhandener Daten ermöglicht erst vergleichende Suchstrategien.

Vorhandene Daten im CAAD-Modell

Idealerweise sollte das Werkzeug zur Unterstützung der Materialwahl in eine Gesamtstrategie eingebunden sein (vgl. Kapitel 3.4.2). In diesem Fall können viele Angaben über Materialoberflächen, die im digitalen Gebäudemodell bereits vorhanden sind, genutzt werden. Selbst einfache CAAD-Systeme verwalten zu Visualisierungszwecken bereits Daten über das gewünschte Aussehen von Oberflächen, also z.B. Definitionen von Farben und Texturen. Unabhängig

von der verwendeten Technik bei dieser Beschreibung (vgl. Kapitel 3.1.3) können diese Angaben sehr einfach genutzt werden, um einen repräsentativen Ausschnitt der virtuellen Oberfläche zu rendern (z.B. ebenfalls einen Quadratmeter, vgl. Kapitel 6.1.2). Im Anschluss kann das gerenderte Ergebnis auf demselben Weg wie ein Produktfoto automatisch nach Farbanteilen und Texturparametern analysiert werden. Durch den Bezug auf eine Fläche gleicher Größe wird diese Herangehensweise vergleichbare Werte liefern.

Auch eine Vielzahl technischer Daten, die z.B. durch angegliederte Simulationsprogramme ermittelt wurden, könnte aus dem CAAD-Modell ausgelesen und weiterverwendet werden. Ein etwas größerer Aufwand wird allerdings erforderlich, wenn auch die Angaben zu Raumnutzungen oder geometrische Lagebeschreibung einzelner Bauteile als für die Materialwahl relevante Information genutzt werden sollen. Hierbei ist dann immer noch eine inhaltlich-fachliche Interpretation der Daten notwendig (z.B. aus der Raumnutzung „Großküche“ die Folgerung, dass der Fußboden rutschhemmend sein muss). Solche Fachkenntnisse können aber durch Expertensysteme abgebildet werden. Bis zu welcher Grenze solche Systeme sinnvoll eingesetzt werden können, soll an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden.

Vorhandene Werte im Bezug auf andere Materialien

Die zweite Möglichkeit einer Übernahme und Weiterverwendung von Daten ist durch die Suchstrategien „Ähnlichkeit“ und „Analogie“ beschrieben (vgl. Kapitel 2.3): Hat der Planer bereits ein Material gefunden, welches relativ gut zu seinen Wünschen passt, wird er von diesem ausgehend für die weitere Suche vielleicht nur noch gezielt einige wenige Werte in der Eingabe ändern wollen, um weitere ähnliche Produkte zu finden. Alle anderen Werte der ursprünglichen Suche bzw. die vorliegenden Kennwerte des zum Vergleich herangezogenen Materials können dann selbstverständlich direkt übernommen werden.

Auch die Strategie Inspiration, die durch freies Browsen (siehe Kapitel 7.3.3) durch die Welt der Materialien verfolgt werden kann, beruht letztlich darauf, immer das zuletzt betrachtete Material als Referenz und Ausgangspunkt für die weitere Suche zu verwenden, also dessen Werte für die weitere Suche zu übernehmen.

6.2.2

Manuelle Werteingabe

Alle anderen, nicht ableitbaren Werte müssen zur vollständigen Beschreibung eines Idealmaterials im Anschluss manuell ergänzt werden. Zur Förderung einer gewünschten intuitiven Anwendung des entscheidungsunterstützenden Tools - gerade auch in den frühen Planungsphasen, in denen noch wenige exakte Daten vorliegen - ist es wichtig, dass der Nutzer diese notwendigen Eingaben ohne zusätzliche Hilfsmittel in einer einfachen, ihm verständlichen Form tätigen kann. Hierzu können folgende Wege beschritten werden:

Direkte Werteingabe

Am einfachsten ist es natürlich, wenn dem Planer die gewünschten Werte bekannt sind und direkt in der anschließend benötigten Form eingegeben werden können. Bei den quantitativ einzugebenden Daten sollten daher Wertesysteme und Einheiten verwendet werden, die dem üblichen Gebrauch (z.B. „Euro pro Quadratmeter“) entsprechen, so dass diese ohne weitere Umrechnung übernommen werden können.

Bei den in Ordinalskalen abgebildeten Eigenschaften sollten die zur Auswahl gestellten Begriffe so gewählt sein, dass diese die unterlegten realen Eigenschaften im allgemeinen Sprachgebrauch verständlich abbilden. Darauf wurde bereits bei der vorgeschlagenen Zusammenfassung von individuellen Eigenschaften in Klassen geachtet (vgl. Kapitel 6.1.3). Die dort zumeist vorgenommene Unterteilung in nur drei Klassen erscheint vielleicht manchmal etwas grob, vielfach ist jedoch eine feinere Untergliederung (z.B. Werte zwischen „matt“ und „seidenmatt“) bereits sprachlich kaum möglich. Dennoch können durch eine Formulierung von Tendenzen (z.B. „eher matt als seidenmatt“) auch Zwischenwerte in der Eingabe berücksichtigt werden.

In vielen Programmen ist es zudem mittlerweile üblich, dass die zahlenmäßige Eingabe eines Werts mit einer Angabe der Einheit ergänzt wird. Wird durch den Nutzer eine abweichende Einheit eingegeben, werden diese Werte anschließend intern in die vom Programm benötigte Form umgerechnet (z.B. von Millimetern in Meter).

Eingabe von Farbwerten

Eine manuelle Beschreibung der gewünschten Farbe eines Materials kann - ohne weitere Auswirkung auf das Ergebnis - im Prinzip auf vielen unterschiedlichen Wegen erfolgen, da sich alle Farbsysteme und herstellereigenspezifische Farbnamen sehr exakt ineinander umrechnen lassen (vgl. Kapitel 3.2.1):

Eine erste und oft angewendete Möglichkeit ist, Farben mit einer „Pipette“ in einem Farbfeld anzuwählen. Allerdings bildet ein solches Farbfeld immer nur zwei Dimensionen des dreidimensionalen Farbraums ab, die jeweils dritte muss zusätzlich angegeben werden (vgl. Abb. 6.1). Wie intuitiv ein solches Vorgehen angewendet werden kann, hängt von der Erfahrung des Nutzers sowie vom benutzten Farbsystem ab.

In eine ganz andere Richtung gehen die zahlreichen Ansätze, Farben mit Namen oder Begriffen zu bezeichnen. Während Bezeichnungen wie z.B. RAL3000 „Feuerrot“ sehr individuell vergeben sind und daher auch ohne Beziehung zu anderen Farbwerten stehen, lassen sich z.B. innerhalb des Colour Naming System CNS [Berk 1982] viele feine Farbabstufungen auf Grundlage einer stringenten Grammatik zwischen zwei Grundfarben genau bezeichnen. Noch

exakter lassen sich Farben im National Color System NCS benennen, welches mit Prozentangaben den jeweiligen Anteil der Grundfarben sowie Helligkeit und Sättigung angibt [Wikipedia 2008c].

Je detaillierter Farben durch solche Schemata beschrieben werden können, desto mehr verschwimmen die Grenzen zu der Angabe von Farben mittels reiner Zahlwerte. Die in Computer-Anwendungen weit verbreiteten Systeme RGB und CMYK codieren Farben jedoch in drei bzw. vier unabhängigen Farbkanälen, die erst durch ihre Mischung den Farbton bestimmen. Daher ist es in ihnen nur mit einiger Erfahrung möglich, allein aufgrund der drei bzw. vier Zahlenwerte auf die resultierende und wahrgenommene Farbe zu schließen.

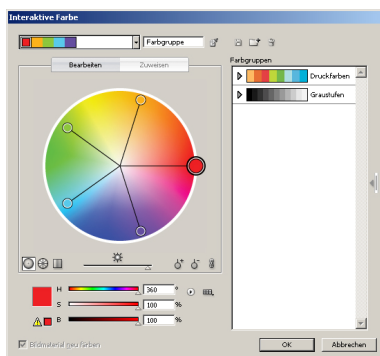


Abb. 6.10: HSB-Farbwähler

Der menschlichen Wahrnehmung am nächsten kommend erscheint eine Eingabe im HSV- bzw. HSB-System, da dieses - dem allgemeinen Sprachgebrauch folgend - den Farbton, die Buntheit und die Helligkeit einer Farbe in drei unabhängigen Kanälen codiert. Der Nutzer kann somit zielgerichtet drei Komponenten steuern, die er inhaltlich direkt interpretieren kann. Zudem beruhen viele Farbharmenien auf diesen drei Farbkanälen.

Eine Eingabe des Farbtons (Hue) im Bereich 0-360° bildet den bekannten Farbkreis ab, Sättigung (Saturation) und Helligkeit (Value bzw. Brightness) können dagegen einfacher auf einer Skala von 0-100% angegeben werden.

6.2.3

Interfacegestaltung

Neben der grundsätzlichen Frage, in welcher Einheit oder in welchem Wertesystem Eingaben getroffen werden, kann eine geeignete Gestaltung der Eingabemaske die Intuitivität und Richtigkeit der Eingabe unterstützen:

Eingabefelder

Quantitative Daten können zumeist sehr viele fein abgestufte Werte annehmen. Sie müssen daher manuell eingetragen werden können, eine Auswahl aus vorgegebenen Werten wäre dagegen nicht sehr übersichtlich. Als Hilfestellung kann dabei angegeben werden, in welcher Einheit die Eingabe erwartet wird und in welchem Wertebereich diese liegen kann (z.B. „0 bis 100 Prozent“).

Auswahlfelder

Im Gegensatz dazu können die zur Verfügung stehenden Ausprägungen bei Ordinal- oder Nominalskalen als Werte in einem Auswahlfeld bereits vorgegeben werden, da die meisten der oben vorgeschlagenen Kriterien nur wenige verschiedene Zustände annehmen können. So sieht der Nutzer direkt, welche Auswahlmöglichkeiten er hat (z.B. bei „Materialart“).

Insbesondere bei der Klassifizierung von Texturen ist zudem eine Verwendung von Referenzbildern (vgl. Kapitel 6.1.3) anstelle der Begriffe denkbar, um einen visuellen Anhaltspunkt für die doch nicht ganz alltäglichen Begrifflichkeiten zu geben. Bei vielen anderen Kriterien kann der Gebrauch von aussagekräftigen Symbolen gegenüber den Begriffen ebenfalls den Vorteil einer einfacheren Zuordnung mit sich bringen.

Schieberegler

Gerade in den frühen Planungsphasen liegen erst wenige exakte Werte vor. Die Möglichkeit einer Eingabe über Schieberegler kann diese anfängliche Ungenauigkeit recht gut abbilden und so ein „Herantasten“ an die späteren Werte erleichtern. Schieberegler können sowohl bei quantitativen Daten als auch zur Generierung von tendenziellen Zwischenwerten bei Ordinalskalen verwendet werden. Zusätzlich sollten aber auch Zahlen- oder Auswahlfelder für eine Eingabe exakter Werte bzw. zur Anzeige der durch den Regler eingestellten Werte vorhanden sein.

Visuelles Feedback

Alle eingegebenen Werte können das gewünschte Idealmaterial immer nur abstrakt beschreiben. Zumindest die optischen Eigenschaften eines Materials lassen sich aber gut an einem vorgegebenen Grundkörper - wie z.B. aus Visualisierungssoftware bekannt - darstellen.

Das damit verbundene direkte visuelle Feedback gibt eine sehr gute Kontrolle der eigenen Eingaben.

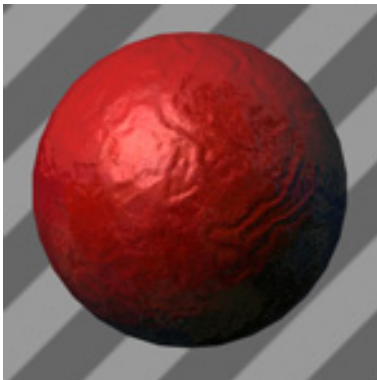


Abb. 6.11: Visuelles Feedback über Grundkörper

Zusammenfassung

Sind Eigenschaften des gesuchten Idealmaterials bereits in der CAAD-Planung oder innerhalb des Werkzeugs zur Unterstützung der Materialwahl beschrieben, lassen sich diese Informationen für den Suchvorgang übernehmen. Bei einer ergänzenden manuellen Festlegung der Zielwerte ist darauf zu achten, dass diese entweder in einer aus anderen Anwendungen bekannten Form verwendet werden bzw. dass mögliche Ausprägungen der Kriterien bereits so definiert werden, dass diese Werte dem allgemeinen Sprachgebrauch des Menschen entsprechen. Eine entsprechende Gestaltung der Eingabemaske kann unterstützend wirken.

In der Kombination beider Wege ist es möglich, dem System die gewünschten oder geforderten Eigenschaften eines Idealmaterials so mitzuteilen, dass diese Daten denen der vorliegenden Materialien in Skala und Metrik entsprechen. Somit ist auch die zweite Voraussetzung für die Berechnung der Unähnlichkeit eines Materials zum gesuchten Idealmaterial, nämlich die nutzerseitige Beschreibung im Zielwert gegeben (vgl. Kapitel 6).

6.3 Festlegung der Gewichtung

»Die Bemessung der Wichtigkeit eines Objektes erfolgt durch ein Subjekt und kann je nach Kontext auf einer objektiven oder einer subjektiven Methode beruhen: Eine objektive Methode liegt immer dann vor, wenn die zu bewertenden Parameter, deren Wertebereiche und Grenzwerte sich vollständig und eindeutig beschreiben lassen. Ist dies nicht möglich, so wird die Bewertung mehr oder weniger intuitiv, bzw. basierend auf Weltwissen, Lebenserfahrung und persönlichen Beziehungen und Neigungen durchgeführt, was eine subjektive Methode der Bemessung ist.«

[Wikipedia 2007h]

Nicht alle Materialeigenschaften sind dem Planer in der Entscheidungsfindung gleich wichtig. Geforderte Eigenschaften sind oftmals unbedingt einzuhalten (es gibt aber auch Soll-Vorschriften, von denen in bestimmten Fällen doch abgewichen werden kann), anderen gewünschten Eigenschaften kann eine unterschiedliche Priorität eingeräumt werden. Dies drückt sich dann vielleicht in Formulierungen wie „das Material sollte...“ oder „es wäre schön, wenn...“ aus.

Wie wichtig dabei jedes Kriterium genommen wird, muss jeweils von Fall zu Fall individuell entschieden werden. Es kann z.B. vorkommen, dass eine bestimmte Farbe genau eingehalten werden soll, der Preis jedoch eine untergeordnete Rolle spielt. Andersherum kann aber auch eine feste Kostenobergrenze bestimmte Gestaltungsideen zu Fall bringen.

Um Materialien aufgrund der „Gesamtähnlichkeit zum Idealmaterial“ bewerten zu können, muss das Gewicht, das den jeweiligen Entscheidungskriterien beigemessen wird, möglichst genau beziffert werden.

6.3.1 Unterscheidung nach Kriterien

Wie bereits dargelegt, lassen sich die Kriterien - unabhängig vom Inhalt - hinsichtlich ihrer Relevanz in die zwei Gruppen „absolut wichtig“ und „relativ wichtig“ unterteilen (vgl. Kapitel 4.2). Diese müssen auch bei der Festlegung der Gewichtung unterschiedlich behandelt werden:

Absolut wichtige KO-Kriterien

Damit ein Material überhaupt als denkbare Alternative in Betracht gezogen werden kann, ist die Einhaltung derjenigen Kriterien, die vorab als KO-Kriterien definiert wurden, absolut erforderlich. Das Gewicht dieser Kriterien ist also offensichtlich so groß, dass das Nichterfüllen der hier geforderten Eigenschaften zum sofortigen Ausschluss des Materials aus der weiteren Bewertung führt. Diese KO-Kriterien müssen unabhängig von allen anderen Kriterien berücksichtigt werden und beeinflussen deren Gewichtung auch nicht.

Relativ wichtige Kriterien

Im Gegensatz dazu sind alle anderen Gewichtungen immer nur relativ zueinander zu verstehen. Würden z.B. insgesamt nur zwei Kriterien berücksichtigt, wäre es völlig egal, ob beide als „sehr wichtig“ oder beide als „eher unwichtig“ beschrieben würden. Sie müssten in jedem Fall zu gleichen Teilen in der Entscheidung berücksichtigt werden.

Eine übliche Methode, diese Wichtigkeit auch mathematisch zu beschreiben, ist die Einführung eines Gewichtungsfaktors, der den prozentualen Anteil des Einzelkriteriums an der Gesamtentscheidung darstellt. Die Summe aller Gewichtungsfaktoren ist also per Definition 100% und bedeutet die Gesamtheit der Entscheidung. Um zu einer Bezifferung der Gewichtungsfaktoren zu kommen, die den gefühlten und verbal formulierten Wichtigkeiten der Kriterien entsprechen, lassen sich verschiedene Wege einschlagen. Im Folgenden werden davon beispielhaft zunächst zwei Extrempositionen diskutiert, die letztlich zu einem für die Zwecke dieser Arbeit ausreichend genauen und zugleich praktikablen Kompromiss zusammengeführt werden.

6.3.2

Direkte Eingabe für jedes einzelne Kriterium

Die einfachste Möglichkeit für die Ermittlung relativer Gewichte ist, jedem Einzelkriterium zunächst auf Grundlage der eigenen Einschätzung ein individuelles Gewicht direkt zuzuweisen, z.B. auf einer Skala von 0% („absolut unwichtig“) bis 100% („absolut wichtig“).

»Normalisierung oder Normierung bedeutet in der Mathematik und Statistik die Skalierung des Wertebereichs einer Variablen auf einen bestimmten Bereich, üblicherweise zwischen 0 und 1 (bzw. 100 Prozent).«

[Wikipedia 2007!]

Diese manuell vergebenen Gewichte ergeben in ihrer Summe nicht zwangsläufig 100%. Sie können aber anschließend normalisiert werden, indem jedes Einzelgewicht durch diese Summe aller verteilten Gewichte dividiert wird. Die auf diese Weise ermittelten relativen Werte stellen dann wieder den Anteil jedes Einzelkriteriums an der Gesamtentscheidung dar und summieren sich auf 100%.

Vor- und Nachteile

Der Vorteil dieser Methode liegt in der Einfachheit des Vorgehens. Jede Änderung in der absoluten Gewichtung eines einzelnen Kriteriums wirkt sich direkt auf die relative Gewichtung aller Kriterien aus. Allerdings weist dieses Verfahren im Gegenzug den unbestreitbaren Nachteil auf, dass es dem Nutzer fast unmöglich sein dürfte realistisch festzulegen, wie wichtig ihm diese Einzelkriterien nun im Einzelnen sind. Eine konsistente Simultanbewertung einer großen Zahl von Elementen ist zu komplex.

Die erzielten Ergebnisse der Suche sind also mit einer großen Unsicherheit behaftet und zu hinterfragen. Sie können aber eventuell rückwirkend zu einer Neujustierung der Gewichte beitragen, wenn die in der Berechnung ermittelten Materialien nicht den Erwartungen entsprechen.

6.3.3

Hierarchisch aufgebaute Paarvergleiche

»Die hierarchische Aufbereitung der Ziele dient einer möglichst treffenden Zuordnung der Zielgewichte, da in einem derart aufgebauten Zielsystem in den Teilsystemen in der Regel nur zwei oder drei Teilziele gleichzeitig zu betrachten und mit Stufen-Gewichten zu versehen sind.«

[Eickemeier 2002, S.389]

1	gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächst-höhere Element (Ziel).
3	etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung
5	erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung
7	sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt
9	absolut dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen Elementen
2,4, 6,8	Zwischenwerte	Zwischen zwei benachbarten Urteilen muß eine Übereinkunft getroffen werden, ein Kompromiß

Abb. 6.12: Punkteskala für Paarvergleiche bei AHP

Eine deutlich zuverlässigere Art, zu einer „objektiven“ Gewichtung zu gelangen, besteht darin, eine Reihe einfacher Paarvergleiche sukzessiv durchzuführen. In einem hierarchisch aufgebauten Kriterienmodell müssen dabei immer nur die Elemente auf derselben Hierarchiestufe miteinander verglichen werden.

Die Resultate solcher Sukzessivvergleiche erweisen sich im Bezug auf Simultanvergleiche bei wiederholter Durchführung als besser reproduzierbar [Lusti 2002, S.21]. Zudem erlauben sie mittels einer Konsistenzprüfung eine Kontrolle darüber, ob die einzelnen Angaben untereinander stimmig sind. Die Fehlerquote wird also geringer.

Analytischer Hierarchieprozess (AHP)

Eine präzise Angabe, um wie viel ein Kriterium wichtiger ist als ein anderes, bereitet allerdings auch bei einfachen Paarvergleichen zunächst Schwierigkeiten. In der ursprünglichen Formulierung des „Analytischen Hierarchieprozesses“ werden diese daher anhand einer Punkteskala von 1-9 (bzw. im Gegenvergleich mit den reziproken Werten) vorgenommen, deren Bedeutung jedoch verbal beschrieben wird [Saaty 1990].

Die Ergebnisse dieser Paarvergleiche lassen sich in einer Evaluationsmatrix erfassen, deren normalisierter Eigenvektor (Summe der Komponenten entspricht dann 100%) die relative Gewichtsverteilung der Einzelkriterien, also die gesuchten Gewichtungsfaktoren, abbildet. Diese so ermittelten Werte weichen im Vergleich zueinander üblicherweise ein wenig von den ursprünglich anhand der Punkteskala eingegebenen Verhältnissen der Gewichtungen ab. Dieser Effekt ist jedoch gewollt und führt zu einer Korrektur auch nicht vollständig konsistenter Paarvergleiche. Zu große Inkonsistenzen in den einzelnen Bewertungen dagegen werden in einer einfachen Konsistenzprüfung festgestellt [Saaty 1990, S.21] und erfordern eine entsprechende Nachbewertung.

»Das Gewicht für jedes Basisziel errechnet sich als Produkt der Stufengewichte über die Kanten, die vom Basisziel zum Gesamtziel führen.«

[Eickemeier 2002, S.389]

»Es drängt sich die Frage nach der "wahren" Skala auf, die nämlich Gewichte produziert, die den Vorstellungen eines Entscheiders tatsächlich auch entsprechen. Die

Im hierarchisch aufgebauten Modell erfolgen die Paarvergleiche immer nur innerhalb einer Hierarchiestufe, die relativen Gewichte addieren sich so zunächst auf jeder Stufe zu 100%. In der Betrachtung des Gesamtmodells lassen sich anschließend die letztlich anzusetzenden individuellen Gewichtungsfaktoren der Einzelkriterien durch Multiplikation der Gewichte aller einzelnen Stufen ermitteln [Weber 1993, S.98].

Vor- und Nachteile

AHP stellt - gerade bei schlecht quantifizierbaren Problemen wie der vorliegenden Kriteriengewichtung - einen Weg dar, überhaupt erst einmal zu plausiblen und auch reproduzierbaren Ergebnissen zu kommen. In der Literatur wird allerdings besonders die Skaleneinteilung von 1-9 hinsichtlich ihrer Zuordnung zu den gewählten

Beantwortung dieser Frage bleibt sicher in großen Teilen den Individuen selbst vorenthalten. [...] Grundsätzlich ist festzuhalten, dass jegliche Punkteskala immer nur einen Ersatz darstellen kann [...]»

[Eickemeier 2002, S.394]

»Allgemein ist die Zahl der nicht-redundanten Paarvergleiche bei n Entscheidungselementen gleich der Zahl der Kombinationen ohne Wiederholungen zur zweiten Klasse: $n!/2(n-2)!$ «

[Lusti 2002, S.21]

Begriffen diskutiert [Eickemeier 2002]. Eine genaue Zahl, die mit Ausdrücken wie „sehr viel größere Bedeutung“ verbunden sein soll, ist offensichtlich nur individuell zu beziffern. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die mit dieser Frage verbundenen Auswirkungen allerdings nicht weiter betrachtet werden.

Ein viel größeres Problem für die Anwendung von AHP im Rahmen der Materialwahl stellt allerdings die bei zunehmender Zahl einfließender Kriterien schnell wachsende Anzahl notwendiger Paarvergleiche dar, welche notwendig werden, um zu einem durchgängigen Ergebnis zu kommen:

Um allein die vorgeschlagenen Kriterien der Materialentscheidung innerhalb der aufgestellten Hierarchiestruktur (vgl. Kapitel 5.2) zu berücksichtigen, müssten insgesamt 129 Paarvergleiche vorgenommen werden. Selbst wenn man nur auf höheren Hierarchiestufen verbleibt und z.B. alle bauphysikalischen Eigenschaften im Vorhinein als „gleich wichtig“ ansetzt, erscheint diese Vorgehensweise daher im Rahmen einer intuitiven Unterstützung auch der frühen Planungsphasen wenig praktikabel.

6.3.4

Vereinfachte Eingabe in hierarchischer Struktur

In einer Zusammenführung beider bisher vorgestellten Methoden kann als Kompromiss eine Vorgehensweise gewählt werden, die auf den einzelnen Hierarchieebenen immer nur wenige Elemente gleichzeitig betrachtet, diese jedoch nicht im Paarvergleich, sondern in direkter Bewertung. Allein die im Vergleich zu einer direkten Bewertung aller Kriterien stark reduzierte Anzahl an simultan zu berücksichtigenden Elementen kann schon zu einer Verbesserung der subjektiven Bewertung führen.

Eine weitere deutliche Verringerung der Komplexität kann zudem durch die Verwendung einer Punkteskala herbeigeführt werden, diese jedoch im Gegensatz zum Paarvergleich zur direkten Bewertung einzelner Kriterien. Anders als die aus Fragebögen bekannten Likert-Skalen [Wikipedia 2007m] werden hier allerdings nicht Werte rund um einen neutralen Mittelwert benötigt („trifft nicht zu“ - „neutral“ - „trifft zu“), sondern Zahlen im Bereich von 0-100%. Eine Unterteilung könnte also z.B. folgendermaßen aussehen:

„absolut unwichtig“ = 0% - „etwas wichtig“ = 25% - „wichtig“ = 50% - „sehr wichtig“ = 75% - „absolut wichtig“ = 100%

Die so verbal beschriebenen, aber mit Zahlen hinterlegten Stufengewichte der betrachteten Kriterien können wieder auf jeder Hierarchiestufe normalisiert werden (vgl. Kapitel 6.3.2). Die letztendlich resultierenden Gewichte der Einzelkriterien lassen sich anschließend wie im AHP-Verfahren durch Multiplikation der Werte aller Hierarchiestufen berechnen.

Hierbei muss allerdings darauf geachtet werden, dass die Eingaben sich nicht logisch widersprechen. Bekommt z.B. ein Oberkriterium eine gewisse Wichtigkeit zugeschrieben, können nicht gleichzeitig alle Unterkriterien „absolut unwichtig“ sein. Die resultierenden Gewichte würden sich in solch einem Fall nicht zu 100% summieren. Dieses Problem kann jedoch einfach durch eine entsprechende Kontrolle der Eingabe oder durch eine erneute Normalisierung (Division der ermittelten Gewichte durch die Summe aller Einzelgewichte) gelöst werden.

Vor- und Nachteile

Der hier vorgeschlagene Ansatz versucht, die Vorteile beider zuvor beschriebenen Verfahren zu vereinen. Vorteilhaft wirkt sich die Reduzierung der Komplexität durch Ausnutzung der hierarchischen Struktur aus, so dass die Einstellungen relativ gut vorgenommen werden können. Allerdings ist keine Konsistenzprüfung wie beim AHP-Verfahren möglich, so dass diese Kontrollmöglichkeit über die eigene Bewertung wegfällt. Die Nutzung einer nur fünfteiligen Skala zur Bewertung der Kriterien ergibt zwar - mathematisch gesehen - einen Verlust an Detailgenauigkeit in der Bewertung, inhaltlich allerdings wird eine über diese Stufen hinausgehende exaktere Bezifferung des subjektiven Empfindens dem Nutzer sowieso kaum möglich sein.

Zusammenfassung

Es wurden verschiedene Wege dargelegt, um zu einer individuellen Gewichtung der Einzelkriterien zu gelangen. Abhängig von der gewählten Methode, die letztlich verfolgt wird, und dem Aufwand, den man bereit ist, dafür in Kauf zu nehmen, wird das Ergebnis mehr oder weniger genau die subjektiv wahrgenommenen Wichtigkeiten abbilden können.

Da der zu treibende Aufwand mit steigender Zahl einfließender Kriterien immer größer wird, wird im Zuge der in dieser Arbeit verfolgten Strategie der Materialwahl eine Reduzierung zwingend notwendig - auch wenn dies zu Lasten der erzielbaren Genauigkeit geht. Daher wurde zwischen zwei denkbaren Extremen ein Verfahren formuliert, das einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Praktikabilität darstellt. Die Auswirkung einer daraus folgenden Ungenauigkeit in der Bewertung wird noch in der Gesamtbetrachtung der Ergebnisse diskutiert werden (siehe Kapitel 6.6).

Festzuhalten bleibt, dass es im Prinzip möglich ist, plausibel zu einer relativ genauen Bezifferung der Kriteriengewichtung zu kommen. Damit ist auch die letzte der drei notwendigen Voraussetzungen (vgl. Kapitel 6) erfüllt, um Materialien hinsichtlich ihrer Gesamtähnlichkeit zueinander vergleichen zu können.

6.4 Berechnung der Einzelunähnlichkeit

»Äpfel mit Birnen vergleichen (dt.)- to compare apples and oranges (en.)«
Redewendung - idiom

Die Materialwahl in der Architektur wurde eingangs als eine mehrkriterielle und multiattributive Entscheidungsfindung bezeichnet, bei der inhaltlich höchst unterschiedliche Kriterien berücksichtigt und gegeneinander abgewogen werden müssen (vgl. Kapitel 1.2.3).

Die im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Strategie zur Unterstützung dieser Entscheidung ist die Berechnung und Minimierung der Unähnlichkeit vorliegender Materialien zu einem individuell formulierten Idealmaterial (vgl. Kapitel 5.3). Hierzu werden die Unähnlichkeiten in den Einzelkriterien zunächst unabhängig voneinander betrachtet und erst anschließend zu einem Gesamtwert zusammengezogen.

Im Hinblick auf die Berechnung eines Gesamtwerts wird zunächst definiert, in welcher Form die Unähnlichkeit in einem Einzelkriterium angegeben werden soll. Anschließend wird - in Abhängigkeit von der vorliegenden Datenart - die prinzipielle weitere Vorgehensweise bei der Berechnung vorgestellt. Dieser prinzipielle Weg kann aber auch - wie bei der Erzeugung der Daten selbst - für jedes Kriterium individuell definiert oder modifiziert werden, je nach dem, wie die Unähnlichkeit inhaltlich verstanden werden soll.

6.4.1 Angabe der Unähnlichkeiten

Die Unähnlichkeit zweier Materialien könnte - zumindest bei quantitativen Daten - als absoluter Abstand der Werte (z.B. „Differenz der Aufbauhöhe: 2 cm“) oder als Relation zueinander (z.B. „Material A ist drei mal so hart wie Material B“) angegeben werden. Beide Angaben wären allerdings im Zuge der hier verfolgten Strategie nicht sinnvoll, da im Rahmen der Gesamtbetrachtung über viele verschiedene Kriterien höchst unterschiedliche Eigenschaften gegeneinander aufgerechnet werden sollen. Dafür ist es notwendig, dass letztlich die gleiche Form bei allen Kriterien vorliegt.

Vergleichbare Werte liefert dagegen die Angabe als Unähnlichkeitskoeffizient auf einer Skala von 0% = „überhaupt nicht unähnlich“ oder „identisch“ bis 100% = „maximal unähnlich“.

Alle berechneten absoluten Unähnlichkeiten können in diesen Wertebereich zwischen 0 und 1 normalisiert werden, indem der Betrag der ermittelten absoluten Abstände durch den maximal möglichen Abstand dividiert werden. Dies impliziert allerdings, dass eine Angabe bei Kriterien, deren Wertebereich nicht begrenzt ist (z.B. Preis prinzipiell nach oben offen) nur relativ zum jeweils größ-

ten vorliegenden Abstand zu verstehen ist. Eine Interpretation der Unähnlichkeit ist bei solchen Kriterien ohne Kenntnis über den Maximalwert kaum möglich.

6.4.2

Prinzipielle Berechnung von Unähnlichkeiten

Die Unähnlichkeit δ_{ija} zwischen zwei Elementen i und j im Kriterium a lassen sich, wenn diese die Werte u annehmen, in den verschiedenen Datenarten prinzipiell wie folgt berechnen [Basalaj 2001, S.2-3]:

$$\delta_{ija} = \begin{cases} 0 & : u_{ia} = u_{ja} \\ 1 & : u_{ia} \neq u_{ja} \end{cases}$$

Formel 6.5: Unähnlichkeit bei nominalen Daten

$$\delta_{ija} = \frac{|r(u_{ia}) - r(u_{ja})|}{k_a - 1};$$

$$k_a = \max_i r(u_{ia})$$

Formel 6.6: Unähnlichkeit bei ordinalen Daten

$$\delta_{ija} = \frac{|u_{ia} - u_{ja}|}{R_a};$$

$$R_a = \max_i u_{ia} - \min_i u_{ia}$$

Formel 6.7: Unähnlichkeit bei quantitativen Daten

Binäre / Nominale Daten

Zwei Elemente gelten als identisch, wenn beide der gleichen Kategorie angehören. Sind sie nicht in der gleichen Gruppe, so gelten sie als maximal unähnlich. Die Unähnlichkeit kann also nur die zwei Maximalwerte 0 oder 1 annehmen.

Ordinale Daten

Bei Eigenschaften, die als ordinale Daten in einer Rangfolge abgebildet werden können, hängt der Grad der Unähnlichkeit sowohl von dem jeweiligen Rang $r(u)$ beider Elemente, als auch von der Anzahl insgesamt möglicher Ränge k_a ab. Sind z.B. drei Ränge möglich, kann die Unähnlichkeit 0 (wiederum „identisch“), 0,5 = 50% oder 1 = 100% („maximal verschieden“) betragen.

Quantitative Daten

Bei Daten, die eine direkte quantitative Bezifferung einer Eigenschaft abbilden, lässt sich die absolute Unähnlichkeit einfach über den Betrag der Differenz beider Werte u ermitteln. Durch Division durch den maximalen Wertebereich R_a wird dieser Abstand auf den Zielbereich zwischen 0 und 1 normalisiert.

Der maximale Wertebereich kann der theoretisch mögliche Bereich sein (bei nicht genau begrenzten Wertebereichen wie z.B. Preisen allerdings nicht vorher festlegbar) oder der maximal vorhandene Wertebereich innerhalb der berücksichtigten Daten. Letzteres kommt z.B. zum Tragen, wenn nur wenige Materialien einer zusätzlichen Analyse unterzogen werden (siehe Kapitel 7)

Farbigkeit

Der Vergleich zweier gleichmäßiger Farben bzw. die Berechnung des wahrgenommenen Farbabstands findet normgerecht im CIE-L*a*b*-Farbraum statt. Die numerischen Werte des Lab-Modells beschreiben geräteunabhängig und ohne Einschränkungen alle Farben, die von einer Person mit normalem Sehvermögen wahrgenommen werden können. Für die Vergleichbarkeit der Werte ist nur der konsistente Bezug auf die gleiche Normlichtart (z.B. D65) und den angesetzten Normalbeobachter (üblicherweise 10°) erforderlich. Durch die angenäherte Gleichabständigkeit des CIE-L*a*b*-Farbraums kann die Berechnung aller Werte auf einfache Weise und unabhängig von der Position im Farbraum folgendermaßen erfolgen [DIN 2006]:

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

Formel 6.8: Buntheit

$$h_{ab} = \arctan \frac{b^*}{a^*};$$

$$h_{ab} = \begin{cases} 0^\circ - 90^\circ; & a^*, b^* > 0 \\ 90^\circ - 180^\circ; & a^* < 0, b^* > 0 \\ 180^\circ - 270^\circ; & a^*, b^* < 0 \\ 270^\circ - 360^\circ; & a^* > 0, b^* < 0 \end{cases}$$

Formel 6.9: Bunttonwinkel

$$\Delta E_{ij}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

Formel 6.10: Farbabstand

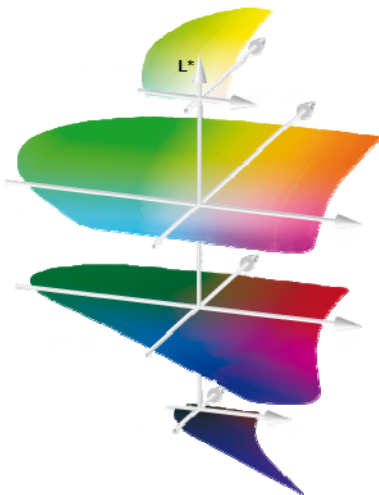


Abb. 6.13: Ungleichmäßiger L*a*b*-Farbraum

Die visuelle Empfindung der Helligkeit entspricht bereits direkt dem quantitativen Wert L^* , welcher im Bereich von 0% bis 100% liegt. Die Unähnlichkeit im Kriterium Helligkeit entspricht der Differenz beider Luminanzwerte.

Die Buntheit einer Farbe lässt sich als angenäherte Größe aus den $L^*a^*b^*$ -Werten als euklidische Distanz von der Unbuntachse ($a^*=0$ und $b^*=0$) berechnen. Farben gleicher Buntheit liegen also auf einer Kreislinie innerhalb der durch a^* und b^* aufgespannten Ebene im $L^*a^*b^*$ -Farbraum. Die absolute Unähnlichkeit zweier Farben hinsichtlich ihrer Buntheit entspricht der Differenz der beiden Kreisradien (unabhängig vom Farbton).

Der Bunttonwinkel einer Farbe ist der Winkel zwischen der positiven a^* -Achse und der gedachten Linie durch den die Farbe repräsentierenden Punkt im Farbraum und der Unbuntachse. Er lässt sich daher als Arcustangens des Verhältnisses von b^* zu a^* (unter Berücksichtigung des Quadranten) berechnen. Die absolute Unähnlichkeit im Bunttonwinkel ist die Differenz der Werte beider Elemente, d.h. der Wert Δh wird durch Addition oder Subtraktion von 360° in den Bereich von -180° bis 180° korrigiert.

Auch der absolute Farbabstand zwischen zwei Farbreizen kann - da die Koordinatenachsen L^* , a^* und b^* rechtwinklig aufeinander stehen - als euklidische Distanz der beiden die Farben repräsentierenden Punkte im Farbraum berechnet werden.

Für die kriterienübergreifende Vergleichbarkeit müssen alle Werte ebenfalls noch in den Wertebereich von 0-1 normalisiert werden. Dies erfolgt üblicherweise wie beschrieben durch Division des Betrags durch den jeweils möglichen maximalen Wertebereich. Eindeutig festgelegt ist dieser Maximalwert allerdings nur bei der Helligkeit ($\max \Delta L=100$) und beim Bunttonwinkel ($\max \Delta h=180^\circ$). Für die Koordinaten a^* und b^* gibt es dagegen - auch wenn am Monitor nur ein begrenzter Bereich dargestellt wird - keinen einfach begrenzten Zahlenraum. Der $L^*a^*b^*$ -Farbraum ist stattdessen ungleichmäßig aufgebaut, die jeweils maximalen a^* - oder b^* -Werte hängen vom Wert L^* ab. Die Farbe grün liegt dabei insgesamt am weitesten von der Unbuntachse entfernt [Wikipedia 2007n].

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die zu berücksichtigenden Farbwerte aus RGB-Pixelbildern ermittelt werden (vgl. Kapitel 6.1.2). Die genaue Umrechnung der RGB- in $L^*a^*b^*$ -Werte ist zwar abhängig vom zugrunde gelegten RGB-Arbeitsfarbraum und dem Referenzweiß (der Standardbeleuchtung) [Lindbloom 2001], diese werden aber für alle Materialien konsistent angesetzt. Unter dieser Voraussetzung lassen sich - innerhalb dieses Bezugsrahmens - wiederum Maximalwerte ermitteln:

$$\max \Delta C^* = \sqrt{a_{grün}^2 + b_{grün}^2}$$

Formel 6.11: max. L*a*b*-Wert

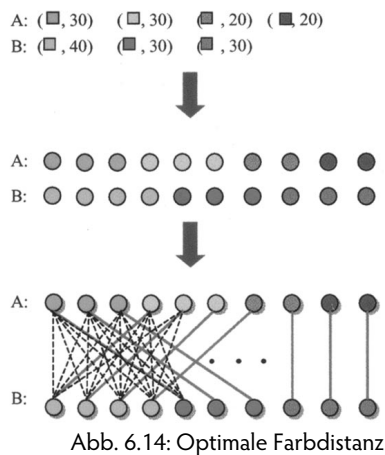
$$\max \Delta E^* = \sqrt{L_{grün}^2 + a_{grün}^2 + b_{grün}^2}$$

Formel 6.12: max. mögl. Farbabstand

Der Abstand zwischen „schwarz“ (RGB 0-0-0, entsprechend L*a*b* 0-0-0) und „grün“ (RGB 0-255-0, L*a*b*-Wert je nach Bezugsrahmen) liefert so die Maximalwerte für Buntheit und Farbe, durch die die absolut ermittelten Buntheits- bzw. Farbabstände bei der Normalisierung noch dividiert werden müssen.

Mehrfarbige Oberflächen

In der Betrachtung von Oberflächen, die mehrere unterschiedliche Farbanteile (z.B. Maserungen oder Muster) aufweisen, muss die Berechnung der Unähnlichkeiten (hinsichtlich Farbe, Farbton, Buntheit und Helligkeit) für alle einzelnen Anteile durchgeführt werden, um die Gesamtunähnlichkeit im Kriterium Farbe zu ermitteln. Ein mögliches Vorgehen hierzu beschreibt [Mojsilović 2002]:



Für den Farbvergleich können die Farbwerte aus einem Pixelbild ohne relevanten Informationsverlust auf wenige dominante Farbwerte reduziert werden (vgl. Kapitel 6.1.2). Diese Reduktion kann zusätzlich so durchgeführt werden, dass die einzelnen Farbkomponenten jeweils gleich große Flächenanteile des Bildes beschreiben. Dadurch können sie im Weiteren als gleichwertig betrachtet werden (siehe Anhang B.1).

Die wahrgenommene, geringste Farbdistanz lässt sich dann ermitteln, indem jede Komponente des einen Bildes mit genau einer Komponente des anderen derart in Beziehung gesetzt wird, dass die Summe aller Distanzen minimiert wird. Lösungsalgorithmen finden sich in der Graphentheorie (z.B. „Rothberg Gabow Algorithmus“). Der Rechenaufwand für dieses Minimierungsproblem lässt sich durch die Verringerung der Anzahl der betrachteten Komponenten stark reduzieren.

6.4.3

Individuelle Modifikationen

Die vorgestellten Berechnungsverfahren beruhen auf der mathematischen Annahme, dass die betrachteten Kriterien genau nur einen Wert annehmen können und dass die Unähnlichkeit zwischen zwei Werten symmetrisch ist. Bei einigen der betrachteten Materialeigenschaften muss allerdings aus inhaltlichen oder anwendungsspezifischen Gründen von dieser Annahme abgewichen werden. Sie bedingen daher einige Modifikationen in der Definition der Verfahren.

Mehrfachauswahlen

Bei der Suche nach einem geeigneten Material kann es manchmal sinnvoll sein, mehrere Wünsche zu formulieren (z.B. bei der Festlegung der gewünschten Materialart). Entsprechend muss dann die Berechnung für jeden dieser Werte separat durchgeführt werden. Die jeweils geringste Unähnlichkeit findet anschließend Berücksichtigung.

Von-Bis-Werte

Ganz ähnlich verhält es sich, wenn für einzelne Kriterien die Lage in einem bestimmten Wertebereich gewünscht wird: Liegt der Wert eines untersuchten Materials innerhalb des Bereichs, ist die Unähnlichkeit 0%. Andernfalls bezieht sich die Berechnung der Distanz auf den jeweils am nächsten liegenden Grenzwert des gewünschten Wertebereichs.

Minimal- / Maximalwerte

Bei einigen Kriterien ist es sinnvoll, statt fester Zielwerte eher Minimal- oder Maximalwerte eingeben zu können. Dadurch ist die Berechnung der Unähnlichkeit nicht mehr symmetrisch. Legt man z.B. maximale Kosten fest, erscheint es wenig sinnvoll, bei einem billigeren Material den Abstand zur Kostengrenze als Unähnlichkeit zu berechnen. Vielmehr könnte man diese in einem solchen Fall als 0% definieren, um das Material in die nähere Auswahl zu nehmen. Ist das Material hingegen teurer als gewünscht, muss die Distanz zur Kostenobergrenze selbstverständlich als Unähnlichkeit beziffert werden.

Zwischenwerte bei Ordinalskalen

Speziell bei der Verwendung von grob abgestuften ordinalen Skalen kann es gewünscht sein, zunächst auch unscharfe Festlegungen (z.B. „eher seidenmatt als matt“) als Tendenz treffen zu können (vgl. Kapitel 6.2.3). Solche Angaben können als Zwischenwerte generiert und in der ordinalen Rangfolge als Zwischenrang berücksichtigt werden. Die Berechnung der Unähnlichkeit kann dann problemlos auch mit diesen Zwischenwerten nach der Formel für Ordinalskalen erfolgen.

Zusammenfassung

Für jedes der in die Bewertung einfließenden Einzelkriterien ist die Berechnung der Unähnlichkeit zu einem vorher definierten Idealmaterial möglich. Speziell das Kriterium „Farbigkeit“ erfordert dabei einen etwas höheren Berechnungsaufwand. Auch Sonderfälle aufgrund inhaltlicher Eigenheiten einiger Materialeigenschaften können durch Modifikation der Berechnungsverfahren erfasst werden.

Die in jedem Einzelkriterium vorgenommene Normierung der Werte in den Bereich zwischen 0% = „identisch“ und 100% = „maximal unähnlich“ ermöglicht in der folgenden Gesamtbetrachtung aller Kriterien die Aufrechnung auch inhaltlich höchst verschiedener Aspekte.

6.5

Berechnung der Gesamtunähnlichkeit

»A collection of entity descriptions may be conveniently represented by a set of tuples or a set of objects with appropriate attributes. [...] In general, the attributes cannot be expected to be homogeneous, and thus a dissimilarity coefficient for data tables has to combine attributes measured on arbitrary scales, to give an overall dissimilarity between pairs of object [...] a crucial ability if any possible real world data is to be considered.«

[Basalaj 2001, S.4]

Alle Materialalternativen sollen letztlich anhand nur einer einzigen Zahl „Unähnlichkeit zum Idealmaterial“ bewertet und in eine Rangfolge gebracht werden können. In die Berechnung dieses Gesamtwerts („general dissimilarity coefficient“) sollen alle ermittelten und normalisierten Einzelunähnlichkeiten unter Berücksichtigung ihres individuell vergebenen Gewichts einfließen. Zudem sollen auch KO-Kriterien und solche Kriterien, in denen die Datenlage nicht vollständig ist, das Ergebnis inhaltlich sinnvoll beeinflussen.

Der hier verfolgte Weg, die vielen Einzelwerte in einen Gesamtwert zu überführen, besteht darin, die einzelnen Kriterien als räumliche Dimensionen zu interpretieren. Jedes Material kann dann in allen seinen Eigenschaften als Punkt in diesem Raum abgebildet werden. Die multikriterielle Entscheidung der Materialwahl (vgl. Kapitel 1.2.3) wird also in einem multidimensionalen Raum abgebildet. Die Unähnlichkeiten in den Einzelkriterien entsprechen dann den räumlichen Distanzen in der jeweiligen Koordinatenrichtung, die Gesamtunähnlichkeit ergibt sich aus der räumlichen Gesamtdistanz.

Für den Umgang mit unvollständig vorliegenden Daten und KO-Kriterien müssen besondere Lösungen gefunden werden.

6.5.1

Ermittlung der Gesamtdistanz

»Eine Metrik ist eine mathematische Funktion, die je zwei Elementen eines Raums einen nicht negativen skalaren Wert zuordnet, der als Abstand der beiden Elemente voneinander aufgefasst werden kann.

Ein Raum ist eine Menge, deren Elemente in geometrischer Interpretation als Punkte aufgefasst werden. Ein metrischer Raum ist ein Raum, auf dem eine Metrik definiert ist.«

[Wikipedia 2007o]

Zwei Punkte in einem beliebigen Raum haben einen Abstand zueinander. In welcher Form dieser Abstand zweier Punkte begriffen und berechnet werden soll, wird durch die Metrik als mathematische Beschreibung eines Raums festgelegt. Sind die Punkte identisch, so ist der Abstand = 0.

Im Rahmen dieser Arbeit wird dem räumlichen Modell die euklidische Metrik zugrunde gelegt, da diese der menschlichen Wahrnehmung eines Raums entspricht und zudem aus üblichen Diagrammdarstellungen bekannt ist.

$$\delta_{ges,ij} = \left(\sum_{a=1}^q \delta_{a,ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Formel 6.13: Gesamtdistanz

$$\delta_{ges,ij} = \left(\sum_{a=1}^q w_a \delta_{a,ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}} ;$$

$$\sum_{a=1}^q w_a = 1$$

Formel 6.14: Gewichtete Gesamtdistanz

Die Gesamtdistanz zweier Elemente i und j entspricht dann der Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate aller Einzeldistanzen [Wikipedia 2007p].

Berücksichtigung der individuellen Gewichtung

Dadurch, dass alle Einzelwerte bereits auf einen identischen Bereich zwischen 0 und 1 normalisiert wurden, werden sie bereits gleichberechtigt zueinander bewertet. Damit die Einzeldistanzen aber auch entsprechend ihres prozentualen Anteils an der Gesamtentscheidung berücksichtigt werden, müssen ihre quadrierten Werte noch mit ihrem individuellen Gewichtungsfaktor multipliziert werden [Cox 1994, S.10].

Die Summe aller Gewichtungsfaktoren soll definitionsgemäß 100% sein (vgl. Kapitel 6.3.2).

Im Ergebnis liegt die Gesamtunähnlichkeit wiederum im Bereich zwischen 0 und 1. Inhaltlich bedeutet dies, dass zwei Materialien unter Berücksichtigung aller relevanten Eigenschaften als identisch betrachtet werden müssen, auch wenn sie in als „absolut unwichtig“ gekennzeichneten Eigenschaften unähnlich sind. Andersherum aber gelten sie auch bereits als „maximal unähnlich“, wenn sie in allen Kriterien, denen eine Wichtigkeit größer als 0 zugewiesen wurde, ebenfalls maximal unähnlich waren, obwohl sie in unwichtigen Kriterien vielleicht identische Werte aufweisen.

Der Wert zwischen 0% und 100% erlaubt also nur auf Basis der individuellen Gewichtung eine Einschätzung über das Verhältnis zweier Materialien zueinander. Der Grad der Unähnlichkeit ist also subjektiv bestimmt.

6.5.2

Umgang mit nicht vorliegenden Daten

Aus verschiedenen Gründen kann es sein, dass einzelne Daten bei einigen Materialien nicht vorliegen (vgl. Kapitel 6.1.2). In diesem Fall können im jeweiligen Kriterium keine Einzelunähnlichkeiten in der oben beschriebenen Form berechnet werden. Bei der Berechnung des Gesamtwerts kann darauf in unterschiedlicher Weise reagiert werden:

Wertung des Fehlens als Ausschlusskriterium

Eine prinzipielle Möglichkeit wäre, in der Bewertung nur solche Materialien zu berücksichtigen, deren Daten vollständig vorliegen. Hierbei sind wiederum nur die Kriterien zu berücksichtigen, denen zumindest eine geringe Wichtigkeit ($w > 0$) zugemessen wurde. Bei Kriterien, die als „absolut unwichtig“ eingestuft wurden, ist es dagegen an dieser Stelle irrelevant, wenn keine Daten vorliegen.

Dieses Vorgehen erscheint allerdings sehr nachteilig, da in der Praxis sicherlich zu vielen, insbesondere zu den innovativeren Materialien, erst lückenhafte Daten vorliegen. Diese würden allesamt aus

dem Blickfeld verschwinden, die gewünschte Innovation und Inspiration (vgl. Kapitel 2.3) würde so nicht unterstützt.

Geschätzte Werte

Eine andere Möglichkeit ist das Ersetzen der fehlenden Werte durch Schätzwerte. Vorgeschlagen werden z.B. auch Mittelwerte aus den Daten aller anderen Elemente [Everitt 1993, S.38].

Ein Vorteil dieses Wegs ist sicher, dass Materialalternativen mit lückenhafter Datenlage nicht im Vorhinein ausgeschlossen werden. Allerdings verfälschen solche Schätzwerte natürlich das Ergebnis - ein Material könnte z.B. gerade in diesem Kriterium eigentlich Extremwerte aufweisen, die bloß nicht im Datensatz erfasst sind.

Einführung eines binären Faktors

Eine weitere Lösungsmöglichkeit ist, die gewichteten Einzelkriterien mit einem weiteren Faktor zu multiplizieren, welcher den Wert 0 annimmt, wenn die Daten nicht vollständig vorliegen, andernfalls den Wert 1 [Basalaj 2001, S.4]. Da sich so die Gesamtgewichte nicht mehr zu 100% summieren, erfordert das Ergebnis für eine Vergleichbarkeit noch eine zusätzliche Normalisierung durch Division durch die Summe aller berücksichtigten Gewichte.

$$\delta_{ges,ij} = \left(\frac{\sum_{a=1}^q w_{a,ij} w_a \delta_{a,ij}^2}{\sum_{a=1}^q w_{a,ij} w_a} \right)^{\frac{1}{2}} ;$$

$$w_{a,ij} = \begin{cases} 1; & \text{vorh.} \\ 0; & \text{nicht vorh.} \end{cases}$$

Formel 6.15: Einführung eines binären Faktors

Einzelne Kriterien fallen somit einfach aus der Bewertung heraus, die Unähnlichkeit bezieht sich nur noch auf die vorliegenden Daten. Auch hier besteht die Gefahr, dass möglicherweise nicht dokumentierte Extremwerte vernachlässigt werden.

Direkte Angabe der Einzelunähnlichkeit

In Bezug auf die Materialwahl ist aus inhaltlichen Gründen letztlich auch vorstellbar, bei unvollständigen Datensätzen statt der dann nicht ermittelbaren Werte für die Einzelunähnlichkeiten einen individuellen Wert zwischen 0 und 1 direkt für diese Einzelunähnlichkeit vorgeben zu können. Dieser Wert würde dann - genauso wie die berechneten Distanzen - einfach mit dem entsprechenden Gewicht im Quadrat zum Ansatz gebracht.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise wäre, dass der Nutzer so die Güte seiner Ergebnisse individuell steuern könnte: Ein Wert um 0 wird diejenigen Materialien relativ besser bewerten, deren Daten unvollständig vorliegen, also vielleicht eher die innovativen Produkte. Diese würden so ins Blickfeld gelangen. Ein Wert nahe der 1 würde diese schlecht dokumentierten Materialien dagegen deutlich ungünstiger bewerten und so den Blick eher auf bekannte Produkte lenken.

6.5.3

Umgang mit KO-Kriterien

Die Kriterien, welche individuell als KO-Kriterium festgelegt wurden (vgl. Kapitel 4.2.1), müssen einfach nur erfüllt werden, damit ein Material überhaupt berücksichtigt werden kann. Sind jedoch alle

KO-Kriterien eingehalten, wirkt sich dies nicht auf die weitere Bewertung des Materials aus.

Überprüfung

Das Nichterfüllen eines KO-Kriteriums bedeutet, dass der geforderte Wert bzw. Wertebereich (vgl. Kapitel 6.4.3) nicht eingehalten wird. Dies drückt sich dadurch aus, dass die Einzelunähnlichkeit in diesem Kriterium einen Wert ungleich 0 annimmt. Ist der Wert dagegen 0, entspricht das Material in diesem Kriterium den Anforderungen.

Umsetzung

Die Abbildung von KO-Kriterien in der Berechnung der Gesamtunähnlichkeit kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass bei Nichterfüllen auch nur eines einzigen KO-Kriteriums die Gesamtunähnlichkeit auf 100% festgesetzt wird. Da der Fokus des Nutzers nur auf den am besten bewerteten Materialien liegt, fallen die „maximal unähnlichen“ natürlich aus der weiteren Betrachtung heraus.

Sind alle absolut geforderten Eigenschaften hingegen erfüllt, erfolgt die Bewertung wie oben beschrieben nur auf Grundlage der sonstigen, individuell gewichteten Eigenschaften.

6.6

Diskussion des Rankings

»Our sensory perception operates in specialized ways to serve our survival needs. Therefore, however we try to be objective in interpreting experience, our understanding is perceived and abstracted in a very subjective way, normally to serve our needs! Our survival seems to be a meaningful basis for devising purposes. Shared subjectivity in interpretation is actually what we mean by objectivity. Thus the hierarchies we form are objective by our own definition because they relate to our collective experience.«

[Saaty 1990, S.15]

Der ursprüngliche Ausgangspunkt der vorangegangenen Überlegungen war, dem Planer ein Instrument an die Hand zu geben, welches ihm ermöglicht, vorliegende Materialien in Bezug auf ein von ihm beschriebenes Idealmaterial zu beurteilen. Als Maßstab für die Bewertung wurde definiert, wie nahe ein Material diesem Idealmaterial „unter dem Strich“ kommt, wie unähnlich es diesem also unter Berücksichtigung einer individuellen Gewichtung aller Kriterien ist.

Anschließend wurden mehrere Verfahren aufgezeigt, wie notwendige Daten zu den Materialien aus heute bereits vorliegenden Quellen generiert werden können, wie der Planer darin unterstützt werden kann, sein Idealmaterial zu beschreiben sowie die individuelle Gewichtung der Kriterien zu finden und wie aus diesen Ausgangsdaten der gesuchte Wert „Gesamtunähnlichkeit zum Idealmaterial“ berechnet werden kann.

Das Material mit der kleinsten Gesamtunähnlichkeit entspricht seinem Idealmaterial am weitesten. In dieser Logik wäre also jenes Material das optimale und somit das vom Planer auszuwählende Material. Wie belastbar sind aber die Ergebnisse der Berechnung? Kann das objektiv beste Material auf die beschriebene Weise gefunden werden?

»Nach Stachowiak ist der Begriff Modell durch drei Merkmale gekennzeichnet:

1. *Abbildung.* Ein Modell ist immer ein Abbild von etwas, eine Repräsentation natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können.

2. *Verkürzung.* Ein Modell erfasst nicht alle Attribute des Originals, sondern nur diejenigen, die dem Modellschaffer bzw. Modellnutzer relevant erscheinen.

3. *Pragmatismus.* Pragmatismus bedeutet soviel wie Orientierung am Nützlichen. Ein Modell ist einem Original nicht von sich aus zugeordnet. Die Zuordnung wird durch die Fragen Für wen?, Warum? und Wozu? relativiert. Ein Modell wird vom Modellschaffer bzw. Modellnutzer innerhalb einer bestimmten Zeitspanne und zu einem bestimmten Zweck für ein Original eingesetzt. Das Modell wird somit interpretiert.«

[Wikipedia 2007q]

»To be realistic our models must include and measure all important tangible and intangible, quantitatively measurable, and qualitative factors.«

[Saaty 1990, S.1]

Belastbarkeit des Modells

Die äußerst komplexe Materialwahl in der Architektur (vgl. Kapitel 1.2) wurde als ein Entscheidungsprozess beschrieben, der in einem formalisierten Modell abgebildet werden kann. Wie jedes andere Modell auch kann dieses die Realität selbstverständlich nur verkürzt auf die vom Modellschaffer als relevant erachteten Attribute abbilden.

Bei der Aufstellung des Modells wurden zwangsläufig eine Reihe von subjektiven Annahmen getroffen: Zunächst hängt das beschriebene Modell von den in Betracht gezogenen Einflusskriterien und der daraus aufgestellten hierarchischen Struktur ab (vgl. Kapitel 5). Diese Auswahl könnte aber - wie dargestellt - auch weitere Kriterien oder eine andere Unterteilung aufweisen.

Anschließend wurde ein Weg gezeigt, wie die einzelnen Eigenschaften in Zahlwerte umgewandelt werden können, damit sie rechnerisch gegeneinander in Ansatz zu bringen sind. Dabei war es notwendig, per Definition Relationen zwischen den realen Begebenheiten und den zugehörigen Werten festzusetzen, die dann für alle Materialien gleich verwendet werden (vgl. Kapitel 6.1.3). Auch hierbei bleiben selbstverständlich gewisse Interpretationsspielräume offen.

Schließlich wurde als mathematischer Rahmen der Unähnlichkeitsberechnung eine Metrik festgelegt (vgl. Kapitel 6.5.1), die ebenfalls Einfluss nimmt auf die konkrete Form des Ergebnisses.

Alle diese - notwendigen - Annahmen sind aber in ihrer Auswahl und in ihrer gewählten Form fachlich begründet und in sich konsistent. Daher ist davon auszugehen, dass das Modell ein nachvollziehbares, plausibles - und somit nützliches - Ergebnis liefern wird. Würden die Annahmen - mit gleicher fachlicher Berechtigung - anders getroffen, dürfte dies das Ergebnis nicht grundsätzlich verändern, sondern letztlich nur graduell verschieben.

Instabilität der Rangfolge

Ein viel entscheidenderer Kritikpunkt am Ranking liegt systembedingt in der - durchaus gewollten - Gesamtsicht über alle Kriterien, also in der Reduktion des Auswahlkriteriums auf letztendlich nur einen einzigen Wert. Eine eindeutige Aussage, welches Material gewählt werden sollte, ist auf dieser Basis nämlich nicht möglich:

Vorstellbar sind z.B. zwei Materialien, die grundsätzlich verschiedene Eigenschaften aufweisen, im Ranking jedoch trotzdem als gleich geeignet bewertet werden. Dies kann z.B. dann vorkommen, wenn

das eine Material im Kriterium A gut, im Kriterium B hingegen schlecht abschneidet, das andere Material hingegen entsprechend andersherum.

Durch das gegenseitige Aufrechnen vieler Einzelwerte muss also davon ausgegangen werden, dass bei allen betrachteten Materialien eine Vielzahl nahezu als gleich gut bewertet werden.

Berücksichtigt man dann noch unvermeidbare Ungenauigkeiten in der Festlegung der Gewichtung (vgl. Kapitel 6.3), eine gewisse Bandbreite in der Ausformulierung dessen, was der Planer sucht (vgl. Kapitel 6.2), sowie die subjektive Definition, wie die Einzelkriterien in dem Modell angesetzt werden (vgl. Kapitel 6.1), wird man zu Recht die Exklusivität des am besten bewerteten Materials in Frage stellen. Eine normalerweise im Rahmen des Entscheidungsmodells an dieser Stelle durchzuführende Sensitivitätsanalyse, die die Reaktion der Rangfolge auf kleine Änderungen in den Gewichtungen näher untersuchen würde, käme zu dem Schluss, dass das Ergebnis des Bewertungsmodells im Detail keineswegs stabil ist.

Fazit

Innerhalb des vorgestellten Modells ist es nicht eindeutig möglich, für einen bestimmten Einsatzzweck das „optimale Material“ zu berechnen. Dies verwundert allerdings auch nicht sonderlich, da diese Problematik entsprechend auch bei manueller Auswahl existiert: Es gibt halt nicht nur das eine Material (oder sogar: Produkt), was sinnvollerweise eingesetzt werden sollte. Stattdessen wird jedes seine Vor- und Nachteile aufweisen.

Dennoch kann die vorgestellte Vorgehensweise - nicht nur wegen der Notwendigkeit einer konkreten und somit nachvollziehbaren Formulierung der Wünsche und Anforderungen an die Oberfläche - bereits in der bisher beschriebenen Form entscheidungsunterstützend wirken: Durch das vorgestellte Verfahren wurde nämlich eine automatische Negativselektion der eher ungeeigneten Materialien vorgenommen, die somit nicht mehr weiter berücksichtigt werden müssen. An der Spitze der Rangliste steht dagegen eine Vielzahl von Materialien, die allesamt relativ gut geeignet sein dürften. Im weiteren Verlauf des Auswahlprozesses braucht sich der Planer also nur noch auf diese zu konzentrieren.

Die zwangsläufig irgendwann folgende, abschließende Entscheidung für ein Material kann dem Planer nicht abgenommen, über die Berechnung hinaus aber noch durch eine geeignete Ergebnisdarstellung und damit verbundene Analyse- und Interpretationsmöglichkeiten erleichtert werden. Mögliche Schritte und Verfahren dazu werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

7

Zusätzliche Analyse des Ergebnisses

» [...] a "photograph like" picture of reality is not always [...] the best picture to explain the essence of the matter. This is why Picasso would take the elements of a traditional picture and move them about, change their orientation, change their color, or distort them in some manner. In doing so he would facilitate a new understanding of the subject. [...] Which picture is correct? Both are, just as Picasso's art is as valid as Rembrandt's.«

[Heady 2004, S.37]

Das im vorangegangenen Kapitel beschriebene Vorgehen lieferte eine Rangliste an möglichen Materialien sowie an deren Spitze eine Vielzahl von favorisierten Materialien, aus denen dann letztendlich gewählt werden kann.

Es wurde bereits erläutert, warum das Ranking hinsichtlich der Herausarbeitung eines einzigen optimalen Materials nicht absolut erfolgreich sein kann. Dies heißt aber auch, dass die gängige Präsentation des Ergebnisses, also eine feststehende und lineare Auflistung der in Frage kommenden Materialien - wie etwa bei bestehenden Material-Datenbanken üblich - nicht unbedingt sinnvoll ist, da dadurch eine feste Rangfolge suggeriert wird, darüber hinaus aber keine weitere Information über Zusammenhänge gegeben wird.

Eine den Sachverhalt der Ungenauigkeit angemessener repräsentierende Darstellung kann hingegen durch eine zusätzliche Aufbereitung der vorliegenden Daten mittels Multidimensional Scaling (MDS) erreicht werden (Kapitel 7.1). Die durch diesen Schritt gewonnene räumliche Präsentation möglicher Materialien erlaubt zudem ein besseres Verstehen der inhaltlichen Zusammenhänge (Kapitel 7.2), insbesondere, wenn die Darstellung nicht statisch bleibt, sondern noch durch interaktive Elemente dynamisch ergänzt und genutzt wird (Kapitel 7.3).

Das vorgestellte Verfahren wird abschließend hinsichtlich seiner Einsatzfähigkeit und Nützlichkeit im Rahmen der Materialsuche diskutiert (Kapitel 7.4).

7.1

Multidimensional Scaling

»Multidimensional Scaling refers to a class of techniques. These techniques use proximities among any kind of objects as input. [...] The chief output is a spatial representation, consisting of a geometric configuration of points, as on a map. [...] This configuration reflects the „hidden structure“ in the data, and often makes the data much easier to comprehend.«

[Kruskal 1978, S 7]

Mit Multidimensional Scaling steht eine in vielen Wissenschaftsgebieten einsetzbare Datenanalysetechnik zur Verfügung, die es ermöglicht, paarweise miteinander verglichene Elemente derart in

einer räumlichen Darstellung abzubilden, dass jeweils ähnliche Elemente nahe beieinander liegen, unähnliche dagegen weit entfernt [Young 1985].

Im Ergebnis können sich auf diese Weise Gruppen („cluster“, „neighbourhoods“) von ähnlichen Elementen bilden, die sich von anderen Gruppen wiederum untereinander ähnlicher Elemente deutlich abheben. Durch eine Interpretation dieser Struktur lassen sich - in den Rohdaten ansonsten verborgene - Zusammenhänge erkennen und somit weitere Erkenntnisse über die Elemente gewinnen.

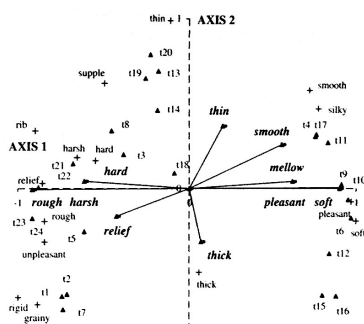


Abb. 7.1: MDS im psychometrischen Test

Die in der Berechnung verwendete Unähnlichkeit zwischen zwei Elementen muss dabei nicht zwangsläufig objektiver Natur sein, sondern kann auch allein auf einer subjektiven Einschätzung beruhen. MDS wird daher z.B. oft in psychometrischen Tests eingesetzt, bei denen die Kriterien, die in eine subjektiv wahrgenommene Ähnlichkeit einfließen, überhaupt noch nicht bekannt sind. Erst anhand der Clusterbildung und den daraus ableitbaren Hauptdimensionen lassen sich im Umkehrschluss die offenbar für die Wahrnehmung relevanten Kriterien herausarbeiten [Rao 1993, Picard 2003].

Gerade diese nicht zwingend notwendige Objektivität der Unähnlichkeiten ermöglicht aber auch den sinnvollen Einsatz von MDS zur weiteren Unterstützung der Materialwahl: Es wurde beschrieben, wie sich die Unähnlichkeit zwischen zwei beliebigen Materialien als Gesamtkoeffizient berechnen lässt (vgl. Kapitel 6.5). Das Ergebnis dieser Berechnung beruht auf Definitionen und Festlegungen, es ist daher mit gewissen Unsicherheiten und Ungenauigkeiten behaftet, also zwangsläufig nicht vollkommen objektiv.

Indem die Ermittlung der Unähnlichkeiten aber nachvollziehbar und fachlich begründet wurde, erscheint es nahe liegend, dass auch die räumliche Darstellung dieser Beziehungen mittels MDS eine Struktur ergibt, welche die Realität plausibel abbildet. Es wird daher erwartet, dass aus einer solchen Darstellung weitere Erkenntnisse über die berücksichtigten Materialien, aber auch über die vom Planer angesetzten Kriterien in ihrer jeweiligen Gewichtung gewonnen werden können.

7.1.1

Unterschiedliche Arten von MDS

Multidimensional Scaling interpretiert Unähnlichkeiten - egal wie diese ursprünglich ermittelt wurden - als räumliche Distanzen.

Alle Elemente werden dabei paarweise verglichen. Das Ergebnis lässt sich - wenn gewünscht zunächst für jedes Kriterium getrennt - in einer Unähnlichkeitsmatrix erfassen. Anschließend wird versucht, jedes untersuchte Element derart durch einen Punkt in einem niedrigdimensionalen Raum zu repräsentieren, dass die räumlichen Ab-

stände aller Punkte untereinander „bestmöglich“ den Unähnlichkeiten entsprechen.

Traditionell werden dabei metrische und nichtmetrische bzw. je nach Art der vorliegenden Daten Ratio-, Intervall- und Ordinal-Analysen unterschieden [Heady 2004, S.21]. Die Unähnlichkeiten zwischen zwei Elementen können auf Grundlage verschiedener Metriken berechnet werden, wobei die euklidische Metrik am weitesten verbreitet ist. Gewichtetes MDS („weighted MDS“ oder „individual differences scaling“ INDSCAL) ermöglicht zudem, einzelne Kriterien auch unterschiedlich stark in das Ergebnis einfließen zu lassen.

Alle diese Unterscheidungen beziehen sich jedoch allein auf die Art, wie „reale“ Eigenschaften der Elemente in Form von Unähnlichkeiten ausgedrückt und berechnet werden. Der im Rahmen dieser Arbeit zum Vergleich zweier Materialien herangezogene Gesamtunähnlichkeitskoeffizient (vgl. Kapitel 6.5) berücksichtigt dagegen bereits die verschiedenen Skalen und Gewichtungen. Die ermittelten Gesamtunähnlichkeiten können also direkt als räumliche Distanzen interpretiert werden.

7.1.2

Berechnungsziel Stressminimierung

Das Ziel von Multidimensional Scaling ist eine Abbildung, bei der die räumlichen Abstände aller Punkte „bestmöglich“ den Unähnlichkeiten der Elemente untereinander entsprechen.

Aufgrund von Ungenauigkeiten in den ermittelten Unähnlichkeiten, vor allem aber durch die Reduktion der Dimensionen, werden die räumlichen Distanzen des Ergebnisses jedoch nicht exakt den Unähnlichkeiten entsprechen. Diese Abweichung wird als „Stress“ (auch: „badness of fit“) bezeichnet. Die Suche nach der bestmöglichen Abbildung bedeutet demnach eine Minimierung des Stresses.

Definition von Stress

Es gibt mehrere verschiedene Varianten, wie der Stress konkret berechnet werden kann. Diese unterscheiden sich z.B. darin, in welcher Form Abweichungen einfließen bzw. zu welchen Werten die Abweichungen in Beziehung gesetzt werden. Einzelne Werte können auch durch einen Gewichtungsfaktor w_{ij} in ihrem Einfluss begrenzt werden, z.B. wenn diese nur mit einer großen Unsicherheit zu ermitteln waren.

$$\sigma_n = \frac{\sum_{i < j} w_{ij} (D_{ij} - d_{ij})^2}{\sum_{i < j} w_{ij} D_{ij}^2}$$

Formel 7.1: Standardisierter Stress

Eine übliche, oft verwendete Berechnungsvariante ist der „Standardisierte Stress“. Hier wird die Differenz D_{ij} zwischen ursprünglich vorliegender Unähnlichkeit und abgebildeter Distanz d_{ij} ins Verhältnis gesetzt zur ursprünglichen Unähnlichkeit und für alle betrachteten Elemente i und j aufsummiert [XLSTAT 2006].

»The choice of the badness measure is not always important. There are numerous comments in the literature that this aspect can be ignored with the expectation that the map will be unchanged. [...]The better the fit the more the choice of the badness measure is immaterial.«

[Heady 2004, S.33]

Je nach benutzter Definition von Stress kann sich eine leicht veränderte, wenn auch nicht grundsätzlich andere Lage der Elemente im Raum ergeben. Die Art der gewählten Stressberechnung wird sich dabei umso stärker auf das Ergebnis auswirken, umso schlechter die Abbildung insgesamt passt. Bei einer insgesamt guten Abbildbarkeit der Unähnlichkeiten wirkt sich die Form der Stressberechnung kaum noch aus.

Nichtlinearer Einfluss von Abbildungsfehlern auf den Stress

Zusätzlich zum obigen Ansatz, bei dem jeweils die prozentuale Abweichung zwischen Abbildung und Realität unabhängig von den Ausgangswerten berücksichtigt wird, kann der Einfluss der jeweiligen Abweichungen auf die Stressberechnung noch durch ein weiteres - diesmal jedoch von der Größe der Ausgangsunähnlichkeit abhängiges Abbildungsgewicht („mapping weight“) - gesteuert werden. Dadurch können z.B. Abweichungen bei kleinen Unähnlichkeitswerten deutlich höher bewertet werden als bei großen, also einen größeren Einfluss auf die Darstellung bekommen [Heady 2004, S.36]. Heady argumentiert, dass ein solches Vorgehen große Unähnlichkeiten wegen der oftmals unklaren Bedeutung oder unsicheren Festlegbarkeit der „maximalen Unähnlichkeit“ in ihrer Wirkung abmildern kann bzw. im Gegenzug durch die nichtlineare Interpretation der Unähnlichkeiten als räumliche Distanzen das Ergebnis überhöht. Dadurch kann dieses in bestimmten Fällen leichter interpretiert werden.

Der Frage nach der sinnvollsten Definition von Stress soll in dieser Arbeit nicht weiter nachgegangen werden, da hier eine exakte Analysierbarkeit des Ergebnisses nicht unbedingt notwendig ist. MDS soll stattdessen nur als ein prinzipielles räumliches Abbildungsverfahren benutzt werden. Der Prototyp (siehe Kapitel 8) arbeitet mit standardisiertem Stress und ohne Abbildungsgewichte.

7.1.3

Berechnungsverfahren

Die Berechnung selbst erfolgt in einem iterativen Verfahren, bei dem Elemente, die im Raum im Verhältnis zum Ausgangswert noch zu weit auseinander liegen, schrittweise aufeinander zu, die noch zu nahe beieinander liegenden dagegen voneinander weg bewegt werden. Diese Berechnung kann begrenzt werden durch eine fixe Anzahl an Durchläufen oder durch einen Schwellwert für die Veränderung des Stresses pro Schritt.

Für die eigentliche Berechnung sind mehrere Algorithmen veröffentlicht. Die im Prototypen (siehe Kapitel 8) verwendete Statistiksoftware XLSTAT verwendet den als schnell geltenden SMACOF-Algorithmus („Scaling by Majorizing a Convex Function“) [Cox 1994, S.156].

Die beschriebene Art der iterativen Berechnung bringt jedoch auch einige Schwierigkeiten mit sich:

Lokale Minima

Zu Beginn des Lösungsprozesses nehmen die Elemente eine Ausgangsposition ein, die entweder zufällig verteilt oder aber auch geometrisch vorgegeben werden kann. Die Berechnung der „bestmöglichen“ Lösung erfolgt dann derart, dass die Elemente Schritt für Schritt so verschoben werden, dass der Stress verkleinert wird. Es kann jedoch passieren, dass auf diesem Weg nicht die absolut beste Lösung erzielt werden kann, sondern nur ein lokales Minimum, bei dem jeder weitere Iterationsschritt nur wieder den Stress vergrößern würde. An dieser Stelle würde der Algorithmus die Berechnung abbrechen.

Ein Wiederholen der Berechnung auf Basis einer veränderten Ausgangsposition kann helfen, dieses lokale Minimum zu umgehen und so zu einer Lösung mit deutlich kleinerem Stress führen. Die MDS-Software Permap bietet dafür z.B. als Hilfe an, aus einer großen Zahl von automatisch wiederholten Durchläufen die jeweils beste abzuspeichern [Permap].

Relative Lage der Elemente zueinander

Jede berechnete Lösung positioniert die Elemente nur relativ zueinander, es kann also bei Wiederholung der Berechnung auf Basis einer anderen Zufallsverteilung absolut gleichwertige, jedoch zueinander verdrehte oder auch gespiegelte Lösungen geben. Solange das Ergebnis nur statisch betrachtet und interpretiert werden soll (siehe Kapitel 7.2), wirft dies keine Probleme auf. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit oder Vergleichbarkeit zu anderen Lösungen kann es jedoch sinnvoll sein, das gesamte Feld zu drehen oder zu spiegeln, was wiederum in den beim Prototyp verwendeten MDS-Programmen unterstützt wird.

»Prokrustes bot Reisenden ein Bett an. War der Wanderer groß, gab er ihm ein kleines Bett und hackte ihm die Füße ab, damit er hineinpasste. War er eher klein, gab er ihm ein großes Bett, zog ihn in die Länge und reckte ihm die Glieder auseinander, indem er sie auf einem Amboss streckte. Der Name Prokrustes bedeutet im Griechischen der Strecker.«

[Wikipedia 2007r]

Bei interaktiven Strategien (siehe Kapitel 7.3) mit einer Vielzahl von Neuberechnungen nach minimalen Änderungen der Eingabe spielt dagegen die relative Lageänderung einzelner Elemente für die Interpretation hingegen eine große Rolle. Die globale Ausrichtung des Gesamtfelds sollte daher möglichst erhalten bleiben. Dies kann dann durch die sogenannte Prokrustes-Analyse erreicht werden, bei der zwei Lösungen durch Dehnung bzw. Stauchung, Drehung sowie durch Spiegelung des gesamten Feldes derart aufeinander abgebildet werden, dass die Gesamtheit der Lageänderungen aller Elemente minimiert wird [Cox 1994, S.92].

Der Prototyp (siehe Kapitel 8) verschiebt allerdings aus Gründen der besseren Lesbarkeit das gesamte Feld derart, dass die Lage des als Referenzpunkt mit abgebildeten Idealmaterials immer konstant bleibt. Dieser Eingriff führt dazu, dass eine Prokrustes-Analyse nur die angebotenen Materialien, nicht aber das Idealmaterial berücksichtigen muss.

Berechnungsaufwand

Zur Aufstellung der ursprünglichen Rankingliste war es erforderlich, jedes Material nur mit dem vorher definierten Idealmaterial zu vergleichen. Die Zahl der durchzuführenden Unähnlichkeitsberechnungen steigt dabei linear zur Anzahl der betrachteten Materialien an.

Im Gegensatz dazu ist es beim Multidimensional Scaling notwendig, jedes berücksichtigte Material paarweise mit jedem anderen zu vergleichen. Allein die Zahl der notwendigen Berechnungen zur Aufstellung der Unähnlichkeitsmatrix wächst dabei - mit der Fakultät der Anzahl aller berücksichtigten Materialien - stark an. Anschließend müssen alle betrachteten Elemente noch in dem iterativen Verfahren mit einer Vielzahl von Durchläufen im Raum platziert werden, was eine Vielzahl weiterer Berechnungen erfordert.

Es kann daher aus Gründen der Performance notwendig sein, die Zahl der mit MDS betrachteten Materialien - insbesondere innerhalb eines interaktiven Systems mit schnell wechselnden Ausgangskonstellationen (siehe Kapitel 7.3) - zu begrenzen.

Allerdings sollen im Rahmen dieser Arbeit sowieso nur die am besten bewerteten Materialien mittels MDS näher untersucht und abgebildet werden, daher sollte dieser Einschränkung nicht allzu viel Gewicht beigemessen werden. Außerdem macht eine Limitierung auch aus einem anderen Grund Sinn: Das Ergebnis muss leicht erkennbar am Bildschirm dargestellt werden können, die Aufnahmekapazität des Menschen ist begrenzt. Zu viele gleichzeitig angezeigte Elemente könnten sich im Auswahlprozess vielleicht sogar negativ auswirken.

Der Prototyp (siehe Kapitel 8) berücksichtigt die 30 bestplatzierten Materialien sowie das Idealmaterial als Referenz.

7.1.4

Dimensionalität des Ergebnisraums

»The decision about the dimensionality to use for a given set of data is as much a substantive as a statistical question. Even if a good statistical method did exist for determining the "correct" or "true" dimensionality, this would not in itself suffice for assessing what dimensionality to use. Since MDS is almost always used as a descriptive model for representing and understanding the data, other considerations enter into decisions about the appropriate dimensionality, e.g., interpretability, ease of use, and stability.«

[Kruskal 1978, S.48]

Das Verfahren Multidimensional Scaling beruht darauf, dass eine größere Zahl an Kriterien bzw. Dimensionen in einem niedrigdimensionalen Raum abgebildet wird. Diese Reduktion impliziert geradezu, dass aus der Lage eines Elements im Raum nicht mehr eindeutig die ursprünglichen Werte eines einzelnen Kriteriums abgelesen werden können (im Gegensatz etwa zu vielen 2D-Diagrammen, wo einem Wert auf der X-Achse genau ein Wert auf der Y-Achse zugewiesen werden kann). Stattdessen sollen sich gerade in dieser Zusammenfassung vieler Kriterien neue Einblicke in ansonsten vielleicht verborgene Zusammenhänge ergeben.

Die Frage nach der sinnvollen oder richtigen Zahl an Dimensionen des Abbildungsraums darf daher nicht nur statistische Aspekte berücksichtigen, sondern sollte - insbesondere im Rahmen dieser Arbeit - die Handhabbarkeit des Ergebnisses und vor allem die Interpretierbarkeit in den Vordergrund stellen.

Handhabbarkeit

Das Ergebnis der MDS-Analyse soll letztlich am Monitor ausgegeben werden. Aus Gründen der Handhabung liegt daher ein 2D- oder 3D-Ausgaberaum nahe. Das 2D-Ergebnis kann direkt dargestellt werden. Ein 3D-Ergebnis würde in der Darstellung ebenfalls auf zwei Dimensionen reduziert. Die Ebene der perspektivischen oder parallelen Projektion lässt sich dabei - wie aus anderen 3D-Anwendungen bekannt - beliebig drehen, so dass die 3D-Struktur von allen Seiten betrachtet werden kann.

»So, one can say that MDS users have faith that their data has a significant hidden structure and that it can be substantially described using two (three, in rare cases) dimensions. No theory says that this must be so, but we proceed as if it is so. Fortunately, a vast amount of experience suggests it oftentimes is so.«

[Heady 2004, S.53]

Interpretierbarkeit

Die Frage, ob ein derart reduziertes Abbild dann jedoch inhaltlich noch „stimmig“ ist, lässt sich pauschal nicht beantworten, sie hängt im Einzelfall von der Ausprägung der konkreten Daten ab.

Kruskal weist in der Diskussion der Dimensionalität darauf hin, dass Kriterien, in denen die betrachteten Elemente sich nur unwesentlich unterscheiden, kaum eine eigene Dimension ausbilden [Kruskal 1978, S.60], diese das Endergebnis also nur gering beeinflussen. Gehören also z.B. alle dargestellten Materialien der Materialart „Holz“ an, so wirkt sich das - egal wie stark dieses Einzelkriterium in der ursprünglichen Bewertung gewichtet wurde - auf die Anordnung der Materialien im MDS-Ergebnis nicht aus.

Das bedeutet im Umkehrschluss, dass sich im Ergebnis ausbildende Dimensionen eher die Kriterien repräsentieren, in denen die Werte deutlich voneinander abweichen. Das Gesamtergebnis zeigt dem Nutzer auf diese Weise also vorzugsweise die Breite des Spektrums unterschiedlicher Lösungen innerhalb grundsätzlich jedoch ähnlicher Alternativen.

Welche Schlüsse darüber hinaus aus dem Ergebnis gezogen werden können, zeigt der folgende Abschnitt.

7.2

Statische Untersuchung

»When multidimensional scaling yields useful insights, these generally result from examining the configuration. One of the most important methods of examination is simply to look at the arrangement of points, where each point has been labeled to indicate which object it represents. There are systematic methods, however, which are sometimes used to supplement this direct examination.«

[Kruskal 1978, S.9]

Im Gegensatz zur linearen Ausgabe einer einfachen Rankingliste ist das Ergebnis des Multidimensional Scalings eine räumliche Abbildung. Obwohl das konkrete Aussehen wie beschrieben - abhängig vom Berechnungsverfahren oder dem Abbildungsraum - stark variieren kann, gewinnt der Nutzer eine Reihe zusätzlicher Informationen über die betrachteten Elemente sowie Einblicke in Zusammenhänge, die ihm vielleicht zunächst verborgen waren. Eine geeignete Darstellung kann dabei die Lesbarkeit und dadurch auch die Interpretierbarkeit des Ergebnisses deutlich erhöhen.

7.2.1

Analyse der Ergebnisqualität

»How well do we know what we know? [...] it is still true that MDS maps can be misinterpreted and artifacts can be mistaken for relationships. It is important to qualify a map before undertaking the painstaking effort of defining and interpreting groups and assigning dimensions.

Several map evaluation tests are given [...]. All of these tests have to do with the validity of the two-dimensional representation of multi dimensional data. They do not address the interpretation of the map.«

[Heady 2004, S.52]

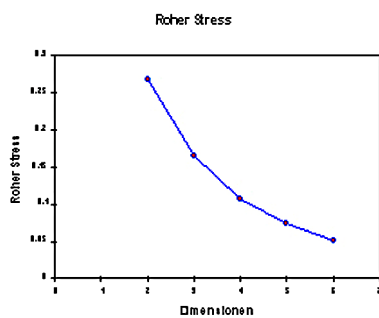


Abb. 7.2: Stress versus Dimension

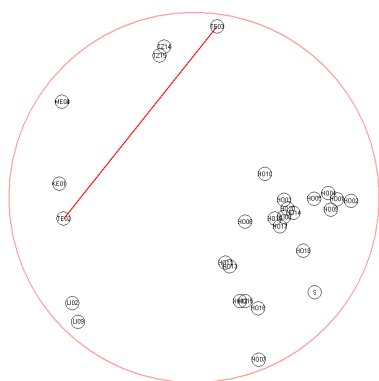


Abb. 7.3: Gestauchte Distanzen

Bevor das Ergebnis interpretiert wird, kann die Güte der Abbildung, also die Korrelation zwischen dem niedrigdimensionalen Ergebnis und der multidimensionalen Realität, durch entsprechende Analyseverfahren untersucht werden, damit eventuelle Missinterpretationen des Ergebnisses aufgrund ungünstiger Ausgangskonstellationen, lokaler Minima, ungünstiger Ausgaberräume etc. verhindert werden können.

Einige Verfahren, die von den im Rahmen des Prototyps (siehe Kapitel 8) eingesetzten MDS-Programmen (Permap bzw. XLSTAT) unterstützt werden, sollen hier kurz vorgestellt werden. Diese Untersuchungen beziehen sich dabei allesamt ausdrücklich nur auf die Qualität der Abbildung. Sie erlauben noch keine Aussage über inhaltliche Aspekte im Rahmen der Materialwahl.

Abbildung Stress versus Dimensionalität

Je mehr dominante Kriterien in das Ergebnis einfließen und je geringer die Anzahl der Dimensionen im Ausgaberaum ist, desto größer wird der Stress der jeweiligen Lösung sein. Eine übliche Analyseverfahren ist daher, die Entwicklung des Stresses in Abhängigkeit zur wachsenden Anzahl von Dimensionen der Abbildung zu untersuchen. Dies kann z.B. einfach in einem 2D-Diagramm dargestellt werden.

Sinkt das Stressniveau bei einer weiteren Erhöhung der Dimensionen des Ergebnisraums nicht mehr signifikant, macht diese Erhöhung kaum noch Sinn - die Dimension des Ergebnisraums wäre rein mathematisch gesehen ausreichend.

Gedehnte bzw. gestauchte Distanzen

Die Umsetzung aller paarweise ermittelten Unähnlichkeiten als Distanzen in einem niedrigdimensionalen Raum führt nahezu zwangsläufig dazu, dass einige Abstände zu groß, andere hingegen zu klein abgebildet werden. Die „bestmögliche“ Lösung minimiert immer nur die Summe aller Abweichungen. Es kann also sein, dass einige Distanzen besonders stark gedehnt oder gestaucht werden müssen, um letztlich ein gutes Gesamtergebnis zu erhalten.

Eine Visualisierung solcher extrem ungünstig abgebildeten Unähnlichkeiten (bezogen auf einen individuellen Grenzwert) z.B. durch Verbindungslinien in der Ergebnisdarstellung kann Fehlinterpretationen vermeiden helfen. Beide Fehlervarianten (Dehnung und Stauchung) können in der Ergebnisdarstellung getrennt abgelesen werden.

Shepard-Diagramm

Zur Überprüfung der Abbildungsqualität nicht nur einzelner Distanzen, sondern der des Gesamtergebnisses eignet sich ein separa-

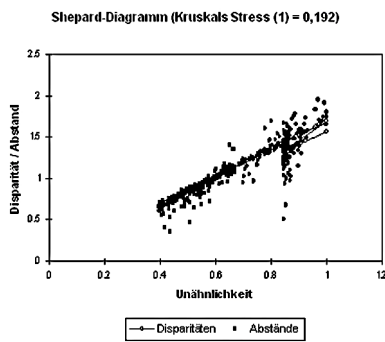


Abb. 7.4: Shepard-Diagramm

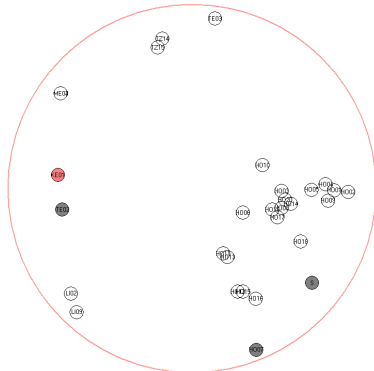


Abb. 7.5: Out-of-Plane-Tendenz

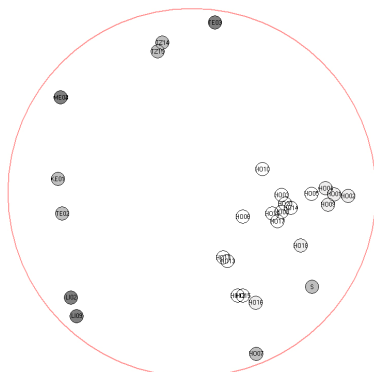


Abb. 7.6: Pareto-Plot

»Almost all experts in the field agree that MDS results should not pass or fail depending on some particular value of some particular statistic. The first consideration is, do your results have face value? This means that they should "make sense" to an intelligent but non-expert observer. The lack of slavish obedience to statistical tests works both ways. Weak statistics should not necessarily condemn meaningful results, and strong statistics should not be used to prop up frivolous results.

tes Diagramm, bei dem in einer 2D-Darstellung die räumlichen Distanzen in Bezug auf die Unähnlichkeiten abgetragen werden.

Bestenfalls sollten die Punkte des Diagramms dabei nahe einer Winkelhalbierenden liegen und die Standardabweichung klein sein. Liegen einzelne Punkte hingegen stark entfernt von der Diagonale, so zeigt dies, dass diese Unähnlichkeiten nicht gut abgebildet werden konnten, das dargestellte Ergebnis also bei diesem Element Abbildungsschwächen aufweist.

„Out-Of-Plane“-Tendenz

Häufen sich bei einem einzelnen Element mehrere solcher nur ungünstig abbildbaren Unähnlichkeiten, so ist dieses Element von einem hohen Stress geprägt, d.h. es ist im vorliegenden Abbildungsraum offenbar nicht sinnvoll abbildbar.

Die Lage des Elements im Raum entspricht demnach nicht den ihm innewohnenden Eigenschaften. Damit es nicht zu Fehlinterpretationen kommt, können solche Elemente daher gekennzeichnet werden.

Pareto-Plot

Wie aus anderen statistischen Verfahren bekannt, wird auch das Multidimensional Scaling-Ergebnis nicht durch alle Elemente gleichmäßig beeinflusst. Wenige Extremwerte können die Abbildung stärker beeinflussen als eine Vielzahl durchschnittlicher Werte (Pareto-Prinzip: 20% der Elemente erzeugen 80% des Ergebnisses).

Eine Berechnung des individuellen Beitrags jedes Elements zum Ergebnis der Darstellung kann helfen, solche extremen Elemente zu identifizieren. Eine entsprechende Markierung kann helfen, schon bei der ersten Betrachtung des Ergebnisses ein besonderes Augenmerk auf diese Elemente zu lenken.

Aussagekraft der Analyseverfahren

Die oben genannten Tests zeigen einige Wege auf, die Abbildungsqualität eines Multidimensional Scaling-Ergebnisses prinzipiell zu überprüfen und darzustellen.

Allerdings gibt es keine konkreten Grenzwerte, bei denen sich sagen ließe, dass ein solches Ergebnis nicht mehr gültig oder sinnvoll sei. Somit können die Tests nur Hinweise auf Unregelmäßigkeiten in der Abbildung oder Erklärungsmöglichkeiten bei auffälligen Ergebnissen geben - mehr nicht.

Viel entscheidender als die mathematische „Richtigkeit“ einer Abbildung, also der Exaktheit der Abbildung von unterliegenden Daten in einer räumlichen Struktur, sollte die Angemessenheit und Sinnhaftigkeit des Ergebnisses sein. Lassen sich aus der räumlichen

All results should pass the "adequacy, interpretability, stability, meaningfulness, reasonability, and generalizability" hurdles, and if they do then they should be accepted.

[Heady 2004, S.63]

Darstellung - egal wie „exakt“ diese ist - weitere Schlüsse über Zusammenhänge der Materialien oder über die eigenen Suchkriterien ziehen, so erfüllt diese bereits ihren Zweck, nämlich eine weitere Möglichkeit einer Unterstützung der Materialwahl.

7.2.2

Interpretation des Ergebnisses

Multidimensional Scaling platziert die untersuchten Elemente in einem räumlichen, und somit - aufgrund der ursprünglichen Interpretation von Unähnlichkeiten als Distanzen - auch in einem inhaltlichen Zusammenhang. Aus der räumlichen Darstellung lassen sich also Rückschlüsse über die den Elementen innewohnenden Eigenschaften ziehen. Die Interpretation des Ergebnisses wird dabei bereits deutlich erleichtert, wenn eine Darstellungsform gefunden wird, welche die Lesbarkeit der innewohnenden Struktur erhöht.

Ergebnisdarstellung

Die Beschränkung des Abbildungsraums auf zwei oder drei Dimensionen ermöglicht den Einsatz aus anderen Werkzeugen bereits vertrauter Visualisierungstechniken. Die einzelnen Elemente können z.B. statt als einfacher, nur mit einem Text ausgezeichneten Punkt im Raum durch eine verkleinerte Abbildung des Materials repräsentiert werden. Dies ermöglicht - insbesondere, da zumeist die Optik eines Materials eine große Rolle spielt - die unmittelbare Zuordnung eines Materials zu dieser Position.

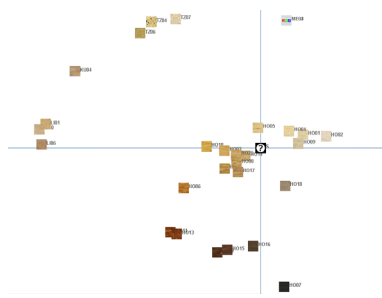


Abb. 7.7: 2D-Darstellung MDS

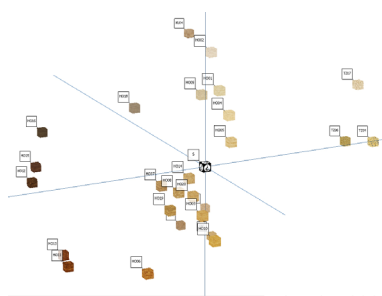


Abb. 7.8: 3D-Darstellung MDS

Während ein 2D-Ergebnis direkt am Monitor dargestellt werden kann, erfordert ein 3D-Ergebnis noch eine Reduktion um eine Dimension durch Projektion auf die Monitorebene. Dennoch kann eine räumliche Information vermittelt werden. Dazu bieten sich z.B. perspektivische Darstellungen mit dadurch bedingten Größenänderungen der Abbildungen an sowie zusätzliche Hilfsmittel wie Unschärfe der im Hintergrund liegenden Elemente oder das Einblenden von Clipping- oder Referenzebenen.

Fokus und Kontext

Kruskal weist darauf hin, dass MDS globale Strukturen besser abbilden kann als lokale [Kruskal 1978, S.46]. In der Betrachtung und Interpretation des Ergebnisses sollten daher weniger die Eigenschaften einzelner Elemente als vielmehr genau solche eher übergeordneten Strukturen im Gesamtergebnis im Vordergrund stehen.

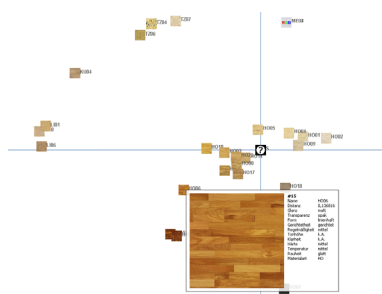


Abb. 7.9: Detailinformationen

Dennoch sollte natürlich jederzeit auch der Fokus auf einzelne Bereiche der räumlichen Darstellung oder auch auf ein einzelnes Element gelenkt werden können, also z.B. durch die Anzeige von Detailinformationen zu Eigenschaften eines einzelnen Materials. Ein derartiges Wechseln der Betrachtungsebene erleichtert die Inter-

pretation des Ergebnisses, da die Einzelemente immer in einen Gesamtkontext integriert werden können.

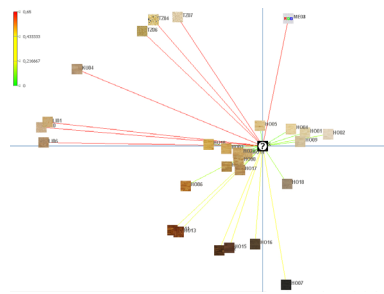


Abb. 7.10: Anzeige der Gesamtähnlichkeit

Unähnlichkeit zum Idealmaterial

In der ursprünglichen Berechnung der Gesamtunähnlichkeiten wurden alle Materialien zunächst in Bezug auf ein vom Planer formuliertes Idealmaterial bewertet. Es erscheint sinnvoll, auch dieses nicht real vorhandene Bezugsmaterial in die MDS-Analyse mit einzubeziehen. Das räumliche MDS-Ergebnis, welches ja immer nur relative Abstände abbildet, kann jeweils so im Raum verschoben werden, dass die Lage des Idealmaterials als Referenzpunkt über alle Suchdurchläufe konstant bleibt. Die weiter betrachteten Materialien ordnen sich dann immer rund um das Idealmaterial an. Auch die spätestens im Zuge der dynamischen Untersuchungen notwendig werdende Prokrustes Analyse (vgl. Kapitel 7.1.3) sollte dieses Idealmaterial als Fixpunkt berücksichtigen.

Auch wenn die Rankingliste als nicht absolut stabil bezeichnet wurde (vgl. Kapitel 6.6) kann es für die Interpretation des MDS-Ergebnisses hilfreich sein, die vorher ermittelten Gesamtunähnlichkeiten zum Idealmaterial anzugeben. Eine Visualisierung dieser relativen Werte, z.B. durch verschiedenfarbige Verbindungslinien zum Idealmaterial, ermöglicht eine Einschätzung der Alternativen auf den ersten Blick.

Hauptachsen / Dimensionen

Bei der Anordnung der Elemente im Ergebnis zeichnen sich Hauptachsen ab, die sich durch eine Regressionsanalyse auch rechnerisch ermitteln lassen [Kruskal 1978, S.35 ff]. Die relative Lage der Elemente zur jeweiligen Achse wird dabei durch einen Korrelationskoeffizienten beschrieben, der Aufschluss geben kann über die Stärke bzw. Relevanz dieser Achse.

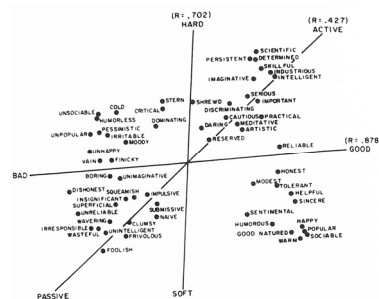


Abb. 7.11: Ermittlung von Hauptdimensionen

Diese Hauptachsen entsprechen dabei nicht zwangsläufig den Dimensionen des Abbildungsraums, sie stehen auch nicht unbedingt senkrecht aufeinander. Sie lassen sich aber inhaltlich als die eigentlichen Dimensionen der unterliegenden Daten interpretieren. Betrachtet man die Eigenschaften der Elemente in ihrer Entwicklung entlang einer solchen Achse, lassen sich diese möglicherweise auch konkret mit übergeordneten inhaltlichen Begriffen bezeichnen. Die Achsen geben so also Aufschluss über das mögliche Spektrum der betrachteten Elemente.

Clusterbildung

Während die Hauptachsen eher globale Zusammenhänge abbilden, beruhen Clusterbildungen auf lokalen Strukturen. Dadurch, dass ähnliche Elemente in räumlicher Nähe platziert werden, ergeben sich inhaltlich zusammenhängende Cluster („neighbourhoods“). Die Neigung zur Clusterbildung kann im Ergebnis gut visualisiert werden, indem die Elemente mit den jeweils kürzesten Distanzen zueinander mit Linien verbunden werden („Waern-Links“). Durch

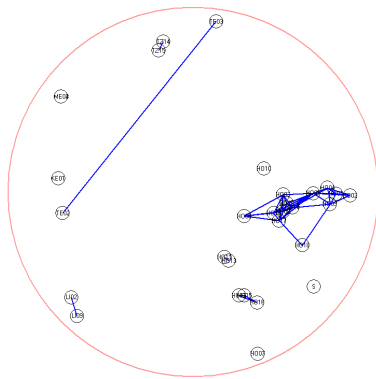


Abb. 7.12: Waern-Links

»Der Mensch ist in der Lage, die komplexen Zusammenhänge zu erkennen und Schlüsse daraus zu ziehen.«

[InfAR 2007]

Verschieben des Grenzwerts, bis zu dem die Linien noch angezeigt werden, zeichnen sich erst kleinräumige, dann immer größere Gruppen deutlich ab.

Insbesondere bei der Betrachtung von Clustern sollte aufgrund der ungünstigeren Abbildungsqualität bei lokalen Strukturen wiederum weniger die genaue Lage eines Elements innerhalb einer solchen Gruppe, sondern vielmehr die Gruppe als Muster innerhalb eines Gesamtzusammenhangs interpretiert werden. Cluster können aufgrund ihrer jeweiligen Gemeinsamkeiten charakterisiert werden und stellen in ihrer Gesamtheit in Bezug auf andere Gruppen jeweils grundsätzlich verschiedene Wahlalternativen dar.

Zusammenfassung

Der zusätzlich zur ursprünglichen Bewertung vorgenommene Vergleich einzelner Materialien untereinander und vor allem die räumliche Darstellung dieser Beziehungen mittels MDS liefert - im Vergleich zur linearen Liste eines Rankings - weitere Informationen über ansonsten vielleicht verborgene strukturelle Zusammenhänge innerhalb der betrachteten Materialien. Eine geeignete Darstellung dieser Strukturinformationen erleichtert die inhaltliche Interpretation des MDS-Ergebnisses durch den Nutzer.

7.3

Dynamische Untersuchung

»Perhaps the most significant recent acknowledgement of the fact that a user formulates a problem concurrently with solving it was the concept of dynamic queries [...]«

[Spence 2001, S.72]

Das Ergebnis des Multidimensional Scaling wurde bisher allein statisch betrachtet und interpretiert. Ein zusätzliches dynamisches Erkunden von Daten verspricht durch die Interaktion des Nutzers mit dem Werkzeug, also z.B. durch eine Variation der Eingangsparameter, die Materialwahl noch auf einer weiteren Ebene zu unterstützen. Zusammenhänge, die zur jeweiligen Bewertung und räumlichen Anordnung der Elemente geführt haben, können durch dynamische Verfahren leichter erkannt bzw. gezielt untersucht werden.

Die Grundlage jeder dynamischen Untersuchung ist eine vom Nutzer ausgehende Veränderung der Berechnungsgrundlage sowie das Beobachten der damit verbundenen Ergebnisänderung. Der Nutzer kann z.B. die Gruppe der Materialien, welche in die Analyse einbezogen werden sollen, durch Hinzufügen oder Wegnehmen einzelner Elemente manipulieren, oder aber er verändert punktuell seine formulierten Suchkriterien oder deren Gewichtung innerhalb einer „What-If-Strategie“. Als weitere Möglichkeit kann der Nutzer sich auch ganz von dem ursprünglich beschriebenen Idealmaterial lösen und durch Browsen seinen Fokus auf ein beliebiges anderes Material lenken.

Direkt nach jeder nutzerseitigen Modifikation wird die Berechnung erneut durchgeführt. Der Informationsgewinn liegt neben dem erneuten statischen Betrachten des dann modifizierten Ergebnisses vor allem in der Interpretation der dynamischen Veränderung an sich.

Welchen Erkenntnisgewinn dynamische Strategien mit sich bringen können und inwieweit solche Verfahren im Rahmen dieser Arbeit möglich sind, soll im Folgenden dargestellt werden.

7.3.1

Manipulation der Auswahl der Elemente

Aus Gründen des Berechnungsaufwands sowie der Übersichtlichkeit wurde die MDS-Analyse ursprünglich nicht auf alle vorliegenden Materialien, sondern nur auf eine begrenzte Gruppe von Elementen angewendet (vgl. Kapitel 7.1.3). Dies waren die am besten bewerteten Materialien, damit speziell diese näher untersucht werden konnten. Diese Gruppe der analysierten Materialien kann durch Wegnahme oder Hinzufügen weiterer Elemente manipuliert werden:

Elemente herausnehmen

Eine mögliche Modifikation ist das manuelle Herausnehmen einzelner Elemente aus der MDS-Analyse, vorzugsweise jener mit hohen Stresswerten (vgl. Kapitel 7.2.1). Indem solche nur ungünstig abbildbaren Elemente nicht weiter in der Berechnung berücksichtigt werden müssen, kann sich die Abbildungsqualität aller übrigen Elemente verbessern. Somit kann sich ein klareres und dadurch einfacher zu lesendes Ergebnis einstellen. Selbstverständlich bedeutet dies, dass das herausgenommene Element nun nicht mehr in Bezug zu den anderen gesehen werden kann.

Elemente hinzunehmen

In die andere Richtung geht das Einbeziehen zusätzlicher Materialien in die MDS-Analyse, vor allem solcher, die ursprünglich eher nicht so gut bewertet wurden. Dies muss im Umkehrschluss nicht unbedingt zu Lasten der Abbildungsqualität gehen, da diese dem Idealmaterial unähnlichen Materialien zwar in einem relativ großen Abstand zu diesem und zu den anderen positioniert würden, dieser jedoch auch ihrer Unähnlichkeit genau entspricht.

Durch das Einbinden solcher Referenzmaterialien lässt sich ein großräumigerer Bezugsrahmen erzeugen, so dass z.B. die relative Lage von Clustern in einem größeren Kontext deutlich werden kann. Auch wenn der Nutzer sich durch Browsen (siehe Kapitel 7.3.3) weit vom eigentlichen Idealmaterial entfernt hat, kann die Darstellung der relativen Lage des Idealmaterials als Orientierung sinnvoll sein.

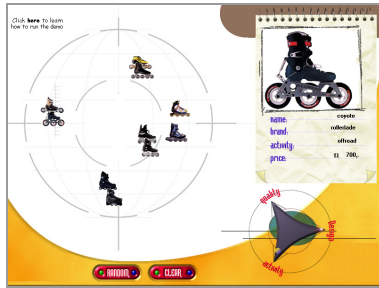


Abb. 7.13: MDS-Interactive

»The user can form the landscape by picking the most expressive samples while retaining the overview.«

[Stappers 2000]

Vollständig manuelle Auswahl der Elemente

Führt man diesen Gedanken weiter, so kann sogar die ursprüngliche Auswahl der bestbewerteten Materialien vollständig ignoriert und die Gruppe der mittels MDS untersuchten Materialien rein manuell festgelegt werden. Stappers und Pasman nutzen diese Herangehensweise z.B. als Technik, um zunächst eine Auswahl bestehender Produkte (Präzedenzfälle) in einem inhaltlichen Zusammenhang darzustellen, um anschließend aus der Konstellation der Elemente Rückschlüsse für die Entwicklung eines neuen Produkts ziehen zu können [Stappers 2000, Pasman 2003].

Generierung von passenden Elementen

Die in der Auswahl befindlichen und dargestellten Elemente spannen bereits einen Bezugsrahmen auf. Daher ist es aufgrund der dann vorliegenden Distanzen bzw. Unähnlichkeiten zu vorhandenen Elementen in umgedrehter Reihenfolge sogar möglich, nach Auswahl eines Orts innerhalb der räumlichen Anordnung nach einem Element zu suchen, welches dieser Position möglichst gut entspricht. Durch ein solches Vorgehen könnte eine Suche schrittweise vom groben Überblick bis hin zur Detailauswahl immer weiter eingegrenzt werden. In der Benutzung des von Stappers und Pasman vorgestellten Softwareprototyps (vgl. Abb. 7.13) zeigt sich aber auch deutlich, dass nicht immer ein Element gefunden werden kann, welches genau an diesem Ort läge. Daher kommt es als Reaktion teilweise zu deutlichen Veränderungen der ursprünglichen räumlichen Anordnung.

Zusammenfassung

Jede Manipulation der ursprünglich automatisch vorgenommenen Auswahl der berücksichtigten Elemente verändert das räumliche Ergebnis der MDS-Analyse und kann dadurch beim Nutzer neue Erkenntnisse hervorbringen. Der Eingriff kann entweder die Abbildungsqualität und somit die Interpretierbarkeit des Gesamtergebnisses verbessern helfen oder aber zusätzliche Informationen in Form eines veränderten Bezugsrahmens generieren. Im Extremfall kann sogar die ursprüngliche Auswahl ganz fallen gelassen und die Gruppe der durch MDS abgebildeten Elemente frei festgelegt werden. Ein solches Vorgehen - also das Anordnen einer frei vorgegebenen Gruppe von vorliegenden Materialien mittels MDS - könnte auch im Rahmen der Materialwahl durch das Darstellen von inhaltlichen Zusammenhängen hilfreiche Informationen liefern. Allerdings handelt es sich dann nicht mehr um eine nähere Untersuchung des ursprünglichen Ergebnisses.

Die Manipulation der Auswahl der Elemente ist ein Verfahren, bei dem eher das anschließende, statische Ergebnis als die dynamische Veränderung an sich im Vordergrund steht.

7.3.2

„What-If“-Strategie

Eine andere Untersuchungsmethode, die deutlich auf der Veränderung als solcher aufbaut, ist die Modifikation der Anfrage, also die Umformulierung des Idealmaterials, sowie die Beobachtung, wie die räumliche Konfiguration darauf reagiert. Die Reaktion sollte bei solchen dynamischen Untersuchungen möglichst in direktem zeitlichem Zusammenhang mit der Aktion erfolgen [Ware 2004, S.72].

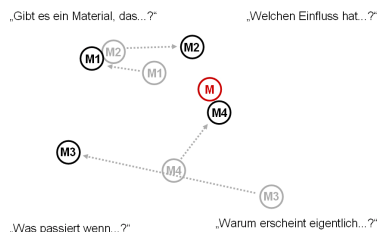


Abb. 7.14: What-If-Strategie

Das Ziel dieser Strategie ist weniger eine vollkommen unabhängige zweite Suche nach Materialien, auch wenn diese aufgrund etwaiger Unsicherheiten bei der ursprünglichen Anfrage auch sinnvoll sein kann, sondern vor allem das gezielte Durchspielen von „Was-wäre-wenn“-Szenarien („What-If“-Strategie). Wird dabei jeweils nur ein einzelnes Kriterium - entweder im gesuchten Wert oder aber in der ihm zugewiesenen Gewichtung - modifiziert, kann insbesondere der Einfluss dieses einen Kriteriums auf die Bewertung und Anordnung der Materialien untersucht werden.

Eine solche „What-If“-Strategie kann im Prinzip in zwei Richtungen verfolgt werden - beide haben ihre Berechtigung:

Beibehaltung der Gruppe der Elemente

Die Modifikation der Anfrage kann allein auf die ursprünglich untersuchten Elemente bezogen werden. Im Ergebnis ergibt sich dann nur eine andere räumliche Anordnung: einzelne Elemente wandern aufeinander zu, andere voneinander weg. Diese Bewegung lässt sich wiederum als Veränderung der Elemente auf inhaltlicher Ebene lesen. Elemente, die sich sehr stark bewegen, reagieren offenbar sehr sensibel auf das modifizierte Kriterium, werden also in ihrer Bewertung stark durch dieses beeinflusst.

Berücksichtigung aller Elemente

Andersherum können auf Grundlage einer modifizierten Anfrage auch alle anderen Materialien von Neuem bewertet werden. Dann wird es selbstverständlich vorkommen dass Materialien vollständig aus dem Kreis der berücksichtigten Elemente heraus fallen, andere dagegen neu hinzukommen.

Ein solches Vorgehen macht es möglich, sich vorübergehend von vielleicht zu sehr einschränkenden Kriterien zu befreien. Tauchen im Ergebnis besonders interessante, vorher jedoch verborgene Materialien auf, wird der Nutzer vielleicht die ursprünglich gemachten Vorgaben des Idealmaterials in diesem Kriterium noch einmal überdenken. „What-If“-Untersuchungen können somit - neben weiteren Erkenntnissen über die betrachteten Materialien - durchaus ein Feedback über die eigene Suche liefern.

Zusammenfassung

Das dynamische Durchspielen von „Was-wäre-wenn“-Szenarien ermöglicht ein gezieltes Untersuchen der inhaltlichen Beziehungen von Materialien untereinander sowie des Einflusses einzelner Krite-

rien auf das Ergebnis. Durch das Entdecken von Gemeinsamkeiten zwischen verschiedenen Materialien oder das Erkennen von sonstigen Mustern im Ergebnis können im Umkehrschluss Erkenntnisse über die ursprüngliche Suchanfrage, z.B. über vorher nicht gesehene Präferenzen, gewonnen werden.

7.3.3

Browsen

Eine offene Erkundungsstrategie stellt das Browsen durch die angebotenen Materialien dar. Hierbei wird anstelle des Idealmaterials ein neues Material als Referenz festgelegt. Anschließend werden alle Materialien in Bezug auf dieses erneut bewertet. Das Ergebnis zeigt dann diejenigen Materialien an, die diesem neuen Material - unter Beachtung der ursprünglichen Gewichtung - am ähnlichsten sind. Beim Browsen bewegt sich das Blickfeld also weg vom ursprünglich formulierten Idealmaterial. Browsen kann mehr oder weniger zielgerichtet angewendet werden.

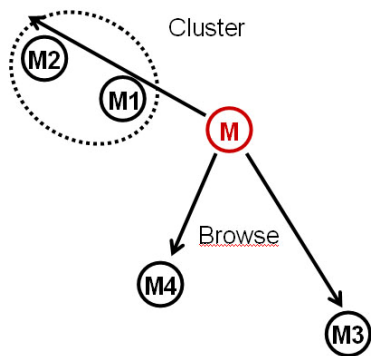


Abb. 7.15: Browsen

Lenkt der Planer seine Aufmerksamkeit bewusst auf ein bestimmtes Material bzw. auf eine Materialgruppe, die sich vorher als Cluster herauskristallisiert hat, kann das Browsen eher als eine vertiefende Untersuchungstechnik verstanden werden: Indem der Nutzer das fokussierte Material oder die Materialgruppe in einen neuen Zusammenhang stellt, kann er dieses unter einem anderen inhaltlichen Vorzeichen untersuchen.

Wiederholt er diesen Schritt jedoch mehrmals, kann dies letztlich dazu führen, dass er sich mehr und mehr vom eigentlich gesuchten Idealmaterial entfernt. Das Browsen wird dann weniger zielgerichtet, weniger analytisch angewendet.

Im Prinzip lässt sich durch Browsen der gesamte Datenbestand - unabhängig von weiteren Analysetätigkeiten - auch völlig frei erkunden. Da beim Browsen immer weitere - vielleicht auch unerwartete - Materialien ins Blickfeld gelangen, sind inspirierende Zufalls-treffer nahezu vorprogrammiert. Der Schwerpunkt einer solchen Vorgehensweise liegt dann eher auf der Suche nach Inspiration.

7.3.4

Protokollierung des Verlaufs

Im Verlauf des Materialwahlprozesses durchläuft ein Nutzer eine Vielzahl von Teilergebnissen, welche als Ausgangspunkt für eine neue Suche, als Zwischenschritt bei der weiteren Verfeinerung der Suche oder bereits als eine von mehreren möglichen Alternativen gelten können. Nachdem weitere Schritte vollzogen worden sind, sollte zu diesen Teilergebnissen zurückgekehrt werden können, um die Suche von dort aus in eine andere Richtung lenken bzw. um ein als möglich erkanntes Material in einem anderen Zusammenhang näher untersuchen zu können.

Werden die einzelnen Schritte, die der Planer bei seiner Suche gegangen ist, im Hintergrund als Verlauf („History“) aufgezeichnet, ist es jederzeit möglich, zu jedem einzelnen Schritt zurückzukehren. Darüber hinaus können zudem - durch Betrachten des Suchverlaufs - Schlüsse über das eigene Suchverhalten oder sonst vielleicht verborgene Vorlieben abgeleitet werden. Dieses Feedback könnte bei einer erneuten Suche z.B. zu einem zielgerichteteren Vorgehen führen.

7.3.5

Probleme dynamischer Verfahren bei MDS

Der Unterschied zwischen einer dynamischen Untersuchung und einer erneuten, von der ursprünglichen Suche unabhängigen, Suchanfrage besteht darin, dass es immer eine Verbindung zum jeweils letzten Ergebnis gibt. Dynamische Erkundungsstrategien erfordern daher - im Gegensatz zu statischen Analysen - eigentlich eine nahezu zeitgleiche, am besten synchron mit der Aktion des Nutzers eingehende Reaktion des Ergebnisses, insbesondere, wenn es auf die Veränderung als solche ankommt.

Da die mit Multidimensional Scaling abgebildeten Daten jedoch bei der Materialwahl zunächst in einem komplexen Bewertungssystem ermittelt werden und zudem die Abbildung in einer nichtlinearen Form geschieht, bringt die Anwendung dynamischer Verfahren einige Probleme mit sich:

Berechnungszeit

Jede Veränderung der Anfrage bedingt eine Neuberechnung der gesamten MDS-Konstellation. Beschränkt sich die dynamische Untersuchung dabei nur auf die ursprünglich gewählten Materialien, wird dies noch nicht zu einer nennenswerten Einschränkung in der Handhabbarkeit führen. Müssen jedoch jeweils alle Materialien auf einer veränderten Ausgangsbasis neu bewertet werden, kann sich die dafür notwendige Berechnungszeit auf eine flüssige Interaktion negativ auswirken. Ein direkter zeitlicher Zusammenhang zur Aktion des Nutzers ist dann nicht mehr unbedingt gegeben.

Keine harmonischen Bewegungen

Im Rahmen der „What-If“-Strategie interessiert insbesondere die relative Lageänderung, also der Weg, den einzelne Elemente nach einer Modifikation der Berechnungsbasis nehmen. Es erscheint daher naheliegend, die ursprüngliche Lage aller Elemente als Ausgangsposition für die iterative Neuberechnung der räumlichen Anordnung zu nehmen (vgl. Kapitel 7.1.3). Allerdings können die Elemente im neuen Ergebnis plötzlich eine deutlich andere Position als zuvor einnehmen, wenn dadurch der Stress der Gesamtlösung minimiert wird. Der Weg von der Ursprungsposition im Raum zur neuen Lage lässt sich also nicht unbedingt einfach durch eine Linie oder eine Kurve beschreiben, vielmehr kann es zu abrupten Sprüngen in der Bewegungsbahn kommen.

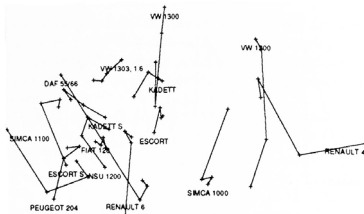


Abb. 7.16: Bewegungspfade bei dynamischen Änderungen

Um die Stärke und Richtung der Bewegung dennoch einschätzen zu können, lassen sich in der Darstellung die Start- und Endposition (und evtl. eine Zwischenposition), die aus einer mittleren Veränderung der Parameter errechnet wurde, mit einer Linie verbinden. Länge und Richtung dieser Linie zeigen dann - ungeachtet der Tatsache, dass dies nicht der „real“ zurückgelegte Weg des Elements war - die relative Lageänderung der Elemente an. Dieses grafische Hilfsmittel erleichtert so die Interpretation der inhaltlichen Veränderung.

Ein- und Auswandern von Elementen

Berücksichtigt man in der „What-If“-Strategie nicht nur die vorher betrachteten, sondern alle vorhandenen Materialien, können Elemente aus der Abbildung durch MDS hinausfallen bzw. neu hinzukommen. Das Gleiche gilt in verstärktem Maße für das Browsen, bei dem ja ganz bewusst neue Materialbereiche erkundet werden sollen. Jedes wegfallende oder neu hinzukommende kann die gesamte Anordnung des Feldes vollständig verändern. Zwar wurde mit der Prokrustes-Analyse ein Verfahren vorgestellt, wie eine Gesamtveränderung der Lage aller Elemente in der Summe minimiert werden kann, dieses Verfahren kann jedoch nur auf diejenigen Materialien angewendet werden, die sowohl im ursprünglichen wie auch im neuen Ergebnis vorliegen. Die Lage der neu hinzugekommenen Elemente muss dann in Relation zu diesen bestimmt werden.

Zusammenfassung

Multidimensional Scaling ist eine Technik, welche vorliegende komplexe Sachverhalte in einer nichtlinearen Form abbildet. Eine Schwierigkeit im Rahmen einer dynamischen Untersuchung kann daher bereits aus dem notwendigen Berechnungsaufwand erwachsen. Das Prinzip der Abbildung und die Beschränkung auf wenige Elemente bedingt zudem, dass jede nutzerseitige Modifikation eine nicht gleichförmige und dadurch wenig vorhersehbare Reaktion hervorrufen kann. Jede Veränderung des Ergebnisses sollte daher genau untersucht werden, damit es zu keiner Fehlinterpretation kommt.

7.4

Diskussion des Multidimensional Scaling

»Die wichtigste Regel zum Fällen von Entscheidungen ist, dass die Entscheidung um so leichter fällt, je kleiner die Unsicherheit ist - jede Entscheidung fällt leichter, wenn mehr Informationen zum Entscheidungsbedarf vorliegen.«

[Wikipedia 2006d]

Der ursprünglich verfolgte Ansatz, Materialien allein in Bezug zu einem vorab formulierten Idealmaterial zu bewerten und so das „optimale“ Material berechnen zu können, hatte zu einem nicht stabilen oder eindeutigen Ergebnis geführt (vgl. Kapitel 6.6). Die Art der ursprünglich vorliegenden Daten, die maximal mögliche Genau-

igkeit in den Nutzereingaben und die Reduzierung vieler Einzelkriterien auf einen einzigen Gesamtwert reichen offenbar noch nicht für eine eindeutige Entscheidung aus.

Da aber davon ausgegangen wird, dass der Nutzer sich umso sicherer für ein Material entscheiden kann, je breiter er über dieses, aber auch über mögliche Alternativen informiert ist, wurde durch Verwendung von Multidimensional Scaling eine weitere Informationsmöglichkeit auf einer dem Einzelmaterial übergeordneten Ebene angeboten. Die damit einhergehende - sinnfällig begründete - räumliche Anordnung der am besten bewerteten Materialien dient dazu, inhaltliche Zusammenhänge zwischen den als denkbar eingestuften Materialien herausarbeiten zu können sowie ein Feedback über die eigene Suche zu erlangen.

*»tasks that need to be supported:
 Overview: Gain an overview over the entire collection
 Zoom: Zoom in on items of interest.
 Filter: Filter out uninteresting items.
 Detail-on demand: Select an item or group and get details when needed.
 Relate: View relationships among items.
 History: Keep a history of actions to support undo, replay, and progressive refinement.
 Extract: Allow extraction of subcollections and of the query parameters.«*

[Shneiderman 1998, S.524]

Um dieses zusätzliche Informationsangebot analysieren und interpretieren zu können, lassen sich unterschiedliche statische oder dynamische Verfahren anwenden. Die von Shneiderman formulierten Techniken des Zugangs zu Informationen [Shneiderman 1998, S.524] sind dabei in der Gesamtheit der beschriebenen Verfahren enthalten:

Die räumliche Darstellung als solche gibt nicht nur einen Überblick über den Datenbestand, sondern zeigt bereits Beziehungen zwischen einzelnen Elementen auf. Einzelne Elemente können aus der Betrachtung herausgenommen oder aber hinzugefügt werden. Zu jedem Material können Detailinformationen abgerufen werden, zudem besteht die Möglichkeit, durch Browsen einen Wechsel des Fokus hin zu anderen Materialien oder Materialgruppen vorzunehmen. Eine vom Nutzer frei zusammengestellte Auswahl von Materialien kann in beliebigen Kriterien unter Berücksichtigung einer individuellen Gewichtung untersucht werden.

Wird Multidimensional Scaling zusammen mit den darauf aufbauenden Untersuchungstechniken wie beschrieben eingesetzt, erlaubt dies mit dem wechselseitigen Verfolgen der vier prinzipiell möglichen Auswahlstrategien Analyse, Synthese, Ähnlichkeit und Inspiration (vgl. Kapitel 2.3) eine große Methodenvielfalt bei der Suche nach einem Material.

Prinzipbedingt gibt es bei Multidimensional Scaling niemals eine „eindeutige“ oder „richtige“ Darstellung der abzubildenden Realität, daher muss jedes mittels MDS generierte Ergebnis individuell betrachtet und interpretiert werden. Versteht ein Nutzer jedoch, die richtigen Fragen zu stellen und das Ergebnis richtig zu deuten, kann Multidimensional Scaling viele zusätzliche Informationen über die betrachteten Materialien, über ihre Gemeinsamkeiten und Unterschiede, sowie über sein eigenes Suchverhalten preisgeben.

8**Prototyp**

Zur Demonstration der Umsetzbarkeit der vorgeschlagenen Bewertungsstrategie, zur Untersuchung der Aussagekraft der Ergebnisse sowie zur regelmäßigen eigenen Überprüfung der zunächst theoretisch formulierten Unterpunkte im Laufe der Erarbeitung der Lösungsstrategie wurde das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren mit reduziertem Umfang in einem einfachen Softwareprototyp umgesetzt.

Dieser mit relativ einfachen Programmier-Techniken erstellte Prototyp (Kapitel 8.1) beschränkt sich dabei auf eine rein manuelle Eingabe allein der gewünschten sinnlichen Kriterien und ihrer individuellen Gewichtung. Er greift auf einen vorgegebenen Datensatz von mehr als 100 Materialien zu, deren Eigenschaften vorab manuell ermittelt oder nach Erfahrungswerten festgelegt wurden (Kapitel 8.2). Nach der Eingabe der gewünschten Werte für das gewünschte Idealmaterial (Kapitel 8.3) werden die zur Verfügung stehenden Materialien in Bezug auf die Gesamtähnlichkeit zu diesem Idealmaterial bewertet und so in eine Reihenfolge gebracht (Kapitel 8.4). Die 30 bestbewerteten Materialien können anschließend per Multidimensional Scaling räumlich dargestellt und näher untersucht werden (Kapitel 8.5).

In einem abschließenden Beispielszenario werden die in der Arbeit vorgestellten Methoden anhand des Prototyps durchgespielt und in ihren Auswirkungen interpretiert (Kapitel 8.6).

8.1**Verwendete Software**

Die Umsetzung und Programmierung des Prototyps erfolgte - vor allem mangels tieferer Kenntnisse in anderen Programmiersprachen, aber auch wegen der Möglichkeit des ständigen Überblicks über alle relevanten Zwischenergebnisse - primär innerhalb eines Tabellenkalkulationsprogramms [Excel]. Dieses wurde für die notwendigen Farbraumumrechnungen durch ein Add-In zur vereinfachten Berechnung von Matrix-Funktionen erweitert [Matrix].

Die Handhabung des durch diese Plattform nicht sehr eleganten Prototyps wird allerdings etwas vereinfacht durch ein automatisches Abarbeiten mehrerer aufeinanderfolgender Schritte beim Auslösen der Berechnung sowie durch die Erzeugung eines hilfreichen visuellen Feedbacks bei der Eingabe. Hierzu wurden mehrere kleine Makros in Scriptsprache geschrieben [Visual Basic].

Die Ergebnismatrix des paarweisen Vergleichs der 30 bestbewerteten Materialien lässt sich anschließend zum einen in die freie MDS-Software Permap exportieren und dort per Multidimensional Scaling in einer einfachen zweidimensionalen Darstellung untersuchen

[Permap], zum anderen werden die zwei- und dreidimensionalen Koordinaten für die Abbildung der Materialien zunächst innerhalb der Tabellenkalkulation per MDS durch den Statistikaufsatz XLSTAT berechnet [XLSTAT] und erst in einem weiteren Schritt durch ein deutlich umfangreicheres Programm zur Datenvisualisierung XLSTAT-3DPlot in verschiedenen Arten dargestellt [3DPlot].

8.2 Materialdaten

Bei der Zusammentragung der Materialdaten für die Nutzung im Prototyp wurden allein Produkte aus dem Anwendungsbereich Fußboden berücksichtigt. Dabei wurde auf ein breites Spektrum an Materialarten, aber auch auf eine gewisse Bandbreite an Individuen innerhalb einer Materialart Wert gelegt. Konkret finden folgende Materialarten in angegebener Anzahl bei den Mustern Verwendung: 20 x Holz, 10 x Keramische Fliesen, 9 x Kunststoff, 18 x Linoleum, 4 x Metall, 7 x Stein, 20 x Teppich, 20 x Terrazzo.

Bei der Sammlung wurde zwar auf Produktdatenblätter verschiedener Herstellerwebseiten zurückgegriffen, allerdings nur, um mit realistischen Bildern verschiedener Oberflächen arbeiten zu können. Ein konkreter Verweis auf das entsprechende Produkt oder ein sonstiger Rückgriff auf die Produktdaten war - auch aus Gründen der Unvollständigkeit oder Uneinheitlichkeit der angebotenen Daten - nicht vorgesehen. Es handelt sich daher letztendlich um fiktive Produkte.

Ermittlung der Farbwerte

Von jedem Material liegt ein Pixelbild in der Größe von 512 x 512 Pixeln vor. Die Bilder decken einen repräsentativen Bereich der Oberfläche, allerdings nicht eine jeweils gleich große Fläche ab. Da die Bilder jedoch an dieser Stelle nicht automatisch ausgewertet werden sollten (vgl. Kapitel 6.1.2) und zudem eine Weiterverwendung im CAD-System nicht vorgesehen ist, wirkt sich dies nicht weiter im Ergebnis aus.

Die RGB-Bilder wurden ohne weitere Farbkorrekturen auf die vier als dominant wahrgenommenen Farben reduziert. Diese wurden zusammen mit ihren prozentualen Anteilen am Gesamtbild ausgelesen und manuell nach einem einheitlichen Algorithmus in vier gleichwertige Farbpakete im $L^*a^*b^*$ -Farbraum umgerechnet (siehe Anhang B.1). Für jede der vier Farben wird zudem der Bunttonwinkel ermittelt (vgl. Kapitel 6.4.2).

Festlegung der weiteren Kennwerte

Alle anderen Materialeigenschaften wurden - auf der vordefinierten Skala für das jeweilige Kriterium - nach Augenschein und nach Erfahrungswerten festgelegt. Einige Werte, die nicht ganz offensichtlich und „objektiv“ bestimmbar waren, wurden bewusst als



Abb. 8.1: Datenbasis über 100 Materialien

„nicht vorhanden“ offengehalten. Da dies auch bei einem automatischen Auslesen vorkommen kann, bietet der Prototyp die Möglichkeit, auf solche nicht vorhandenen Daten zielgerichtet zu reagieren (vgl. Kapitel 6.5.2).

Für eine leichtere Lesbarkeit des Ergebnisses wurde abschließend jedes Element mit einem Kurznamen codiert, der aus zwei Buchstaben für die Materialart und einer zweistelligen Zahl zur Durchnummerierung besteht.

8.3 Eingabe

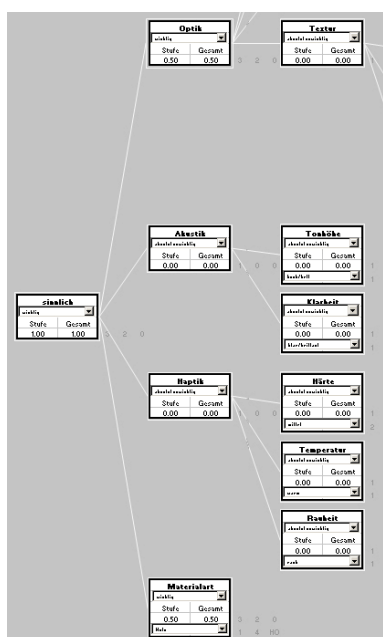


Abb. 8.2: Eingabemaske

Die Eingabe der gewünschten Eigenschaften des Idealmaterials erfolgt nur manuell, die automatische Übernahme von Daten aus CAD-Systemen wurde nicht berücksichtigt, weil sie zur Untersuchung der reinen Bewertungsstrategie nicht relevant ist. Allerdings gibt es die Möglichkeit, im Rahmen einer dynamischen Untersuchung des MDS-Ergebnisses ein anderes in den Fokus genommenes Material mit seinen jeweiligen Materialeigenschaften als Referenzmaterial zu übernehmen. Die Rückkehr zum ursprünglich definierten Idealmaterial ist jederzeit möglich.

Die verschiedenen Kriterien, die bei der Materialwahl berücksichtigt werden sollen, wurden bereits in einer hierarchisch aufgebauten Baumstruktur angeordnet (vgl. Kapitel 5.2). Die Eingabemaske des Prototyps bildet diese Struktur entsprechend ab, so dass die Ebene der jeweiligen Eingabe im Zusammenhang zu allen anderen Kriterien gesehen werden kann. Für jedes Kriterium lassen sich der gewünschte Wert und das Gewicht eingeben. Sowohl der ermittelte Gewichtungsfaktor der Hierarchiestufe als auch der Faktor innerhalb der Gesamtbetrachtung werden angezeigt. Weiterhin lässt sich eingeben, welcher Wert für die Unähnlichkeit angesetzt werden soll, wenn in einem Kriterium die vorliegenden Materialdaten lückenhaft sind (vgl. Kapitel 6.5.2).

Eingabe der gewünschten Materialeigenschaften

Die angebotenen sinnlichen Kriterien sind - mit Ausnahme der Farbigkeit - in ordinalen bzw. bei der Materialart in nominalen Daten abgebildet (vgl. Kapitel 6.1.1). Dies ermöglicht, die denkbaren Ausprägungen des Kriteriums in einem Kombinationsfeld zur Auswahl vorzugeben und so sicherzustellen, dass nur prinzipiell vorgesehene Werte eingegeben werden können.

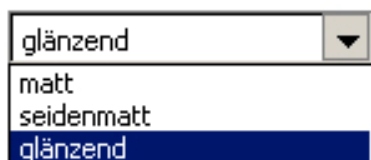


Abb. 8.3: Auswahlfeld

The interface consists of four vertical sliders on the left and two tables on the right. The sliders are labeled 'Farbe', 'Bunton', 'Helligkeit', and 'Buntheit'. Each slider has a dropdown menu for importance (e.g., 'wichtig', 'absolut unwichtig') and three input fields for 'Stufe', 'multipl.', and 'Gewicht'. The 'Farbe' slider is set to 'wichtig' with values 1.00, 0.75, and 0.75. The other sliders are set to 'absolut unwichtig' with values 0.00. The right side features four tables for 'Farbe 1' through 'Farbe 4' and a 'Resultierende' table. Each color table has columns for H, S, V, Anteil, L, a, b, and %. The 'Resultierende' table lists four packages with their respective H, S, V, and L values.

Farbe 1			
H	S	V	Anteil
40	50	95	50
L	a	b	%
85	9	49	50.0%

Farbe 2			
H	S	V	Anteil
50	30	90	25
L	a	b	%
87	-3	31	25.0%

Farbe 3			
H	S	V	Anteil
40	90	50	25
L	a	b	%
42	16	53	25.0%

Farbe 4			
H	S	V	Anteil
240	40	50	0
L	a	b	%
35	15	-32	0.0%

Resultierende			
85	9	49	Paket 1
85	9	49	Paket 2
87	-3	31	Paket 3
42	16	53	Paket 4

Abb. 8.4: Farbeingabe

Die Eingabe der gewünschten Farbwerte dagegen ist deutlich aufwendiger gestaltet: Es ist möglich, bis zu vier verschiedene Farben im der Wahrnehmung und dem Sprachgebrauch nahekommenden HSV-Farbsystem einzugeben (vgl. Kapitel 6.2.2). Dabei können den Farbwerten auch unterschiedliche Anteile (also auch ein Anteil von 0 bei gewünschter Einfarbigkeit) zugewiesen werden. Auf diese Weise ist es möglich, bei Bedarf auch nach mehrfarbigen oder gemusterten Materialien zu suchen und dennoch z.B. eine vorwiegende Farbe festzulegen.

Um dem Nutzer ein visuelles Feedback zu geben, werden über ein einfaches Script die eingegebenen Farbwerte in ihren Mengenteilen als gestapeltes Balkendiagramm dargestellt. Dies geschieht - um auch eine Einzelbetrachtung der Kriterien zu ermöglichen - getrennt als resultierende Farbe und als reiner Bunton (100% Sättigung und 100% Helligkeit) sowie in neutralen Graustufenskalen codiert als Helligkeitswert und als Buntheitswert.

Für die weitere Berechnung werden die vier Farben nach dem gleichen Algorithmus wie die Werte der zur Auswahl stehenden Materialdaten in vier gleichwertige Farbpakete im L*a*b*-Farbraum umgerechnet (siehe Anhang B.1) und als Resultierende zur Überprüfung angezeigt.

Eingabe der Gewichtung

Die Eingabe der Kriteriengewichtung erfolgt über eine fünfteilige Skala („absolut unwichtig“ = 0% - „etwas wichtig“ = 25% - „wichtig“ = 50% - „sehr wichtig“ = 75% - „absolut wichtig“ = 100%). Für die Ermittlung der relativen Stufengewichte (also innerhalb der gleichen Kriterienstufe) werden diese mittels Division durch die Summe aller eingegebenen Einzelgewichtungen normalisiert, so dass ihre Gesamtsumme 1 ergibt. Eine Ausnahme besteht, wenn alle Kriterien „absolut unwichtig“ sind, dann ist die Summe 0. Der bei der Berechnung der Gesamtähnlichkeit angesetzte Gewichtungsfaktor der Einzelkriterien ergibt sich anschließend durch Multiplikation dieser relativen Stufengewichte mit den relativen Stufengewichten aller höheren Ebenen (vgl. Kapitel 6.3.4).

The image shows a dropdown menu with a downward arrow in the top right corner. The menu is open, showing five options: 'absolut unwichtig', 'etwas wichtig', 'wichtig', 'sehr wichtig', and 'absolut wichtig'. Below the menu, the text 'KO-Kriterium' is visible.

Abb. 8.5: Eingabe der Gewichtung

Die Eingabe der Gewichtungen wird auf inhaltliche Unstimmigkeiten untersucht. So kann es z.B. sein, dass ein Oberkriterium als „absolut unwichtig“, ein dazugehöriges Unterkriterium hingegen als „wichtig“ eingestellt wurde. Es ist ja durchaus gewollt, dass es möglich ist, mit nur einem Schritt beim Oberkriterium die Gewichtung mehrerer Unterkriterien zu verändern. Durch Multiplikation mit der Wichtigkeit 0 werden dann auch alle Unterkriterien „absolut unwichtig“.

Andersherum kann der Nutzer aber auch versuchen, einem Oberkriterium eine gewisse Wichtigkeit zu geben, selbst wenn alle Unterkriterien „absolut unwichtig“ sein sollen. Obwohl auch dieser Fall mathematisch durch erneute Normalisierung aller ermittelten Ein-

zelgewichte (diese summieren sich zu einem Wert kleiner als 1) zu lösen ist, macht eine solche Eingabe inhaltlich wenig Sinn. Wenn ein Oberkriterium eine gewisse Wichtigkeit erlangen soll, dann sollte auch spezifiziert werden können, welche der Unterkriterien gemeint sind.

Inhaltliche Unstimmigkeiten in beiden Richtungen werden daher - auch wenn sie mathematisch gelöst werden - als Hinweis in der Eingabemaske farblich hervorgehoben.

Bei den Kriterien, die keine weiteren Unterkriterien aufweisen und somit sinnvoll als KO-Kriterium gelten können (außer den Farbwerten, da hier die möglichen Werte in zu feinen Abstufungen vorliegen), ist die Auswahlkala um diesen Punkt erweitert. Wird nun eines der Kriterien als absolutes KO-Kriterium festgesetzt, dann wird dies gesondert festgehalten und das relative Gewicht auf 0 gesetzt, um die Summenbildung der anderen Kriterien nicht zu beeinflussen (vgl. Kapitel 6.3.1).

Regelmäßigkeit		
wichtig		
Stufe	multipl.	Gewicht
0.67	0.13	0.17
regelmäßig		

Abb. 8.6: Anzeige aller Gewichte

Für jedes Kriterium werden zur Kontrolle das Stufengewicht und das durch Multiplikation der Werte aller Hierarchiestufen ermittelte Gesamtgewicht angezeigt. Bei Kriterien auf der untersten Stufe wird zudem das (bei inhaltlich unstimmgigen Eingaben vom multiplizierten Gewicht abweichende) normalisierte Gesamtgewicht angegeben, welches dann auch in die weiteren Berechnungen einfließt.

8.4

Berechnung

Die Berechnung der Unähnlichkeiten der Materialien in Bezug auf das Idealmaterial laufen im Rahmen der normalen Tabellenkalkulation simultan zu jeder Änderung in der Eingabe. Der Zeitaufwand für die Durchführung der Berechnungen ist noch relativ hoch, da eine Vielzahl von Zwischenwerten ermittelt werden muss und die Algorithmen nicht auf Laufzeitverkürzung optimiert wurden.

Das Bewerten bzw. das eigentliche Ändern der Rangfolge sowie die darauf folgende Berechnung der räumlichen Anordnung im Rahmen des Multidimensional Scaling erfolgt durch ein Script erst nach einem gesonderten Auslösen der Berechnung. Dieses getrennte Vorgehen spart nicht nur etwas Rechenzeit, sondern vereinfacht vor allem den manuell vorzunehmenden Export der notwendigen Daten in die nachfolgende Visualisierungssoftware zu einem definierten Zeitpunkt.

Der Ablauf der Berechnung bei den Einzelwerten

In einem ersten Schritt werden alle Materialien in Bezug auf das Ideal- bzw. das gewählte Referenzmaterial bewertet.

Dazu findet die Berechnung der Unähnlichkeit zunächst in jedem Einzelkriterium statt (vgl. Kapitel 6.4). Sie gestaltet sich, da vorwie-

gend ordinale und nominale Daten mit einem festen Wertebereich verarbeitet werden müssen, sehr einfach (vgl. Kapitel 6.4.2). Nur für die Werte im Zusammenhang mit der Farbbigkeit muss etwas mehr Aufwand betrieben werden, da hier jeweils vier gleichwertige „Farbpakete“ paarweise miteinander in Bezug auf ihre Unähnlichkeit verglichen werden (siehe Anhang B.1). Aus den 24 möglichen Kombinationen wird die insgesamt „günstigste“ ermittelt, d.h. jedes Paket des einen Materials ist mit je einem des anderen Materials verbunden und die Summe der Unähnlichkeiten wird minimiert. Anschließend muss der so ermittelte Abstand noch normalisiert werden. Hierzu wurde vorab nach dem gleichen Algorithmus wie die sonstigen Farbraumumrechnungen der Maximalabstand zweier Farben ermittelt (vgl. Kapitel 6.4.2). Das Ergebnis ist - wie in jedem anderem Einzelkriterium auch - ein Wert zwischen 0 und 1.

Berücksichtigung der KO-Kriterien

Alle derart ermittelten Einzelwerte werden quadriert und mit dem Gewichtungsfaktor des jeweiligen Kriteriums multipliziert, um sie anschließend zur Gesamtunähnlichkeit aufsummieren zu können (vgl. Kapitel 6.5). Zugleich wird aber auch überprüft, ob eine der betrachteten Eigenschaften als KO-Kriterium festgesetzt wurde. Wenn ja, wird bei Nichterfüllung eines geforderten Kriteriums der Wert der Gesamtunähnlichkeit stattdessen direkt auf 1 (also „maximal unähnlich“) gesetzt. Das Material fällt dann aufgrund der schlechtest möglichen Bewertungszahl aus der weiteren Betrachtung der am besten bewerteten Materialien heraus.

Paarweiser Vergleich von Materialien

Soll das Ziel der Berechnungen zunächst das Herausfinden der besten Materialien sein, so wird die Liste der untersuchten Materialien auf Basis der berechneten Gesamtunähnlichkeiten in eine neue Reihenfolge gebracht. Anschließend werden die 30 Materialien mit den kleinsten Werten (inklusive des Referenzmaterials) nach den gleichen Verfahren wie zuvor jeweils paarweise miteinander verglichen.

Werden in einem zweiten Schritt jedoch gezielte „What-If“-Untersuchungen durchgeführt, so kann statt einer vollständigen Neubewertung aller Materialien nach Änderung der Eingabe auch allein eine Neuberechnung der Unähnlichkeiten nur für die bereits zuvor „bestplatzierten“ 30 Materialien vorgenommen werden (vgl. Kapitel 7.3.2).

Die Berechnungen der Unähnlichkeiten untereinander beziehen sich allerdings nicht mehr auf den insgesamt möglichen Wertebereich innerhalb des Kriteriums, sondern nur noch auf den durch diese 30 Materialien abgedeckten Bereich. Es kann also sein, dass alle Materialien in einem Einzelkriterium identisch sind (z.B. „opak“), die Unähnlichkeit aller zueinander also 0 ist. Diese Eigenschaft wirkt sich dann nicht weiter auf die Ermittlung der Gesamtunähnlichkeiten aus, das Unterscheidungskriterium wird für die räumliche Anordnung irrelevant (vgl. Kapitel 7.1.4). Andersherum können kleine

Unterschiede innerhalb eines Kriteriums aber auch eine deutlich höhere relative Relevanz als bei der ursprünglichen Bewertung aller Materialien erlangen. Insbesondere bei dem Einfluss der Farbwerte ist dies zu betrachten, da das theoretisch mögliche Farbspektrum durch kaum ein Material ausgeschöpft werden dürfte.

Multidimensional Scaling

Die resultierenden Werte der paarweise ermittelten Gesamtähnlichkeiten werden abschließend in einer Unähnlichkeitsmatrix zusammengestellt, die die eigentliche Grundlage bietet für die weitere Berechnung der räumlichen Anordnung im Rahmen des Multidimensional Scalings.

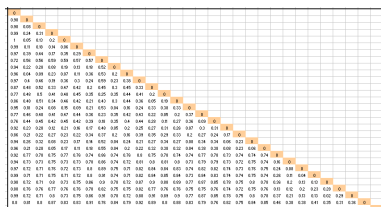


Abb. 8.7: Unähnlichkeitsmatrix

Diese Ergebnismatrix wird einerseits - mit einigen für die weitere Verarbeitung notwendigen Schlüsselwörtern versehen - als reines Textfile aus der Tabelle exportiert und dann als Input in Permap genutzt. Die eigentliche MDS-Berechnung läuft anschließend extern in Permap, sie kann dort modifiziert oder ausgehend von einer anderen Startkonstellation wiederholt durchgeführt werden.

Andererseits wird die Matrix durch den Statistikaufsatz XLSTAT direkt innerhalb der Tabellenkalkulation mittels MDS analysiert, die räumlichen Koordinaten für eine 2D- und eine 3D-Abbildung liegen als Ergebnis anschließend in Tabellenform vor. Auch dieses Ergebnis kann auf Basis einer anderen Startkonstellation erneut berechnet werden. Die jeweiligen Koordinaten werden anschließend so verschoben, dass das Referenzmaterial immer im Ursprung liegt.

Beide Berechnungsprogramme bieten verschiedene Definitionen von Stress zur Auswahl an. Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sollten die gleichen Einstellungen, also z.B. „Normalisierter Stress“ (entspricht „Stress“ in Permap) gewählt werden (vgl. Kapitel 7.1.1). Beide Programme nähern sich zunächst ausgehend von einer Zufallskonfiguration in einem iterativen Verfahren dem Ergebnis an.

8.5 Ausgabe

Die beiden zur Ausgabe benutzten Programme Permap und XLSTAT-3DPlot unterscheiden sich vor allem in der Art und Qualität der Darstellung, aber auch in den angebotenen Analysemöglichkeiten. Permap ist allein für die Durchführung von Multidimensional Scaling ausgelegt, d.h. die Berechnung der räumlichen Anordnung erfolgt direkt im Programm und die Analysewerkzeuge sind speziell auf MDS ausgerichtet. Allerdings ist die grafische Ausgabe sehr einfach gehalten. XLSTAT-3DPlot dagegen ist eine Software speziell zur Visualisierung von beliebigen Daten, die z.B. aus einer Tabelle eingelesen werden können. In welcher Form diese Daten letztlich dargestellt werden, lässt sich sehr individuell festlegen. Dafür sind die Analysemöglichkeiten eher begrenzt.

Zur Überprüfung der vorgeschlagenen Vorgehensweise bei der Materialwahl lohnt es daher zumeist, beide Ausgabemöglichkeiten in die Betrachtung mit einzubeziehen.

Visualisierung in Permap

Zur Arbeit in Permap wird die Unähnlichkeitsmatrix als txt-File übergeben. Die iterative Suche nach der besten Lösung kann durch die Bewegung der Elemente verfolgt werden. Die Elemente selbst werden allerdings nur durch Kreise dargestellt, die mit einem Label, also z.B. dem Kurznamen des Materials, versehen werden können.

Die Darstellung ist zudem immer nur zweidimensional, auch wenn drei- oder vierdimensionale MDS-Berechnungen unterstützt werden. Diese Ergebnisse werden dann in einer nicht vom Nutzer beeinflussbaren Projektion auf die Abbildungsebene dargestellt.

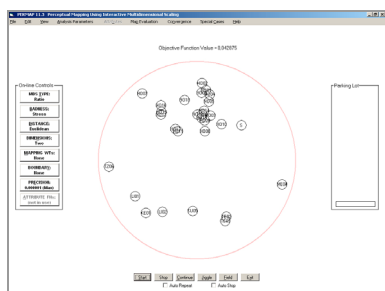


Abb. 8.8: Visualisierung MDS in Permap

Da die Lage der Elemente in der Abbildung nur relativ zueinander ermittelt wird und eine Prokrustes-Analyse (vgl. Kapitel 7.1.3) nicht implementiert ist, lässt sich die gesamte 2D-Abbildung für eine bessere Lesbarkeit drehen, verschieben, zoomen oder spiegeln.

Es ist zudem möglich, einzelne Elemente manuell in der Anordnung zu verschieben und auf dieser veränderten Basis mit der iterativen Berechnung fortzufahren. So können einerseits lokale Minima (vgl. Kapitel 7.1.3) aufgelöst werden, andererseits kann durch dieses Vorgehen eine Lösung herbeigeführt werden, die das für die Evaluation gewünschte Zusammenspiel beider Ansätze ermöglicht, indem die Anordnung dem Ergebnis aus XLSTAT entspricht.

Neben einer Unterstützung der benannten statischen Analyseverfahren (vgl. Kapitel 7.2) bietet Permap durch die interne Berechnung die Möglichkeit, einzelne Materialien temporär aus der Berechnung herauszunehmen (vgl. Kapitel 7.3.1). Das Hinzufügen einzelner zusätzlicher Materialien hingegen müsste bereits innerhalb der Tabellenkalkulation geschehen, da ja dort die Unähnlichkeitsmatrix berechnet wird.

Visualisierung in XLSTAT-3DPlot

Der zweite im Rahmen des Prototyps vorgesehene Weg ist, dass die räumlichen Koordinaten der darzustellenden Materialien durch XLSTAT bereits in der Tabellenkalkulation ermittelt werden. Diese Angaben werden anschließend mit den Daten zu den sonstigen Materialeigenschaften ergänzt und zur Darstellung an XLSTAT-3DPlot übergeben.

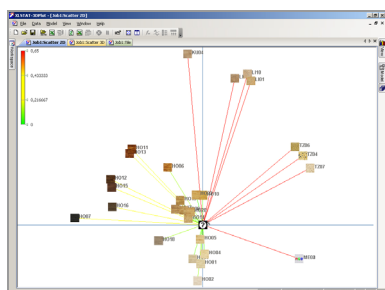


Abb. 8.9: Visualisierung MDS in XLSTAT-3DPlot

In der 2D-Darstellung kann dann dort die Lage der Elemente zueinander nicht mehr geändert werden, nur ein Zoomen und Verschieben der Ansicht ist möglich. Die 3D-Ansicht bietet zudem die Möglichkeit, das gesamte Feld für eine bessere Lesbarkeit aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten. Der Ursprung der Anordnung wird jeweils mit einem Koordinatenkreuz gekennzeichnet. Die einzelnen Materialien werden nicht nur mit ihrem Namen, sondern auch durch kleine Texturen repräsentiert. Eine farblich codierte

Verbindungsline zeigt die Gesamtähnlichkeit jedes Materials in Bezug auf das Referenzmaterial. Beim Anwählen eines Materials werden in einem Popup-Fenster die aus der Tabellenkalkulation mitgegebenen Zusatzinformationen angezeigt. Diese visuellen Hilfen erleichtern den schnellen Überblick, das vorgesehene Springen zwischen Detailinformation und Kontext ermöglicht zudem eine Untersuchung des Ergebnisses auf unterschiedlichen Ebenen.

8.6

Beispiel

Als Abschluss der Beschreibung des Prototyps wird die Suche nach einem Material in einem konkreten Beispiel durchgespielt. In mehreren aufeinander aufbauenden Szenen wird dabei zum einen das Vorgehen eines fiktiven Nutzers nachvollzogen, zum anderen werden innerhalb der Szenen noch einmal die in der Arbeit vorgestellten Methoden und Problemfelder am konkreten Beispiel in den jeweiligen Auswirkungen verdeutlicht. Je nachdem, welches Programm die jeweilige Aussage besser unterstreicht, wird für die Erläuterung die Ausgabe aus XLSTAT-3DPlot oder die aus Permap herangezogen. Ausgangspunkt ist die auf 0 zurückgesetzte Suchmaske (alle Kriterien „unwichtig“).

Die im Folgenden gezeigten Screenshots dienen zunächst der Übersicht. Zur besseren Lesbarkeit auch im Detail sind sie am Ende der Arbeit noch einmal deutlich größer dargestellt (Anhang B.2).

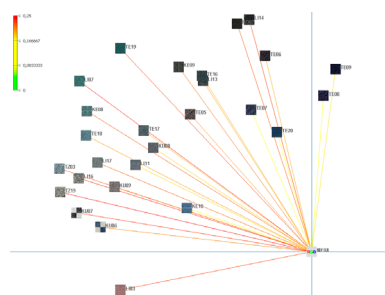


Abb. 8.10: Szene 01 - 01

Szene 1: Suche allein nach gewünschter Farbe

In einem ersten Schritt will der Nutzer nur nach Materialien suchen, die einer von ihm gewünschten Farbe entsprechen. Den genauen Farbton hat er vielleicht bei der Ausarbeitung eines Farbkonzepts in einer anderen Software ermittelt.

Er trifft also für das Kriterium Farbe die Einstellung „absolut wichtig“. Dabei wird ihm angezeigt, dass er der Farbigkeit und den optischen Eigenschaften noch keine Wichtigkeit zugewiesen hat. Für die Farbigkeit wählt er daher ebenfalls „absolut wichtig“, für die Optik dagegen nur „sehr wichtig“, da er davon ausgeht, im weiteren Verlauf des Auswahlprozesses noch weitere, ebenfalls wichtige Kriterien ins Spiel zu bringen. Das ermittelte Gewicht für Farbe ist 100%. Zunächst sucht er nach mittelblauen Materialien und stellt als einzige Farbe HSV 240-40-50 ein.

Im Ergebnis bekommt er 30 verschiedene Materialien (inkl. seines Idealmaterials) angezeigt, die farblich ungefähr seiner Suche entsprechen. Das Spektrum reicht allerdings - da nicht so viele blaue Materialien in der Datenbank sind - von fast violett bis zu sehr dunkelblau. Direkt auf dem Idealmaterial werden zwei Metalloberflächen angeordnet, bei denen davon ausgegangen wird, dass sie in allen Farben lackiert werden können. Der Farbabstand ist daher 0.

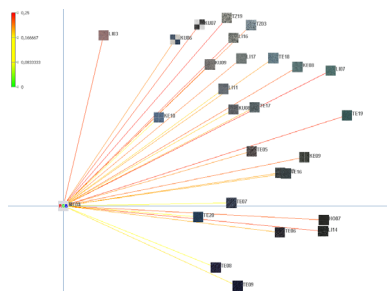


Abb. 8.11: Szene 01 - 02

Relative Lage

Führt der Nutzer bei gleicher Eingabekonstellation eine Neuberechnung durch, wird er üblicherweise ein anders aussehendes Ergebnis bekommen.

Die absolute räumliche Lage der Materialien wird auf Basis zufälliger Ausgangspositionen iterativ ermittelt. Es wird in keinem der beiden Werkzeuge eine Prokrustes-Analyse durchgeführt. Das Ergebnis kann daher von Ausgabe zu Ausgabe gedreht, gespiegelt oder verschoben sein (vgl. Kapitel 7.1.3). Darüber hinaus sind auch weitere, ebenfalls „richtige“ Lösungen möglich (vgl. Kapitel 7.4).

Der Nutzer darf also bei der Interpretation des Ergebnisses nur die relative Lage der Materialien zum Idealmaterial heranziehen.

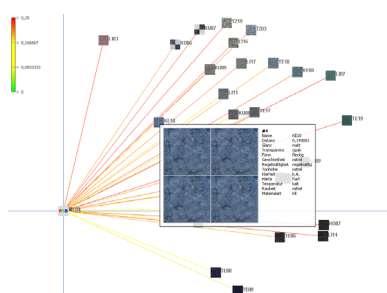


Abb. 8.12: Szene 01 - 03

Fokus und Kontext

Die einzelnen Materialien werden durch Multidimensional Scaling vor allem in ihrem Kontext angezeigt. Um sich über einzelne Materialien näher informieren zu können, ist es zweckmäßig, sich weitere Detailinformationen anzeigen zu lassen.

Hier sind es neben einer deutlich größeren Pixelbilddarstellung des Materials alle in der Datenbank eingetragenen Materialeigenschaften. Diese wurden zusammen mit den räumlichen Koordinaten aus der Tabellenkalkulation an XLSTAT-3DPlot übergeben.

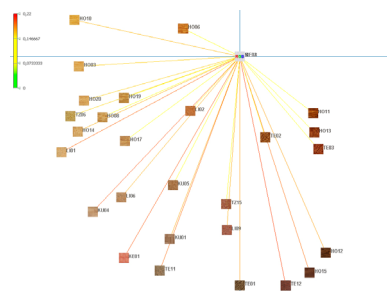


Abb. 8.13: Szene 02 - 01

Szene 2: Veränderung der gewünschten Farbe

In einem vollständig integrierten Gesamtprozess der Materialwahl (vgl. Kapitel 3.4) hätte der Nutzer ohne weiteres bereits an dieser Stelle die Raumwirkung der oben ausgewählten blauen Keramikfliesen anhand einer Visualisierung überprüfen können. Vielleicht kommt er dadurch zu dem Entschluss, doch eher ein bräunliches Material einsetzen zu wollen.

Ohne an der Kriteriengewichtung etwas zu ändern, sucht er nun nach Materialien in einem kräftigen, mitteldunklen Brauntönen (HSV 40-90-50). Im Ergebnis bekommt er wiederum 30 Materialien gezeigt, die jetzt allerdings zwischen hell-gelblich und dunkel-rötlich ausfallen.

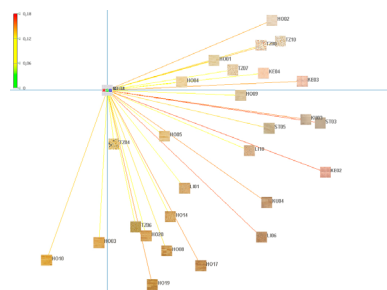


Abb. 8.14: Szene 02 - 02

Da dem Nutzer die Materialien farblich immer noch zu kräftig erscheinen, sucht er in einem weiteren Anlauf Produkte in deutlich helleren, weniger gesättigten Farben. Er gibt ein eher wärmeres HSV 40-50-95 und ein fast schon grünlich ausfallendes HSV 50-30-90 in gleichen Teilen vor.

Nun bewegen sich die Materialien, die ihm angeboten werden, vorwiegend zwischen diesen Farbtönen. Allerdings werden auch etwas dunklere sowie rötlichere Materialien angezeigt, da auch die Zahl der warm-grauen Materialien in der Datenbank begrenzt ist. Sie werden jedoch - wie aus den roten Linien zum Idealmaterial sofort erkennbar ist - insgesamt schlechter bewertet.

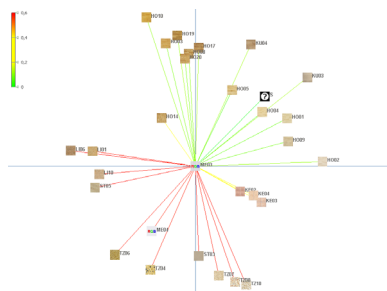


Abb. 8.15: Szene 02 - 03

Neuanordnung versus Neuberechnung

An dieser Stelle entschließt sich der Nutzer, die vorgeschlagenen 30 Materialien zusätzlich danach zu analysieren, ob ihre Textur gerichtet ist oder nicht.

Er verändert daher die Kriteriengewichte von Gerichtetheit und von Textur auf „wichtig“. Dadurch wird die Gerichtetheit mit 33%, die Farbe nur noch mit 67% bei der Berechnung der Gesamtähnlichkeiten angesetzt.

Nachdem er als Wert „gerichtet“ eingestellt hat, führt er eine Neuordnung der bereits angezeigten Elemente durch. Diese sortieren sich dabei in deutlich gerichtete Materialien wie längs verlegte Holzdielen (grüne Linien), mittel gerichtete wie z.B. Quadratfliesen (gelbe Linien) und absolut ungerichtete Terrazzo- oder Linoleumböden (rote Linien).

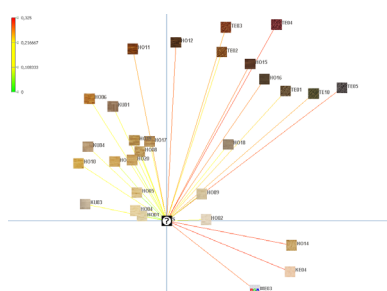


Abb. 8.16: Szene 02 - 04

Hätte der Nutzer bei gleichen Einstellungen stattdessen eine vollständige Neuberechnung aller Materialien durchgeführt, so wären die ungerichteten, aber farblich passenden Materialien ungünstiger bewertet worden als z.B. gerichtete Holzdielenböden, die jedoch farblich noch etwas stärker vom Idealmaterial abweichen als die ursprünglich angezeigten.

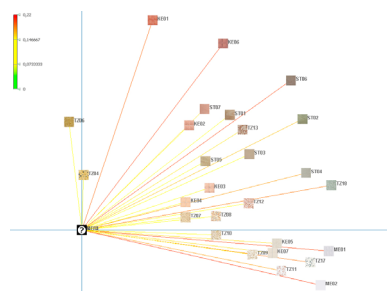


Abb. 8.17: Szene 03 - 01

Szene 3: Einbeziehung der haptischen Eigenschaften

Der nächste Schritt des Nutzers besteht darin, statt der Gerichtetheit das haptische Empfinden der Oberflächentemperatur in der Auswahl mit zu berücksichtigen. Da ihm dies jedoch deutlich weniger wichtig ist als der gesuchte Farbton, stellt er bei Haptik nur „etwas wichtig“ ein. Da die drei Unterkriterien noch alle auf „absolut unwichtig“ stehen, wird dies angezeigt, so dass er nicht vergisst, auch der Temperatur eine gewisse Wichtigkeit zuzuweisen. Das ermittelte Kriteriengewicht liegt dann bei 25%, das der Farbe bei 75%.

Das Ergebnis zeigt diverse „kalte“ Materialien wie Stein, Terrazzo oder Keramikfliesen, so dass dieses Unterscheidungskriterium im paarweisen Vergleich keine Rolle mehr spielt. Stattdessen richtet sich die Anordnung allein nach der Farbe.

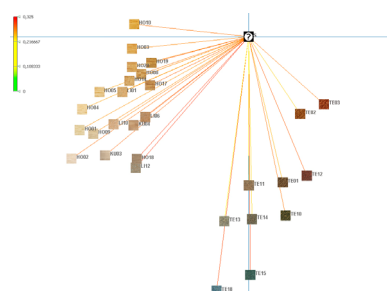


Abb. 8.18: Szene 03 - 02

Anders sieht es aus, wenn bei gleicher Gewichtung nach eher warmen Materialien gesucht wird. Da in der Datenbank allein die 20 Teppichböden die Eigenschaft „warm“ erfüllen und diese Teppiche zudem auch noch farblich sehr weit auseinander liegen, bilden sich im Ergebnis zwei Gruppen von prinzipiell möglichen Materialien heraus: die warmen, aber farblich weniger gut passenden Teppichböden sowie die farblich gut passenden, allerdings nur als „mittel“-warm festgelegten Holz- oder Linoleumböden.

Wichtig ist auch hier, auf die in den Verbindungslinien farblich coodierte Gesamtähnlichkeit zum Idealmaterial zu achten: Einige Teppichböden ähneln - obwohl räumlich weiter entfernt - inhaltlich

dem Idealmaterial mehr als die Holzböden. MDS bildet eher den Gesamtzusammenhang als eine Einzelinformation ab (vgl. Kapitel 7.2.2)

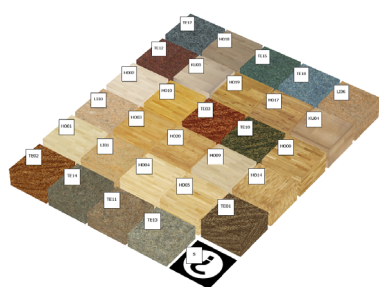


Abb. 8.19: Szene 03 - 03

Darstellung ohne MDS

Für die weitere Suche ist das Erkennen solcher Gesamtzusammenhänge aber durchaus wichtig. Durch sie werden z.B. deutlich zwei Stoßrichtungen für die weitere Suche aufgezeigt: entweder man konzentriert die Suche auf Teppichböden, dann sollte das Augenmerk auf der Farbigkeit liegen. Oder aber man schaut sich speziell in der Gruppe der Hölzer und Linoleumböden um, da diese offenbar hinsichtlich der gewünschten Farbe erfolversprechendere Ergebnisse mit sich bringen.

Eine Darstellung des gleichen Rankingergebnisses ohne MDS (z.B. durch Visualisierung der jeweiligen Gesamtähnlichkeit als Quaderhöhen in XLSTAT-3DPlot) gäbe dagegen keine Hinweise auf eine weitere Vorgehensweise.

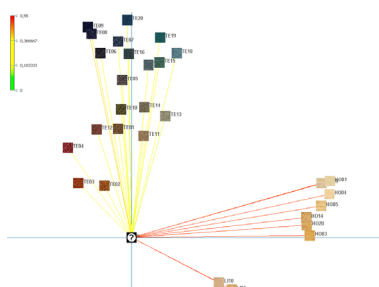


Abb. 8.20: Szene 04 - 01

Szene 4: Zusätzliche Einbeziehung der Materialart

Der Nutzer entscheidet sich, auch die Materialart als weiteres Kriterium in seiner Auswahl zu berücksichtigen. Zunächst konzentriert er sich auf die Teppichböden. Dazu weist er der Materialart „Teppich“ auch „etwas wichtig“ zu. Hierdurch reduziert sich das Gewicht der Farbe auf 60%, Temperatur und Materialart haben jeweils 20%.

In der Folge gliedern sich die vorgeschlagenen Materialien in drei Gruppen auf: Zum einen gibt es die große Gruppe der Teppichböden, die jedoch farblich recht unterschiedlich ausfallen (es gibt zu wenige gelblich-graue Teppiche in der Datenbank). Dennoch werden sie relativ gut bewertet (gelbe Linien), da sie zwei der drei Suchkriterien voll erfüllen.

Dann gruppieren sich sowohl die farblich passenden Hölzer als auch die gleichfarbigen Linoleumböden aufgrund ihrer jeweils gleichen Materialität zusammen.

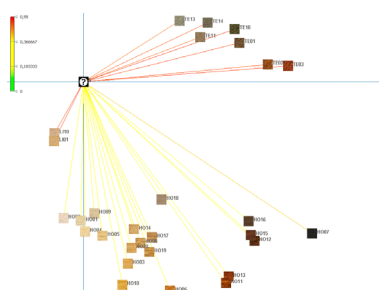


Abb. 8.21: Szene 04 - 02

Wird die Suche bei gleicher Gewichtung der Einzelkriterien auf Holz spezifiziert, ergibt sich im Prinzip ein ähnliches Ergebnis: Es bilden sich (weil es ebenfalls nur 20 Hölzer in der Datenbank gibt) wiederum drei Gruppen heraus: Zum einen die Teppiche, hier jedoch eher weniger, dafür die farblich stimmigeren, zum anderen die entsprechenden Linoleumböden, und als diesmal größte Gruppe die Hölzer, welche in sich erneut nach ihrer Farbigkeit sortiert sind. Auch hier gilt wieder, dass die Hölzer trotz ihrer räumlichen Entfernung zum Idealmaterial dessen Eigenschaften in der Gesamtsicht besser erfüllen.

Änderung der gewünschten Werte durch Feedback

Die genaue Untersuchung des Ergebnisses zeigt, dass in der Suche eigentlich noch ein Widerspruch steckt: Es wird gleichzeitig nach dem Material Holz gesucht, aber auch nach warmen Materialien.

Alle Hölzer sind jedoch mit „mittel“ gekennzeichnet. Diese Erkenntnis führt im Umkehrschluss beim Nutzer nun dazu, dass er - obwohl ihm die haptische Qualität Temperatur noch genauso wichtig ist wie zuvor - doch eher nach „mittel“-warmen Materialien weitersucht.

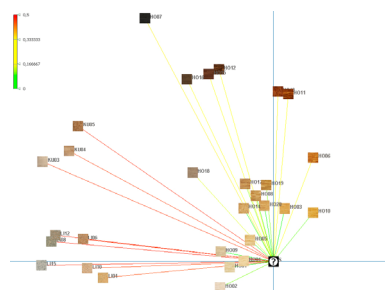


Abb. 8.22: Szene 04 - 03

Im Ergebnis seiner Suche rücken die Holzoberflächen nun wesentlich deutlicher an sein Idealmaterial heran (grüne Verbindungslinien), die Ausdifferenzierung innerhalb der Gruppe der Hölzer wird klarer. Nebenher werden ihm aber weiterhin auch noch Materialalternativen dargestellt. Diese größere Streuung innerhalb der Materialgruppen kommt daher zustande, dass alle angezeigten Materialien nun zu den „mittel“-warmen gehören und sich somit nur noch die unterschiedliche Farbigkeit und die Materialart auswirken.

Darstellung der Clusterbildung

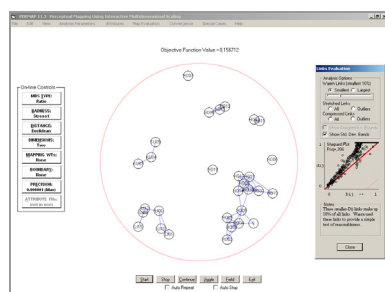


Abb. 8.23: Szene 04 - 04

Da die Streuung der Elemente nun zugenommen hat, ist nicht mehr ganz eindeutig erkennbar, welche Materialien zu - inhaltlich zu interpretierenden - Gruppen zusammengefasst werden können. Die Tendenz zur Clusterbildung kann jedoch durch Waern-Links (vgl. Kapitel 7.2.2) visualisiert werden und gibt so einen Hinweis darauf, welche grundlegenden Alternativen bei der Lösung des Materialwahlprozesses denkbar sind. Durch eine schrittweise Anpassung der Grenze, bis zu der die Verbindungslinien gezeigt werden, lassen sich auch Untergruppen leicht identifizieren.

Szene 5: Zusätzliche Einbeziehung der Akustik

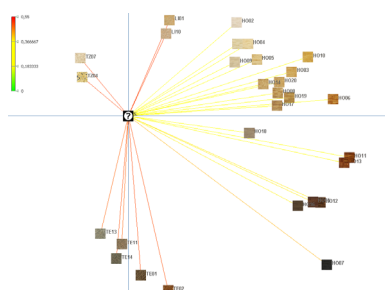


Abb. 8.24: Szene 05 - 01

Im folgenden Schritt legt der Nutzer auch noch Wert darauf, dass das gewählte Material in der akustischen Wahrnehmung des Raums eher gedämpft wirkt. Er stellt dies daher unter Klarheit als Wert ein und gibt diesem Kriterium das Gewicht „etwas wichtig“, dem Oberkriterium ebenfalls. Dadurch reduziert sich die in die Berechnung einfließende relative Wichtigkeit der Farbe auf 50%, die der Materialart, der gefühlten Temperatur und der Klarheit machen jeweils 17% aus.

Die vorher gut bewerteten Materialien sind immer noch in der Nähe des Idealmaterials angeordnet, allerdings werden sie jetzt etwas schlechter bewertet. Zusätzlich kommen aber sowohl offensichtlich wenig dämpfende Materialien wie Terrazzoböden - in den gesuchten Farben - als auch gut dämpfende wie Teppichböden - diese allerdings in weniger passenden Farben - hinzu, beide jedoch nicht so gut bewertet in Bezug auf das Idealmaterial.

Der Einfluss des Vorgabewerts für nicht vorliegende Daten

Untersucht man die scheinbar widersprüchliche Konstellation genauer, kann man erkennen, dass keiner der Holzböden einen Wert für die Klarheit besitzt. Dadurch hat an dieser Stelle der vom Nutzer für solche Fälle eingestellte Wert, der mit dem individuellen Kriteriengewicht zum Ansatz gebracht wird, das Ergebnis entsprechend beeinflusst (vgl. Kapitel 6.5.2).

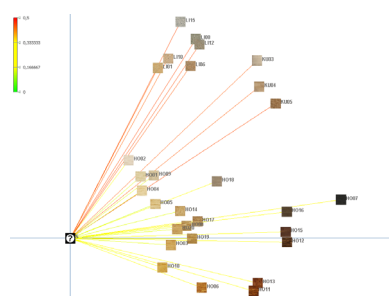


Abb. 8.25: Szene 05 - 02

Durch den oben vorgegebenen Wert von 0,5 werden die Hölzer nun schlechter bewertet, so dass diejenigen Materialien, die in anderen Kriterien sehr gut bewertet sind (bei den Terrazzoböden z.B. in der Farbe), in der Gesamtsicht mit diesen konkurrieren können. Durch Änderung des Vorgabewerts auf 0,1 werden dagegen die Hölzer wieder insgesamt besser bewertet und so zusammen mit ebenfalls gedämpft klingenden Materialien wie Linoleum- oder Kunststoffböden angezeigt, diese liegen jedoch wegen der nicht erfüllten Materialart weiter entfernt.

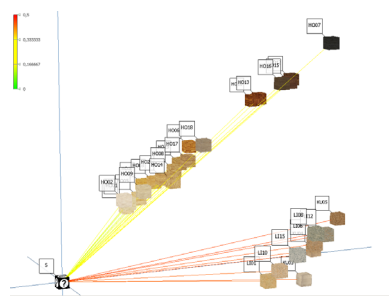


Abb. 8.26: Szene 05 - 03

Ausbildung von Hauptdimensionen

Wechselt man bei gleicher Konstellation zur 3D-MDS-Abbildung und dreht die gesamte räumliche Anordnung in geeigneter Weise, erkennt man deutlich die sich herausgebildeten Hauptdimensionen: Die Materialien ordnen sich hier in zwei Ebenen an, die sich - wenn man die Einzelelemente betrachtet - als „Holz“ und „Nicht-Holz“ interpretieren lassen. Offensichtlich ist dies also unter den eingestellten Gegebenheiten das relevanteste Entscheidungsmerkmal, die Unterschiede in den anderen, ebenfalls betrachteten Kriterien fallen dagegen nicht so sehr ins Gewicht.

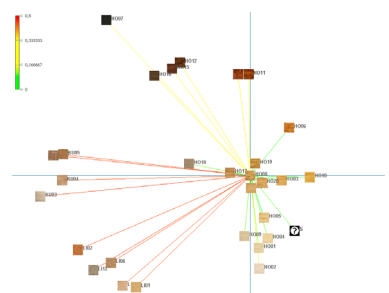


Abb. 8.27: Szene 05 - 04

Szene 6: Inspiration durch freies Browsen

An dieser Stelle beschließt der Nutzer, seine bisherige Suche vielleicht noch einmal grundsätzlich zu hinterfragen. Hierzu löst er sich bewusst von seinem Idealmaterial und browsst schrittweise durch die angezeigten Materialien.

Bei einer Gewichtung der Materialart und Temperatur von 20% und der Farbe von 60% springt er zunächst zu dem Material HO08. Dadurch gelangt dieses als Referenzmaterial in den Fokus der Betrachtung, dargestellt durch den Schnittpunkt der beiden blauen Linien. Relativ dazu ordnen sich die unter dieser Gewichtung ähnlichsten Materialien an. Das ursprüngliche Idealmaterial ist dabei nur noch eines von vielen, zeigt aber durch seine Lage noch an, von wo aus das Browsen gestartet ist.

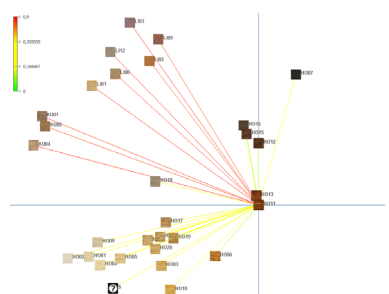


Abb. 8.28: Szene 05 - 05

Entfernung von der ursprünglichen Suche

Durch einen weiteren Sprung ist nun mit HO11 ein deutlich rötlicheres Holz als Referenzmaterial ausgewählt worden. Das ursprüngliche Idealmaterial liegt bereits ganz am Rand des angezeigten Feldes. Zwischen diesem und dem Referenzmaterial finden sich die Materialien wieder, die sich bereits zuvor zwischen diesen befanden. Allerdings werden auf der anderen Seite mit mehreren rötlichen Linoleum- oder Kunststoffböden nun schon Materialien angezeigt, die zuvor nicht zur Auswahl gehörten.

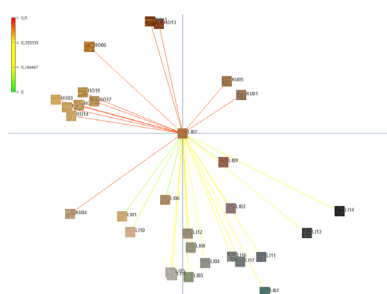


Abb. 8.29: Szene 05 - 06

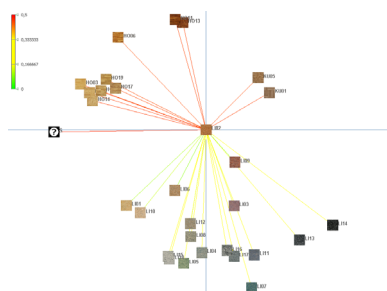


Abb. 8.30: Szene 05 - 07

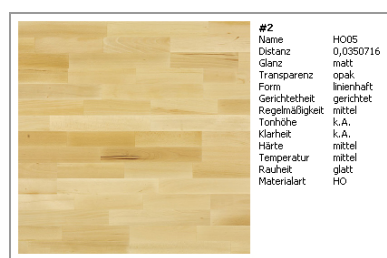


Abb. 8.31: Szene 05 - 08

Besonders deutlich wird die Abkehr von der ursprünglichen Suche, wenn der Nutzer im letzten Schritt zu LI02 springt und somit die Materialart des Referenzmaterials ändert. Im Ergebnis wird zwar immer noch das Material angezeigt, von dem aus der Sprung erfolgt ist (HO11), viel deutlicher drängen sich aber nun mehrere Linoleumböden in verschiedenen Farben in die Wahrnehmung. Das ursprünglich formulierte Idealmaterial wird gar nicht mehr angezeigt, die Unähnlichkeit zum jetzt anvisierten Referenzmaterial ist mittlerweile zu groß geworden.

Ein Material kann jedoch im Rahmen einer dynamischen Untersuchung manuell - trotz vielleicht schlechter Bewertung in Bezug auf das Referenzmaterial - in die MDS-Berechnung einbezogen werden (vgl. Kapitel 7.3.1) und so relative Bezüge zum Gesamtfeld aufzeigen. Der Prototyp sieht allerdings nur vor, das von den 30 Materialien am schlechtesten bewertete durch das Idealmaterial zu ersetzen. Alle anderen Materialien werden anschließend zwar immer noch in Bezug auf das Referenzmaterial bewertet, lassen sich jedoch zusätzlich auch in ihrer Lage zum Idealmaterial interpretieren.

Plausible Entscheidung für ein Material

Am Ende des gesamten Auswahlverfahrens steht die Entscheidung des Nutzers an. Da er durch das Browsen zu keiner völlig neuen Materialidee gekommen ist, kehrt der Nutzer zurück zur ursprünglichen Suche (eine History-Auswertung sieht der Prototyp zwar nicht vor, allerdings sind die letzten Einstellungen zum Idealmaterial noch vorhanden). Durch ein mehrstufiges Verfahren hatte er im letzten Schritt 30 Materialien herausgefiltert, die vor allem einen hellbraunen-grünlichen Farbton haben sollten, zusätzlich aber auch möglichst der Materialart „Holz“ angehören, sich „mittel“-warm anfühlen und gedämpft klingen.

Der Nutzer entscheidet sich letztlich für das Material HO05, da dieses von seinen Vorgaben und Wünschen in der Gesamtsicht nur um 3,5% abweicht. Er ist sich dessen bewusst, dass zu den akustischen Eigenschaften dieses Materials keine näheren Angaben vorliegen, doch selbst bei einem Wert von 0,5 für solche unbestimmte Kriterien zählte HO05 zu den sehr günstig bewerteten Alternativen. Er ist sich daher sicher, eine gute und vor allem plausible Wahl getroffen zu haben.

»Auch die längste Reise beginnt mit dem ersten Schritt.«

Spruchwort

Der Titel dieser Arbeit lautet „Unterstützung der Materialwahl in der Architektur durch Plausibilität der Entscheidung“. Wie weit das in dieser Formulierung angestrebte Ziel durch das in der Arbeit vorgestellte Verfahren erfüllt werden kann, soll nun abschließend diskutiert werden.

Hierzu wird der Inhalt der Arbeit zunächst noch einmal kurz zusammengefasst, um sich die Ausgangsproblematik, die Argumentationslinie und den genauen Ablauf des Verfahrens erneut vor Augen zu führen (Kapitel 9.1). Im Laufe der Erarbeitung der hier vorgestellten Lösung ergaben sich einige Fragen und Probleme, auf die sich auch die zahlreichen Diskussionen mit fachlich mit der Problematik vertrauten Kollegen wiederholt verengten. Da diese Punkte aber zentral sind für das Verständnis und vor allem die Akzeptanz des vorgeschlagenen Weges, wird auf sie noch einmal gesondert eingegangen (Kapitel 9.2). In Kenntnis der Beantwortung dieser „Kritikpunkte“ erfolgt anschließend die Beurteilung der Strategie hinsichtlich des vorgegebenen Ziels (Kapitel 9.3).

Selbstverständlich kann diese Arbeit nicht mehr sein als ein kleiner Beitrag auf dem Wege zu einer zukünftig sicherlich wesentlich umfassenderen Unterstützung der Materialwahl in der Architektur. Während der Bearbeitung sind zahlreiche mit dieser Thematik verbundene Probleme und weitere Themenfelder deutlich geworden, die teilweise jedoch nur am Rande erwähnt werden und durch diese Arbeit ungelöst bleiben müssen. Der abschließende Ausblick soll daher ein wenig den Weg weisen für mögliche weitere Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Materialwahl in der Architektur (Kapitel 9.4).

Der Ausgangspunkt der Arbeit war die Feststellung, dass die sinnliche Wahrnehmung unserer gebauten Umwelt in besonderem Maße durch die Materialität ihrer Oberflächen bestimmt wird. Unzählige neue Produkte und die losgelöste Betrachtung der Oberfläche eröffnen ein nahezu unüberschaubares Angebot an Materialien. Diese müssen neben ihren sinnlichen Qualitäten aber auch vielfältige technische Aufgaben übernehmen und sollten zudem zahlreichen weiteren Anforderungen entsprechen. Die Entscheidung für ein Material wird somit zu einem sehr komplexen, durch eine Vielzahl von Kriterien beeinflussten Vorgang innerhalb der Planung eines Bauwerks.

Grundlage dieser Arbeit war die Annahme, dass solche mehrkriteriellen Entscheidungen prinzipiell durch Entscheidungsunterstützende Systeme abgestützt werden können.

Die Materialwahl

Im ersten Hauptteil wurde dann zunächst der Auswahlprozess im Hinblick auf den Zeitpunkt, die Wissensgrundlagen und auf mögliche Strategien beschrieben. Daraus leitete sich die Forderung an ein gewünschtes Unterstützungssystem ab, dieses solle ermöglichen, zu jedem Zeitpunkt und in unterschiedlicher Detailtiefe auf immer aktueller Wissensbasis nach verschiedenen Strategien bei der Entscheidungsfindung vorgehen zu können.

Anschließend wurden diverse digitale Systeme vorgestellt, die bereits heute im Zusammenhang mit der Materialwahl zum Einsatz kommen. Dies diente nicht nur zur Abgrenzung der Arbeit zu bereits vorhandenen Techniken, sondern vor allem als Referenz für die technische Machbarkeit eines am Ende ausgemalten integrierten Gesamtprozesses der Materialwahl. Es wurde herausgestellt, dass es innerhalb dieses denkbaren Prozesses vor allem an einer nachvollziehbaren Strategie zur Bewertung der Alternativen fehlt.

Die Entscheidungskriterien

Der zweite Hauptteil der Arbeit widmete sich den Kriterien, die in die Entscheidung für oder gegen ein Material einfließen. Diese wurden zunächst strukturell unterschieden nach ihrer Art und Relevanz. Dabei wurde herausgestellt, dass darüber hinaus eine weitere Kategorisierung der Materialien für die Zwecke dieser Arbeit nicht sinnvoll ist. Die Kriterien sollten stattdessen unabhängig voneinander betrachtet werden können.

Im Weiteren wurden die üblicherweise in eine Materialwahl einfließenden Kriterien konkret genannt. Da sich diese hierarchisch nicht auf einer Ebene befinden, wurden sie in einer Baumstruktur dargestellt. Am Ende stand die Definition des letztlich ausschlaggebenden Kriteriums, nämlich dass das ausgewählte Material einem vom Planer formulierten Idealmaterial unter Berücksichtigung einer individuellen Kriteriengewichtung in der Gesamtsicht am wenigsten unähnlich sein soll.

Das Verfahren

Im dritten Hauptteil wurde ein Verfahren vorgestellt, wie Materialien in Bezug auf das Idealmaterial bewertet werden können. Hierzu wurde gezeigt, wie die Eigenschaften von Produkten in Daten abgebildet werden können und wie der Nutzer darin unterstützt werden kann, sein Idealmaterial und seine individuelle Kriteriengewichtung zu formulieren. Aus den vorliegenden Daten konnte so die Unähnlichkeit in jedem Einzelkriterium und in der Gesamtsicht errechnet werden.

Da diese Bewertung allein allerdings kein stabiles und eindeutiges Ergebnis hervorbrachte (es gibt nicht „das optimale Material“), wurde für eine weitergehende statische und dynamische Untersuchung der bestbewerteten Materialien mit Multidimensional Scaling ein bekanntes Verfahren der Informationsvisualisierung angewendet. Die vorgestellte Bewertungsstrategie erlaubte in ihrer Zweistufigkeit das Verfolgen der vier möglichen Auswahlstrategien Analyse, Synthese, Ähnlichkeit und Inspiration.

Prototyp

Um das vorgestellte Verfahren hinsichtlich Umsetzbarkeit und Sinnfälligkeit der Ergebnisse zu überprüfen, wurde es in einer prototypischen Software umgesetzt. Anhand eines Beispielszenarios wurden der Umgang mit dem Programm sowie noch einmal die einzelnen Vorgehensweisen und die Interpretationsmöglichkeiten der Ergebnisse innerhalb eines Auswahlprozesses beschrieben.

9.2

Diskussion besonderer Kritikpunkte

Während der gesamten Bearbeitungszeit einer solchen Arbeit beschäftigt man sich mit einer Vielzahl von Fragestellungen und Problemen. Einige davon drängen sich - auch wenn man sie bereits für gelöst hält - immer wieder in den Vordergrund. Es handelt sich dabei weniger um Detailfragen, sondern eher um Fragen grundsätzlicher Natur. Sie decken sich vorwiegend mit den Fragen, die auch immer wieder von Diskussionspartnern gestellt werden, die ebenfalls fachlich mit dem Thema Materialwahl in der Architektur zu tun haben.

An dieser Stelle sollen diese Fragen daher noch einmal explizit beantwortet und Gründe, die für die vorgestellte Strategie sprechen, herausgestellt werden.

Würde ein Architekt mit einem solchen System auswählen?

Ein häufig von Diskussionspartnern vorgebrachter Kritikpunkt war, dass sich sicher kein Architekt auf ein solches Verfahren einlassen würde, stattdessen doch eigentlich schon im Vorhinein genau wisse, welches Material er einsetzen wolle.

Selbstverständlich gibt es viele gute Architekten, die eine so große Erfahrung und ein breites Know-how auf dem Gebiet der Materialien haben, dass sie auch bisher zu überzeugenden Lösungen gekommen sind. Um auf dem Laufenden zu bleiben, müssen sie allerdings viel Energie für die Pflege ihres Wissens aufbringen. Stehen sie vor der Aufgabe, ihre Ideen und Planungen konkret umzusetzen, müssen auch sie in irgendeiner Form nach geeigneten Produkten aus der Baustoffindustrie suchen. Vertrauen sie dabei nur auf Altbewährtes, so verschließen sie sich einer Reihe von vielleicht ganz anderen, innovativeren Lösungen. Ein solchermaßen voreingenom-

»The development of new materials and technologies allow more freedom in design. Therefore, it is important for designers to stay up-to-date about new possibilities, and to exploit the special properties of new materials. This makes material selection important in the early phase of design, not rejecting or missing options merely because they are unfamiliar.«

[Bezooyen 2002, S.2]

mener Nutzer wird daher durch seine eingeschränkte Sicht nicht immer unbedingt die „bestmögliche“ Materialwahl treffen.

Auch ein bereits auf ein Material festgelegter Architekt könnte zudem mit dem vorgeschlagenen Werkzeug nach geeigneten Produkten bzw. ähnlichen Alternativprodukten suchen, die weiteren Vorteile einer integrierten Planung (z.B. Datenübergabe für Visualisierungen oder Simulationen) nutzen und seine bereits getroffene Entscheidung mit plausiblen Argumenten unterfüttern.

Komplexität und Aufwand

In eine ähnliche Richtung geht die Befürchtung, dass der Aufwand für die Eingabe aller Parameter zu groß sei, das System insgesamt zu komplex und dadurch vielleicht auch zu ungenau oder fehleranfällig. Dies würde die praktische Nutzung behindern.

Es ist klar, dass die Eingabe im Vergleich zum Prototyp durch ein geeignetes Interfacedesign (z.B. Ausblenden nicht benötigter Hierarchieebenen) übersichtlicher gestaltet sowie durch die Möglichkeit von Voreinstellungen (z.B. für nutzerspezifische Gewichtungskonstellationen) in der Handhabung vereinfacht werden kann. Im Rahmen eines integrierten Gesamtprozesses könnten viele Angaben auch direkt aus der CAAD-Planung übernommen werden. Der Prototyp in seiner beschriebenen Form dient also zunächst nur als prinzipieller Nachweis der Machbarkeit.

Das vorgestellte Verfahren bildet zudem in seiner Komplexität im Grunde nur das auch sonst vom Architekten zu bewältigende Auswahlverfahren ab: Auch bei einer manuellen Auswahl muss sich dieser darüber klar werden, welche Eigenschaften ein ideales Material mitbringen soll und wie wichtig ihm bestimmte Kriterien sind. Der Unterschied ist allerdings, dass dies im Kopf des Nutzers sicherlich schneller abläuft, dafür aber auch unschärfer und für Dritte weniger nachvollziehbar.

Objektivität der Kriterienfestlegung und -unterteilung

Weiter stellt sich immer wieder die Frage, ob die in der Arbeit vorgeschlagenen Kriterien denn „wirklich“ die sind, die bei der Materialwahl entscheidend sind, und ob darüber hinaus die gewählten Unterteilungen bei den jeweiligen Kriterien ausreichend sind. Diese Frage lässt sich allerdings kaum „objektiv“ beantworten oder gar beweisen.

Wie bereits bemerkt, beruht die Zusammenstellung der Einzelkriterien in dieser Arbeit auf einer nicht näher ausgeführten Querschnittsbetrachtung von Quellen zum Thema Material in der Architektur (Bücher, Zeitschriften, Webseiten sowie eine vor Beginn der Bearbeitung durchgeführte Umfrage bei Architekten und Materialagenturen). Die Kriterien bilden somit ein in Fachkreisen üblicherweise benutztes und somit schon - im Sinne von geteilter Subjektivität - relativ objektives Spektrum ab. Ergänzungen im Detail sind

durchaus denkbar, sie würden das weitere Vorgehen und die Strategie als Ganzes jedoch nur wenig verändern.

Etwas anders gelagert ist das Problem der Unterteilung der möglichen Wertebereiche: hier war ein Kompromiss zu finden zwischen der notwendigen Genauigkeit (die zudem auch vom Menschen verstanden werden muss) und der Breite der vorhandenen Daten. Auch hier wurde für die Festlegung teilweise wieder auf die Untergliederungen anderer Quellen zurückgegriffen. In den oftmals vielleicht verkürzt wirkenden Angaben zeigt sich dadurch auch ein wenig die Unschärfe, die einer manuellen oder auf bestehende Systeme zurückgreifende Auswahl ebenso innewohnt.

Im frühen Planungsstadium interessieren exakte Werte noch nicht so sehr. Im Weiteren sind aber prinzipiell auch detailliertere Angaben denkbar und im Rahmen der Berechnung wie beschrieben verwendbar. Dies würde den Einsatzbereich des Werkzeugs deutlich nach hinten verlagern.

Datenbasis

Sehr eng mit dem vorangegangenen Thema verbunden ist das Problem, von den Herstellern vergleichbare und detaillierte Daten zu den einzelnen Produkten zu bekommen. Dies ist auch einer der Gründe dafür, dass im Prototyp letztlich nur fiktive Materialien zum Einsatz kamen.

Die Sammlung von Daten ist derzeit sowohl noch ein technisches Problem (kein automatisches Auslesen von Daten aufgrund uneinheitlicher Datenformate), als auch eine Frage der fehlenden neutralen und unabhängigen Beschreibung von Produkten. Es gibt zwar Bestrebungen, Standards für die Produktklassifikation in der Bauindustrie einzuführen, die Art der dort verwalteten Daten orientiert sich jedoch eher an den Erfordernissen des E-Business als an den hier beschriebenen gestalterisch notwendigen Kriterien [E-class]. Einfach strukturierte, aber umfassende Produktbeschreibungen sind auf kaum einer Herstellerwebseite zu finden gewesen, was auch bei der manuellen Materialwahl ein Problem darstellt.

Selbst wenn alle Produkte im Detail beschrieben wären, müssten für eine Vergleichbarkeit der einzelnen Materialarten untereinander viele der Werte dann doch wieder in gröbere Kategorien eingeteilt werden. Hierzu bedarf es wiederum einer Definition, wie die einzelnen Werte interpretiert werden sollen. Selbstverständlich sollte vom Nutzer zur Information jederzeit aber auch auf die detaillierteren Daten zugegriffen werden können. Darüber hinaus sind einige andere prinzipielle Möglichkeiten für das Erzeugen von geeigneten Daten vorgestellt worden.

Ergebnisqualität

Zusammenfassend stellt sich die Frage, ob durch das vorgestellte Vorgehen überhaupt ein qualitativ hochwertiges Ergebnis erzielt werden kann.

Die Frage zielt in zwei Richtungen: zum einen muss hinterfragt werden, ob auf der Grundlage eines Kriterienkatalogs und einer Datenbasis, die beide durch zahlreiche Definitionen und Verallgemeinerung geprägt sind, ein „objektives“ Ergebnis herauskommen kann. Zum anderen sollte sich - gerade vor dem Hintergrund eines nicht gerade geringen Eingabeaufwands - eine eindeutige Verbesserung gegenüber der bisherigen Vorgehensweise bei der Materialwahl ergeben.

Statt „Objektivität“ des Ergebnisses wurde in der Arbeit bewusst der Begriff „Plausibilität“ benutzt. Die Einschätzung, welches Material die beste Alternative darstellt, ist von zu vielen unscharfen, schlecht bezifferbaren Kriterien sowie von einer mit vertretbarem Aufwand nur ungenau ermittelbaren Gewichtung abhängig. Dadurch kann es kein absolutes und allgemeingültiges Ergebnis geben.

Die Kriterien und ihre Unterteilung wurden jedoch hinlänglich fachlich begründet. Aufgrund der Prämisse, dass zunächst einmal jedes Kriterium gleichberechtigt die Entscheidung beeinflussen kann, wurden alle ermittelten Einzelunähnlichkeiten in den gleichen Wertebereich zwischen 0 und 1 normalisiert. Unter der Berücksichtigung der individuellen Gewichtung ergab sich daraus die Möglichkeit, auch inhaltlich völlig unterschiedliche Kriterien miteinander in Beziehung zu setzen. Die Bewertung eines Materials in Bezug auf das Idealmaterial ist in dieser Weise nachvollziehbar und beruht auf fachlich getroffenen Festlegungen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass das Ergebnis insgesamt sinnvoll und plausibel ausfällt.

Selbst wenn nicht der skizzierte Idealzustand eines integrierten Gesamtprozesses zugrunde gelegt wird, ist einer der Vorteile gegenüber der manuellen und insbesondere der bisherigen digital gestützten Arbeitsweise, dass in der Beurteilung der Alternativen erstmals eine Möglichkeit vorgesehen ist, inhaltlich sehr verschiedene Kriterien individuell gewichtet gegeneinander aufzurechnen und so zu einem umfassenden Gesamturteil zu kommen. Die anschließende räumliche Anordnung mehrerer nahezu gleich gut bewerteter Materialien kann darüber hinaus wichtige Hinweise über das eigene Suchverhalten geben. Die Suche selbst ist nicht nur auf eine Strategie festgelegt.

9.3

Fazit

Mit der vorgestellten Vorgehensweise ist ein prinzipieller Weg aufgezeigt worden, wie die Materialwahl in der Architektur erleichtert werden kann. Zunächst wurde dazu eine Gesamtstrategie zur Einbindung der Materialentscheidung in den sonstigen Planungsprozess skizziert, anschließend wurde schwerpunktmäßig vertieft, wie auf Grundlage einer solchen aus vielen Quellen zusammengetragenen Datenbasis die eigentliche Entscheidung für ein konkretes

Material durch eine plausible Bewertungsstrategie sowie durch eine geeignete Art der Informationsvisualisierung unterstützt werden kann.

Die Entscheidung selbst kann und soll dem Planer nicht durch ein digitales Werkzeug abgenommen werden. Die von ihm zu treffende Auswahl eines Materials kann jedoch - neben der Notwendigkeit einer individuellen Beschreibung dessen, was man sucht, insbesondere durch die Möglichkeit einer umfangreichen Interpretation der erzielten Ergebnisse - auf einer nachvollziehbaren und gesicherten Grundlage erfolgen. Diese höhere Plausibilität stellt im Gegensatz zu einer Entscheidung „aus dem Bauch heraus“ eine qualitative Verbesserung zur bisherigen Arbeitsweise dar. Das Vorliegen einer plausiblen Bewertungsbasis unterstützt den Architekten bei der Auswahl eines geeigneten Oberflächenmaterials.

9.4

Ausblick

Mit der Arbeit wurde ein genereller Weg, wie die derzeitige Planungspraxis - speziell hinsichtlich der Materialwahl - verbessert werden kann, beschrieben und in Form eines im Umfang und in der Handhabung reduzierten Softwareprototyps als Nachweis der Machbarkeit umgesetzt.

Nicht nur im Falle einer konkreten Umsetzung des Gesamtprozesses, sondern auch in Bezug auf eine mögliche Erweiterung und Verallgemeinerung der verwendeten Methoden sind allerdings noch viele Fragen unbeantwortet. Sie bieten Raum für vertiefende, ergänzende und ähnlich gelagerte Forschungsarbeiten.

Softwaretechnische Umsetzung

Der Prototyp zeigt nur im Prinzip die Umsetzbarkeit der beschriebenen Methoden anhand eines Teils der beschriebenen Kriterien und auf Basis von rund 100 Materialien. Für die Unterstützung der Entscheidungsfindung in Realität müssten sowohl die sonstigen Kriterien abgebildet werden als auch die Datenbasis durch den automatisierten Zugriff auf reale Produktdaten verbreitert werden.

Während ersteres nur eine Frage der praktischen Umsetzung ist (Programmierung eines webbasierten Werkzeugs, geeignete Interfacegestaltung für einen komfortablen Umgang mit einer Vielzahl von Kriterien, Optimierung der Berechnungsalgorithmen, Anbindung an CAAD etc.), ist die Zielvorstellung eines automatisierten Datenzugriffs vielleicht auch in nächster Zukunft kaum zu erreichen. Neben den technischen Voraussetzungen wäre es nötig, dass ein Standard zur Beschreibung von Produkten nicht nur technische Merkmale, sondern auch die sinnlich-ästhetischen Kriterien abzubilden vermag. Im Rahmen eines Gesamtprozesses sollten zudem angehängte Daten weitergenutzt werden (Simulationen, E-

Commerce). Auch hierfür ist noch ein einheitlicher Standard zu definieren und einfach anzuwendende technische Lösungen zu entwickeln.

Eine Hürde auf diesem Weg ist sicher die extrem kleinteilige Anbieterstruktur bei Bauprodukten. Solange ein solcher Standard nicht existiert, könnten jedoch zumindest die redaktionell betreuten Materialdatenbanken versuchen, auf einem in diesem Sinne umfassenden und einheitlichen Kriterienkatalog zur Beschreibung von Materialien aufzubauen. Auch hierzu ist ein enger Dialog zwischen Herstellern, Materialagenturen und Anwendern allerdings unverzichtbar.

Erweiterung

Das Verfahren in der beschriebenen Form beruht noch auf einigen Einschränkungen, die aus Gründen der Verallgemeinerung und Objektivierbarkeit notwendig waren. Insbesondere betrifft dies die Detailliertheit der Daten und das Ausklammern wichtiger, jedoch subjektiver Einflusskriterien.

Für die einzelnen Kriterien wurden relativ grobe Unterteilungen vorgeschlagen, damit auch Materialien höchst unterschiedlicher Art miteinander verglichen werden können. Durch die notwendige Reduzierung von vorher exakteren Werten in grobe Klassen geht natürlich sehr viel Information verloren, die in einer Detailuntersuchung dann fehlt. Hier wäre ein zweistufiges Vorgehen denkbar, welches zunächst mit den gröberen Daten arbeitet, um grundsätzliche Materialalternativen herauszuarbeiten, dann aber im Detailvergleich einzelner Produkte untereinander die exakt vorliegenden Werte berücksichtigt.

Subjektive Kriterien wurden zunächst ausgeblendet, um zu einer verallgemeinerbaren Lösung zu kommen. Dennoch spielen diese in der Realität eine nicht unbedeutende Rolle. Mathematisch ist es kein Problem, auch solche Kriterien ebenfalls in die Bewertung von Materialien einzubeziehen, indem z.B. ein Punktesystem zum Ausdrücken von Vorlieben oder Erfahrungen verwendet wird und die dann vorliegenden Daten durch Normalisierung und individuelle Gewichtung gleichberechtigt neben anderen Kriterien zu stehen kommen. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass solche individuellen Bewertungen bereits vor der eigentlichen Materialwahl erfolgen müssen, damit sie dort einfließen können. Da dies nicht für alle potentiellen Materialien im Vorhinein geschehen kann, ist eine Art selbstlernendes System denkbar, welches im Laufe der Zeit zu einem individuellen Nutzerprofil führt.

Verallgemeinerung der Methoden

Bei der Materialwahl handelt es sich um nur eine von vielen komplexen Entscheidungen innerhalb des gesamten Planungs- und Bauprozesses. In vielen anderen Bereichen der Planung (z.B. Grundrissorganisation) gibt es aufgrund der Komplexität des architektoni-

schen Entwerfens und der Vielzahl der darin einfließenden Kriterien ebenso wenig nur eine einzige, „optimale“ Lösung. Wenn auch hier die Kriterien eindeutig formuliert und mit konkreten Werten hinterlegt werden können, lassen sich die Verfahren der Bewertung (Gewichtung, Berechnung im Einzelkriterium, Zusammenfassung zu einem Gesamtwert) und die anschließende räumliche Darstellung der Ergebnisse mittels Multidimensional Scaling auch auf solche Planungsentscheidungen übertragen.

Resümee

Der Lehrstuhl Informatik in der Architektur an der Bauhaus-Universität Weimar, an dem ich diese Arbeit schreiben konnte, agiert wie bereits erwähnt unter dem Leitspruch *»Eine durchgehende und zugleich sinnvolle digital gestützte Planungstätigkeit existiert noch nicht. Viele arbeiten daran. Wir auch.«*

Ich verstehe das Gesamtbild eines umfassenden Planens als ein aus vielen kleinen Steinchen zusammengesetztes Mosaik. Bei Mosaiken ist es üblich, mit wenigen Steinchen zunächst die Konturen des Bildes zu legen. Das Füllen dieser Konturen, das Auslegen aller Flächen bis hin zum fertigen Bild hingegen benötigt sehr viel mehr Steinchen.

Ich bin davon überzeugt, mit dieser Arbeit einen weiteren Mosaikstein zu den mittlerweile recht gut erkennbaren Konturen einer durchgehenden und digital gestützten Planungstätigkeit hinzugefügt zu haben. Das Ziel der vollständig gefüllten Fläche, die durchgehende digital gestützte Planung, hingegen ist noch lange nicht erreicht.

Das Arbeiten in diesem Themenfeld ist und bleibt also spannend. Es lohnt weiterhin, die gesamte Forschung auf diesem Gebiet in der vollen Breite des Spektrums im Auge zu behalten.

Anhang A

A.1

Glossar

AHP	Analytic Hierarchy Process; Verfahren zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen, bei dem das Problem in eine hierarchische Struktur aufgelöst wird, so dass eine Bewertung der Alternativen in einem mehrstufigen Prozess mittels einfacher Paarvergleiche erfolgen kann
Atom-Feed	Atom Syndication Format; XML-Format zum plattformunabhängigen Austausch von Informationen
Augmentierung	Hier: das Anreichern von realen Körpern mit (Material-) Informationen durch aufprojizierte Texturen
Browsen	Hier: das Springen (Durchblättern) von Information zu Information
CAAD-System	Computer Aided Architectural Design; speziell auf Architekturfunktionalitäten ausgelegte rechnergestützte Planungssysteme
Cie-L*a*b*	Von der Internationalen Beleuchtungskommission CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) eingeführter geräteunabhängiger und theoretisch unbegrenzter Farbraum, der alle vom Menschen wahrnehmbaren Farben durch die drei Kanäle Helligkeit (Luminanz), Rot- oder Grünanteil (a) und Blau- oder Gelbanteil (b) codiert. Durch die visuelle Gleichabständigkeit entspricht die geometrische Distanz zweier Farben nahezu dem wahrgenommenen Farbabstand
CMYK-Farbmodell	Subtraktives Farbmodell, bei dem alle wahrnehmbaren Farben durch die Kanäle Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz („Key“) codiert werden
CNS	Colour Naming System; Modell zur verbalen Beschreibung einer Farbe
DirectX	Programmierschnittstelle für multimedia-intensive Anwendungen
Entscheidung	Eine Entscheidung ist eine bewusste oder unbewusste Wahl zwischen Alternativen oder zwischen mehreren unterschiedlichen Varianten
Entscheidungsunterstützendes System	Die Gesamtheit aus möglichen Verfahren zur Bereitstellung von Informationen zur Unterstützung einer Entscheidung und ihrer konkreten Umsetzung in einer entsprechenden Software
EPIX	Dateiformat für Pixelbilder, bei dem sowohl die räumliche Tiefe einer Oberfläche als auch das zugewiesene Material in je einem zusätzlichen Bildkanal codiert sind
Force-Feedback	Technik, die in einem Eingabegerät eine Rückstellkraft generieren kann und somit dem Nutzer ein gewisses haptisches Erfahren eines virtuellen Gegenstands ermöglicht
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HSV-Farbmodell	Farbmodell, welches der menschlichen Art Farben wahrzunehmen ähnelt, da die wahrnehmbaren Farben durch die drei Kanäle Farbton („Hue“), Sättigung („Saturation“) und Helligkeit („Brightness“ bzw. „Value“) codiert werden

Industry Foundation Classes IFC	Von der International Alliance for Interoperability IAI definierter Standard zur digitalen Beschreibung von Gebäudemodellen
International Alliance for Interoperability IAI	Internationale und nichtstaatliche Organisation von Baufirmen, Planern und Softwarehäusern mit dem Ziel der Förderung einer einheitlichen digitalen Beschreibung von Bauwerken
Likert-Skala	Skala zur Messung von persönlicher Zustimmung bzw. Ablehnung zu vorgegebenen Aussagen, bei der sich die Ergebnisse rund um einen neutralen Mittelwert bewegen
Lotuseffekt	Selbstreinigungseffekt der Lotuspflanze aufgrund geringer Benetzbarkeit ihrer Oberfläche, der durch Beschichtung von Oberflächen mit Nanopartikeln synthetisch nachgemacht werden kann
Mapping	Hier: das Aufbringen von Texturen auf 3D-Oberflächen
Mehrkriterielle Entscheidung	Von mehreren Kriterien beeinflusste oder abhängige Entscheidung
Mock-up	Hier: der Entwurf einer Benutzeroberfläche, jedoch noch ohne Funktionalität
Multiattributive Entscheidung	Eine Entscheidung, die nur ein einziges, jedoch von mehreren Kriterien abhängiges Globalziel verfolgt
Multidimensional Scaling MDS	Technik, bei der mehrdimensionale Daten derart in einem niedrigerdimensionalen Raum abgebildet werden, dass die Distanzen in der Abbildung möglichst genau den Unähnlichkeiten der Daten untereinander entsprechen
Nanopartikel	Teilchen aus wenigen bis zu einigen tausend Atomen bzw. Molekülen mit einer Größe von bis zu 100 Nanometern, die auf Oberflächen aufgebracht werden können, um deren Eigenschaften gezielt zu verändern, z.B. für den Lotuseffekt
NCS	National Color System; Farbsystem, welches die wahrnehmbaren Farben über die Anteile der vier Grundfarben Gelb, Grün, Rot und Blau sowie die Sättigung und den Schwarzanteil benennt
Nominalskala	Ermöglicht als niedrigstes Skalenniveau nur die Unterscheidung nach Gleichheit oder Ungleichheit zweier Elemente
Normalisierung	Hier: die Skalierung eines beliebigen Wertebereichs in den vorgegebenen Bereich zwischen 0 und 1
OpenGL	Open Graphics Library; Beschreibung einer plattform- und programmiersprachenunabhängigen Schnittstelle zur Entwicklung von 3D-Computergrafik
Ordinalskala	Ermöglicht das Aufstellen einer Rangfolge zwischen mehreren Elementen, jedoch noch keine exakten quantitativen Aussagen über deren Ausprägungen
Plausibilität	Stimmigkeit, Nachvollziehbarkeit

Podcast	Serie von Mediendateien (Audio oder Video), die z.B. per RSS-Feed automatisch über das Internet bezogen werden kann
Primitiva	Hier: die noch wahrnehmbaren Grundelemente einer visuellen Textur
Rapid Prototyping	Oberbegriff verschiedener Verfahren zur Herstellung von Prototypen auf Basis von 3D-CAD-Daten
Rendering	Hier: die Berechnung eines Pixelbilds auf Basis eines 3D-CAD-Modells
RFID	Radio Frequency Identification; Technik zum berührungslosen Auslesen von Informationen aus einem sich auch entfernt befindenden Transponders
RGB-Farbmodell	Additives Farbmodell, bei dem alle wahrnehmbaren Farben durch die Kanäle Rot, Grün und Blau codiert werden
RSS-Feed	Technik zum Abonnement von Webseiten-Inhalten, mit der ein Nutzer automatisch aktuelle Datensätze abrufen kann
Shader	Hard- oder Softwaremodul zur Berechnung des Aussehens einer 3D-Oberfläche in der Computergrafik
Skalenniveau	Bestimmt in der Statistik die Art der Ausprägung von Eigenschaften eines Elements und damit die Informationstiefe, welche durch die zugehörigen Daten abgebildet werden kann
Stress	Hier: Maß der Güte einer Abbildung bei Multidimensional Scaling
Textur	Hier: ein Pixelbild, das auf eine 3D-Oberfläche aufgebracht wird, so dass über die Farbwerte der einzelnen Pixel das Erscheinungsbild der Oberfläche gezielt verändern kann
TIFF	Tagged Image File Format; verlustfreies Dateiformat zur Speicherung von Bilddaten
XML	Extensible Markup Language; Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdateien
XML-Tag	Festes oder auch frei zu vergebendes Schlüsselwort in XML, durch das der folgende Inhalt automatisch interpretiert werden kann

A.2

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	<i>Blasenmodell des Materialwahlprozesses</i> [Ashby 2002, S.129]	28
Abb. 3.1	<i>Raumstempel in CAAD</i> Autodesk® Revit® Architecture 2008, Screenshot	34
Abb. 3.2	<i>Bauteil-Materialzuweisung in CAAD</i> Nemetschek Allplan 2005, Screenshot	35
Abb. 3.3	<i>IFC MaterialProperties</i> [IAI 2006]	35
Abb. 3.4	<i>DIN 1356-1 Tabelle 8</i> [DIN 1995]	36
Abb. 3.5	<i>Schraffurmenü in CAAD</i> Autodesk® ADT 2007, Screenshot	36
Abb. 3.6	<i>Zusätzliche Schraffurmuster</i> [Hatchpatterns]	36
Abb. 3.7	<i>Präsentationszeichnung in Piranesi</i> Informatix Software International http://www.informatix.co.uk/piranesi/gallery.shtml Stand: 04.03.2008	37
Abb. 3.8	<i>Einbindung einer Farbpalette in CAAD</i> dtp studio oldenburg http://www.ral-digital.de/deutsch/Graphisoft%20ArchiCAD%207-9.htm Stand: 04.03.2008	37
Abb. 3.9	<i>Materialmanager Cinema 4D</i> MAXON Cinema 4D R9.6, Screenshot	38
Abb. 3.10	<i>Maxwell Material</i> Maxwell Materials Gallery http://mxmgallery.maxwellrender.com/ Stand: 04.03.2008	39
Abb. 3.11	<i>Unnatürlich wirkende Kachelung</i> Eigene Grafik	39
Abb. 3.12	<i>Prozeduraler Texturgenerator</i> Alienskin eye candy 5 textures, Screenshot	40
Abb. 3.13	<i>Externe Materialdefinition in DarkTree</i> [Darksim], Screenshot	40
Abb. 3.14	<i>Beschreibung von Realtime-Shadern</i> [Rendermonkey]	41
Abb. 3.15	<i>Vorgegebener Probekörper</i> [C4D-Textures]	41
Abb. 3.16	<i>LightWorks Authoring-Tool</i> [LightWorks]	43
Abb. 3.17	<i>Übernahme einer LWA-Datei in CAAD</i> [Lightworks]	43
Abb. 3.18	<i>Fotobasierter virtual showroom</i> Alpina Color Designer, Screenshot http://www.alpina-farben.de/colordesigner/colordesigner.html Stand: 20.02.2008	44
Abb. 3.19	<i>Eigene Raumsituationen</i> Parador Raumdesigner, Screenshot http://www.parador.de/swf/raumdesigner/de.php Stand: 20.02.2008	44

Abb. 3.20	<i>easyBo Fotoservice</i> [ESIGN]	45
Abb. 3.21	<i>3D-Project Showroom</i> Autodesk® Project Showroom http://labs.autodesk.com/technologies/showroom/ Stand: 04.03.2008	45
Abb. 3.22	<i>Augmentierte Bemusterung</i> [Tonn 2007, S.173]	46
Abb. 3.23	<i>Augmentierung eines 3D-Modells</i> [Raskar 2001, S.1]	47
Abb. 3.24	<i>Augmentiertes Modell mit Menüleiste</i> [Matković 2004]	47
Abb. 3.25	<i>Augmentiertes Schaummodell</i> [Saakes 2006, S.146]	47
Abb. 3.26	<i>Materialmuster mit Marker</i> [Kuhlmann 2007, S.54]	48
Abb. 3.27	<i>SensAble Interface</i> SensAble technologies, Inc. http://www.sensable.com/haptic-phantom-omni.htm Stand: 04.03.2008	49
Abb. 3.28	<i>Zehn Dimensionen des Tastens</i> [Bähren 2001, S.39]	50
Abb. 3.29	<i>Digitaler Farbatlas</i> [Digitaler Farbatlas]	52
Abb. 3.30	<i>Bewertung des Farbabstands</i> [Digitaler Farbatlas]	52
Abb. 3.31	<i>Farbpalette in CorelDraw</i> CorelDraw 9, Screenshot	52
Abb. 3.32	<i>Farbwähler in colored architecture</i> Colored Architecture, Screenshot	53
Abb. 3.33	<i>Unregelmäßiger Holzboden</i> Bauwerk Parkett http://www.bauwerk-parkett.com Stand: 04.03.2008	53
Abb. 3.34	<i>Abgestimmte Produkt-Kollektion</i> Deutsche Steinzeug Agrob-Buchtal Architekturkeramik http://www.agrob-buchtal.de/chroma/grafik/systemuebersicht_system_chroma.pdf Stand: 04.03.2008	53
Abb. 3.35	<i>Farbauswahl auf Herstellerwebseite</i> Armstrong DLW AG http://www.armstrong.com/commflreu/de-de/colour-selector.html Stand: 04.03.2008	54
Abb. 3.36	<i>Granta Design CES Selector</i> Granta - Material Intelligence http://www.grantadesign.com/DE/products.htm Stand: 04.03.2008	54
Abb. 3.37	<i>Granta Design Edu Pack</i> Granta - Material Intelligence http://www.grantadesign.com/DE/products.htm Stand: 04.03.2008	55
Abb. 3.38	<i>Materialexplorer</i> http://www.materialexplorer.com/ Stand: 17.11.2005	55

Abb. 3.39	<i>raumProbe</i> http://www.raumprobe.de/ Stand: 17.11.2005	56
Abb. 3.40	<i>Materialworks</i> http://materialworks.com Stand: 24.04.2007	56
Abb. 3.41	<i>Materialatlas</i> http://www.materialatlas.com Stand: 24.04.2007	56
Abb. 3.42	<i>Architekten Informations System</i> http://www.ais-online.de/ Stand: 17.11.2005	56
Abb. 3.43	<i>AIS Ausschreibungsmanager</i> http://www.ais-online.de/ Stand: 17.11.2005	56
Abb. 3.44	<i>Produktsuche auf Herstellerwebseiten</i> Armstrong DLW AG http://www.armstrong.de/commflreu/de-de/line.asp?productLineId=998 Stand: 04.03.2008	57
Abb. 3.45	<i>Vorwerk Teppichboden-Assistent</i> Vorwerk & Co. Teppichwerke GmbH & Co. KG http://www.vorwerk-teppich.de/sc/vorwerk/home_de.html Stand: 05.06.2007	57
Abb. 3.46	<i>Mock-up material explorer</i> [Bezooyen 2002, S.1]	58
Abb. 3.47	<i>nichtzielgerichtete Suche</i> [Bezooyen 2002, S.16]	59
Abb. 3.48	<i>Acme Online Masonry Designer</i> Acme Online Masonry Designer 6.0, Screenshot http://www.brick.com/ Stand: 04.03.2008	60
Abb. 3.49	<i>Virtual Terrazzo</i> Peter Ebensperger KG http://www.terrazzo.it/de/virtual.asp Stand: 04.03.2008	60
Abb. 3.50	<i>Vectogramm®</i> p&p gmbh http://www.vectogramm.de/ Stand: 07.06.2007	60
Abb. 3.51	<i>Ablauf eines integrierten Gesamtprozesses</i> Eigene Grafik	63
Abb. 4.1	<i>Suchmöglichkeit im materialexplorer</i> http://www.materialexplorer.com/ Stand: 17.11.2005	71
Abb. 5.1	<i>Kriterienbaum</i> Eigene Grafik	84
Abb. 6.1	<i>Produktdatenblatt</i> Armstrong DLW AG http://www.armstrong.com/commflreu/de-de/datasheet.asp?productLineId=2381 Stand 06.02.2008	91
Abb. 6.2	<i>üblicher Farbwähler</i> [Photoshop], Screenshot	96

Abb. 6.3	<i>Glanz</i> Eigene Grafik	96
Abb. 6.4	<i>Transparenz</i> Eigene Grafik	96
Abb. 6.5	<i>Form der Primitiva</i> [Miene 1997, S.7]	97
Abb. 6.6	<i>Kontrast einer Textur</i> [Miene 1997, S.9]	97
Abb. 6.7	<i>Gerichtetheit einer Textur</i> [Miene 1997, S.8]	97
Abb. 6.8	<i>Grobheit einer Textur</i> [Miene 1997, S.8]	97
Abb. 6.9	<i>Regelmäßigkeit einer Textur</i> [Miene 1997, S.8]	97
Abb. 6.10	<i>HSB-Farbwähler</i> Adobe Illustrator CS3, Screenshot	104
Abb. 6.11	<i>Visuelles Feedback über Grundkörper</i> MAXON Cinema 4D R9.6, Screenshot	105
Abb. 6.12	<i>Punkteskala für Paarvergleiche bei AHP</i> [Eickemeier 2002, S.390]	108
Abb. 6.13	<i>Ungleichmäßiger $L^*a^*b^*$-Farbraum</i> [Wikipedia 2007n]	113
Abb. 6.14	<i>Optimale Farbdistanz</i> Mojsilović 2002, S.1244	114
Abb. 7.1	<i>MDS im psychometrischen Test</i> [Picard 2003, S.177]	123
Abb. 7.2	<i>Stress versus Dimension</i> [XLSTAT], Screenshot	129
Abb. 7.3	<i>Gestauchte Distanzen</i> [Permap], Screenshot	129
Abb. 7.4	<i>Shepard-Diagramm</i> [XLSTAT], Screenshot	130
Abb. 7.5	<i>Out-of-Plane-Tendenz</i> [Permap], Screenshot	130
Abb. 7.6	<i>Pareto-Plot</i> [Permap], Screenshot	130
Abb. 7.7	<i>2D-Darstellung MDS</i> [3DPlot], Screenshot	131
Abb. 7.8	<i>3D-Darstellung MDS</i> [3DPlot], Screenshot	131
Abb. 7.9	<i>Detailinformationen</i> [3DPlot], Screenshot	131
Abb. 7.10	<i>Anzeige der Gesamtunähnlichkeit</i> [3DPlot], Screenshot	132
Abb. 7.11	<i>Ermittlung von Hauptdimensionen</i> [Kruskal 1978, S.42]	132
Abb. 7.12	<i>Waern-Links</i> [Permap], Screenshot	133
Abb. 7.13	<i>MDS-Interactive</i> [CHI], Screenshot	135

Abb. 7.14	<i>What-If-Strategie</i> Eigene Grafik	136
Abb. 7.15	<i>Browsen</i> Eigene Grafik	137
Abb. 7.16	<i>Bewegungspfade bei dynamischen Änderungen</i> [Cox 1994, S.80]	138
Abb. 8.1	<i>Datenbasis über 100 Materialien</i> ACDSee32, Screenshot	142
Abb. 8.2	<i>Eingabemaske</i> [Excel], Screenshot	143
Abb. 8.3	<i>Auswahlfeld</i> [Excel], Screenshot	143
Abb. 8.4	<i>Farbeingabe</i> [Excel], Screenshot	144
Abb. 8.5	<i>Eingabe der Gewichtung</i> [Excel], Screenshot	144
Abb. 8.6	<i>Anzeige aller Gewichte</i> [Excel], Screenshot	145
Abb. 8.7	<i>Unähnlichkeitsmatrix</i> [Excel], Screenshot	147
Abb. 8.8	<i>Visualisierung MDS in Permap</i> [Permap], Screenshot	148
Abb. 8.9	<i>Visualisierung MDS in XLSTAT-3DPlot</i> [3DPlot], Screenshot	148
Abb. 8.10	<i>Szene 01 - 01</i> [3DPlot], Screenshot	149
Abb. 8.11	<i>Szene 01 - 02</i> [3DPlot], Screenshot	150
Abb. 8.12	<i>Szene 01 - 03</i> [3DPlot], Screenshot	150
Abb. 8.13	<i>Szene 02 - 01</i> [3DPlot], Screenshot	150
Abb. 8.14	<i>Szene 02 - 02</i> [3DPlot], Screenshot	150
Abb. 8.15	<i>Szene 02 - 03</i> [3DPlot], Screenshot	151
Abb. 8.16	<i>Szene 02 - 04</i> [3DPlot], Screenshot	151
Abb. 8.17	<i>Szene 03 - 01</i> [3DPlot], Screenshot	151
Abb. 8.18	<i>Szene 03 - 02</i> [3DPlot], Screenshot	151
Abb. 8.19	<i>Szene 03 - 03</i> [3DPlot], Screenshot	152
Abb. 8.20	<i>Szene 04 - 01</i> [3DPlot], Screenshot	152
Abb. 8.21	<i>Szene 04 - 02</i> [3DPlot], Screenshot	152
Abb. 8.22	<i>Szene 04 - 03</i> [3DPlot], Screenshot	153

Abb. 8.23	<i>Szene 04 - 04</i> [Permap], Screenshot	153
Abb. 8.24	<i>Szene 05 - 01</i> [3DPlot], Screenshot	153
Abb. 8.25	<i>Szene 05 - 02</i> [3DPlot], Screenshot	154
Abb. 8.26	<i>Szene 05 - 03</i> [3DPlot], Screenshot	154
Abb. 8.27	<i>Szene 05 - 04</i> [3DPlot], Screenshot	154
Abb. 8.28	<i>Szene 05 - 05</i> [3DPlot], Screenshot	154
Abb. 8.29	<i>Szene 05 - 06</i> [3DPlot], Screenshot	155
Abb. 8.30	<i>Szene 05 - 07</i> [3DPlot], Screenshot	155
Abb. 8.31	<i>Szene 05 - 08</i> [3DPlot], Screenshot	155

A.3

Formelverzeichnis

Formel 6.1	<i>Wahrgenommene Tonhöhe</i> [Ashby 2002, S.86]	98
Formel 6.2	<i>Klarheit des Klangs</i> [Ashby 2002, S.86]	98
Formel 6.3	<i>Gefühlte Weichheit</i> [Ashby 2002, S.68]	98
Formel 6.4	<i>Gefühlte Wärme</i> [Ashby 2002, S.85]	98
Formel 6.5	<i>Unähnlichkeit bei nominalen Daten</i> [Basalaj 2001, S.3]	112
Formel 6.6	<i>Unähnlichkeit bei ordinalen Daten</i> [Basalaj 2001, S.2]	112
Formel 6.7	<i>Unähnlichkeit bei quantitativen Daten</i> [Basalaj 2001, S.2]	112
Formel 6.8	<i>Buntheit</i> [DIN2006, S.6]	113
Formel 6.9	<i>Buntonwinkel</i> [DIN2006, S.6]	113
Formel 6.10	<i>Farbabstand</i> [DIN2006, S.7]	113
Formel 6.11	<i>max. L*a*b*-Wert</i> Hergeleitet aus [Formel 6.8] und [Wikipedia 2007n]	114
Formel 6.12	<i>max. mögl. Farbabstand</i> Hergeleitet aus [Formel 6.10] und [Wikipedia 2007n]	114
Formel 6.13	<i>Gesamtdistanz</i> Hergeleitet aus [Wikipedia 2007p]	117
Formel 6.14	<i>Gewichtete Gesamtdistanz</i> [Cox 1994, S.10]	117
Formel 6.15	<i>Einführung eines binären Faktors</i> [Basalaj 2001, S.4]	118
Formel 7.1	<i>Standardisierter Stress</i> [XLSTAT 2006]	124

A.4

Quellenverzeichnis

- Addington 2005 *Smart Materials and Technologies for the architecture and design professions*
D. Michelle Addington; Daniel L. Schodek
Oxford [u.a.] : Architectural Press, 2005
- AKThü 2005 *Thüringer Architektengesetz*
vom 13. Juni 1997 (GVBl. 1997, S. 210) in der Fassung der Änderung vom 04.02.1999 (GVBl. 1999, S. 110), vom 24.10.2001 (GVBl. 2001, S. 269) und vom 22.03.2005 (GVBl. 2005, S. 113)
Architektenkammer Thüringen
http://www.architekten-thueringen.de/architektengesetz/_download/thuerarchg.pdf
Stand: 11.10.2007
- Appiani *Appiani - technical ceramics for architecture*
Anbieter von Architekturkeramik, 3D-Bibliothek zum Download
<http://www.appiani.it/download/download.asp?Lang=DE>
Stand: 02.04.2007
- Arroway *Arroway textures*
Anbieter von hochauflösenden Multilayer-Texturen für Visualisierungen
<http://www.arroway.de/de/index.html>
Stand: 27.02.2008
- Ashby 2002 *Materials and design : the art and science of material selection in product design*
Michael F. Ashby; Kara Johnson
Oxford [u.a.] : Butterworth-Heinemann, 2002
- Autodesk 2003 *The i-drop® Web Publishing Framework*
http://images.autodesk.com/adsk/files/3134901_idrop_introduction0.pdf
Stand: 02.04.2007
- Bähren 2001 *Virtuelle Haptik*
Ralf Bähren
Vordiplom an der Fachhochschule Köln, März 2001
http://www.touchablez.de/Virtuelle_Haptik.pdf
Stand: 19.07.2006
- Basalaj 2001 *Proximity Visualisation of Abstract Data*
Wojciech Basalaj
Januar 2001
<http://www.pavis.org/essay/pavis.pdf>
Stand: 06.11.2006
- Berk 1982 *A New Color-Naming System for Graphics Languages*
Toby S. Berk; L. Brownston; A. Kaufman
IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 2, No. 3, Mai 1982, S.37-44
- Beylerian 1990 *Mondo materials: materials and ideas for the future*
George M. Beylerian; Jeffrey J. Osborne
New York : Abrams, 1990
- Bezooyen 2002 *Material Explorer - "Material Selection Support Tool for Designers"*
Arnold van Bezooyen
Masterthesis an der Technischen Universität Delft, Mai 2002
<http://www.materialexplorer.com/bg/pages/downloads.php>
Stand: 06.11.2006

- BGBI 2001 *Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure*
in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. März 1991
zuletzt geändert durch Art. 5 Neuntes Euro-EinführungsgG vom 10.11.2001 (BGBl. I S. 2992)
<http://www.hoai.de/online/HOAI-Text/HOAI1996.php>
Stand: 16.3.2007
- BGBI 2004 *Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV)*
1. Auflage 2004
Vom 12. August 2004 (BGBl. I S.2179)
http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbst_ttv_2004/gesamt.pdf
Stand: 29.11.2004
- BGZ 2003 *BGR181 Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr*
Berufsgenossenschaftliche Zentrale für Sicherheit und Gesundheit BGZ
Fachausschuss „Bauliche Einrichtungen“ der BGZ
Oktober 1993, aktualisierte Fassung Oktober 2003
<http://www.arbeitssicherheit.de/servlet/PB/show/1224489/bgr181.pdf>
Stand: 24.10.2007
- Bhushan 1997 *The Texture Lexicon: Understanding the Categorization of Visual Texture Terms and Their Relationship to Texture Images*
Nalini Bhushan; A. Ravishankar Rao; Gerald L. Lohse
In: Cognitive Science Vol 21 (2) 1997, S.219-246
<http://www.cogsci.rpi.edu/CSJarchive/1997v21/i02/p0219p0246/MAIN.PDF>
Stand: 19.07.2006
- Birk 2006 *Das Material macht den Unterschied*
Stephan Birk
In: arcguide, Der Internetführer für Architektur, 21. Ausgabe, 2006
<http://www.arcguide.de/jung/html/artikel1-00.html>
Stand: 30.05.2007
- Birk 2006 b *raumPROBE*
Interview mit Hannes Bäuerle und Joachim Stumpp, raumPROBE
Stephan Birk; Liza Heilmeyer
In: arcguide, Der Internetführer für Architektur, 21. Ausgabe, 2006
<http://www.arcguide.de/jung/html/artikel2-00.html>
Stand: 30.05.2007
- BMVBS 2001 *Leitfaden nachhaltiges Bauen*
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
Stand: Januar 2001, 2. Nachdruck (mit redaktionellen Änderungen)
http://www.bmvbs.de/architektur-baukultur/download/lf_nachhbauen.pdf
Stand: 24.10.2007
- Böhme 1994 *Der Glanz des Materials - zur Kritik der ästhetischen Ökonomie*
Gernot Böhme
In: Der Stoff der Dinge: Material und Design
Arnica-Verena Langenmaier [Hrsg.]
München : Design-Zentrum, 1994
- Brownell 2006 *Transmaterial: a catalog of materials that redefine our physical environment*
Blaine Brownell
New York : Princeton Architectural Press, 2006
- C4D-Textures *C4D Textures - Texturize the Real World*
Webseite zum Up- und Download von Materialien für Visualisierungen
<http://www.c4dtextures.com/modules/rmdp/>
Stand: 25.10.2007

- Cardwell 1997 *New materials for construction*
Simon Cardwell
The Arup Journal 3/1997, S.18-19
- Colored Architecture *Colored Architecture*
Software zur Farb-, Material- und Lichtentwurfsplanung
Christian Tonn, Bauhaus-Universität Weimar
- Cox 1994 *Multidimensional scaling*
Trevor F. Cox; Michael A. A. Cox
London [u.a.]: Chapman & Hall, 1994
- Darksim *Advanced Shader & Procedural Effects Authoring*
Software zur prozeduralen Beschreibung von Texturen für Visualisierungen
Darkling Simulations
<http://www.darksim.com/>
Stand: 27.02.2008
- Dialux *DIALux V. 4.4.0.5*
Software für Lichtplanung und -präsentation
DIAL GmbH
<http://www.dial.de/>
Stand: 27.02.2008
- Digitaler Farbatlas *Digitaler Farbatlas V.3.0*
Software zum zahlenmäßigen Vergleich und Bewertung von Farbtönen
dtp studio oldenburg
<http://www.farbatlas.com/>
Stand: 27.02.2008
- Dillon 2000 *Sensing The Fabric - To simulate sensation through sensory evaluation and in response to standard acceptable properties of specific materials when viewed as a digital image*
Pat Dillon; Wendy Moody; Rebecca Bartlett; Patricia Scully; Roger Morgan; Christopher James
Workshop on Haptic Human-Computer Interaction, 31.08.-01.09.2000, University of Glasgow, Scotland
<http://www.dcs.gla.ac.uk/~stephen/workshops/haptic/papers/dillon.pdf>
Stand: 06.11.2006
- DIN 1990 *DIN 201 Technische Zeichnungen – Schraffuren – Darstellungen von Schnittflächen und Stoffen*
Deutsches Institut für Normung e.V.
5. Ausgabe, 1990
- DIN 1995 *DIN 1356-1 Bauzeichnungen*
Deutsches Institut für Normung e.V.
Perinorm Norm CD, Beuth-Verlag
Stand: März 2006
- DIN 2002 *DIN ISO 128-50 Technische Zeichnungen – Allgemeine Grundlagen der Darstellung – Teil 50: Grundregeln für Flächen in Schnitten und Schnittansichten*
Deutsches Institut für Normung e.V.
Ausgabe Mai 2002
- DIN 2005 *DIN EN 685 Elastische, textile und Laminat-Bodenbeläge - Klassifizierung; Deutsche Fassung EN 685:2005*
Deutsches Institut für Normung e.V.
Perinorm Norm CD, Beuth-Verlag
Stand: März 2006

- DIN 2006 *DIN 6174 Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen CIELAB-Farbenraum*
Entwurf, vorgesehen als Ersatz für DIN 6174:1979-01
Deutsches Institut für Normung e.V.
Perinorm Norm CD, Beuth-Verlag
Stand: März 2006
- DIN 2007 *DIN 18960 Nutzungskosten im Hochbau*
Entwurf, vorgesehen als Ersatz für DIN 18960:1999-08
Deutsches Institut für Normung e.V.
Perinorm Norm CD, Beuth-Verlag
Stand: März 2007
- Doveil 1994 *Material spricht - Wirkung, Wert, Ästhetik*
Frida Doveil
Aus dem Italienischen von Birgit Harnack und Arnica-Verena Langenmaier
In: Der Stoff der Dinge: Material und Design
Arnica-Verena Langenmaier [Hrsg.]
München : Design-Zentrum, 1994
- DWDS 2008 *Das Digitale Wörterbuch der deutschen Sprache des 20. Jh.*
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
<http://www.dwds.de/>
Stand: 27.02.2008
- E-class *e-Cl@ss® - Classification and Product Description*
Internationaler Standard zur Klassifizierung und Beschreibung von Produkten und Dienstleistungen
eCl@ss e.V.
<http://www.eclass.de>
Stand: 28.02.2008
- Eickemeier 2002 *Bestimmung der Gewichte bei Mehrzielentscheidungen. Eine vergleichende Analyse ausgewählter Verfahren*
Susanne Eickemeier
In: Operations Research Proceedings 2001, Selected Papers of the International Conference on Operations Research, Duisburg, 03.-05.09.2001
Berlin [u.a.] : Springer, 2002
<http://www.uni-duisburg.de/or2001/pdf/Sek%2013%20-%20Eickemeier.pdf>
Stand: 06.11.2006
- ERCO *ERCO Leuchten*
Anbieter von Leuchten, Download von Leuchtendaten
ERCO Leuchten GmbH
<http://www.erco.com>
Stand: 02.04.2007
- ESIGN *easyBo Fotoservice*
Anbieter von Fotobearbeitungen für virtual showrooms
ESIGN Software GmbH
<http://www.easybo.de/cms/>
Stand: 18.04.2007
- Esslinger 2005 *Gefühlte Optik – Material und Haptik im Gestaltungsprozess*
Marc Esslinger
In: Baustoff Atlas, S.32-35
Manfred Hegger [Hrsg.]
Basel [u.a.] : Birkhäuser ; München : Ed. Detail, 2005
- Everitt 1993 *Cluster analysis*
Brian S. Everitt
London [u.a.] : Arnold, 1993
- Fernandez 2006 *Material architecture: emergent materials for innovative buildings and ecological construction*
John Fernandez
Amsterdam [u.a.] : Elsevier-Architectural Press, 2006

- Finalrender *Finalrender*
Software für physikalisch korrekte Visualisierungen
CEBAS Visual Technology
<http://www.finalrender.com/>
Stand: 28.02.2008
- Formula II *Formula II*
Software zum Entwurf und Herstellung von mehrschichtigen Autolacken
Integra Inc.
<http://www.integra.jp/en/formula2/index.html>
Stand: 28.02.2008
- Fryrender *Fryrender*
Software für physikalisch korrekte Visualisierungen
Feversoft© Virtual Reality Technology
<http://fryrender.com/>
Stand: 28.02.2008
- Funhoff 2005 *Die Entwicklung innovativer Materialien*
Dirk Funhoff
In: Baustoff Atlas, S.28-31
Manfred Hegger [Hrsg.]
Basel [u.a.] : Birkhäuser ; München : Ed. Detail, 2005
- FX Composer *FXComposer*
Software zum Beschreiben von Shadern für Realtime-Visualisierungen
NVIDIA® Corporation
http://developer.nvidia.com/object/fx_composer_home.html
Stand 28.02.2008
- Hansen 2005 *Die Emanzipation der Oberfläche*
Birgit Hansen
In: DBZ 12/2005, S.66-68
- Haptex *HAPTEX - HAPtic sensing of virtual TEXTiles*
Visio-haptisches VR-System zur Interaktion mit virtuellen Textilien
MIRALab, Universität Genf
<http://haptex.miralab.unige.ch/>
Stand: 28.02.2008
- Hatchpatterns *Hatchpatterns*
Anbieter von Schraffuren zum Download
Charles Sweeney
<http://hatchpatterns.com>
Stand: 25.10.2007
- Heady 2004 *PERMAP 11.3 - Operation Manual*
Ronald B. Heady; Jennifer L. Lucas
März 2004
<http://www.ucs.louisiana.edu/~rbh8900/PermapManual.pdf>
Stand: 06.11.2006
- Hegger 2005 *Baustoff Atlas*
Manfred Hegger [Hrsg.]
Basel [u.a.] : Birkhäuser ; München : Ed. Detail, 2005
- Hegger 2006 *Materialgerecht bauen – Kriterien für die Baustoffwahl*
Manfred Hegger
In: Detail 6/2006, S.652-657
- Heilmeyer 2006 *Klassiker remixed*
Liza Heilmeyer
In: arcguide, Der Internetführer für Architektur, 21. Ausgabe, 2006
<http://www.arcguide.de/jung/html/artikel3-00.html>
Stand: 30.05.2007

- Hollins 1993 *Perceptual dimensions of tactile surface texture: A multidimensional scaling analysis*
Mark Hollins; Richard Faldowski; Suman Rao; Forrest Young
In: Perception & Psychophysics, 1993, 54 (6), S.697-705
<http://www.psychonomic.org/search/index.cgi>
Stand 09.08.2006
- Hullmann 2002 *Materialexperimente – Innovationen bei Konstruktion und Gestaltung*
Heinz Hullmann
In: DBZ 12/2002, S.26-29
- IAI 2001 *Material Selection, Specification and Procurement*
International Alliance for Interoperability
IFC Completed Project, PM-3
http://ce.vtt.fi/iaifc/projects/ShowProjectInfo.jsp?project_id=47&status_id=3
Stand: 27.06.2006
- IAI 2006 *Industry Foundation Classes IFC2x Edition 3 - IfcMaterialProperties*
International Alliance for Interoperability
http://www.iai-international.org/Model/R2x3_final/index.htm
Stand: 25.10.2007
- ImageSynth *imageSynth*
Software zur Erstellung nahtlos kachelbarer Texturen für Visualisierungen
Luxology LLC.
<http://www.luxology.com/whatismodo/imageSynth.aspx>
Stand: 25.10.2007
- InfAR 2007 *Forschungsgrundsätze InfAR*
Informatik in der Architektur, Bauhaus-Universität Weimar
<http://infar.architektur.uni-weimar.de/infar/index.html>
Stand: 07.03.2007
- Jana 2006 *The Revolution in Building Materials*
Reena Jana
Interview mit Blaine Brownell in: Business Week online 28.02.2006
http://www.businessweek.com/print/innovate/content/feb2006/id20060228_541223.htm
Stand: 02.03.2006
- Joppien 2002 *Neue Materialien in Kunsthandwerk und Design*
Joppien, Rüdiger
In: Material in Kunst und Alltag
Monika Wagner; Dietmar Rübel [Hrsg.]
Berlin : Akad.-Verl, 2002
- Kennedy 2001 *KVA: Material misuse*
Sheila Kennedy; Christoph Grunenberg
London : Architectural Association, 2001
- Kruskal 1978 *Multidimensional scaling*
Joseph B. Kruskal; Myron Wish
Newbury Park, Calif. [u.a.] : Sage Publications, 1978
- Kuhlmann 2007 *SARSamplingKit - Simulation von Farbe, Material und Licht in einer Spatial-Augmented-Reality Umgebung zur Planungsunterstützung*
Thomas Kuhlmann
Diplomarbeit an der Bauhaus-Universität Weimar, 2007
- LEGEP *LEGEP®*
Software zur lebenszyklusbezogenen Planung und ökologisch-ökonomischer Bewertung von Gebäuden
LEGEP Software GmbH
<http://www.legep.de>
Stand: 28.02.2008

- LightWorks *LightWorks*
Software zur plattform- / softwareunabhängigen Beschreibung von Material,
Download von „Real-World“-Materialien und -Produkten
LightWork Design Ltd.
<http://www.lightworks-user.com/>
Stand: 03.04.2007
- Lindbloom 2001 *RGB Working Space Matrices*
Bruce Justin Lindbloom
<http://www.brucelindbloom.com>
Stand: 07.07.2006
- Lusti 2002 *Data warehousing und data mining: eine Einführung in entscheidungsunterstützende Systeme*
Markus Lusti
2. überarbeitete und erweiterte Auflage
Berlin [u.a.] : Springer, 2002
- Manzini 1989 *The material of invention*
Ezio Manzini
1. Ausgabe
Cambridge, Mass. : The MIT Press, 1989
- Matković 2004 *Dynamic Texturing of Real Objects in an Augmented Reality System*
Krešimir Matkovic, Thomas Psik, Ina Wagner, Denis Gračanin
Technical report, Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung, 2004
http://www.vrvis.at/TR/2004/TR_VRVis_2004_034_Full.pdf
Stand: 24.07.2006
- Maxwellrender *Maxwellrender*
Software für physikalisch korrekte Visualisierungen
Next Limit Technologies
<http://www.maxwellrender.com/>
Stand: 28.02.2008
- Miene 1997 *Analyse und Beschreibung von Texturen*
Andrea Miene; Oliver Moehrke
Diplomarbeit an der Universität Bremen, 1997
<http://www.informatik.uni-bremen.de/agki/www/grp/agki/download/1997/mienemoehrke97.pdf>
Stand: 27.07.2006
- Mojsilović 2000 a *Matching and retrieval based on the vocabulary and grammar of color patterns*
Aleksandra Mojsilović; Jelena Kovačević; Jianying Hu; Robert J. Safranek; S. Kicha Ganapathy
IEEE Transactions on Image Processing, Volume 9, no. 1, Januar 2000, S.38-54
<http://www.research.ibm.com/people/a/aleksand/pdf/00817597.pdf>
Stand: 19.07.2006
- Mojsilović 2000 b *A Method for Color Content Matching of Images*
Aleksandra Mojsilović
IBM Research
<http://www.research.ibm.com/people/jf/yhu/icme00.pdf>
Stand: 19.07.2006
- Mojsilović 2002 *Extraction of perceptually important colors and similarity measurement for image matching retrieval and analysis*
Aleksandra Mojsilović; Jianying Hu; Emina Soljanin
IEEE Transactions on Image Processing, Volume: 11, no. 11, November 2002, S.1238-1248
<http://www.research.ibm.com/people/a/aleksand/pdf/01097760.pdf>
Stand: 19.07.2006

- Morris 1891 *The Influence Of Building Materials On Architecture*
William Morris
The William Morris Internet Archive
<http://www.marxists.org/archive/morris/works/1891/building.htm>
Stand: 27.02.2008
- Munsell 1969 *A Grammar of Color*
Albert H. Munsell
dt. Auszüge in: Gericke/Schmidt, Phänomen Farbe
Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969
- Neutra 1966 *Material – Menschlich angesehen*
Richard Neutra
In: Material, Struktur, Ornament: Beispiele Architektur
Horst Peter Dollinger [Hrsg.]
München : Moos, 1966
- Osborne 1990 *Mondo Materials*
Vorwort in: Mondo materials: materials and ideas for the future
George M Beylerian [Hrsg.]; Elliott Kaufman
New York : Abrams, 1990
- Pasman 2003 *Designing with Precedents*
Gert Pasman
Ph.D. Thesis an der Technischen Universität Delft, 2003
<http://studiolab.io.tudelft.nl/dwp/>
Stand: 28.02.2008
- Photoshop *Photoshop® CS3 Extended*
Software zur Bildbearbeitung, Integration von 3D-Modellen
Adobe Systems GmbH
<http://www.adobe.com/de/products/photoshop/photoshop/>
Stand 28.02.2008
- Picard 2003 *Perceptual dimensions of tactile textures.*
Delphine Picard; Catherine Dacremont; Dominique Valentin; Agnès Giboreau
In: Acta psychologica 114, S.165-184
Amsterdam : Elsevier
- Piranesi *Piranesi 5.0*
Software zum Weiterbearbeiten und Präsentieren von 3D-Modellen
Informatix Software International Ltd
<http://www.informatix.co.uk/piranesi/index.shtml>
Stand: 28.02.2008
- RAL digital *RAL digital*
Software zum Einbinden und Bewerten der RAL-Farbpaletten
dtp studio oldenburg
<http://www.ral-digital.de/>
Stand: 28.02.2008
- Rao 1993 *Towards a Texture Naming System: Identifying Relevant Dimensions of Texture*
A. Ravishankar Rao, Gerald L. Lohse
Visualization '93 : proceedings, 25.-29.10.1993, S.220-227
- Raskar 2001 *Shader Lamps*
Ramesh Raskar; Greg Welch; Kok-lim Low; Deepak Bandyopadhyay
<http://www.merl.com/reports/docs/TR2001-21.pdf>
Stand: 11.04.200
- Rendermonkey *RenderMonkey™ Toolsuite*
Software zum Beschreiben von Shadern für Realtime-Visualisierungen
Advanced Micro Devices, Inc.
<http://ati.amd.com/developer/rendermonkey/index.html>
Stand: 28.02.2008

- Richens 1997 *Beyond Photorealism*
In: The Architects Journal, 12.06.1997
http://www.informatix.co.uk/piranesi/product_information_ajart.shtml
Stand: 30.05.2007
- Rudolphi 2005 *Kriterien für die Auswahl von Baustoffen*
Alexander Rudolphi
In: Baustoff Atlas, S.22-27
Manfred Hegger [Hrsg.]
Basel [u.a.] : Birkhäuser ; München : Ed. Detail, 2005
- Saakes 2006 *Material light: exploring expressive materials*
Daniel Saakes
In: Pers Ubiquit Comput (2006) 10, S.144-147
<http://studiolab.io.tudelft.nl/saakes/publications>
Stand: 24.07.2006
- Saaty 1990 *Multicriteria decision making: the analytic hierarchy process ; planning, priority setting, resource allocation*
Thomas L. Saaty
2. ed., 2. printing. - Pittsburgh, Pa. : RWS Publ, 1996
- Sauer 2005 *Der Architekt als Baustoffscout*
Christiane Sauer
In: Baustoff Atlas, S.14-17
Manfred Hegger [Hrsg.]
Basel [u.a.] : Birkhäuser ; München : Ed. Detail, 2005
- Sauer 2006 *Neue Materialentwicklungen*
Christiane Sauer
In: Detail 6/2006, S.590-594
- Schittich 2001 *Materialästhetik und Ornament*
Christian Schittich
In: Im Detail: Gebäudehüllen : Konzepte, Schichten, Material
Christian Schittich [Hrsg.]
Basel [u.a.] : Birkhäuser, 2001
- Schittich 2005 *Die Oberfläche in der zeitgenössischen Architektur*
Christian Schittich
In: Baustoff Atlas, S.10-13
Manfred Hegger [Hrsg.]
Basel [u.a.] : Birkhäuser ; München : Ed. Detail, 2005
- Schittich 2006 *Die neue Sinnlichkeit des Materials*
Christian Schittich
In: DETAIL 6-2006, S.586-589
- Shneiderman 1998 *Designing the user interface - strategies for effective human-computer interaction*
Ben Shneiderman
3. ed., reprinted with corrections.
Reading, Mass. [u.a.] : Addison-Wesley, 1998
- Sirados *SirAdos Baudaten*
Datenbank zu Baupreisen, Ausschreibung, Bauelementen
WEKA MEDIA GmbH & Co. KG
<https://www.sirados.de>
Stand: 28.02.2008
- Spence 2001 *Information visualization*
Robert Spence
Harlow [u.a.] : Addison-Wesley [u.a.], 2001
- Srinivasan 2005 *What is Haptics?*
Mandayam A Srinivasan
http://www.sensable.com/documents/documents/what_is_haptics.pdf
Stand: 30.05.2007

- Stappers 2000 *Exploring databases for taste or inspiration with interactive multi-dimensional scaling.*
Pieter Jan Stappers; Gert Pasman; Patrick J.F. Groenen
Proceedings of the XIVth triennial congress of the International Ergonomics Association and 44th annual meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, San Diego, CA., 2000
<http://studiolab.io.tudelft.nl/static/gems/publications/00StapIEAExpl.pdf>
Stand: 06.11.2006
- Texxux *Texxux*
Anbieter von Rapid Prototyping-Bearbeitung von Baustoffen
Texxux Limited
<http://www.texxux.com/>
Stand: 06.11.2007
- TMBV 2004 *Thüringer Bauordnung ThürBO*
in der Fassung vom 16.März 2004 (GVGl. S. 349)
Thüringer Ministerium für Bau und Verkehr
<http://www.thueringen.de/imperia/md/content/tmbv/staedteundwohnungsbau/bauordnung.pdf>
Stand: 25.10.2007
- Tonn 2005 *Computergestütztes dreidimensionales Farb-, Material- und Lichtentwurfswerkzeug für die Entwurfsplanung in der Architektur*
Christian Tonn
Diplomarbeit an der Bauhaus-Universität Weimar, 2005
<http://architektur-informatik.scix.net/data/works/att/724a.content.05358.pdf>
Stand: 27.02.2008
- Tonn 2007 *Simulating the atmosphere of spaces – the AR-based support of 1:1 colour sampling in and within existing buildings*
Christian Tonn, Dirk Donath, Frank Petzold
In: Predicting the Future - eCAADe, Frankfurt/Wiesbaden, S.169-176
J. Kieferle and K. Ehlers [Hrsg.], 2007
- Vollard 2004 *Skins for buildings: the architect's materials samples book*
Piet Vollard; Els Zijstra
Vorwort in: Skins for buildings: the architect's materials samples book
Ine ter Borch; David Keuning; Caroline Kruit; Ed Melet; Dr. Kees Peterse; Piet Vollard; Tom de Vries; Els Zijlstra [Hrsg.]
Amsterdam : BIS Publ., 2004
- W3C 2002 *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Zweite Auflage)*
In der Deutschen Übersetzung von Stefan Mintert, 20.01.2002
World Wide Web Consortium
<http://www.edition-w3c.de/TR/2000/REC-xml-20001006/#elemdecls>
Stand: 12.07.2007
- Ware 2004 *Information visualization: perception for design*
Colin Ware
2. ed. - San Francisco, Calif. :
Morgan Kaufmann ; Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 2004
- Weber 1993 *Mehrkriterielle Entscheidungen*
Karl Weber
München [u.a.] : Oldenbourg, 1993
- Wikipedia 2006a *Entscheidungstheorie*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Entscheidungstheorie>
Stand 10.10.2006, 14:52 Uhr
- Wikipedia 2006b *Plausibilität*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Plausibilit%C3%A4t>
Stand 02.11.2006, 16:07 Uhr
- Wikipedia 2006c *Haptische Wahrnehmung*
http://de.wikipedia.org/wiki/Haptische_Wahrnehmung
Stand 29.07.2006, 23:16 Uhr

- Wikipedia 2006c *Heuristik*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Heuristik>
 Stand 29.09.2006, 13:55 Uhr
- Wikipedia 2006d *Entscheidung*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Entscheidung>
 Stand 12.08.2006, 17:46 Uhr
- Wikipedia 2006e *KO-Kriterium*
<http://de.wikipedia.org/wiki/KO-Kriterium>
 Stand 06.10.2006, 15:55 Uhr
- Wikipedia 2006f *Kriterium*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Kriterium>
 Stand 19.10.2006, 13:35 Uhr
- Wikipedia 2006g *Temperatur*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Temperatur>
 Stand 09.08.2006, 11:00 Uhr
- Wikipedia 2007a *Mip Mapping*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Mipmap>
 Stand 29.01.2007, 23:00 Uhr
- Wikipedia 2007b *RSS*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Rss>
 Stand 26.03.2007, 17:17 Uhr
- Wikipedia 2007c *Atom (XML-Format)*
http://de.wikipedia.org/wiki/Atom_%28XML-Format%29
 Stand 07.03.2007, 19:01 Uhr
- Wikipedia 2007d *Radio Frequency Identification*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Rfid>
 Stand 05.04.2007, 19:29 Uhr
- Wikipedia 2007e *Suchen*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Suche>
 Stand 22.08.2007, 20:20 Uhr
- Wikipedia 2007f *Produktkonfigurator*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Konfigurator>
 Stand 29.10.2007, 17:42 Uhr
- Wikipedia 2007g *Individualisierte Massenfertigung*
http://de.wikipedia.org/wiki/Individualisierte_Massenfertigung
 Stand 29.10.2007, 13:36 Uhr
- Wikipedia 2007h *Bedeutsamkeit*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Bedeutsamkeit>
 Stand 17.07.2007, 09:44 Uhr
- Wikipedia 2007i *Sinne (Wahrnehmung)*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Sinne>
 Stand 29.05.2007, 18:07 Uhr
- Wikipedia 2007j *Rangordnung*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Ranking>
 Stand 21.06.2007, 20:03 Uhr
- Wikipedia 2007k *Ziel*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Ziel>
 Stand 09.11.2007, 16:58 Uhr
- Wikipedia 2007l *Normalisierung (Mathematik)*
http://de.wikipedia.org/wiki/Normalisierung_%28Mathematik%29
 Stand 02.08.2007, 12:04 Uhr
- Wikipedia 2007m *Likert-Skala*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Likert-Skala>
 Stand 19.07.2007, 15:28 Uhr

- Wikipedia 2007n *CIE-Normvalenzsystem*
<http://de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem>
 Stand 03.08.2007, 11:20 Uhr
- Wikipedia 2007o *Metrischer Raum*
http://de.wikipedia.org/wiki/Metrischer_Raum
 Stand 14.08.2007, 14:48 Uhr
- Wikipedia 2007p *Euklidischer Raum*
http://de.wikipedia.org/wiki/Euklidischer_Raum
 Stand 05.07.2007, 14:52 Uhr
- Wikipedia 2007q *Modell (Begriff)*
http://de.wikipedia.org/wiki/Modell_%28Begriff%29
 Stand 20.08.2007, 06:51 Uhr
- Wikipedia 2007r *Prokrustes*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Prokrustes>
 Stand 18.07.2007, 22:40 Uhr
- Wikipedia 2008a *Lab-Farbraum*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Lab-Farbraum>
 Stand: 20.02.2008 09:34 Uhr
- Wikipedia 2008b *RAL-Farbsystem*
<http://de.wikipedia.org/wiki/RAL-Farbsystem>
 Stand 15.02.2008, 22:30 Uhr
- Wikipedia 2008c *Natural Color System*
http://de.wikipedia.org/wiki/Natural_Color_System
 Stand 27.01.2008, 00:06 Uhr
- Wikipedia 2008d *Glanz*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Glanz>
 Stand 11.02.2008, 01:52 Uhr
- Wikipedia 2008e *Delta E*
http://de.wikipedia.org/wiki/Delta_E
 Stand 14.02.2008, 08:03 Uhr
- Wikipedia 2008f *Härte*
<http://de.wikipedia.org/wiki/H%C3%A4rte>
 Stand 31.01.2008, 11:32 Uhr
- Wikipedia 2008g *Rauigkeit*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Rauigkeit>
 Stand: 14.01.2008, 18:01 Uhr
- Wikipedia 2008h *Schleifpapier*
<http://de.wikipedia.org/wiki/Schleifpapier>
 Stand 17.02.2008, 15:30 Uhr
- XLSTAT 2006 *Online-Hilfe zu XLSTAT 2006*
 Addinsoft, 2006
- Young 1985 *Multidimensional Scaling*
 Forrest W. Young
 Original: Kotz-Johnson (Ed.) Encyclopedia of Statistical Sciences, Volume 5, Copyright (c) 1985 by John Wiley & Sons, Inc.
<http://forrest.psych.unc.edu/teaching/p208a/mds/mds.html>
 Stand: 06.11.2006

A.5

Im Prototyp verwendete Software

XLSTAT	<i>XLSTAT 2007.1</i> Softwareaufsatz zur Datenanalyse in MS Excel Addinsoft http://www.xlstat.com
Permap	<i>Permap 11.3</i> Software zur Berechnung und Anzeige von Multidimensional Scaling-Analysen Ronald B. Heady http://www.ucs.louisiana.edu/~rbh8900/
Excel	<i>Microsoft® Office Excel 2003</i> Software zur Tabellenkalkulation Microsoft Corporation http://www.microsoft.com
Matrix	<i>Matrix and Linear Algebra for Excel v.22</i> Add-In zur Erweiterung der Matrixfunktionalität in MS Excel Foxes Team http://digilander.libero.it/foxes/SoftwareDownload.htm
3DPlot	<i>XLSTAT-3DPlot 6.1</i> Software zur 3D-Datenvisualisierung Addinsoft http://www.xlstat.com/de/products/xlstat-3dplot/
Visual Basic	<i>Microsoft® Visual Basic 6.5</i> Entwicklungsumgebung für Makros in MS Office-Anwendungen Microsoft Corporation http://www.microsoft.com

A.6

Weiterführende Quellen

Die folgenden Quellen sollen dem interessierten Leser einen vertiefenden Einblick in einzelne Themenfelder der Arbeit ermöglichen. Sie wurden allesamt für die Arbeit ebenfalls untersucht und ausgewertet, sind im Text jedoch nicht vollständig referenziert.

Inspirations- und Informationsquellen

Fachzeitschriften mit Themenschwerpunkt Material

arcguide 21. Ausgabe	<i>Materialien + Oberflächen</i>
db 1/06	<i>Oberflächen anders</i>
DBZ 11/05	<i>Materialexperimente</i>
DBZ 12/05	<i>Haptik</i>
detail 10/0	<i>Transluzente Materialien</i>
detail 6/06	<i>Material + Oberfläche</i>

Bücher zur Materialinspiration

Beylerian, George	<i>MaterialConneXion_1</i>
Beylerian, George	<i>MaterialConneXion_2</i>
Brownell, Blaine	<i>Transmaterial</i>
Hegger, Manfred	<i>Baustoff Atlas</i>
Martin, Cat	<i>The Surface Texture Book</i>
MateriÓ	<i>Material World 2 -innovative materials for architecture and design</i>
Onna, Edwin	<i>Material World - innovative structures and finishes for interiors</i>
Stattmann, Nicola	<i>Handbuch Material Technologie</i>
Zijlstra, Els	<i>Material skills</i>

Material-Rechercheservices

Formade architecture + materials	http://www.formade.com/srv_recherche.html Stand: 04.03.2008
Hansen Innenarchitektur	http://www.hansen-innenarchitektur.de Stand: 04.03.2008
Materialsgate	http://www.materialsgate.de/cberatung.html Stand: 04.03.2008
Plan-und b	http://plan-und-b.de Stand: 04.03.2008

Fachmessen

100%materials	http://www.100percentdetail.co.uk Stand: 04.03.2008
contractworld materials	http://www.contractworld.com Stand: 04.03.2008
materialexperience	http://www.materialxperience.nl Stand: 04.03.2008

Materialica <http://www.materialica.de>
Stand: 04.03.2008

Materialvision <http://material-vision.messefrankfurt.com>
Stand: 04.03.2008

Material-Agenturen

Materia <http://materia.nl>
Stand: 04.03.2008

MaterialconneXion <http://www.materialconnexion.com>
Stand: 04.03.2008

Materio <http://www.materio.com>
Stand: 04.03.2008

Modulor Musterkiste <http://www.modulor.de>
Stand: 04.03.2008

Musterkiste <http://musterkiste.de>
Stand: 04.03.2008

Raumprobe <http://www.raumprobe.de>
Stand: 04.03.2008

Material-Newsletter

Materialsmothly <http://www.papress.com/mm2/index.tpl>
Stand: 04.03.2008

Materialworks <http://www.materialworks.com>
Stand: 04.03.2008

Materio <http://www.materio.com>
Stand: 04.03.2008

Transstudio <http://transstudio.com/tm/>
Stand: 04.03.2008

Material-Scouts

Formade <http://www.formade.com/>
Stand: 04.03.2008

Materialconnexion <http://www.materialconnexion.com>
Stand: 04.03.2008

Material-Scout <http://material-scout.com/>
Stand: 04.03.2008

Raumprobe <http://www.raumprobe.de/>
Stand: 04.03.2008

Materialdatenbanken im Web

Materialdatenbanken zur Inspiration

100%Materials <http://www.100percentmaterials.co.uk/>
Stand: 04.03.2008

Architonic <http://www.architonic.com/>
Stand: 04.03.2008

Innovatheque <http://www.innovatheque.fr/>
Stand: 04.03.2008

MaterialconeeXion <http://www.materialconnexion>
Stand: 04.03.2008

Materialexplorer	http://www.materialexplorer.com/ Stand: 04.03.2008
Materialworks	http://materialworks.com Stand: 04.03.2008
Materio	http://www.materio.com/ Stand: 04.03.2008
RaumProbe	http://www.raumprobe.de/ Stand: 04.03.2008

Materialspezifische Datenbanken

Materialatlas	http://www.materialatlas.com Stand: 04.03.2008
Musterkiste	http://musterkiste.de Stand: 04.03.2008

Datenbanken zur Herstellersuche

ArcGuide	http://www.arcdesk.de/arcguide/hersteller_db/start.html Stand: 04.03.2008
Architekten Informations System	http://www.ais-online.de/ Stand: 04.03.2008
Baunetz Baukatalog	http://www.baunetz.de/arch/baukatalog/ Stand: 04.03.2008
Betterbuild	http://www.betterbuild.com Stand: 04.03.2008
Detail Deutscher Baukatalog	http://www.detail.de/rw_2_Baukatalog_Inhalt.htm Stand: 04.03.2008
HeinzeBauOffice	http://www.heinzebauoffice.de/hbo/ Stand: 04.03.2008

Fachspezifische Datenbanken

Engineering fundamentals	http://www.efunda.com/materials/materials_home/materials.cfm Stand: 04.03.2008
GaBi	http://www.gabi-software.com Stand: 04.03.2008
Granta Material Intelligence	http://www.grantadesign.com/DE/ Stand: 04.03.2008
Idemat	http://www.io.tudelft.nl/research/dfs/idemat/index.htm Stand: 04.03.2008
Legep	http://www.legep.de Stand: 04.03.2008
Mat24	http://www.mat24.de/ Stand: 04.03.2008
Matdata	http://matdata.net Stand: 04.03.2008
Materialdatacenter	http://www.materialdatacenter.com Stand: 04.03.2008
Materialsgate	http://materialsgate.de Stand: 04.03.2008
MatWeb	http://www.matweb.com/index.aspx Stand: 04.03.2008
The A to Z of Materials	http://azom.com Stand: 04.03.2008

Virtual showrooms

Alpina Colordesigner	http://www.alpina-farben.de/colordesigner/colordesigner.html Stand: 04.03.2008
Armstrong Design a Room	http://www.armstrong.com/resflram/na/home/en/us/dar.asp Stand: 04.03.2008
Autodesk Project Showroom	http://showroom.labs.autodesk.com/ Stand: 04.03.2008
Brillux Farbdesigner	http://www.farbdesigner.de/farbdesigner.html Stand 04.03.2008
Granit90	http://www.granit90.de/showroom/showroom_content.html Stand 04.03.2008
Krono Objektplaner	http://www.kronoflooring.com/konfigurator/start.html Stand 04.03.2008
Parador Raum-Designer	http://www.parador.de/swf/raumdesigner/de.php Stand 04.03.2008
Pergo Virtual Showroom	http://www.global.pergo.com/de-de/Lokale-Startseite/eShowroom/ Stand: 04.03.2008
Vorwerk Virtuelles Einrichten	http://www.vorwerk-teppich.de/virtuelles_einrichten.brw Stand: 04.03.2008

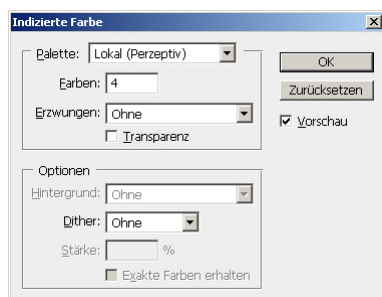
Produktkonfiguratoren

Acme Online Masonry Designer	http://www.brick.com/ Stand: 04.03.2008
Appiani Mix	http://www.appiani.it/prodotti/appiani-mix.asp?Lang=DE Stand: 04.03.2008
Meister Raum-Bodendesigner	http://meister.esignserver3.de/showGallery.do Stand: 04.03.2008
Tisca Handtuft Konfigurator	http://www.tisca.ch/tisca-tiara/handtuft/select/de/index.html Stand: 04.03.2008
Virtual terrazzo	http://www.terrazzo.it/de/virtual.asp Stand: 04.03.2008
Westbond FlexCreator	http://www.westbond.de/ Stand: 04.03.2008

Interaktive MDS-Anwendungen

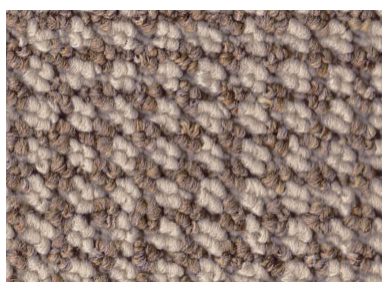
CHI	<i>MDS-interactive Skates</i> http://studiolab.io.tudelft.nl/mdsi/applications Stand: 06.11.2006
Literaturlandkarte	<i>Literaturlandkarte</i> http://www.literaturlandkarte.de Stand: 04.03.2008
Queens Library	<i>Queens Library</i> http://aqua.queenslibrary.org/ Stand: 04.03.2008

B.1 Berechnung Farbreduktion und -unähnlichkeit



Photoshop-Menü zur Farbreduzierung

Für die Berechnung der Farbwerte von (auch nicht gleichmäßig farbigen) Materialien werden die zugehörigen RGB-Pixelbilder zunächst in Adobe Photoshop leicht weichgezeichnet, um einzelne, evtl. extreme Pixelwerte etwas zu glätten. Anschließend kann das Bild auf wenige Farben reduziert werden, indem die Funktion Bild>Modus>indizierte Farben mit der Einstellung „perzeptiv“ und frei wählbarer Farbzahl angewendet wird. Das Ergebnis ist ein Pixelbild, welches mit wenigen unterschiedlichen Farben den wahrgenommenen Eindruck des Originalbilds wiederzugeben versucht.



Ausgangsbild

Sinnvolle Anzahl an Farben

Das Beispiel des Teppichs zeigt, dass eine Reduzierung auf nur eine oder zwei Farben noch zu viel Detailinformation über das Aussehen des Teppichs verloren gehen lässt, eine Anzahl von mehr als vier Farben hingegen kaum einen Gewinn an Farbinformation mehr bringt. Da zudem der Aufwand der weiteren Berechnung mit der Fakultät der Anzahl berücksichtigter Farben ansteigt, wurde eine durchgängige Reduzierung auf vier dominante Farben als Kompromiss zwischen Abbildungsgenauigkeit und Aufwand gewählt.



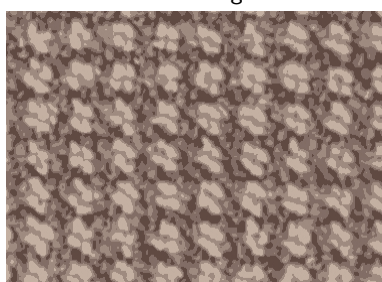
Reduzierung auf eine Farbe



Reduzierung auf zwei Farben



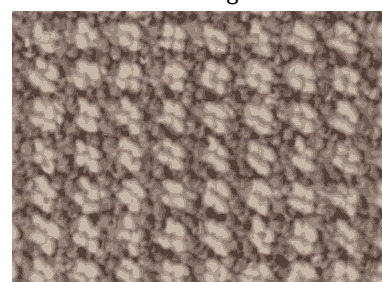
Reduzierung auf drei Farben



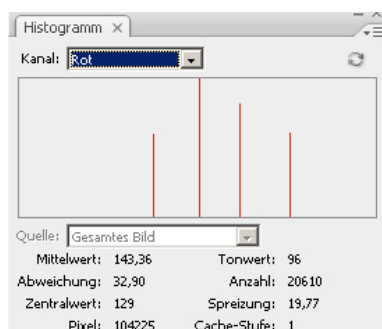
Reduzierung auf vier Farben



Reduzierung auf fünf Farben



Reduzierung auf sechs Farben



Vier Farben im Photoshop-Histogramm

Erzeugung gleichwertiger Farbpakete

Die genauen RGB-Farbwerte und die Anzahl der Pixel, also der Anteil der Farbe am Gesamtbild, können aus dem Histogramm des reduzierten Pixelbilds entnommen werden. Jeder Farbwert muss nach dem gleichen Algorithmus wie im Prototyp verwendet in $L^*a^*b^*$ -Werte umgewandelt werden. Verwendet wurden die Farbraumumrechnungsformeln nach [Lindbloom 2001] mit dem Arbeitsfarbraum Adobe RGB1998, einem 2°-Normalbeobachter bei einem D65-Referenzweiß und ein Gamma von 2,2.

Für die weitere Berechnung sind jeweils gleichgroße Farbpakete notwendig [Mojsilović 2002], daher werden in einem nächsten Schritt die Farbanteile, die größer sind als 25%, direkt einem Farbpaket zugewiesen. Die verbleibenden Reste werden gemäß ihres prozentualen Anteils zu einem neuen $L^*a^*b^*$ -Farbwert gemischt und auf die verbleibenden Farbpakete aufgeteilt. Im Ergebnis hat man vier gleichwertige Farbpakete, die in ihren Farbwerten das Originalbild ausreichend gut codieren.

Anzahl Pixel	%	RGB	$L^*a^*b^*$	Abzug %	Rest %
20601	19,77	96-76-69	35-10-9	0	19,77
34393	33,00	129-109-102	49-9-9	25	8,00
28419	27,27	158-138-127	60-8-10	25	2,27
20812	19,97	194-175-161	74-6-11	0	19,97
104225	100,00			50	50,00

Paket	$L^*a^*b^*$	%
1	49-9-9	25
2	60-8-10	25
3	54-8-10	25
4	54-8-10	25

Berechnung der Farbunähnlichkeit zweier Materialien

In der Betrachtung zweier Materialien werden zunächst die einzelnen, gleichwertigen Farbpakete miteinander verglichen. Anschließend wird je ein Paket des einen Materials mit je einem Paket des anderen so in Beziehung gesetzt, dass die Summe der mit 25% eingebrachten Werte minimiert wird. Im Prototyp wird dafür kein spezieller Algorithmus verwendet, sondern es werden alle 24 Möglichkeiten berechnet und daraus der Minimalwert gewählt. Dieser entspricht dem minimalen und wahrgenommenen Abstand.

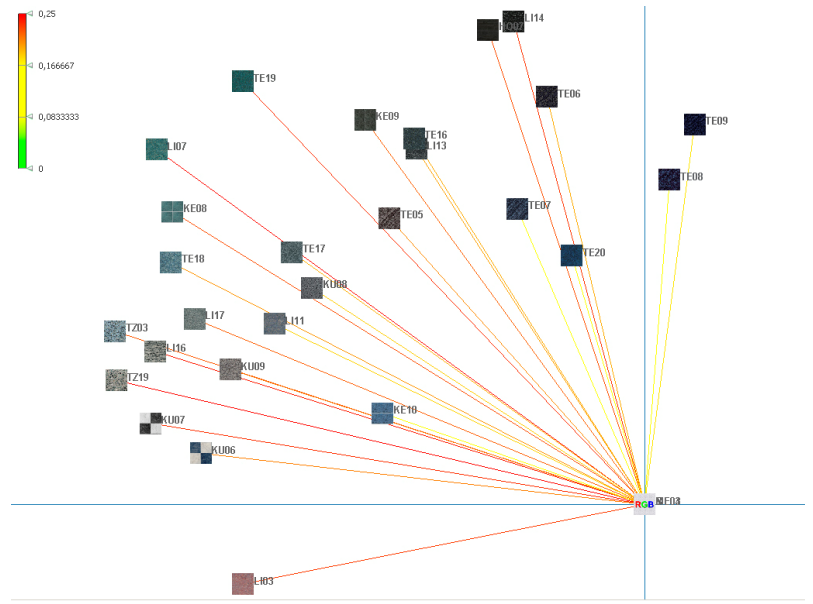
Dieser absolute Wert wird abschließend durch Division durch den maximal möglichen Abstand ($RGB\ 0 - 255 - 0 > L^*a^*b^*\ 83 - 138 - 91 > \max \Delta E = 184,97$) normalisiert (vgl. Kapitel 6.4.2).

		Teppich			
		49-9-9	60-8-10	54-8-10	54-8-10
HO16	54-29-55	50,41	50,02	49,66	49,66
	60-24-57	50,55	48,70	49,07	49,07
	57-26-55	48,43	47,27	47,27	47,27
	57-26-55	48,43	47,27	47,27	47,27

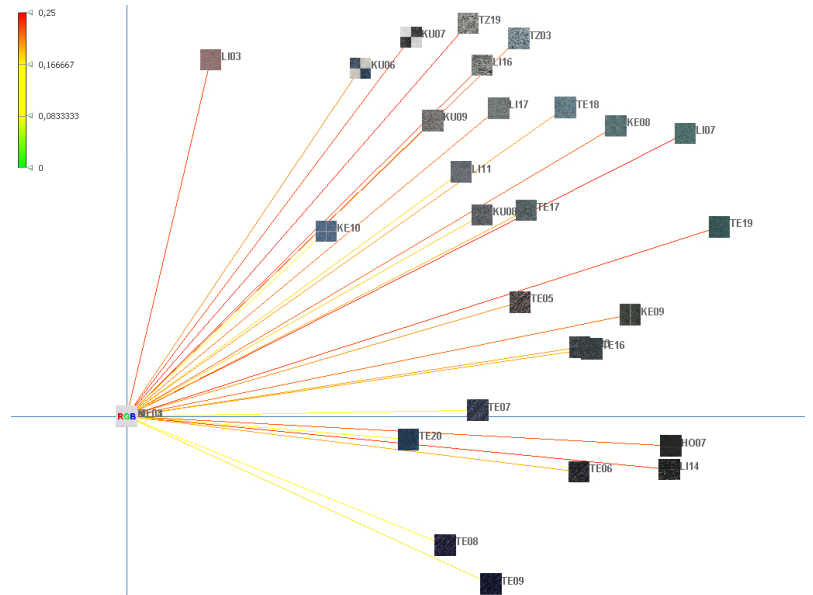
Abs.	MIN	48,41	(Durchschnitt der ausgegrauten Werte)
Norm.	MIN	0,2617	

B.2 Screenshots zum Berechnungsbeispiel im Prototyp

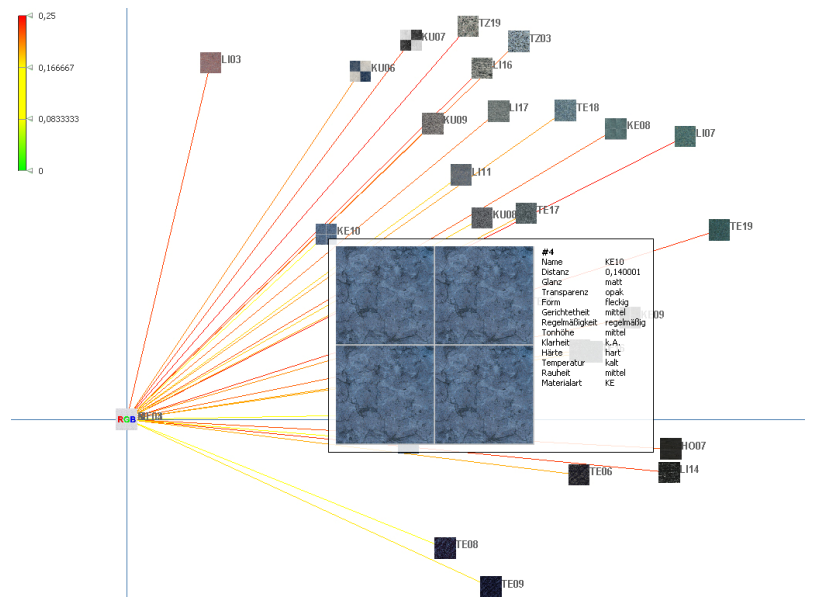
Szene 01 - 01



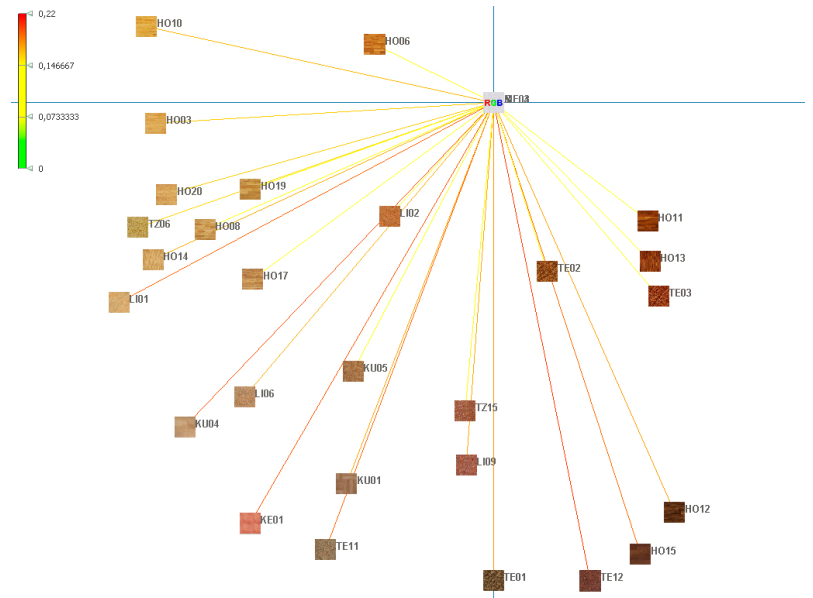
Szene 01 - 02



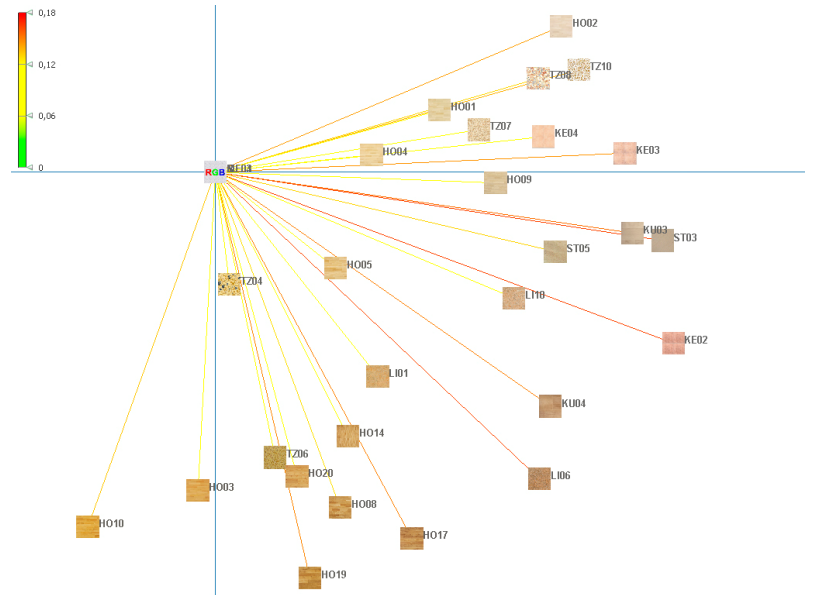
Szene 01 - 03



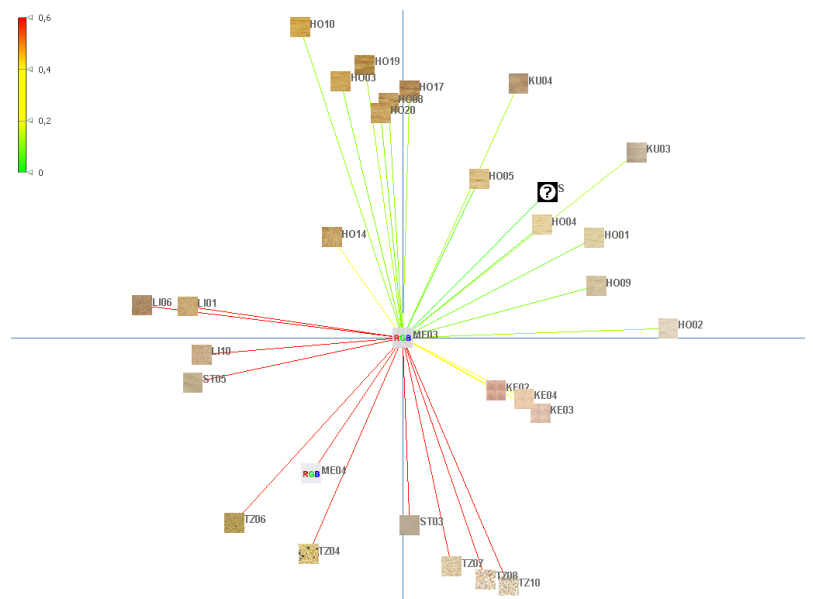
Szene 02 - 01



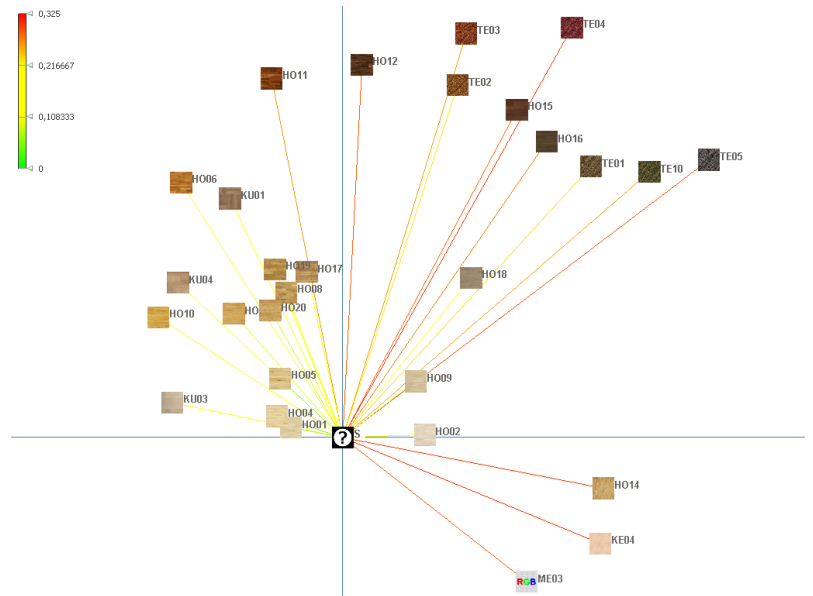
Szene 02 - 02



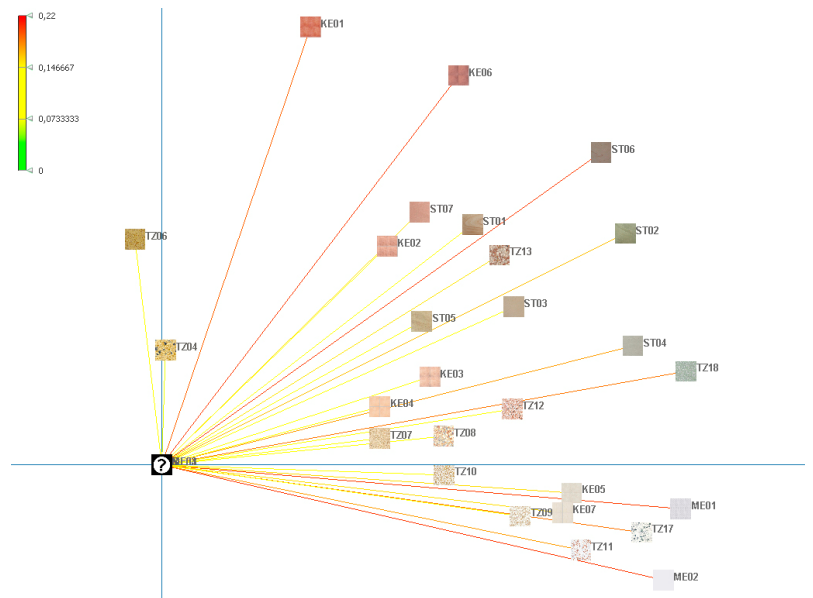
Szene 02 - 03



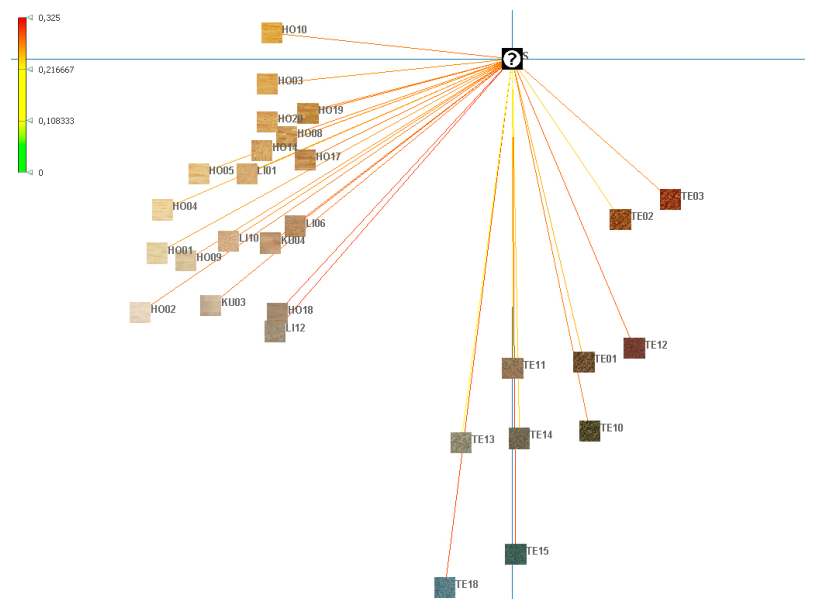
Szene 02 - 04



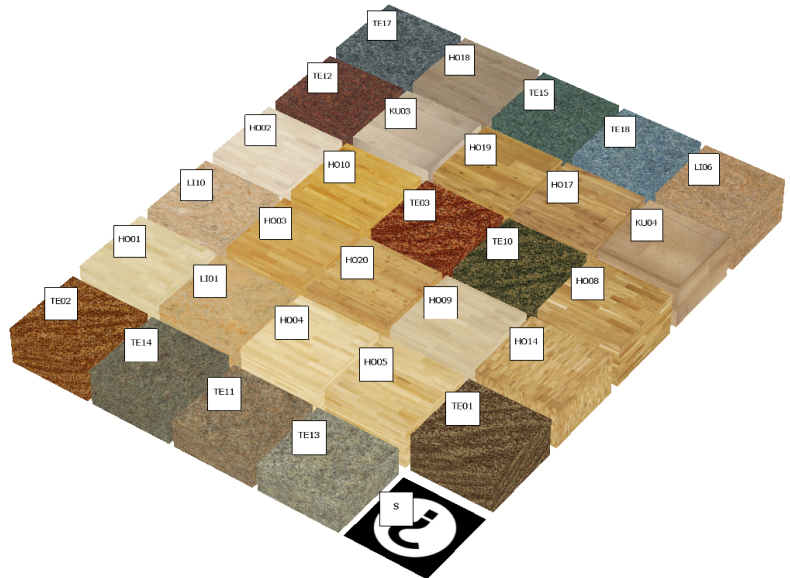
Szene 03 - 01



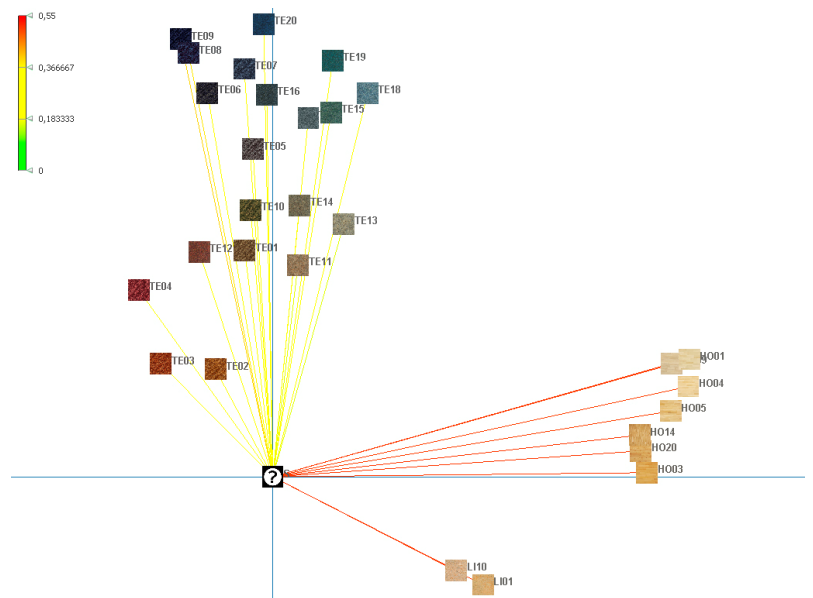
Szene 03 - 02



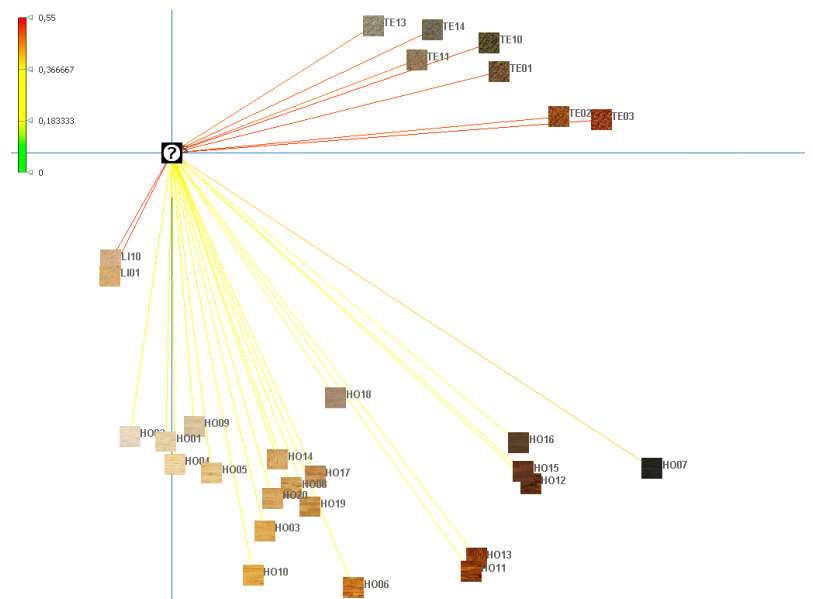
Szene 03 - 03



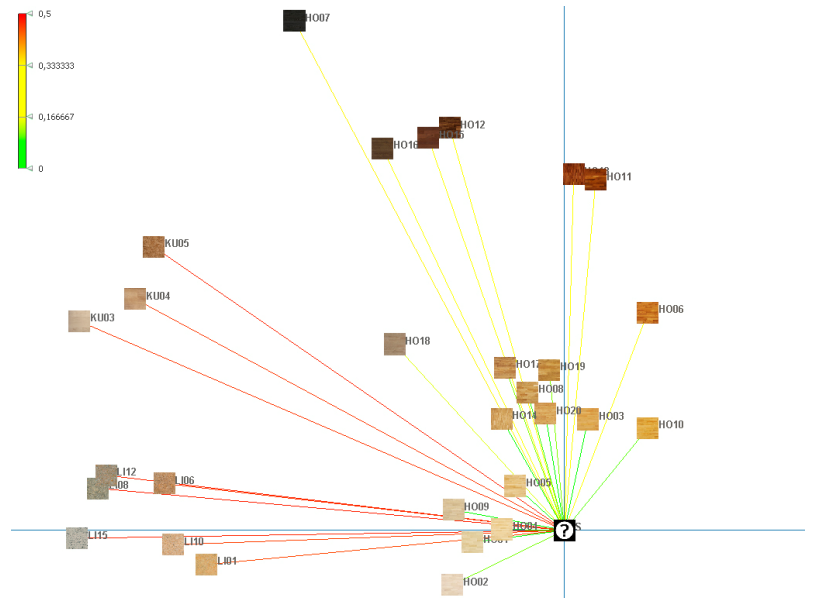
Szene 04 - 01



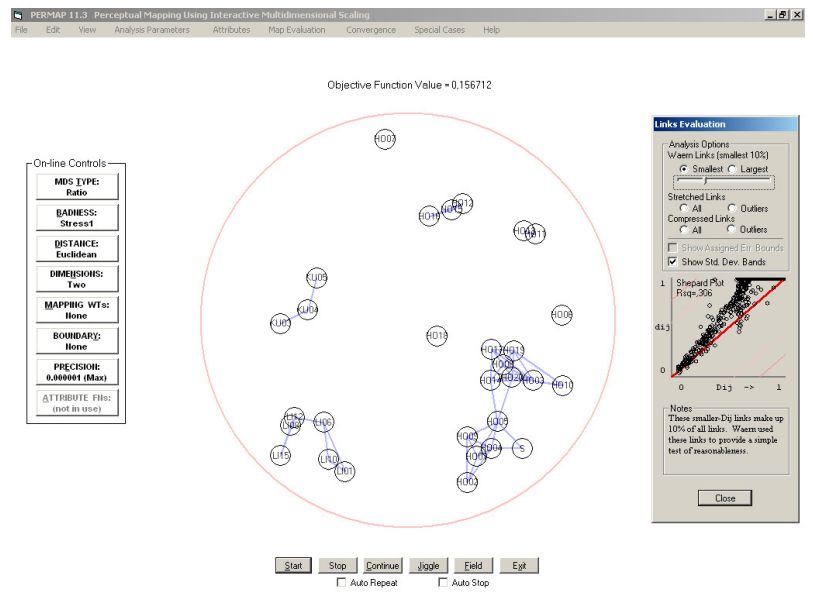
Szene 04 - 02



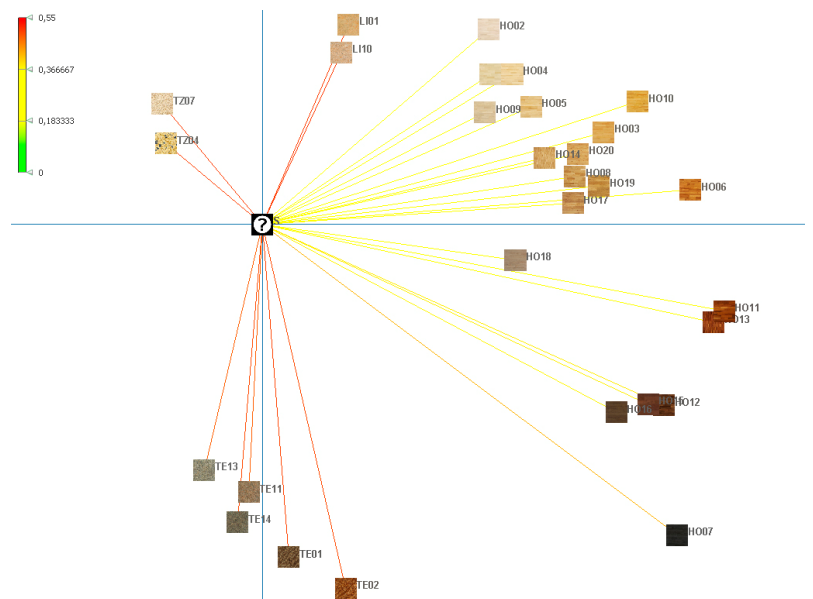
Szene 04 - 03



Szene 04 - 04



Szene 05 - 01



Thesen

- 0 Die Material- und Produktauswahl in der Architektur wird unterstützt, wenn die Entscheidung für ein Material plausibel auf einer begründeten Basis getroffen werden kann.

Hintergrund

- 1 Architektur wird über die den Raum begrenzenden Oberflächen wahrgenommen, das Oberflächenmaterial bestimmt daher entscheidend die Wahrnehmung des Raums. Mit der Wahl eines geeigneten Materials kann ein Architekt seine Entwurfsintention unterstützen.
- 2 In der Architektur eingesetzte Materialien müssen über diese gestalterisch wirksamen, vorwiegend sinnlich wahrnehmbaren Eigenschaften hinaus noch viele weitere Anforderungen erfüllen. Diese können z.B. technischer, ökonomischer oder ökologischer Natur sein.
- 3 Aufgrund dieser komplexen Voraussetzungen ist es verständlich, dass es nicht immer nur ein einziges, „optimales“ Material für einen bestimmten Einsatzzweck geben kann. Zudem kann das gleiche Ausgangsmaterial in unterschiedlichen Produkten mehrerer Hersteller Verwendung finden.

Probleme bei der Materialwahl

- 4 Die Zahl der im Bauwesen zur Verfügung stehenden Materialien und Produkte nimmt durch Neuentwicklungen und Neuzulassungen, aber auch durch die Möglichkeiten des weltweiten Handels sowie durch eine Rückbesinnung auf tradierte Verfahren immer weiter zu. Damit es zum Einsatz eines Produkts kommt, muss dieses zum einen überhaupt erst vom Planer entdeckt werden, zum anderen muss zugleich eine ausreichende und mit anderen Produkten vergleichbare Information über seine Eigenschaften möglich sein. Auch und gerade im Zeitalter des Internets ist diese Suche nach und die Information über Materialien derzeit jedoch noch umständlich, zeitintensiv und nur wenig zielgerichtet durchführbar.
- 5 Die Materialwahl findet derzeit noch losgelöst von der sonstigen CAAD-Planung statt, es gibt keine Durchgängigkeit des digitalen Planungsprozesses. Brüche und doppelte Informationshaltung kosten jedoch Zeit in der Handhabung, als potentielle Fehlerquellen können sie zudem auch die Ergebnisqualität stark beeinträchtigen.
- 6 Im Rahmen der Materialwahl müssen viele inhaltlich höchst unterschiedliche Kriterien gleichzeitig berücksichtigt werden. Diese Komplexität ist vom Planer jedoch kaum zu bewältigen, daher trifft er seine Entscheidung für ein Material - selbst beim Vorliegen umfassender Informationen - eher „aus dem Bauch heraus“. Auf dieser Basis kann er jedoch nicht sicher sein, mit dem gewählten Material eine „optimale“ Lösung gefunden zu haben.

Einordnung der genannten Probleme

- 7 Für das Problem der gezielten Produktsuche und Informationsbeschaffung (These 4) existieren bereits technische Lösungen: Hersteller könnten die Eigenschaften ihrer Produkte in einem automatisch auslesbaren und interpretierbaren Datenformat auf ihren Webseiten zur Verfügung stellen. Notwendig ist allerdings die Definition eines einheitlichen, materialübergreifenden Produktbeschreibungsstandards, der zudem von der sehr kleinteilig strukturierten Baustoffindustrie angenommen werden muss.
- 8 Das Problem der Brüche im Gesamtprozess (These 5) kann ebenfalls technisch als gelöst angesehen werden. Es werden bereits heute viele unterschiedliche digitale Techniken und Herangehensweisen verwendet, welche jeweils einzelne Punkte innerhalb der gesamten Materialwahl unterstützen. Diese lassen sich im Prinzip zu einem durchgängigen digitalen Planungsprozess kombinieren.
- 9 Im Umgang mit den vielen unterschiedlichen Einflusskriterien bei der Materialwahl (These 6) ist in der Architekturpraxis derzeit noch kein allgemeingültiges Verfahren bekannt, wie die verschiedenen Einflusskriterien „objektiv“ gegeneinander in Ansatz gebracht werden können.

Dieses Fehlen eines objektiven Verfahrens zur Berücksichtigung aller Einflusskriterien bei der Material- und Produktauswahl in der Architektur ist das Problem, welches im Rahmen der Arbeit gelöst werden soll.

Lösungsansatz

- 10 Die Art und Weise, wie verschiedene Einflusskriterien im Rahmen der Materialwahl miteinander verrechnet werden können, liegt weder objektiv / real / materialimmanent noch irgendwie gesetzlich vorgeschrieben oder genormt vor. Daher muss zur Lösung dieses Problems ein eigenes Bewertungsverfahren definiert werden.
- 11 Lassen sich alle Einzelschritte und notwendige Definitionen innerhalb dieses Bewertungsverfahrens fachlich begründen, so wird die Durchführung des Bewertungsverfahrens auch ein inhaltlich sinnvolles Ergebnis hervorbringen.
- 12 Die Gesamtheit aus möglichen Verfahren zur Bereitstellung von Informationen zur Unterstützung einer Entscheidung und ihrer konkreten Umsetzung in einer entsprechenden Software wird als „Entscheidungsunterstützendes System“ verstanden.
- 13 Das Entscheidungsunterstützende System nimmt dem Nutzer nicht die Entscheidung ab, sondern liefert die begründeten Grundlagen für die Entscheidung. Je mehr Informationen über ein Material oder eine Materialgruppe, aber auch über Zusammenhänge zwischen Materialien und deren Eigenschaften dem Planer zur Verfügung stehen, desto sicherer kann er sich für ein Material entscheiden.

Umsetzung

- 14 Das Bewertungsverfahren kann durch mathematische / statistische Methoden abgebildet werden.
- 15 Die Einzelkriterien, die bei der Materialwahl berücksichtigt werden sollen, lassen sich fachlich begründet festlegen.
- 16 Eigenschaften von Materialien lassen sich hinsichtlich dieser Einzelkriterien beschreiben und „objektiv“ (zumindest per Definition) beziffern. Technisch ist es auch möglich, diese im Bewertungsverfahren notwendigen Daten automatisch aus den von den Herstellern bereitgestellten Produktdaten abzuleiten oder zu generieren.
- 17 Ebenfalls lässt sich (manuell oder aus der CAAD-Planung abgeleitet) beschreiben und beziffern, welche Anforderungen ein Material im jeweiligen Einsatz zu erfüllen hat.
- 18 Aus der Statistik sind Methoden bekannt, wie Daten beliebigen Inhalts und unterschiedlicher Ausprägung miteinander verrechnet werden können. Einige dieser Verfahren können - zum Teil mit begründeten Modifikationen - auch auf die Materialwahl übertragen werden.
- 19 Mit Hilfe dieser Verfahren lassen sich Materialien in Bezug auf den jeweiligen Einsatzzweck automatisch und „objektiv“ (per Definition) unter Berücksichtigung aller Einzelkriterien bewerten und in eine Rangfolge bringen. Der Planer kann auf Basis dieser Bewertung „gute“ von „weniger guten“ Materialien unterscheiden.
- 20 Da es für einen Einsatzzweck nicht immer nur ein einziges „optimales“ Material geben wird (These 3), reicht diese Art der Bewertung als alleinige Entscheidungsgrundlage nicht unbedingt aus.
- 21 Die geeignete Darstellung der Alternativen und charakteristischer Zusammenhänge und eine damit verbundene Analysemöglichkeit können jedoch einen weiteren Erkenntnisgewinn bringen, der die Entscheidung erleichtern kann.

Fazit

- 22 Ein integriertes Zusammenspiel aus CAAD-Planung, webbasierter Produktsuche und -information und einer Entscheidungsunterstützung bei der Materialbewertung kann schneller und sicherer als bisher ein optimiertes und auch innovatives Ergebnis bei der Materialwahl hervorbringen. Dem Verfahren der Materialbewertung kommt dabei eine Schlüsselrolle zu, damit die Wahl des Materials in der Architektur durch eine „objektive“ Grundlage begründet werden und dadurch nachvollziehbar und plausibel erfolgen kann.

Curriculum Vitae

Name	Christoph Spiekermann
Anschrift	Thomas-Müntzer-Straße 23 99084 Erfurt
Familienstand	ledig, zwei Kinder
Eintrag Architektenliste	Mitgliedsnummer 2098-03-1-A, AK Thüringen

Tabellarischer Lebenslauf

08.11.1968	geboren in Wimbern, NRW
1974 - 1978	Engelhardgrundschule, Wickede (Ruhr)
1978 - 1987	Franz-Stock-Gymnasium, Arnsberg / Neheim Abschluss Abitur
1987 - 1989	Zivildienst Städtisches Krankenhaus, Wetter (Ruhr)
1989 - 1996	Studium der Architektur, Universität Dortmund Abschluss Diplom
1996 - 1997	Architekt bei WLP Werner Lehmann + Partner, Bonn / Dortmund
seit 1997	Freie Berufsausübung im Bereich Architektur-Visualisierungen
1998 - 2000	Projektmitarbeit „Modulare Wissensvermittlung unter Nutzung moderner Informationstechniken“, FH-Münster / FH-Düsseldorf
2000 - 2001	Erziehungszeit
2001 - 2002	Architekt bei Virtual Future GmbH / Pohl Architekten, Erfurt
2002	Architekt bei Pohl Architekten GmbH & Co. KG, Erfurt
2003	Erziehungszeit
seit 2003	Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Bauhaus-Universität, Weimar Lehrstuhl Informatik in der Architektur Betreuung von Diplomarbeiten, Semesterarbeiten und Projekten

Veröffentlichungen

- 2006 *Digitale Unterstützung der Material- und Produktauswahl im architektonischen Entwurfs- und Planungsprozess.*
Spiekermann, Ch., Donath, D.:
In: Forum Bauinformatik 2006, Verlag der Bauhaus-Universität Weimar 2006, ISBN: 3-86068-291-1, S.271-280
- 2006 *Digitale Unterstützung der Material- und Produktauswahl im architektonischen Entwurfs- und Planungsprozess.*
Spiekermann, Ch., Donath, D.:
In: Gürlebeck, K., Hempel, L., Könke, C. (Hrsg.), Proceedings of the International Conference on the Applications of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering (IKM 2006) July 12-14, CD-ROM Ausgabe Weimar, 2006

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle unmissverständlich gekennzeichnet.

Dritte Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderen Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Weimar, 31.03.2008

Danksagung

Ich danke Prof. Dirk Donath, der mich zum Wintersemester 2003 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an dem von ihm geführten Lehrstuhl Informatik in der Architektur an der Bauhaus-Universität Weimar eingestellt hat und mir damit überhaupt erst das fachliche Umfeld, den Raum und auch die Zeit für die Beschäftigung mit den Themen der digitalen Unterstützung von Architekturplanung geboten hat. Er hat mein wissenschaftliches Arbeiten initiiert und mir dabei die Freiheit gewährt, dieses Thema zu verfolgen.

Ohne meine Kollegen am Lehrstuhl hätte diese Arbeit kaum entstehen können. Sie alle haben mit ihrem breit gefächerten Fachwissen viele Anregungen und wertvolle Diskussionsbeiträge geliefert. Darüber hinaus kann aber auch der Beitrag eines angenehmen und menschlich warmen Arbeitsumfelds für eine solche Arbeit nicht hoch genug eingeschätzt werden. Nicht nur dass ich mit allen Kollegen gerne zusammengearbeitet habe, sie haben mir auch in vielen persönlich schwierigen Situationen den Rücken gestärkt. Habt Dank!

Ebenso erwähnt werden sollen an dieser Stelle auch die zahlreichen Kollegen anderer Lehrstühle, die Teilnehmer auf Konferenzen und Kolloquien sowie mehrere Studenten, die in anregender Weise mit mir über das Thema der Arbeit fachlich gestritten haben. Jeder hat mit seinen Anmerkungen und Ideen seinen Anteil an der Arbeit.

Bei Prof. Claus Dießenbacher bin ich während meines Studiums an der Universität Dortmund das erste Mal überhaupt mit dem Computer in der Architekturplanung in Berührung gekommen. Der damalige CAD-Kurs hat den Grundstein gelegt für mein weiteres Berufsleben, das in der Rückschau schwerpunktmäßig auf den Einsatz digitaler Techniken in der Architektur ausgerichtet war und ist.

Beim immer wieder unterbrochenen Schreiben über einen so langen Zeitraum verliert man schon manchmal den „roten Faden“ oder wird „betriebsblind“. Ich danke daher Melanie Pohner für ein erstes, strukturelles Gegenlesen der Rohfassung und insbesondere Julia Raasch-Bertram für das Abschlusslektorat. Logische Fehler in der Argumentationskette sowie Rechtschreibfehler habe selbstverständlich dennoch ich allein zu verantworten.

Allen Freunden, Bekannten und Verwandten, die mich in den letzten Monaten vielleicht als angespannt oder wenig flexibel im Umgang mit gemeinsamer Zeit erlebt haben, sei gedankt für ihr Verständnis sowie für viele aufmunternde Worte und Taten. Ohne einen solchen Halt wäre die Arbeit nicht fertig geworden.

Schlussendlich bedanke ich mich bei meinen beiden Töchtern. Auch sie haben hinsichtlich Zeit und Gelassenheit bei ihrem Vater einige Abstriche machen müssen. Im Gegenzug haben sie mir durch ihre Existenz und Lebensfreude immer wieder gezeigt, dass eine solche Arbeit nicht das einzig Wichtige im Leben ist. Es ist gut, dass jeder Computer auch einen Knopf zum Ausschalten besitzt.

Im gesamten Dokument wird „der Planer“, „der Nutzer“ oder „der Architekt“ allein aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit nur in der männlichen Form gebraucht. Selbstverständlich gelten die getroffenen Aussagen ebenso für Planerinnen, Nutzerinnen und Architektinnen, welche nach einer Statistik der Bundesarchitektenkammer vom 01.01.2007 immerhin ein Viertel des Berufsstands ausmachen.