

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN**

Institut für Photogrammetrie und Kartographie

Lehrstuhl für Kartographie

# **Kartographische Anreicherung von Gebäudefassaden mit thermalen Bilddaten**

**Dipl.-Ing. Univ. Holger Kumke**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr. techn. Roland Pail

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Liqiu Meng
2. Univ.-Prof. Dr. phil. habil. Manfred F. Buchroithner, Technische Universität Dresden

Die Dissertation wurde am 30.06.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 09.09.2011 angenommen.

"Jedes Sehen will gelernt und geübt sein. Man sieht bloß, was man unterscheidet, und man unterscheidet nur, wofür man sich einmal interessierte und was man mit Namen zu nennen weiß."

Carl Spitteler (1845 – 1924)

## **Danksagung**

Mit der Fertigstellung der Dissertationsschrift möchte ich jenen Danken, die mich über die Zeit begleitet und unterstützt haben.

Uni.-Prof. Dr. Liqiu Meng danke ich für die Vergabe des interessanten Promotionsthemas und für die Möglichkeit diese Arbeit am Lehrstuhl für Kartographie durchführen zu können, mit ihrer zurückhaltenden aber immer zielgerichteten Betreuung meiner Arbeit gab sie wertvollen Anregungen und Ratschläge, die ich immer geschätzt habe.

Besonderer Dank gilt der DEUTSCHEN FORSCHUNGSGESELLSCHAFT (DFG), die im Rahmen des SINO-GERMAN-BÜNDELPROJEKTES diese Arbeit finanziell gefördert und so zum Gelingen beigetragen hat.

Weiterer Dank gilt meinen ehemaligen und jetzigen Kollegen für die stets kollegiale und angenehme Atmosphäre am Lehrstuhl. Meiner Frau, meinen Geschwistern und Freunden, die alle auf ihre Art und Weise mich in meiner Arbeit unterstützten.

## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit behandelt die visuelle Anreicherung thermaler Daten auf Gebäudefassaden im städtischen Raum. Die messtechnisch detektierte Wärmestrahlung als Thermogramm zeigt nicht sichtbare thermale Informationen, die Aufschluss über den Zustand der Gebäudehülle geben und als Rohdaten eine Aufbereitung zu thermalen Fassadenkarten für planare 2D-, wie auch kartenverwandte räumlich virtuelle 3D-Darstellungen erlauben. Analog zur digitalen thematischen Kartengestaltung wurden die Thermalkartenentwürfe für eine Ausgabe am Monitor konzipiert, die aber weitere innovative Visualisierungsmöglichkeiten erschließen können.

Für den kartographischen Verarbeitungsprozess fanden konventionelle wie auch unkonventionelle Wege in der Herstellung Einzug, um softwarebedingte Zwänge und Restriktionen sowie computertechnische Implementierungsprobleme für die kartographische Gestaltung zu bewältigen. Aus einer Kombination der bekannten Gestaltungsregeln und der neuen kartographischen Perspektive entstanden systemunabhängige thermale Fassadenkarten, die als Anregung, Denkanstoß und Ausblick auf temperaturbezogene Darstellungsformen im städtischen Raum und Grundlage für weitere Forschungsarbeit dienen sollen.

In der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung, der 3D-Computergraphik, der 2D-Kartographie und der Thermographie aufbereitet. Der Vergleich zwischen den computergraphischen Eigenschaften und der kartographischen Lehre bildet dabei einen Schwerpunkt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und die Besonderheiten der thermalen Informationen auf Gebäudefassaden fließen in der Gestaltung der Kartenentwürfe mit ein.

## Summary

The thesis is dedicated to the visual enrichment of thermal data on building facades in urban area. Heat radiation or thermogram which can be detected and measured by physical instruments shows invisible thermal information and indicates the state of the building surface. It serves as raw data for the design of thermal façade maps on planar display surface as well as 3D space-based map-related depictions.

Similar to the digital thematic map design, the thermal maps are conceived for the output on screens. Their special characteristics, however, have opened up many innovative visualization alternatives. In the cartographic design process of thermal maps, both conventional and unconventional work flows have been considered to circumvent the software constraints, restrictions and other artefacts that may occur during the engineering implementation. These workflows lead to a series of system-independent thermal façade maps that reflect the combination of the known design rules and new cartographic perspectives. The new designs are intended to shed some light on the diversified expressions of temperature-related information in urban area and stimulate further research on their interpretations.

The thesis has also elicited the theoretical background of human perception, 3D-computer graphic, 2D-cartography and thermography. The close relationship between computer graphics and cartography is particularly stressed. The gained insight is integrated in the design process of thermal maps.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>15</b>
1.1	Die städtische Umgebung und deren kartographische Darstellung.....	15
1.2	Ziele und Abgrenzung der Forschungsarbeit .....	17
1.3	Motivation und Forschungsfragen.....	17
<b>2</b>	<b>Die menschlich-visuelle Raumwahrnehmung .....</b>	<b>19</b>
2.1	Tiefenwahrnehmung.....	20
2.2	Binokulare Tiefenkriterien (Stereoskopie).....	21
2.3	Okulomotorische Tiefenkriterien .....	22
2.4	Monokulare Abbildungskriterien .....	23
2.4.1	Statische monokulare Abbildungen .....	24
2.4.2	Dynamische monokulare Tiefenkriterien .....	27
<b>3</b>	<b>Eigenschaften der 3D-Computergraphik .....</b>	<b>29</b>
3.1	3D-Graphikpipeline.....	29
3.2	Objektbeschreibung.....	31
3.2.1	Oberflächenmodelle.....	31
3.3	Mapping-Techniken .....	33
3.4	Kamera .....	37
3.5	Lichtquellen.....	37
3.6	Beleuchtungsmodelle .....	38
3.6.1	Lokale Beleuchtungsmodelle.....	39
3.6.2	Globale Beleuchtungsmodelle .....	40
3.7	Schattierungsmodelle .....	41
3.7.1	Farbkomponenten .....	43
3.8	Ebene geometrische Projektionen .....	43
3.9	Bildsynthese .....	46
3.10	Ausgabemedium.....	46
<b>4</b>	<b>Grundlagen zur kartographischen Abstraktion .....</b>	<b>48</b>
4.1	Nutzeraspekte .....	49
4.2	Kommunikationsprozess .....	49
4.3	Objektrelation in der Karte.....	51
4.3.1	Räumlicher Bezug.....	51
4.3.2	Sachlicher Bezug .....	52
4.3.3	Zeitlicher Bezug.....	54
4.4	Elemente der Kartengestaltung .....	54
4.4.1	Kartenzeichen .....	55
4.4.2	Graphische Variablen .....	55

4.4.3	Raster- und Vektorprinzip .....	57
4.4.4	Minimaldimension und Verdeckungsgrad .....	59
4.5	Wahrnehmung & Kognition der Kartenzeichen .....	59
4.6	Farben in der Karte .....	61
4.7	Farbskalen .....	63
4.7.1	Farbgestaltung und -nutzung für Temperaturwerte .....	64
4.8	Farbmodelle in Computergraphik und digitaler Kartographie.....	65
4.9	Schummerung .....	67
4.10	Thematische Kartengestaltung .....	70
<b>5</b>	<b>3D-Computergraphik versus 2D-Kartographie .....</b>	<b>75</b>
5.1	Karten und kartenverwandten Darstellungen.....	80
5.1.1	Real existierende kartenverwandte Darstellungen .....	80
5.1.2	Virtuelle kartenverwandte Darstellungen.....	81
5.2	Gestaltung von digitalen kartenverwandten Darstellungen .....	84
5.2.1	Räumlich-konstruktiv .....	84
5.2.2	Räumlich-perspektivisch .....	88
5.2.3	Räumlich-physikalisch .....	89
5.3	Technologien der räumlichen Darstellungen .....	90
<b>6</b>	<b>Thermographie und Darstellung thermaler Informationen.....</b>	<b>95</b>
6.1	Messstreckeneinfluss durch atmosphärische Transmission.....	96
6.2	IR-Kamerasystem und Bauthermographie.....	96
6.3	Detektion thermaler Strukturen.....	99
6.4	Messtechnisch bedingte thermale Farbdarstellung .....	100
6.5	Interpretationsfehler .....	101
<b>7</b>	<b>Thermale Informationen an der Gebäudefassade.....</b>	<b>103</b>
7.1	Zielgruppen .....	103
7.2	Klassifizierung thermaler Informationen .....	104
7.2.1	Tiefe der thermalen Strukturen.....	106
7.2.2	Fiktive thermale Strukturen.....	106
7.3	Korrelation zwischen Thermalstrukturen und Fassadengeometrie .....	106
7.4	Datensatz.....	107
7.4.1	Thermales Basisbild .....	107
7.4.2	Reales Basisbild.....	108
7.4.3	Digitale Gebäudemodelle .....	108
7.5	Aufbereitung des thermalen Bildes.....	109
7.6	Auswahl der Farbskalen.....	113
7.7	Farbschema .....	114

7.7.1	Diskretes Farbschema .....	114
7.7.2	Kontinuierliches Farbschema .....	115
<b>8</b>	<b>Thermale 2D- und 3D-Kartenentwürfe .....</b>	<b>117</b>
8.1	Thermale 2D-Kartenentwürfe .....	117
8.1.1	Isolinienkarten .....	117
8.1.2	Schichtstufenkarten.....	118
8.1.3	Isokarten.....	120
8.1.4	Symbolisierung der thermalen Strukturen .....	122
8.1.5	Legenden.....	126
8.1.6	Implementierung.....	128
8.2	Thermale 3D-Kartenentwürfe .....	129
8.2.1	Voraussetzung für Linien.....	130
8.2.2	Ebene Karten in räumlich virtueller Umgebung.....	130
8.2.3	Körperhafte Karten in räumlich virtueller Umgebung .....	131
8.2.4	Kartographische Ausgestaltung .....	143
8.2.5	Bildsynthese.....	160
8.3	Einsatz der Software Werkzeuge .....	161
8.3.1	2D-Kartenbearbeitung .....	161
8.3.2	3D-Kartenbearbeitung .....	162
8.3.3	Mathematisch basierte analytische Programme.....	163
<b>9</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>164</b>



# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Tiefenhinweise für die menschliche Wahrnehmung.....	21
Abb. 2: Horopterkreis mit Panum-Gebiet .....	22
Abb. 3: Akkommodation.....	22
Abb. 4: Konvergenz .....	23
Abb. 5: Mehrdeutigkeit statischer verebneter Abbildungen.....	23
Abb. 6: Zentralprojektion (Linearperspektive) .....	24
Abb. 7: Kombination aus Interposition, Objektlage und Licht/Schatten.....	24
Abb. 8: Objekthöhenlage zum Horizont .....	25
Abb. 9: Luftperspektive [links] – Himmelperspektive [rechts] (aus Graf 1995).....	25
Abb. 10: Relative Objektgröße – Wahrnehmung, Vorstellung und Wirklichkeit [von links nach rechts].....	26
Abb. 11: Absolute Objektgröße .....	26
Abb. 12: Texturperspektive nach Gibson (aus Gibson 1973b, S. 256) .....	27
Abb. 13: Abstandveränderung der retinalen Punktlage durch ihre Ausrichtung nach Gibson.....	27
Abb. 14: 3D-Graphikpipeline [s. Anhang].....	30
Abb. 15: 2D-Graphikpipeline [s. Anhang].....	31
Abb. 16: Oberflächenmodell [links] und Voxelmodell [rechts].....	31
Abb. 17: Sieben Variationen der Standard u/v-Mapping-Verfahren.....	34
Abb. 18: Vorgehensweise Bump-Mapping .....	35
Abb. 19: Vorgehensweise Displacement-Mapping.....	35
Abb. 20: Bump- und Displacement-Mapping .....	36
Abb. 21: Indirekte und direkte Lichtquellen .....	38
Abb. 22: Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF).....	39
Abb. 23: Vergleich zwischen dem Gouraud- und Phong-Schattierungsmodell .....	42
Abb. 24: Tesselierte Kugel mit Flat, Gouraud und Phong Schattierungsmodell.....	42
Abb. 25: Farbkomponenten: Umgebungsfarbe, Streufarbe und Glanzfarbe .....	43
Abb. 26: Zentralprojektion [links] und Parallelprojektion [rechts].....	44
Abb. 27: Zentral- und Parallelprojektionen.....	44
Abb. 28: 1-/ 2-/ 3-Fluchtpunktprojektionen [von links nach rechts].....	45
Abb. 29: "Then and Now 1914 and 1939" ( Monmonier 1996, Figure 7.9, S. 100) .....	48
Abb. 30: Kartographisches Kommunikationsnetz.....	50
Abb. 31: Qualitative und quantitative Daten.....	53
Abb. 32: Nominal-, Ordinal- und Interval- /Ratioskalierte Daten.....	53

Abb. 33: Kartenzeichen (Koch 2002a, S. 452).....	55
Abb. 34: Geometrisch geordnete ästhetische Attribute aus Wilkinson (Wilkinson 1999) .....	57
Abb. 35: Vergleich zwischen Raster- und Vektorgraphik.....	58
Abb. 36: Gestaltung – Kognition – Feedback (abgeleitet von Kriz 2001, S. 231, 232) .....	60
Abb. 37: Bipolarer (oben) – monopolarer (unten) Farbverlauf .....	65
Abb. 38: Bipolare Farbreihe .....	65
Abb. 39; RGB- und CMY-Farbmodell mit Grautonlinie d .....	66
Abb. 40: HSV- Modell .....	66
Abb. 41: HSL-Modell.....	67
Abb. 42: Beleuchtungsvarianten.....	68
Abb. 43: Schummerung mit einer Lichtquelle nach Yoèli .....	69
Abb. 44: Schummerung mit zwei Lichtquellen.....	69
Abb. 45: Einfluss der Nebenlichtquelle in Grün.....	69
Abb. 46: Schummerung durch globales Beleuchtungsmodell.....	69
Abb. 47: Isolinienkarte – aufrecht [links] und hangaufwärts orientiert [rechts].....	71
Abb. 48: Schichtstufenkarte .....	72
Abb. 49: Photorealistisch, NPR und NPR mit Schattenwurf [von links nach rechts] (Döllner und Buchholz 2005) .....	75
Abb. 50: Vergleich der 2D-Zeichenebene bezüglich des 3D-Konstruktionsraums.....	76
Abb. 51: Konstruktionsraum der 3D-Computergraphik versus 2D-Kartographie.....	77
Abb. 52: Reliefmodell von Carl Meili (1903) von Säntis (Schweiz) 1:5.000, 184 x 192 cm.....	81
Abb. 53: Verzerrungskurven und ihre Einflüsse (aus Terribilini 2001) .....	85
Abb. 54: Fernbereich – Wahrnehmung eines Gebäudes.....	86
Abb. 55: Nahbereich – Wahrnehmung nur zweier Farben .....	86
Abb. 56: Metallis X-Kreuzungen der Transparenzen.....	87
Abb. 57: Transparenter Körper a) ohne Hintergrund b) mit inhomogen und c) körperhaften Hintergrund .....	88
Abb. 58: Helligkeitsänderung abhängig von der Betrachtungsrichtung .....	89
Abb. 59: Gesamtes elektromagnetisches Spektrum.....	95
Abb. 60: Erweiterte Abbildung des spektralen Transmissionsgrades der Atmosphäre nach Albertz (Albertz 2007) .....	96
Abb. 61: Mobiles Thermalkamerasystem für zwei unterschiedliche Wellenlängen.....	97
Abb. 62: Gebäude: Historisches Massivgebäude – Fachwerkhaus – Fertighaus.....	99
Abb. 63: Messbildaufnahme: Historisches Massivgebäude – Fachwerkhaus – Fertighaus.....	99
Abb. 64: Detailausschnitt: Massivgebäude – Fachwerkhaus – Fertighaus.....	100

Abb. 65: Auswahl herstellerbedingter Thermalfarbskalen.....	101
Abb. 66: IR-Rohbild [oben], Phototextur [links], korrigiertes IR-Bild [rechts], Auflösungsunterschiede [unten].....	108
Abb. 67: TUM (Grau) und Umgebung (Weiß) in LOD2.....	109
Abb. 68: IR-Ausgangsbild [links] und Tontrennung in 7-Stufen [rechts].....	110
Abb. 69: Perzeptiv [links] und selektiv indizierte 7-Farbstufen [rechts].....	110
Abb. 70: Histogramm [oben] – Grautöne aufsteigend sortiert und Break-Points gesetzt (rot) [mitte] – Rückführung auf Grautonwerte [unten] .....	111
Abb. 71: Break-Point-Verfahren [links] und perzeptiv indizierte Farben [rechts].....	112
Abb. 72: Vektorisierungsergebnis 7-stufig [linke Hälfte] und 31-stufig [rechte Hälfte] .....	113
Abb. 73: 7-stufiges Farbschema.....	115
Abb. 74: Farbschema des Thermogramms.....	116
Abb. 75: Farbschemaentwürfe für die Thermalkarte .....	116
Abb. 76: Übersicht über die Thermalkartenentwürfe [s. Anhang] .....	117
Abb. 77: Isothermen – 31-stufig, 7-stufig, 7-stufig mit Schummerung und 7-stufig mit Beschriftung [von links nach rechts] .....	118
Abb. 78: Schichtstufen – Vollfarben mit Isothermen in Farbschema rot, im Farbschema blau, kontinuierliches Farbschema mit Isothermen, Vollfarben mit Schummerung [von links nach rechts] .....	119
Abb. 79: Schichtstufen – flächenhafte Punktsignaturen mit variierenden Punktdurchmessern ohne Referenzkreis, mit Referenzkreis und Wertigkeit über Ringanzahl [von links nach rechts].....	119
Abb. 80: Isokarte.....	120
Abb. 81: Farbschema für Isokarten [s. Anhang] .....	121
Abb. 82: Informationsvariation der Isokarte [s. Anhang] .....	122
Abb. 83: Signaturen für die Oberflächenrauheit .....	123
Abb. 84: Signaturen für die Baustoffe .....	123
Abb. 85: Signaturen für die Fassadenelemente .....	123
Abb. 86: Signaturen für das Aufheizverhalten.....	124
Abb. 87: Signaturen für die äußere thermale Einstrahlung .....	124
Abb. 88: Signaturen für die Wärmeleitfähigkeit.....	124
Abb. 89: Signaturen für die Wärmebrücken .....	125
Abb. 90: Signaturen für die Fassadenschäden.....	125
Abb. 91: Signaturen für die Rohrleitungsschäden.....	125
Abb. 92: Signaturen für das Heizungssystem .....	126
Abb. 93: Signaturen für die Tiefeninformation.....	126
Abb. 94: Legendenaufbau .....	128

Abb. 95: Auf Wärmequellen und Schäden reduzierte Thermalkarte für Laien [s. Anhang] .....	128
Abb. 96: Physikalisch ausgerichtete Thermalkarte für Experten [s. Anhang].....	129
Abb. 97: Ebene Thermalkarte mit Rastertextur (3000ppi).....	130
Abb. 98: Ebene Thermalkarte mit Vektortextur .....	131
Abb. 99: Bandmethode (Ribbon Method) (Quelle: U.S. Army 1956).....	132
Abb. 100: Isothermen – Seitenansicht mit Einfluss der Zentralperspektive [links] und Konturbreite als Minimaldimension im Bereich der Blickrichtung[sachse [rechts].....	132
Abb. 101: Variation der Isolinienkarte – progressiver und stetiger Verlauf mit offenem und progressivem Verlauf mit geschlossenen Isolinien [von links nach rechts].....	133
Abb. 102: Varianten der Isolinienkarte mit progressiver Farbreihe entlang der Flanke [links] und transparenter einfarbiger Flanke [rechts].....	134
Abb. 103: Variationen der Schichtstufenkarte mit progressiven [links] und stetigen Verlauf [rechts] .....	135
Abb. 104: Varianten der Schichtstufenkarte mit kontinuierlichen Farbschema [links] und diskreten transparenten Farbstufen in den Flanken [rechts] mit jeweils opaken Stirnflächen .....	136
Abb. 105:Varianten der Schichtstufenkarte mit Farbschema nur im Stirnflächenbereich [links] und nur im Flankenbereich [rechts] .....	136
Abb. 106: Quaderrasterkarte ohne [links] und mit Rasterabstand [rechts].....	137
Abb. 107: Quaderrasterkarte ohne [links] und mit Referenzraster [rechts].....	137
Abb. 108: Quaderrasterkarte mit kontinuierlichem, einfarbigem und gestuftem progressiven Farbverlauf am Quader [von links nach rechts].....	139
Abb. 109: Stetiger [links] und progressiver Werteverlauf [rechts].....	139
Abb. 110: Mesh- [links] und Splinefläche [mitte, rechts] .....	141
Abb. 111: DFM als Blockbild mit diskretem Farbschema .....	141
Abb. 112: Variation des opaken DFMs [links] mit Gitter [mitte] und als halbtransparentes DFM mit Gitter [rechts].....	142
Abb. 113: Zellen Methode (Eggcrate method), Quelle: U.S. Army 1956 .....	142
Abb. 114: Profilrasterkarte [links], Profilreliefkarte mit halbtransparentem Relief in diskreter [mitte] und kontinuierlicher Farbgebung [rechts] .....	143
Abb. 115: Billboard [links] und Volumenkörper [rechts] .....	146
Abb. 116: Die fünf Platonischen Körper [links von 1 – 5] und die Kugel [rechts] .....	147
Abb. 117: Referenzkörper (Grau) mit Wertigkeit (Rot).....	148
Abb. 118: Staffelung nominaler [links] und nominalen mit ratioskalierten Symbolen [rechts] .....	148
Abb. 119: Punktbasierte 3D-Symbole mit Referenzring und unterschiedlicher Abstufung.....	149
Abb. 120: Kaltfrontsymbol als 2D-Signatur und als extrudierter 3D-Körper [von links nach rechts] .....	149
Abb. 121: 3- bis 12-seitige Liniensignaturen .....	150

Abb. 122: Halbtransparente Quaderrasterkarte mit tiefer liegenden Linearsignaturen .....	151
Abb. 123: Fenstersignatur als Bindeglied zwischen sichtbaren und nicht sichtbaren Informationen .....	152
Abb. 124: Punktsignatur mit Verbindung und angebrachter Tiefenangabe .....	153
Abb. 125: Punktsignatur mit Tiefenangabe über einem DFM [links] und über einer Profilreliefkarte [rechts]...	154
Abb. 126: Verdeckungsgrad abhängig des Kartentyps [s. Anhang].....	155
Abb. 127: Anstieg der körperhaften Dichte der unterschiedlichen Ausgangsmodelle [von oben links nach unten rechts].....	155
Abb. 128: Aufbau des symmetrischen Distanzfächers.....	157
Abb. 129: Distanzfächer – Prinzip [links] und aus Kameraperspektive [rechts].....	158
Abb. 130: Perspektivische Maßstabsbalken – Aufbau [links] und Platzierung [rechts] .....	158
Abb. 131: Kantengitter – Mit Signatursilhouetten [links] und Platzierung in der Szene [rechts] .....	159
Abb. 132: Natürliches körperhaftes Farbschema – kontinuierliche Oberfläche [links], diskrete Schichten und Quader [mitte, rechts] .....	160
Abb. 133: Perspektivische körperhafte Signaturen mit ihren Beschreibungen [s. Anhang] .....	160
Abb. 134: Benutzerschnittstelle von 3ds Max mit Bildsynthese Ergebnis im Pop-Up-Fenster .....	161
Abb. 135: Benutzeroberflächen zur Kartenerstellung – Schicht/Isolinien, Quaderraster und DFM [von links nach rechts] .....	162

# Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Analoge und virtuelle 3D-Stadtmodelle.....	16
Tab. 2: Vor- und Nachteile zwischen <i>Raytracing</i> und <i>Radiosity</i> .....	41
Tab. 3: Betrachtungsabstand für Karte und Monitor.....	47
Tab. 4: Gliederung der Diskreta (nach Hake et al. 2002).....	52
Tab. 5: Gliederung der <i>Kontinua</i> (nach Hake et al. 2002, S. 16).....	52
Tab. 6: Nutzen der klassischen graphischen Variablen nach Einschätzung von Bertin .....	56
Tab. 7: Farbwahl der Isohypsen in einer deutschen topographischen Karte .....	71
Tab. 8: Unterschiede zwischen 3D-Computergraphik und 2D-Kartographie.....	78
Tab. 9: Vor- und Nachteile der 3D-Computergraphik und 2D-Computergraphik.....	79
Tab. 10: Ebene kartenverwandte Darstellungen (Hake et al. 2002, S. 176).....	81
Tab. 11: Autorensystem versus CAD und 3D-GIS.....	93
Tab. 12: Infrarotwellenlängenbereiche (Schuster und Kolobrodov 2004, S. 12). .....	95
Tab. 13: Nutzergruppen.....	104
Tab. 14: Thermische Strukturen im Gebäudebereich .....	105
Tab. 15: Relatives und absolutes Vorkommen .....	106
Tab. 16: Diskretes Farbschema Rot [s. Anhang].....	114
Tab. 17: Diskretes Farbschema Blau [s. Anhang] .....	115
Tab. 18: Isolinienhöhen.....	133
Tab. 19: Polygonanzahl der Isothermendarstellung .....	133
Tab. 20: 7 Höhenstufen im stetigen und progressiven Verlauf .....	135
Tab. 21: Polygonanzahl der Schichtstufendarstellung.....	135
Tab. 22: Polygonanzahl der Quaderrasterdarstellung.....	138
Tab. 23: DFM – Patch und Mesh .....	141
Tab. 24: Profilreliefkarte .....	143
Tab. 25: Mindestdimension der räumlichen Körper.....	145
Tab. 26: Platonische Körper .....	147
Tab. 27: Kartenverwandte Darstellungen mit ihrer Möglichkeit zur Symbolisierung.....	156

# 1 Einleitung

## 1.1 Die städtische Umgebung und deren kartographische Darstellung

Der städtische Raum zeichnet sich seit jeher als ein kompakter, von Menschen geschaffener, Lebensraum aus, der fortwährend durch das menschliche Wirken und Handeln gestaltet und verändert worden ist. Früh regelten Bestimmungen und Gesetze das soziale Zusammenleben und verbesserten die städtische Struktur. So entstanden schon im Zuge der Stadtentwicklung Brandschutzverordnungen und Hygienebestimmungen für den urbanen Raum.

Aus der Sicht der klassischen Kartographie entwickelte sich für die Erfassung der städtischen Umgebung die planare Kartendarstellung. Die Grund- bzw. Katasterkarte im Maßstab 1:500 klärte nicht nur die Besitzverhältnisse, sondern lieferte auch die planerische Grundlage für weitere generalisierte städtisch-thematisch aufbereitete und abstrakte Karten (Gorki und Pape 1987). Für ihre Gestaltung wurden zweidimensionale Daten, Höhenkoten und thematisch bezogene Merkmale erfasst und in einen konstanten Maßstab in eine Stadtkarte überführt. Ihre Darstellungsform basierte meist nur auf der orthogonalen Projektion. Dabei gab es schon frühzeitig Entwicklungen, urbane Karten in einer Panorama bzw. Vogelschau für den Nutzer aufzubereiten. Dazu zählt beispielsweise das Panoramagemälde von Johann Michael Sattler (1786–1847) von der Stadt Salzburg mit seinem Umland (1829), das mit seinen rund 125qm und einen Umfang von 26 Metern eines der größten seiner Zeit war. Diese Art der kartenverwandten dreidimensionalen Darstellungen unterstützte durch ihre zentralperspektivische Projektionen auf eine horizontale Ebene eine für den Menschen räumlich vertraute Sicht und sorgte für ein schnelleres Verständnis der Karteninformation über ein räumlich begrenztes Gebiet.

Die Entwicklung umfasste nicht nur zentralperspektivische, sondern auch parallelperspektivische Projektionen der städtischen Umgebung, dabei wurde das Hauptaugenmerk auf das naturalistisch wirkende Aussehen gelegt. Die erstellten 3D-Stadtkarten dienten zu jener Zeit vorwiegend der Repräsentation des städtischen Status und weniger für die Planungsgrundlage. Dabei gestalteten sich, durch das Anwachsen des städtischen Raumes, die Planungsaufgaben der Stadtplaner immer umfangreicher.

Um eine bessere Übersicht und somit Verständnis für die Planungssituation zu erhalten, wurden analoge physische Stadtmodelle geschaffen, die der Stadtplanung neue Möglichkeiten der Stadtentwicklung eröffneten. Durch die ganzheitliche und stark abstrahierte Übersicht konnte die Baumassenverteilung, vorhandene Freiräume und deren Gebäudebeziehungen (Gebäudetopologie) anschaulicher als in planaren Kartenwerken wiedergegeben werden. Sie stellen bis heute eine wichtige Planungsgrundlage für Stadtplaner und Investoren sowie als Anschauungsmodell für Bürger und Touristen dar. Ihr Vorteil liegt durch die Abstraktion bedingt in der Klarheit des Modells ohne dabei eine visuelle Überfrachtung durch Farben bzw. Texturen zu unterliegen, und in der Möglichkeit der gleichzeitigen Betrachtung durch mehrere Personen ohne zusätzliche technische Hilfsmittel, wie Projektionsflächen und Computer.

Die Weiterentwicklung zu virtuellen digitalen Stadtmodellen ergänzt heutzutage bestehende physische Stadtmodelle durch einen Mehrwert an Mobilität, einer größeren Gestaltungsvielfalt sowie der Darstellung von zeitlichen Aspekten, wie der Gegenüberstellung unterschiedlicher Raumsituationen (vorher/nachher). Dabei ist der Nachführungsaufwand in

beiden Modellen nicht unerheblich, da ihre Umsetzung mit einer präzisen Datenerhebung einhergeht und deren Modellierung physisch bzw. virtuell erfolgen muss (s. Tab. 1).

	<b>Analoge (physische) Stadtmodelle</b>	<b>Virtuelle Stadtmodelle</b>
Mehrfachbetrachtung	+	-
Mobilität des Stadtmodells	-	+
Zeitliche Gegenüberstellung räumlicher Situation	-	+
Präsentationsmedium bei öffentlichen Gremien	-	+
Visualisierungsvariation	-	+
Keine Überfrachtung der Darstellung und dadurch bedingter falscher Proportionseindruck	+	-
Keine Notwendigkeit technischer Hilfsmittel	+	-
Großräumige Darstellungsmöglichkeit	-	+

Tab. 1: Analoge und virtuelle 3D-Stadtmodelle

Das Vorhalten eines virtuellen 3D-Stadtmodelles basiert heute wegen der benötigten Abfragefunktionalität oftmals auf einer Geodatenbank. Dies erfordert zudem die Weiterentwicklung bestehender Geoinformationssysteme (GIS) in der Datenhaltung und Abfragefunktionalität, wie auch der Entwicklung neuer rechnergestützter Geovisualisierungssysteme. Dabei geht die Entwicklung der 2.5D Datenhaltung, also der Speicherung der Lagekoordinaten  $(x,y)$  mit einem Höhenwert  $(h)$  in einem Datenbanksystem, zur echten Speicherung von 3D-Koordinaten  $(x, y, z)$  über.

Für die Visualisierung der virtuellen städtischen Situation wurden Systeme wie beispielsweise ArcScene aus dem GIS-Bereich oder LandXplorer aus dem Computergraphik-Bereich (LandXplorer; Döllner et al. 2003; Döllner 2007) entwickelt. Eine Sonderstellung nehmen die Ansätze von Germanchis ein, der über die Funktionalität einer *Game-Engine* aus dem Bereich der 3D-Spieleindustrie ein Stadtmodell realisieren konnte (Germanchis et al. 2007) oder die geometrisch hoch aufgelösten Stadtrekonstruktionen von Honsel (Honsel 2010). Eine entscheidende Rolle zwischen Datenbank und Visualisierungsumgebung spielt hierbei die Interoperabilität, d.h. der nahtlose Austausch relevanter Daten mit ihren semantischen und topologischen Informationen zwischen heterogenen Softwarelösungen.

Mit CityGML, einem 2008 offiziell zertifizierten OGC<sup>1</sup>-Standard, konnte ein Austauschformat für virtuelle 3D-Stadtmodelle auf dem offenen XML-Standards geschaffen werden (Kolbe et

---

<sup>1</sup> OGC: Open Geospatial Consortium



al. 2005), der die Semantik und Topologie aus den Datenmodell der 3D-Geodatenbank für die Visualisierung unterstützt und unterschiedliche Systeme füreinander kompatibel machte. Richtungsweisend ist somit, dass virtuelle Stadtmodelle als Abfrage-, Visualisierungs-, und Kommunikationssystem auf der Ebene von echten dreidimensionalen Daten ihren Einsatz finden.

Folglich stützt man sich für die räumliche Darstellung auf 2.5D- bzw. 3D-Geodaten aus vorhandenen GIS-Systemen, um ein Ausgangsmodell für Simulationen, Planungen bzw. ihrer städtischen Repräsentation zu schaffen. Bekannte Anwendungen finden sich im Bereich der Lärmanalyse, der Windanalyse, der Verkehrsplanung, großer Bauprojekte, der Netzanalyse von Mobilfunkanbietern oder in virtuellen Stadtrepräsentationen. Dabei ist das Visualisierungsziel räumliche Daten schnell zu erfassen und zu verstehen, Planungsvarianten zu variieren und durchzuspielen oder die Akzeptanz von Bürgern durch räumlich-virtuelle Entwurfsdarstellungen zu erhöhen.

## **1.2 Ziele und Abgrenzung der Forschungsarbeit**

In der vorliegenden Arbeit wird die Thematik der Anreicherung von thermalen Informationen für eine Gebäudefassade behandelt. Grundsätzlich lässt sich jede georäumliche Information mit städteräumlichem Bezug als Anreicherung für virtuelle Stadtmodelle nutzen. Darunter fallen nicht nur Vermessungsdaten, sondern auch georeferenzierte Bildinformationen. So werden heutzutage thermale Informationen aus satellitengestützten IR-Kamerasystemen für großräumige Temperaturanalysen, *Urban-Heat-Island*-Effekt (Lo und Quattrochi 2003) oder aus luftgestützten Infrarot-Systemen zur Auffindung von Leckagen in Fernwärmenetzen (Geßner und Krickau 2005) in virtuellen 3D-Stadtmodellen genutzt. Für kleinräumige thermische Einflüsse, wie innerhalb einer Gebäudefassade, kommen bodengestützte mobile IR-Aufnahmesysteme, überwiegend aus der praxisbezogenen bauthermographischen Verwendung, mit ihren Thermogrammen<sup>2</sup> zum Einsatz (Flohrer 2002).

In der heutigen Forschung wird ein starker Fokus auf die Wiedergabe urbaner Relationen in virtuellen 3D-Stadtmodellen mit dem Ziel der Unterbringung der steigenden Informationsmenge. So kann von einer Forschungslücke gesprochen werden, wenn es um die Darstellung überlagerter Informationen für die Anreicherung von Gebäudefassaden geht.

## **1.3 Motivation und Forschungsfragen**

Für die gestalterische Aufbereitung und Anreicherung thermaler Strukturen und ihrer Unterbringung auf ein virtuelles 3D-Stadtmodell ist der Forschungsbereich der Kartographie das Bindeglied der geometrischen und semantischen Geoinformation. Durch die kartographische Gestaltung lassen sich thematische Karten entwerfen und über Verfahren der Computergraphik veranschaulichen. Dabei verfolgt der Kartograph immer das Ziel, Informationen für den Kartennutzer durch Selektion, Aggregation und Hervorhebung nutzbar

---

<sup>2</sup> Ein Thermogramm ist das Ergebnis einer bildhaften Darstellung von detektierter Wärmestrahlung durch eine Thermographiekamera.

zu machen. Der Aufgabenbereich reicht von der thermalen bildhaften Aufnahme, so genannter Thermogramme, der perspektivischen Darstellung eines virtuellen 3D-Stadtmodelles bis zur Kartennutzung.

Das Thermogramm muss für den Laien aufgrund seiner nicht zu erwartenden thermodynamischen Kenntnisse und der damit verbundenen fehlerfreien Interpretation aufbereitet und selektiert werden. Dabei ist durch die kartographische Aufbereitung eine Verbesserung des Verständnisses der bestehenden Thermalsituation durch eine Kartengraphik zu erreichen.

Virtuelle 3D-Stadtmodelle als Basismodell zur thematischen Datenanreicherung gründen meist auf der perspektivischen Darstellung. Diese entlastet durch die Projektionsart zwar die mentale Leistung des Betrachters, infolge der nicht mehr zu vollziehenden Interpretationsleistung zwischen zweidimensionaler Karte und dreidimensionaler Realität, unterliegt aber den computergraphischen Einflüssen und den monokularen Tiefenkriterien der räumlichen visuellen Wahrnehmung üblicher Bildschirmdarstellungen.

Die Zielgruppe ist der dritte Bereich der Betrachtungen, die thermale Kartengraphiken heranzieht, um aus diesen Erkenntnis und Wissen ableiten zu können. Dabei ergeben sich während der Kartenbetrachtung beim Benutzer aufgrund seiner Wahrnehmung die zentralen Fragen nach dem „Was sehe ich?“ und „Wo liegt es?“.

Diese drei Aspekte der Thermalinformation, der virtuellen Umgebung und der Nutzergruppe müssen in den kartographischen Entwürfen berücksichtigt werden und werfen folgende Forschungsfragen auf:

- Wie können thermale Informationen gestalterisch auf der Fassade angereichert werden?
- Wo liegen potenzielle Fehlerquellen in der thermalen Farbgebung?
- Wie lassen sich verdeckte thermale Informationen mit sichtbaren Elementen kombinieren?
- Wie kann man auf einer metaphorischen Darstellungsoberfläche einer Kartengraphik thermale Tiefenhinweise abbilden?
- Wie kann der Raumbezug zwischen thermaler Information und realer Fassade hergestellt werden?
- Welche thermalen Informationen sind für den Kartennutzer interessant?

Für die Beantwortung dieser Fragen wird im Kapitel 2 auf die menschliche Raumwahrnehmung mit ihren Tiefenreizen eingegangen. Danach folgt der theoretische Hintergrund der computergraphischen Darstellung mit dem anschließenden konventionellen kartographischen Wissenshintergrund in Kapitel 3 und 4. Das Kapitel 5 erläutert die Unterschiede zwischen der Computergraphik und der konventionellen Kartographie näher und diskutiert Design-aspekte für die kartographische Ausgestaltung. Danach schließt sich im Kapitel 6 die Thematik der Thermographie mit ihren Eigenschaften und Besonderheiten an und geht mit dem Kapitel 7 in die Visualisierung thermaler Informationen in konventionelle Karten und ihre Repräsentation in räumlich-virtuelle Gebäudemodelle eines 3D-Stadtmodells über. Das Kapitel 9 gibt eine Zusammenfassung über die Arbeit und einen Ausblick über weitere Forschungsfragen und bildet den Abschluss dieser Arbeit.

## 2 Die menschlich-visuelle Raumwahrnehmung

Das menschliche Auge nimmt den dreidimensionalen euklidischen Raum der realen Umgebung auf seinen beiden konkav gekrümmten Netzhäuten als perspektivisch verzerrtes zweidimensionales Abbild wahr und unterliegt nach Imhof der Gesetzmäßigkeit der Zentralprojektion (Imhof 1963). Das stereoskopische Sehen spielt nach Ware bei einer Distanz von über 30m keine Rolle mehr (Ware 2004, S. 289). Thomer ging dagegen bis maximal 240m (Thorner 1938), Eppenstein bis 500m (Eppenstein 1924) und Vierling theoretisch bis über 2000m aus (Vierling 1965).

Der menschliche Raum- und Tiefenwahrnehmungsprozess rekonstruiert aus den beiden Teilbildern die räumliche Dimension, die Distanz, die Lage zueinander, die Größe und die Silhouette von Objekten. Dabei werden Objekte als gleich bleibend wahrgenommen, obwohl ihre Größe, Orientierung, Position, Form, Farbe und Abstand das Netzhautbild ständig ändert. Man spricht auch von Konstanz, dabei unterscheidet man zwischen Größen-, Form-, Orientierung-, und Helligkeitskonstanz.

Eine denkbare Erklärung für die Größenkonstanz ist der Ansatz, dass unser Wahrnehmungssystem nicht nur aus der Größe des Netzhautbildes die Objektgröße ableitet, sondern auch dessen Entfernung und Sehwinkel erfasst, um auf die Objektgröße zu schließen. Bekannte Größenkonstanztäuschungen sind die sogenannte *Ponzo-* oder auch *Mondtäuschung* und Täuschungen durch den Ames'schen Raum.

Für die Wahrnehmung der Entfernung bedarf es somit bestimmter Reize, die Hinweise auf die räumliche Distanz zweidimensionaler Abbilder des euklidischen Raumes liefern. Diese Hinweisreize werden gerade bei künstlerischen Trugbildern bewusst in ihrer Anordnung so verändert, dass die menschlich-visuelle Wahrnehmung fehlgeleitet wird. Zu den bekanntesten Künstlern aus der Malerei zählt diesbezüglich M.C. Escher mit seinen *Trug-* und *Kippbildern*. Dabei sind in der Gestaltpsychologie die Zusammenhänge und Einflüsse der Tiefenwahrnehmung bis heute noch nicht vollständig geklärt.

Heute lassen sich die Erklärungsansätze zur Raumwahrnehmung in fünf große Bereiche einteilen. Jeder ist für sich richtig, da kein allumfassender, allgemeiner Ansatz gebildet werden kann. Gibsons ökologischer Ansatz stellt eine Weiterentwicklung seiner früh verfassten Bodentheorie dar. Laut seiner Theorie basiert die visuelle Raumwahrnehmung auf dem gleichzeitigen Erkennen von Beständigkeit und dem Wechsel der Oberfläche innerhalb einer bestimmten Umwelt. Er nennt die Beständigkeit der Umwelt Invarianz, den Wechsel in der Umwelt Varianz (Gibson 1973a; Gibson 1973b; Gibson 1982).

Der computerwissenschaftliche Ansatz von Marr besteht darin, räumliche Informationen aus Umweltszenen über mathematische Beschreibungen zu extrahieren und mit einer rückwärtigen Prozessierung ihre Gültigkeit durch Simulation zu überprüfen. Damit wurde die Grundlage für die Forschung im Bereich der Künstlichen Intelligenz (Marr 1982) geschaffen.

Weitere Versuche den Wahrnehmungsprozess zu beschreiben, unterscheiden sich nach kognitionspsychologischen (Wie beeinflussen Erfahrungen und Vorwissen die Wahr-

nehmung?; Neisser 1967), psychophysikalischen (Wie setzen wir die Informationen aus der Umwelt in Wahrnehmungen um?; Fechner 1860, Graham 1989) und physiologischen Ansätzen<sup>3</sup> (Wie werden Objekte in der Umwelt im Nervensystem repräsentiert?; Wertheimer 1925, Koffka 1922).

## 2.1 Tiefenwahrnehmung

Die Wahrnehmungsleistung des Menschen kann für die Raumwahrnehmung in drei Komponenten gegliedert werden. Durch die Differenzierung der eigenen körperlichen Dimension zu allen anderen Umweltobjekten ist der Mensch in der Lage, seine Position in Raum klar festzulegen. Dies wird auch als egozentrische Wahrnehmung bezeichnet, die als Grundlagen für die gesamte Raumwahrnehmung dient. Sobald der Mensch die eigene Position mit einem Objekt aus seiner Umwelt in Beziehung setzt, ermöglicht es ihm die Entfernungswahrnehmung bzw. die absolute Tiefenwahrnehmung (*egozentrische Entfernung*) zu erfassen. Die relative Tiefenwahrnehmung greift dann, wenn der Mensch mehrere Objekte in Relation zueinander erfassen und daraus ihre wechselseitige Beziehung zueinander ableiten kann (*exozentrische Entfernung*). Jeder dieser Auslösereize, die für absolute und relative Wahrnehmung eine Tiefeninformation bereitstellen, werden als Tiefenkriterien bezeichnet. Dabei unterscheidet man zwischen klassischen und neuzeitlichen Tiefenkriterien.

Klassische Tiefenkriterien unterteilen sich in statische<sup>4</sup> und dynamische Kriterien. Dabei stammen die meisten Abbildungskriterien von den Malern aus der Zeit der Renaissance und wurden durch Descartes, Berkeley, Wheatstone und Helmholtz erweitert. Erst im Jahr 1935 setzte Koffka die seit längerem vernachlässigten einäugigen (monokularen) Tiefenkriterien in seinen Untersuchungen wieder ein (s. Kap. 2.4).

Zu den neuzeitlichen Tiefenkriterien zählt die Arbeit von Gibson und Marr. Gibson entwarf im Jahre 1950 seine Bodentheorie, die durch die Theorie der Flächenanordnung im späteren Ansatz der ökologischen Optik ersetzt und erweitert wurde (Gibson 1973a; Gibson 1973b; Gibson 1982). Gibson sieht den Raum als aus vielen verschiedenen Bildern zusammengesetzte texturierte Oberfläche. Eine analytische Erforschung der Tiefenkriterien wurde von Marr durchgeführt (Marr 1982). Er war maßgeblich an der Entwicklung der *Computer Vision* beteiligt und gilt als Begründer der Neuroinformatik.

Abb. 1 zeigt einen Überblick über die klassischen Tiefenkriterien, die in physiologische und psychologische Tiefenkriterien unterteilt werden können. Zu den physiologischen Einflüssen zählen meist beidäugige (binokulare) Reize, zu den psychologischen die monokulare Tiefenkriterien. Die neuzeitlichen Tiefenkriterien des *Breitengradienten*, des *optischen Flusses* von Gibson und die *Tiefenschärfe* (*depth of focus*) (Ware 2004, S. 266) sollen nicht unerwähnt bleiben, werden aber in der weiteren Arbeit nicht näher beschrieben.

---

<sup>3</sup> Auch als Gestaltpsychologie bezeichnet.

<sup>4</sup> Auch Abbildungskriterien (*pictorial deep cues*) genannt.

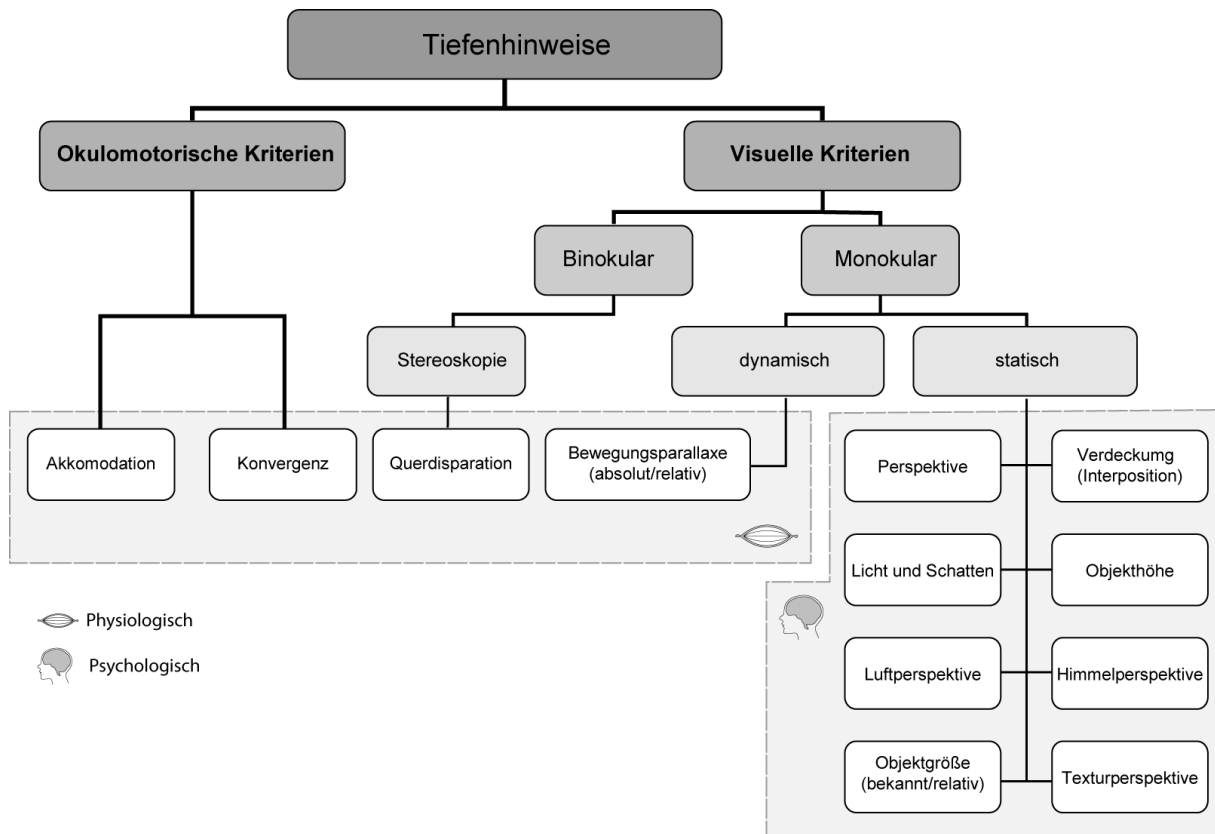


Abb. 1: Tiefenhinweise für die menschliche Wahrnehmung

## 2.2 Binokulare Tiefenkriterien (Stereoskopie)

Die Querdisparation ist das wichtigste Tiefenkriterium im Nahbereich. Durch die Anordnung der Augenpaare in einem Abstand von ca. 6,5cm bei Männern und 5,5cm bei Frauen wird das Umfeld aus zwei unterschiedlichen Standorten betrachtet und ein leicht versetztes Netzhautbild für jedes Auge wahrgenommen. Bei der Fokussierung auf ein Objekt konvergiert der Augenapparat und projiziert in jedem Auge korrespondierende Netzhautareale, die der Lage auf einem Kreis, dem theoretischen Horopterkreis (*Vieth-Müller-Kreis*) entsprechen. Alle übrigen Objekte, die nicht auf dem Horopterkreis liegen, werden auf nicht-korrespondierende Netzhautareale projiziert. Das Panum-Areal verdeutlicht den Bereich, in dem die einzelnen Teilbilder zu einem räumlichen Gesamtbild fusionieren<sup>5</sup> und die Querdisparation ihren Teil zur Tiefeninformation beiträgt. Diesen Prozess nennt man auch räumliches Sehen oder *Stereopsis*. Außerhalb des Panum-Areals zerfallen die fusionierten Netzhautbilder in ihre Teilbilder und werden als Doppelbilder (*Diplopie*) sichtbar.

<sup>5</sup> Die Fusion beschreibt den neuronalen Prozess, indem die retinalen Bilder der beiden Augen zu einem Bild verschmelzen.

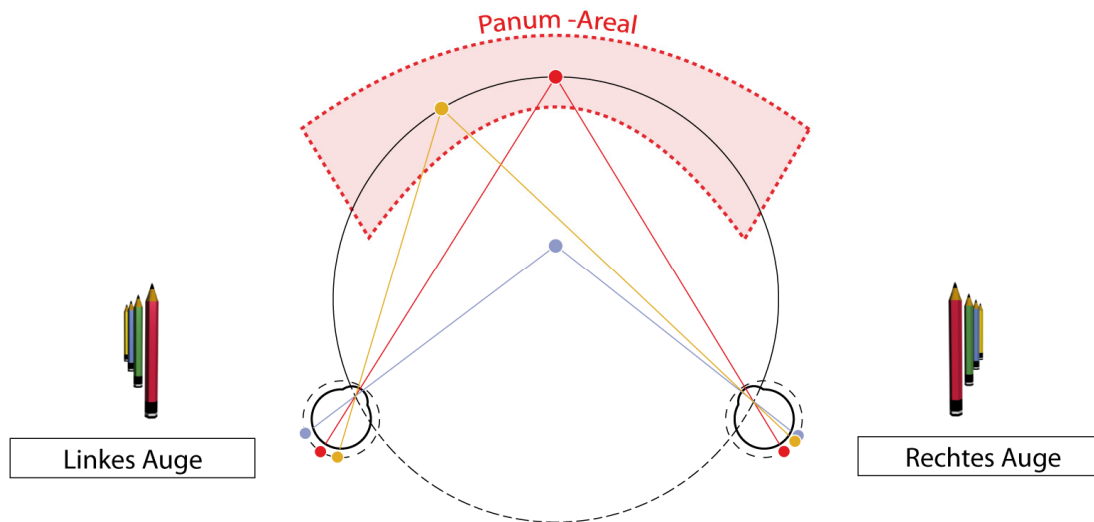


Abb. 2: Horopterkreis mit Panum-Gebiet

Der Tiefenbereich des menschlichen Auges wird mit 70 Winkelminuten angegeben und kann Tiefenunterschiede in Abhängigkeit des Betrachtungsabstandes unterschiedlich genau erfassen. Nach dem Gesetz der *stereoskopischen Parallaxe* nimmt die Genauigkeit der Tiefenunterscheidung im Quadrat zu ihrem Betrachtungsabstand ab und kann aufgrund der festen Basis des menschlichen Augenapparates ausschließlich über dessen Betrachtungsabstand erfolgen (Kelle 1995, S. 29).

Der Einflussbereich der *binokularen Disparität* besteht dagegen nur bis zu einer Distanz von 30 Metern.

### 2.3 Okulomotorische Tiefenkriterien

Zu den okulomotorischen Tiefenkriterien zählt die *Akkommodation*. Sie ist ein monokularer Tiefenreiz, gehört aber nicht zu der Gruppe der bildhaften monokularen Tiefenreize (Ware 2004, S. 260). Die Akkommodation geschieht über die Anpassung der Linsenkrümmung durch den *Ciliarmuskel*, bis die nötige Brennweite für ein scharfes Abbild auf der Netzhaut erreicht ist. Eine Modulation der Linsenkrümmung erfolgt nur im Bereich von 10 cm bis 5 m und kann bei größeren Distanzen keine weiteren Tiefenreize liefern. Somit ist der Beitrag für den Tiefenreiz eher gering einzuschätzen. Rock bewertet den Einfluss der Akkommodation in einer anderen Richtung als nicht mehr hoch. Er geht von einer bereits prozessierten Tiefenwahrnehmung aus, deren Reaktion die Muskelkontraktion für die Akkommodation bedeutet. Das heißt, dass der Muskel keine Reize an das Gehirn weiterleitet, die für die Tiefenwahrnehmung genutzt werden könnten (Rock 1983).



Abb. 3: Akkommodation

Die Konvergenz ist ein weiteres okulomotorisches Tiefenkriterium. Dabei werden beide Augäpfel soweit zueinander verdreht, bis sich beide Sehachsen in einem gemeinsamen

Fixpunkt schneiden. Aus Versuchen konnte festgestellt werden, dass ab einem Betrachtungsabstand von 10m die Effizienz der Konvergenz mit dem Quadrat des Betrachtungsabstands abnimmt.



Abb. 4: Konvergenz

Bei der Schätzung der Entfernung zu einem Objekt (*absolute Tiefenwahrnehmung*) werden automatisch die Konvergenz- und Akkommodationskriterien der binokularen Tiefenwahrnehmung verwendet. Soll die Entfernung zu zwei bzw. mehreren Objekten (*relative Tiefenwahrnehmung*) eingeschätzt werden, gilt die Querdisparation als entscheidendes Kriterium.

## 2.4 Monokulare Abbildungskriterien

Monokulare Abbildungskriterien gehören zu den bildhaften Kriterien und lassen sich in statische und dynamische Kriterien unterscheiden. Die statischen Kriterien können alle mehrdeutig gesehen werden, da sie in einer zweidimensionalen Ebene, wie auch in einem dreidimensionalen Raum zu interpretieren sind. Erst durch die Bewegung löst sich die Mehrdeutigkeit auf und eine eindeutige Form wird erkennbar. Bekanntes Beispiel hierfür ist ein auf eine imaginäre Kugel verteilter Punkthaufen, der in Ruhe keine Form erkennen lässt. Erst durch die Rotation des Punkthaufens ist seine kugelhafte Gestalt eindeutig zu erkennen. Abb. 5 verdeutlicht die Problematik der Mehrdeutigkeit anhand eines verebneten Würfels.

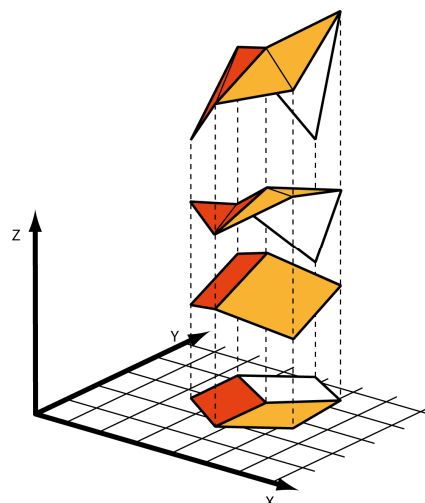


Abb. 5: Mehrdeutigkeit statischer verebneter Abbildungen

## 2.4.1 Statische monokulare Abbildungen

Zu den bedeutendsten Kriterien zählt die Perspektive. Hierbei zählt die Linearperspektive als die einflussreichste Projektionsart. Dies liegt in der Eigenschaft begründet, dass parallele Linien zu einem gemeinsamen Fluchtpunkt zusammenlaufen und die Objektgröße dabei kontinuierlich abnimmt, was wiederum beeinflusst das Maßstabsverhältnis und die Objektwinkel in der Abbildung.

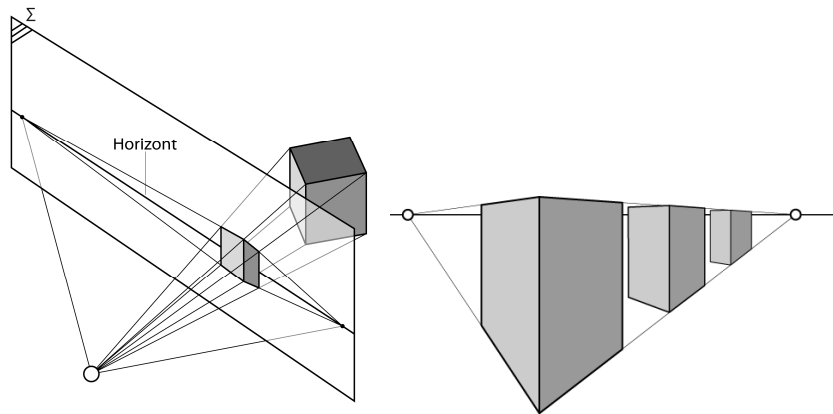


Abb. 6: Zentralprojektion (Linearperspektive)

Verdeckung oder auch Interposition gibt Aufschluss über die räumliche Anordnung mehrerer Objekte und liefert eine gute Tiefenwirkung. Dabei ergänzt unser Wahrnehmungsapparat die fehlenden Teilstücke von bekannten Objekten (Formkonstanz), sodass Objekte klar voneinander getrennt und eine räumliche Gegebenheit wahrgenommen werden kann (s. Abb. 7).

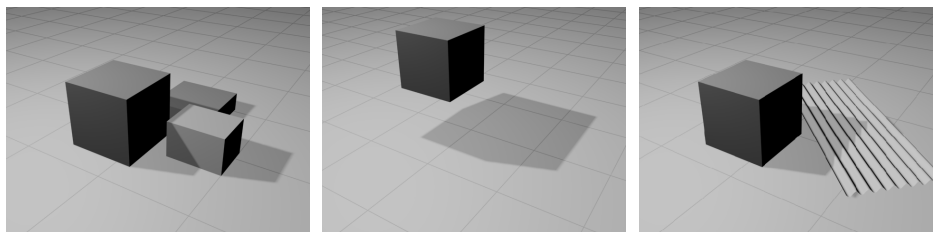


Abb. 7: Kombination aus Interposition, Objektlage und Licht/Schatten

Licht und Schatten sind weitere Kriterien und haben eine beachtliche Bedeutung in der menschlichen Wahrnehmung. Es wird hierbei zwischen Hell-Dunkelschatten (*Chiaroscuro*, Körperschatten), der innerhalb von Objekten auftreten kann, und einem Schlagschatten, den ein Objekt auf eine benachbarte Oberfläche wirft, unterschieden (s. Abb. 7). Durch die evolutionsbedingte Erkenntnis des Menschen, dass Licht immer von oben auf ein Objekt trifft und die Helligkeitswerte der Oberfläche in Abhängigkeit ihrer Ausrichtung zur Lichtquelle variiert, resultiert der Körperschatten. Durch ihn lässt sich auf die Objektform und die Ausrichtung zur Lichtquelle schließen. Der aus dieser Situation entstehende Schlagschatten lokalisiert das Objekt und weist ihm eine deutliche Beziehung zum umgebenden Raum zu. (Ware 2004, S. 267). Hubano schrieb, dass der Schlagschatten die wahrgenommene Objektgröße, Höhenlage und die relative Tiefe beeinflussen können (Hubona et al. 2000, S. 220). Darüber hinaus kann entlang der Schattenkante auch auf die Oberfläche der schattenempfangenden Oberfläche geschlossen werden (s. Abb. 7). Die Erkenntnis des *Chiaroscuro* werden seit langem in der Kartographie im Bereich der Schummerung



topographischer Karten eingesetzt, um eine plastische Wirkung und damit eine leichtere Interpretierbarkeit der Karte zu erzielen (Imhof 1965).

Die Objekthöhenlage zum Horizont lässt Aussagen zu dessen Betrachtungsabstand zu. Je näher das Objekt an der Horizontlinie liegt, umso weiter weg wird das Objekt vom Betrachter wahrgenommen. Aufgrund der linearen Perspektive kann bei einem direkten Vergleich der Objekthöhenlage zweier Objekte Rückschlüsse auf deren Betrachtungsabstand gezogen werden.



Abb. 8: Objekthöhenlage zum Horizont

Ein weiterer Tiefeneffekt ist die Luftperspektive. Sie geht auf Leonardo da Vinci zurück und beschäftigt sich mit der Farb- und Helligkeitsänderung entfernter Objekte. Dabei muss zwischen Luft- und Farbperspektive unterschieden werden. Bei der Luftperspektive kommt es durch Wasserdampf und Schwebeteilchen wie Ruß, Staub etc. zu einer natürlichen Trübung der Atmosphäre, die mit einer Veränderung im Kontrast und Helligkeit einhergeht. Der Kontrast nimmt mit der Distanz kontinuierlich ab und gleicht sich mit anderen Kontrasten aus seiner Umgebung immer weiter an. Gleichzeitig nimmt dabei die Helligkeit zu. Das Resultat sind undeutlich werdende Konturen, die in ihrer Schärfe mit der Distanz weiter abnehmen. Ein zusätzlicher Effekt ist die verursachte Farbverschiebung. Sie führt bei zunehmender Entfernung zu einer zusätzlichen graublauen Verschleierung (Imhof 1965, S. 196) (s. Abb. 9), die sich wie ein Verlaufsfilter über die gesamte Abbildung erstreckt. Durch den blauen Farbanteil, der sich physikalisch bedingt durch seine kürzere Wellenlänge im Auge „weiter hinten“ abbildet, erfolgt eine flachere Linsenkrümmung bei der Akkommodation, das zu einer kleineren Abbildung auf der Netzhaut führt. Der visuelle Eindruck fällt daher kleiner und somit distanzierter aus als bei Farben mit größerer Wellenlänge (z.B. Rot).

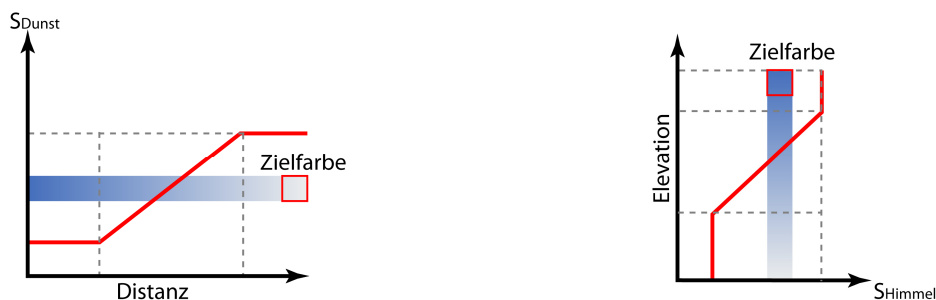


Abb. 9: Luftperspektive [links] – Himmelperspektive [rechts] (aus Graf 1995)

Zu wichtigen atmosphärischen Effekten zählt Graf die Luftperspektive und den Farbverlauf des Himmels (Himmelperspektive) (Graf 1995). Brassel ging für die Simulation der Luftperspektive nach dem Satz: „Je höher, desto klarer, je tiefer, desto dunstiger.“ vor (Brassel 1974).

Die Himmelperspektive erstreckt sich, wie die Luftperspektive, in horizontaler Distanz über die vertikale Richtung mit einer Umkehr der Verlaufsrichtung (s. Abb. 9 – rechts). Statt eines blaugrauen Verlaufs vom Betrachter in die Ferne reichend, geht dieser nun in einen graublauen Verlauf in die Höhe über (Graf 1995). Verursacht wird dies wiederum durch die atmosphärischen Partikel, die das natürliche Sonnenlicht in seiner parallelen Strahlrichtung

streut. Je dichter die Atmosphäre und somit auch ihre Partikelanteile, umso stärker tritt dieser Effekt auf.

Bei der relativen Objektgröße bzw. Größenkonstanz wird die Größe gleicher Objektformen durch die menschliche Wahrnehmung als konstant angesehen (s. Abb. 10). Erscheinen diese Objekte in ihrer Größe verschieden, so wird eher ein räumlicher Distanzunterschied anstelle ihrer unterschiedlichen Größe wahrgenommen. Das Phänomen der Größenkonstanz wird verstärkt durch perspektivische Elemente wie Linien (s. Abb. 10 – Pfeil) oder linear wiederholende Anordnungen von Objekten (z. B. Säulenreihen).

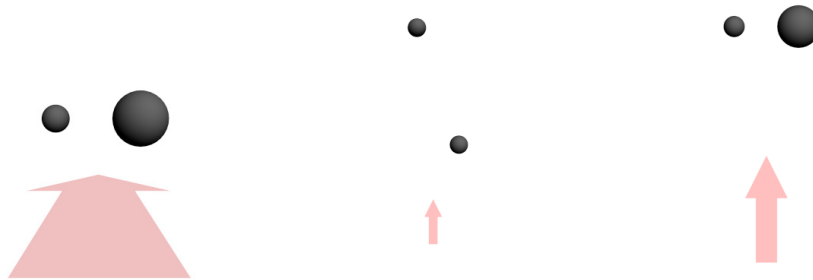


Abb. 10: Relative Objektgröße – Wahrnehmung, Vorstellung und Wirklichkeit [von links nach rechts]

Der Effekt der bekannten Objektgröße berücksichtigt den Erfahrungsschatz des Menschen, indem er das Wissen eines vertrauten Objektes nutzt und dieses mit der unbekanntem Objektgröße vergleicht. Darüber hinaus kann der Betrachter nicht nur die ungefähre Größe des unbekanntem Objektes ableiten, sondern auch seine eigene Entfernung abschätzen. Dieses Kriterium zählt nicht direkt zu den eigentlichen Tiefenkriterien, aber der Beobachter zieht diese Erkenntnisse in seine Tiefenbestimmung unmittelbar mit ein. Das gewinnt gerade dann an Bedeutung, wenn es an anderen Tiefenreizen fehlt, wie sie in einer virtuellen computer-generierten Szene häufig vorkommt. So lässt sich beispielsweise durch die Positionierung einer menschlichen Silhouette neben einem texturfreien Kubus auf dessen ungefähre Größe und den eigenen Abstand schließen (s. Abb. 11).

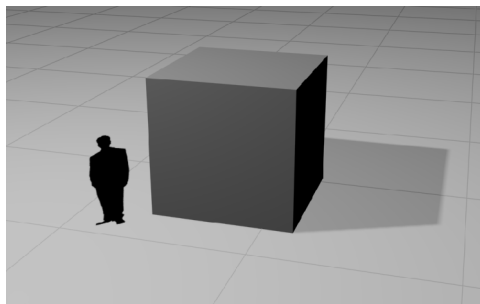


Abb. 11: Absolute Objektgröße

Die Texturperspektive geht auf die Bodentheorie von Gibson zurück und behandelt den Einfluss der Textur am Objekt, der in Abhängigkeit eines variierenden Betrachtungswinkels beim Menschen einen unterschiedlichen Tiefenreiz auslöst (Gibson 1973b) (s. Abb. 12). Texturen nehmen dadurch in ihrer longitudinalen Ausrichtung in ihrer Dichte kontinuierlich zu. Sie bilden einen Texturgradienten, der abhängig vom Betrachtungswinkel ist und zu jedem Zeitpunkt durch eine Funktion beschrieben werden kann (Purdy 1960).

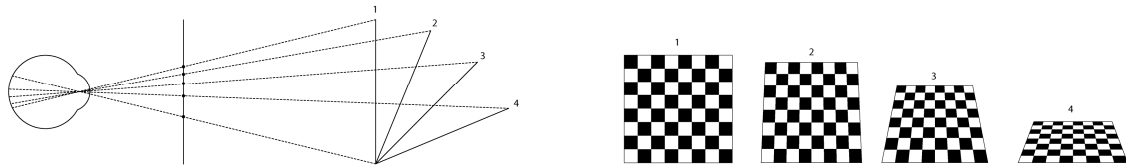


Abb. 12: Texturperspektive nach Gibson (aus Gibson 1973b, S. 256)

Texturen, die mit ihrer Flächennormale zum Betrachter ausgerichtet sind, besitzen keinen Texturgradienten, sondern unterliegen nur der Texturdichte. Dadurch kommt es bei einer Veränderung des Betrachtungsabstandes nur zu einer Variation der Texturdichte. Abb. 13 verdeutlicht diesen Einfluss. So spiegelt sich eine gleichabständige longitudinale Punktfolge im Auge logarithmisch wider, eine vertikale Punktfolge dagegen konstant.

Sowohl Texturgradienten als auch Farb- und Strukturgradienten lösen den gleichen Tiefenwahrnehmungszreiz durch deren Verlauf einer beleuchteten Oberfläche bzw. durch dessen Strukturform aus.

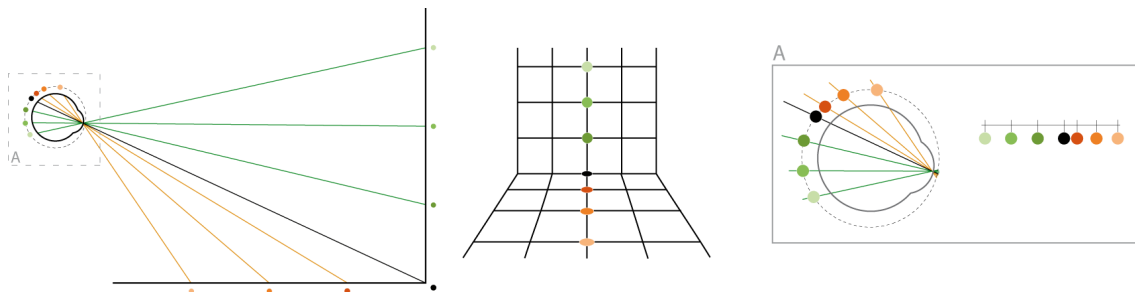


Abb. 13: Abstandveränderung der retinalen Punktfolge durch ihre Ausrichtung nach Gibson

## 2.4.2 Dynamische monokulare Tiefenkriterien

Zu den klassisch dynamischen monokularen Tiefenkriterien zählt die Bewegungsparallaxe. Sie wird zwischen absoluter und relativer, sowie zwischen aktiver und passiver Bewegungsparallaxe differenziert. Dabei steht für die absolute Bewegungsparallaxe die Betrachtung nur eines Objektes, für die relative die Betrachtung zweier oder mehrerer Objekte. Bei der aktiven Bewegungsparallaxe verändert der Betrachter seinen Augenpunkt durch aktiven Standortwechsel. Im passiven bleibt der Betrachter in seiner Umgebung statisch und das Umfeld bewegt sich. Das lässt sich bei einem Blick aus dem fahrenden Zug bzw. bei einer virtuellen Kamerafahrt am Monitor nachvollziehen. So verändert sich für jedes wahrgenommene Objekt permanent der Betrachtungswinkel, wenn der Mensch, ob aktiv oder passiv, seinen Standort bei gleichzeitiger Fixation mehrerer Objekte variiert. Dabei hängt die Größe der Winkeländerung vom Objektabstand ab. Das bedeutet, dass nahe Objekte ihren Winkel schneller als entferntere Objekte verändern und durch die variierenden relativen Bewegungsparallaxen ihre gegenseitige Objektlage erfasst werden kann. Inwiefern dieser Faktor zur Tiefenwahrnehmung beiträgt ist bisher noch nicht geklärt.

So lässt sich festhalten: Mit einer perspektivischen Darstellung, ob auf Papier oder am Bildschirm, können nur die monokularen Tiefenreize angesprochen werden, da binokularer Reize innerhalb der verebneten Abbildung nicht vorhanden sind. Ausnahmen stellen immer nur Systeme dar, die eine räumlich-visuelle Wahrnehmung unterstützen, wie beispielsweise *Anaglyphenbilder* (Bahr 1998), *Chromostereoskopien* (Thierry 1997), *3D-Monitore* (Kirschenbauer 2005), *stereoskopische Monitorsysteme* (Ware, 2004, S. 274), *Head-Mounted-*

*Displays* (Hinsche 1988) oder vorgehängte *Lenticularfolien* am Monitor (Johnson und Jacobsen 2005, Dodgson 2005) im digitalen Anwendungsbereich. Gängige Softwareprodukte für dreidimensionale Visualisierungen beschränken sich hierbei auf die Umsetzung von monokularen Tiefenreizen, aufgrund der überwiegenden Bildschirmausgabe auf Seiten der Anwender. So schreibt Bleisch: “The most accessible and popular applications use monocular depth cues rather than binocular depth perception ...” (Bleisch et al. 2008, S. 216). Darüber hinaus befasst sich die 3D-Computergraphik mit der Umsetzung weiterer Erkenntnisse aus dem Bereich der Physik und Mathematik. Diese führen zu approximierten Verfahren und Beschreibungen der konstruierten virtuellen Szene. Im folgenden Abschnitt sollen sie näher erläutert werden.

### 3 Eigenschaften der 3D-Computergraphik

Die 3D-Computergraphik versucht seit jeher durch physikalische, mathematische, angenäherte und naturalistisch wirkende Verfahren die Umwelt in seiner Gestalt möglichst exakt wiederzugeben. Dabei muss oft aus Gründen des Detailreichtums oder der Komplexität physikalischer Phänomene (z.B. *Kaustiken*) auf eine Näherung bzw. eine einfachere Beschreibung zurückgegriffen werden. Deren Verfahren liefern in der Weiterentwicklung immer naturalistischere und physikalisch fehlerfreiere Ergebnisse. So bleibt das Ziel, ein physikalisch korrekteres Abbild der realen Umgebung zu erstellen, bestehen.

Das bedeutet wiederum, dass weitaus komplexere Bedingungen zum Einsatz kommen als im digitalen 2D-Bereich. So agiert die 3D-Computergraphik innerhalb eines dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystems, auch Weltkoordinatensystem genannt, mit einer Anzahl weiterer lokaler Koordinatensysteme für virtuelle Kameras, Lichtquellen, Objekte und Materialausrichtungen, die ihre Lage und Orientierung zum Weltkoordinatensystem festlegen. Alle in diesem Raum eingebrachten Elemente, vergleichbar mit einem Bühnenbild, werden als Szene bezeichnet. Das Resultat einer solchen Szene ist ein Abbild auf einem üblichen Computerbildschirm, bestehend aus leuchtenden Bildpunkten, den so genannten Pixeln. Für eine renderfähige Szene sind somit mindestens ein Objekt und eine Kamera notwendig. Die Beleuchtung durch eine lokale Lichtquelle, die wie eine Kamera in der Szene platziert wird, ist dagegen nicht zwingend und kann durch eine allgemeine globale Ausleuchtung erfolgen.

Für die Erstellung eines solchen Pixelbildes müssen aus dem Sichtfeld der virtuellen Kamera die Farben jedes einzelnen Pixels bestimmt werden. Deren Farbbestimmung ergibt sich aus der Ermittlung der Farbe jedes Oberflächenpunktes durch Berücksichtigung der physikalischen Materialeigenschaft der Oberfläche, dem direkten und indirekten Lichteinfall und der Kameraausrichtung. Die Abfolge von der Modellerstellung bis hin zur Pixelbildausgabe wird in der Computergraphik als Graphikpipeline bezeichnet. Diese lässt sich in drei Gruppen untergliedern, die Anwendung, die Geometrie und die Rasterung. Im Bereich der Anwendung werden die Formprimitiven mit ihren eigenen Objektkoordinaten sowie den Animations- und Interaktionsparametern definiert. In der Gruppe der Geometrie erfolgt die Anpassung an ein Ausgabegerät und schließt mit der Rasterung für das Endgerät ab. Im Folgenden wird auf ihre Abfolge eingegangen.

#### 3.1 3D-Graphikpipeline

Beginnend mit dem Anwendungsbereich werden die Formprimitiven in ihrem eigenen Objektkoordinatensystem samt ihrer Animations- und Interaktionsparametern definiert. Danach überführt die Graphikpipeline die Formprimitiven in den folgenden Geometriebereich und transformiert durch Objekttransformation die Formprimitiven in das Weltkoordinatensystem der Szene. Der nächste Schritt wandelt alle im virtuellen Kamerasichtfeld sichtbaren Objekte, die im Vorfeld in einer Szene platziert und ausgerichtet wurden, in das Kamerakoordinatensystem um (Bender und Brill 2006, S. 72).

Dem folgt der Prozessschritt der Beleuchtung. Hier wird die Interaktion zwischen Objektmaterial und Lichtquelle berechnet, gefolgt von der Schattierung. Sie ist verantwortlich für die Ausführung der Lichtberechnung und Bestimmung der Pixelfarbe der einzelnen Dreiecksflächen (Möller und Haines 1999, S. 68). Bekannteste Schattierungsverfahren sind das Flat-, das Gouraud- und das Phong-Modell (Bender und Brill 2006, S. 279). Die

eigentliche Berechnung der restlichen interpolierten Farbwerte für die entsprechende Dreieckfläche wird für das Gouraud-Modell erst bei der späteren Rasterung durchgeführt. Nach dem Schattierungsschritt kommt die Projektion. Das bedeutet es werden erst Schnittebenen (*3D-Clipping* und *3D-Culling*) festgelegt, die das Sichtvolumen zu einem Quader oder Pyramidenstumpf (*Frustum*), abhängig von der gewählten Parallel- oder Zentralprojektion, beschneiden und zu einer deutlichen Effizienzsteigerung der darauf folgenden Operationen führen (Bender und Brill 2006, S. 51). Danach erfolgt die Transformation des *Frustums* in einen Einheitswürfel. Das bedeutet, es findet eine Volumentransformation in normalisierte Gerätekoordinaten statt. Im darauf folgenden Schritt erfolgt der Übergang von 3D- in den 2D-Bereich mit den bekannten Transformationen der Parallel- oder Zentralprojektion in das Bildkoordinatensystem. Nach der Verebnung der Kamerasicht folgt das Beschneiden des Bildausschnittes durch das *2D-Clipping*-Verfahren. Hierzu werden die Objekte mit dem Einheitswürfel verschnitten. Das führt zum Verzicht außerhalb liegender Objekte, zu angeschnittenen Objekten bei Überschneidungen mit dem Einheitswürfel oder zu unveränderten Objekten innerhalb des Einheitswürfels (Möller und Haines 1999, S. 16). Nach diesem Prozess erfolgt die *Window-Viewport-Transformation*<sup>6</sup>. Sie gewährleistet durch Translation und Skalierung die richtige Platzierung des Bildes auf ein Ausgabegerät. Das Ergebnis gelangt anschließend in den letzten Abschnitt der Rasterung.

Im Rasterungsprozess werden nun alle Primitiven gerastert, dabei muss die richtige Anordnung überlappender Primitiven zum Betrachter berücksichtigt werden. Meist geschieht dies über das *Z-Buffer*-Verfahren, welches die Tiefeninformation der Primitiven, die frühzeitig im Pipelineprozess zurückgelegt worden sind, auswertet. Die anschließende Farbgebung des Pixels hängt von der dazugehörigen Formprimitive ab und wird nach dessen festgelegten Beleuchtungswerten, Material- und Textureigenschaften eingefärbt. Hier findet die interpolierte Beleuchtungsberechnung für die Dreieckflächen der polygonalen Netze mit den aus dem Beleuchtungsschritt kalkulierten Lichtwerten an den Dreiecksknoten (*vertex*) statt. Das Resultat ist ein diskret gerastertes und passend eingefärbtes zweidimensionales Pixelbild im Gerätekoordinatensystem des Ausgabegerätes (Bender und Brill 2006, S. 73). Abb. 14 zeigt den graphischen Ablauf in der 3D-Graphikpipeline kombiniert aus Bender, Watt und Möller (Bender und Brill 2006, S. 72; Watt 2002, S. 165; Möller und Haines 1999, S. 11).

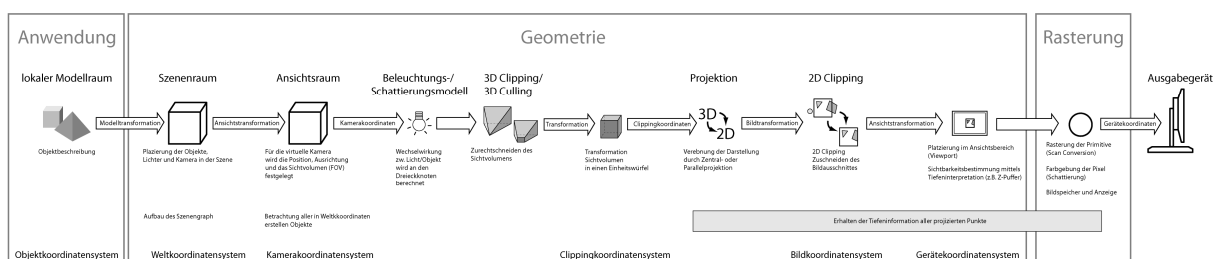


Abb. 14: 3D-Graphikpipeline [s. Anhang]

<sup>6</sup> Screen mapping

Vollständigkeitshalber sei die 2D-Graphikpipeline erwähnt. Dabei handelt es sich stark vereinfacht um eine 3D-Graphikpipeline mit z-Wert Null (Xiang und Plastock 2003, S. 128). Aufgrund der nicht angestrebten räumlich naturalistischen Darstellung und der vorliegenden Dimension sind keine Lichtquellen oder Kameras im Sinne der 3D-Computergraphik enthalten. Dadurch reduziert sich der Prozess ausschließlich auf die Darstellung von *Window-Viewport-Transformationen* oder einer zusammengefassten Ansichtstransformation.

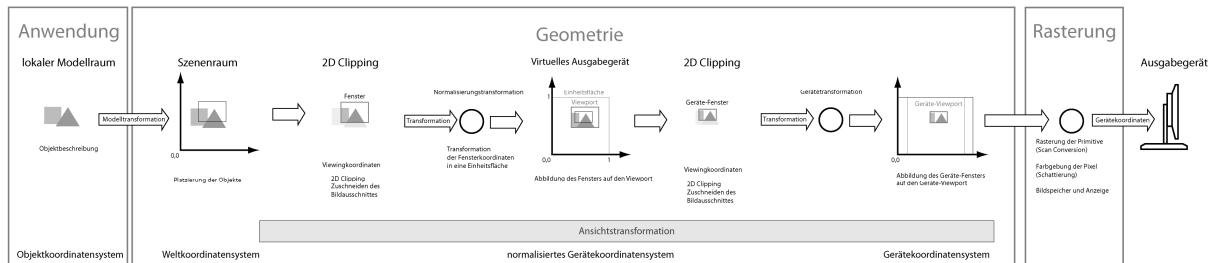


Abb. 15: 2D-Graphikpipeline [s. Anhang]

Im folgenden Kapitel wird auf die unterschiedlichen Beleuchtungsmodelle eingegangen, nachdem ein kurzer Ausblick auf die geometrischen Strukturen generierter Körper in der 3D-Computergraphik geworfen wurde.

## 3.2 Objektbeschreibung

In der 3D-Computergraphik versucht man durch die Annäherung eines polygonalen Netzes den geometrischen realen Volumenkörper zu beschreiben. Es entsteht somit ein geschlossenes Oberflächenmodell (*Mesh-Objekt*), das als räumliches Gitternetz wiedergegeben werden kann. Eine Sonderform der Objektbeschreibung stellen Volumenmodelle (*Voxelmodelle*) dar, sie zeichnen sich durch *Voxel*, vorstellbar als „volumenhafte Pixel“, aus. Ihr Vorteil besteht in der Darstellung und dem Informationstransport innerhalb von Körperstrukturen. So findet sich ihr Einsatz oft in Spezialanwendungen, wie der Medizin, der Meteorologie oder der Geologie. Für die weitere Abhandlung der Thematik wird nur auf die Oberflächenmodelle eingegangen, da das *Voxelmodell* eine Sonderstellung in der Wiedergabe von Körpern einnimmt.

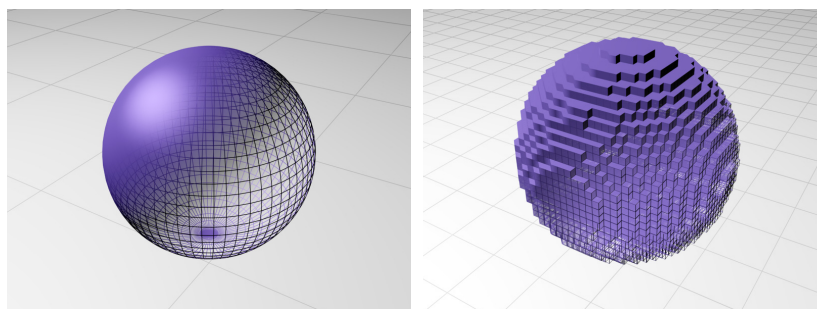


Abb. 16: Oberflächenmodell [links] und Voxelmodell [rechts]

### 3.2.1 Oberflächenmodelle

Das kleinste Element eines Oberflächenmodells ist die Facette, sie kann als Rechteck- oder Dreieckstruktur beschrieben werden und definiert sich über ihre Facettengröße, eine mehr oder weniger gute Annäherung an den wirklichen Volumenkörper (Watt 2002, S. 48). Polygonale Netze besitzen in ihrer Darstellung zwei Vorteile. Zum einen die einfache

Erstellung von Strukturen und zum anderen die existierenden effektiven mathematischen Methoden zur Oberflächenschattierung (Watt 2002, S. 48). Oberflächenmodelle können über zwei Arten der Modellierung konstruiert werden, nämlich der direkten und der indirekten Modellierung.

Zu der direkten Modellierung zählt die Vorgehensweise der *Constructive Solid Geometry (CSG)*. Diese setzt volumenhafte Formprimitive ein und bietet über boolesche Operationen die Möglichkeit, komplexe Körper zu erstellen. Für den späteren Renderprozess<sup>7</sup> bedarf es jedoch den Zwischenschritt, die erstellten *CSG*-Geometrien in maschinenfreundliche Polygonnetze zu konvertieren (Watt 2002, S. 48).

Die indirekte Modellierung bezeichnet das *Boundary-Representation-Verfahren (B-Rep)*. Mithilfe der Topologie zwischen Punkten, Kanten und Flächen kann ein Oberflächenmodell als Objekt wiedergegeben werden. Seine Oberflächengeometrie wird über die zugrunde liegenden Punktkoordinaten festgelegt und über den *Knoten-Kanten-Flächen-Graph (vef-Graph)*<sup>8</sup> beschrieben.

Eine weitere Definition von *B-Reps* sind bikubische Splineflächen. Diese bestehen aus mehreren Patchflächen, die über  $C^1$ -stetigem Übergang am Rand stufenfrei miteinander verschmolzen werden können. Dabei geht die Splinefläche genau durch die vorgegebenen Stützwerte. Da diese Fläche im Vergleich zu einem polygonalen Oberflächenkörper (Mesh) eine analytisch Freiformfläche darstellt, verlaufen ihre Übergänge zwischen den Erhebungen homogener. Die Patchflächen untergliedern sich wiederum in mehrere Vierecksegmente, die analytisch zwischen den Patchecken interpoliert werden. So repräsentieren parametrisierte Patch-Objekte eine Oberfläche, die vor dem Renderprozess, wie bei den *CSG*-Objekten auch, in Polygonnetze umgewandelt werden müssen.

Eine Sonderform für die Oberflächenbeschreibung repräsentieren *Non-Uniform-Rational-B-Splines (NURBS)*. Die gekrümmten Objekte sind prozedurale oder parametrische Oberflächen und erlauben eine exakte mathematische Beschreibung und Repräsentation des Körpers. *NURBS*-Oberflächen werden somit analytisch über die außerhalb der Spline-Kurve liegenden Kontrollpunkte generiert und besitzen gegenüber dem *CSG* und dem *B-Rep* den Vorteil, dass zum einen die Modellierung komplizierter Kurven und Flächen einfacher und zum anderen die Annäherung der Polygone an den idealen Körper besser beschreibbar ist. So erscheint nach Bender die *NURBS*-Oberfläche fast als facettenfreies Oberflächenmodell (Bender und Brill 2006, S. 164). Weiterführende Literatur über die mathematische Beschreibung von *NURBS*-Kurven und -Flächen finden sich unter (Watt 2002; Bender und Brill 2006; Salomon 2006).

---

<sup>7</sup> Renderprozess bedeutet die Verarbeitung innerhalb der Graphikpipeline, mit dem Ergebnis eines Pixelbildes.

<sup>8</sup> vertex-edge-face-Graph



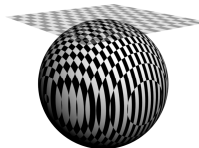
### 3.3 Mapping-Techniken

Das Mapping ist ein Verfahren, um auf einer unifarbene homogenen 3D-Oberfläche eine Textur zu hinterlegen. Die Oberfläche erhält darüber hinaus zusätzliche Information, vergleichbar mit der farblichen Ausgestaltung eines unifarbene Gipsabdruckes aus dem Bereich der klassischen Reliefdarstellung. Das Mapping-Verfahren „beklebt“ somit die Oberfläche entweder mit 2D-Bitmaptexturen (Rastergraphik) oder durch eigens entwickelte *Texturalgorithmen*. Dabei legen die beiden Texturarten die gleiche Eigenschaft wie ein Raster- oder ein Vektorbild zu Tage.

Bitmaptexturen sind als Rasterbilder zu verstehen und müssen in der passenden Auflösung für die Visualisierung vorliegen, ohne störende Artefakte sichtbar werden zu lassen. Wurde eine Rastergraphik auf eine Oberfläche gemappt, werden die projizierten Bildpunkte als *Texel* bezeichnet. Mathematisch beschriebene Texturen hingegen sind artefaktfrei, können aber nur einfachere Detailstrukturen durch ihre Algorithmen wiedergeben.

Für ihre Abbildung wird ein lokales, rechtsgerichtetes kartesisches Bildkoordinatensystem verwendet, das seine horizontale Achse  $u$  und seine vertikale Achse  $v$  auf der Oberfläche ausrichtet und seinen Ursprung in der linken unteren Ecke hat. Die Achse  $w$  ist das Kreuzprodukt aus den Achsen  $u$  und  $v$  und steht somit senkrecht auf dessen Ebene. Für die Repräsentation einer Bitmaptextur auf einer Fläche reicht die Festlegung der  $u/v$ -Koordinate aus, bei Einsatz mathematischer Texturen wird darüber hinaus die  $w$ -Koordinate benötigt.

Das Ziel der Texturierung zweidimensionaler Bitmaptexturen ist es, durch die Wahl eines geeigneten Mapping-Verfahrens die Texturverzerrungen auf einem räumlich gekrümmten Körper zu minimieren. Für geometrische Formprimitive, wie beispielsweise einer Fläche oder eines Zylinders, können Texturkoordinaten direkt zugewiesen werden oder durch Standard-Mapping-Körper nachträglich verzerrungsfrei texturiert werden (s. Abb. 17). Bei Objekten, die keiner Formprimitive entsprechen, lassen sich Mapping-Koordinaten nachträglich zuweisen, um eine Texturierung zu ermöglichen. Die Problematik liegt darin begründet, dass auf einem bestehenden unregelmäßigen Objekt nur Standard-Mapping-Körper zugewiesen werden können. Dies führt in den Bereichen der Divergenz zwischen Objekt und Mapping-Körper zu Verfälschungen bzw. Verzerrungen in der Texturdarstellung (s. Abb. 17). Eine Kompensation der Texturfehler kann zum einen darüber erreicht werden, dass die Formprimitive mit ihren Mapping-Koordinaten als Ausgangsform für die Objektmodellierung Verwendung findet oder eine nachträgliche manuelle Textureditierung für das fertige Objekt vorgenommen wird. Wird von einer Formprimitive für die Konstruktion ausgegangen, so folgen die Texturkoordinaten den eingebrachten Modifikationen.

<b><math>u/v</math>-Mapping Verfahren</b>	
<p><b>Planar</b></p> <p>Projiziert das Map von einer flachen Texturebene auf das Objekt, kommt es zu Verzerrungen in den Bereichen, wo die Tangente der Oberfläche sich der vertikalen Projektionsrichtung der Texturebene nähert.</p>	

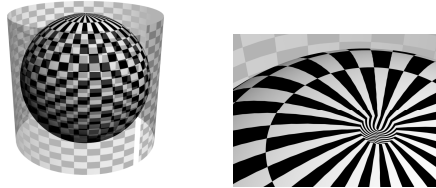
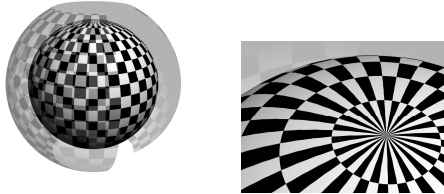
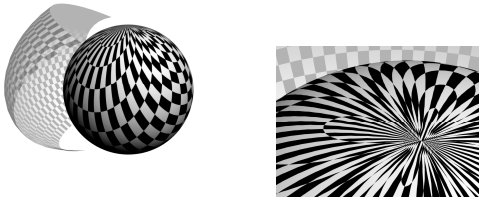
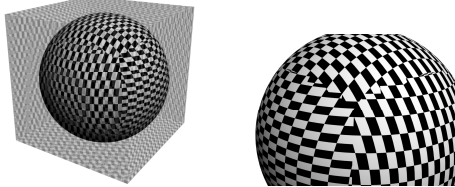
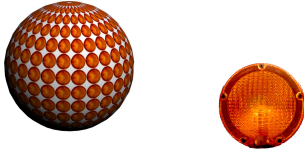

<p style="text-align: center;"><b>Zylindrisch</b></p> <p>Die Textur wird auf einem Zylinder um das Objekt geklebt und bildet eine Stoßnaht auf dem Objekt entlang der zusammenlaufenden Texturkanten aus.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Kugelförmig</b></p> <p>Vergleichbar mit der zylindrischen Projektion nur wird die Textur an den Objektpolen zusammengezogen.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Schrumpfwicklung</b></p> <p>Die Textur wird wie ein Tuch über das Objekt gespannt und seine Ecken laufen in einem gemeinsamen Punkt zusammen.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Quader</b></p> <p>Ein Map-Quader projiziert über seine sechs planare Texturflächen die Textur auf das Objekt. An den Quaderkanten, die gleichmäßig in den Objektmittelpunkt zusammenlaufen, bildet sich jeweils eine Stoßnaht auf dem Objekt aus.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Fläche</b></p> <p>Projiziert auf jede Objektfacette die Textur. Je feinmaschiger das Objekt, umso kleiner fällt die Textur aus.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>XYZ in UVW</b></p> <p>Verknüpft die Geometriedaten des Objektes mit den Texturkoordinaten, dadurch geht die Textur eine feste Verbindung mit der Geometrie ein und folgt allen geometrischen Objektveränderungen.</p>	

Abb. 17: Sieben Variationen der Standard u/v-Mapping-Verfahren

Es existieren zu dem Standard Mapping-Verfahren noch zwei weitere eigenständige Mapping-Verfahren die jeweils eine Sonderstellung einnehmen, nämlich das so genannte Bump- und das Displacement-Mapping-Verfahren. Sie texturieren nicht nur die Objektoberfläche, sondern beeinflussen durch ihre Technik auch den räumlichen Eindruck auf unterschiedliche Art und Weise.

Das Bump-Mapping (Blinn 1978) ist eine erweiterte *Phong-Shading*-Technik, die es ermöglicht, durch Veränderung der Facettennormale die Beleuchtungsberechnung für ein Objekt plastischer erscheinen zu lassen. Dabei bleibt die Geometrie vollständig unberührt. Die

scheinbaren Schattierungen durch die Erhebungen existieren nur in der Textur und werfen daher keinen Schatten auf ihre benachbarten Formen (Bender und Brill 2006, S. 206). Ihre Täuschung fällt erst bei einem flachen Betrachtungswinkel entlang der erhaltenden Fläche auf.

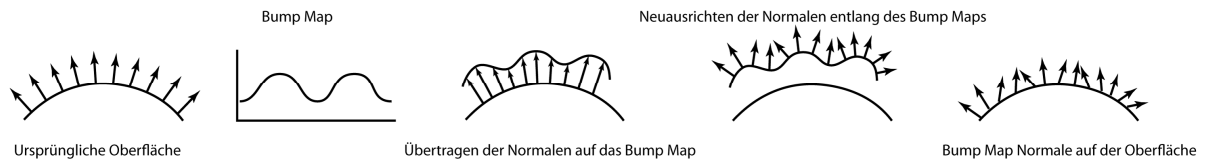


Abb. 18: Vorgehensweise Bump-Mapping

Weiterführende Literatur über unterschiedliche Bump-Mapping-Verfahren, wie *Emboss* Bump-Mapping (*Perturbed Blend* Bump-Mapping), *Environment Mapped* Bump-Mapping (EMBM), *Dot3* Bump-Mapping (*Perturbed Normal* Bump Mapping) finden sich unter Akenine-Möller et al. und Sánchez-Crespo Dalmau wieder (Akenine-Möller et al. 2008; Sánchez-Crespo Dalmau 2004).

Beim Displacement-Mapping-Verfahren hingegen wird die Objektgeometrie durch die Textur beeinflusst. Die geometrische Genauigkeit der Wiedergabe auf diesem hängt hierbei von der Fassettengröße des Oberflächenmodells ab. Die erzeugte Erhebung und sein Anstieg können wiederum nur über den Grautonverlauf der Textur erfolgen. Der Vorteil gegenüber dem Bump-Mapping-Verfahren sind echt geformte Erhebungen und ein sich daraus ergebender Schattenwurf. Für einen plastischen Eindruck aus allen Betrachtungsrichtungen ist das Displacement-Verfahren dem Bump-Mapping-Verfahren vorzuziehen.

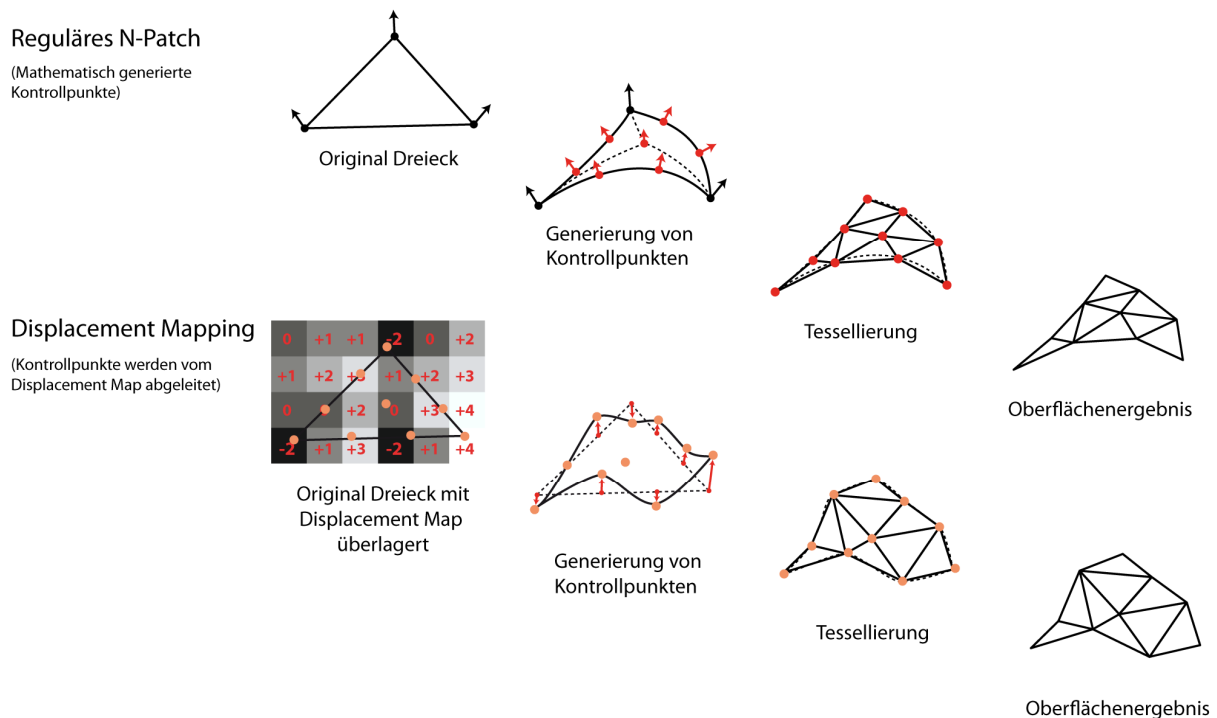


Abb. 19: Vorgehensweise Displacement-Mapping

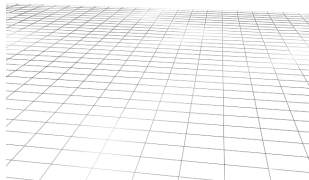
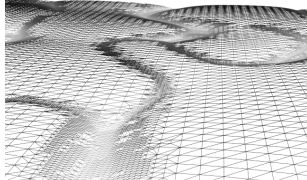
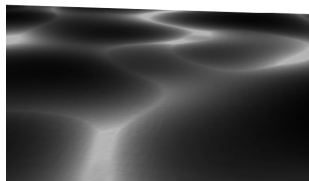
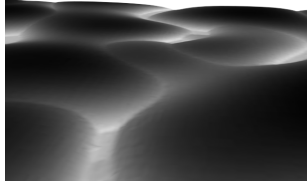
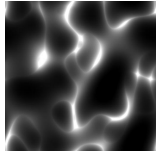
Bump-Mapping	Displacement-Mapping
	
	
<p>Zugrunde liegende Textur</p>	

Abb. 20: Bump- und Displacement-Mapping

Texturen haben folglich nicht nur die Möglichkeit, Objekte mit Informationen über Materialeigenschaften zu versehen, sondern auch einen höheren Detailreichtum in der Geometrie vorzutäuschen bzw. tatsächlich erzeugen zu lassen. Anwendung findet dies überall dort, wo durch die Größe einer Szene die Rechenleistung des Computers an seine Grenzen stößt bzw. der Modellierungsaufwand optimiert werden muss. Diese Verfahren machte sich frühzeitig die Computerspiele-Industrie zunutze, um für echtzeitfähige räumlich-virtuelle Umgebungen den Detailreichtum zu erhöhen bei gleichzeitig reduzierter Polygonanzahl der Objekte.

Den gleichen Herausforderungen müssen sich auch die Anbieter von virtuellen Stadtmodellen stellen. Durch aufwändig erstellte photorealistische Gebäudetexturen (Zanini 1998) oder durch stilisierte Texturen abstrahierter Gebäude (Döllner et al. 2006) wird ein nichtvorhandener naturalistischer Detailreichtum bzw. ein idealisiertes abstraktes virtuelles Stadtmodell für die interaktive Exploration simuliert.

Parallele Entwicklungen verfolgen hingegen genau den gegenteiligen Ansatz. Indem reale Umweltstrukturen in ihrem geometrischen Detailreichtum möglichst exakt wiedergegeben werden, ohne dies durch eine entsprechende Textur zu erreichen (Honsel 2010). Honsel argumentiert damit, dass die Prozessierung der nötigen Transformationen für die große Anzahl der räumlichen Knoten und somit der ruckfreien Bewegung in einer virtuellen Umgebung mit moderner Computertechnologie effizienter möglich ist, als eine vergleichbare Repräsentation durch speicherintensive und korrekturbedürftige Texturen. Grundsätzlich haben beide Lösungen den gleichen Anspruch, nämlich eine 3D-Szene möglichst echtzeitfähig und oftmals auch realitätsnah mit einer 1:1-Relation zwischen dem Datenmodell und der Umwelt wiederzugeben.

### 3.4 Kamera

Durch den 3D-Raum bedingt, ist der Standort des Betrachters innerhalb einer Szene vorerst unbestimmt. Erst das Platzieren einer virtuellen Kamera ermöglicht dem Betrachter die konstruierte Szene als gerendertes Pixelbild am Monitor zu sehen. Dabei legen die inneren wie auch äußeren Kameraparameter das Sichtfeld einer zentral oder orthogonal gewählten Projektion fest. Durch diese Begebenheit ist es möglich, den Standort in der Szene frei zu wählen bzw. zu verändern, oder aber auch den Ansichtswechsel zwischen mehreren eingerichteten Kameras durchzuführen.

Die inneren wie auch äußeren Kameraparameter, wurden für die Gestaltung von topographischen 3D-Karten von Häberling als *globale Gestaltungsaspekte* aufgenommen. Für detaillierte Informationen sei hierbei auf Häberling verwiesen (Häberling 2004, S. 84).

### 3.5 Lichtquellen

Da computergenerierte Lichtquellen nur einen virtuellen Charakter besitzen, versucht man diese wahrnehmungsorientiert und vereinfacht zu beschreiben. Bevor eine Berechnung der Farbe für jedes Oberflächenpixel durch das vorab beschriebene Beleuchtungs- und Schattierungsmodell möglich ist, werden Lichtquellen benötigt, die durch ihren Lichttyp und ihre festgelegten Parameter dem Beleuchtungsmodell die notwendigen Eckdaten übermitteln. So existieren in der 3D-Computergraphik mehrere unterschiedliche Lichtquellen (Lichtkörper). Sie weisen ein individuelles Abstrahlverhalten auf und können in direkte und indirekte Lichtquellen unterschieden werden. Diejenigen, die zu den direkten Lichtquellen zählen, erlauben in Abhängigkeit des gewählten Beleuchtungsszenarios eine individuelle Anpassung ihrer Lichtparameter für die Einstellung. So bieten Tageslichtsysteme eine Kombination aus Richtungslicht (Sonne) und Umgebungslicht (Himmelslicht) an. Durch anpassbare Parameter wie geographische Breite und Zeitangaben sind sie in der Lage, die Ausrichtung der Lichtquelle zu optimieren. Auch lichtenergetische Aspekte im Innenraumbereich sind durch die Standardlichtkörper mit erweiterten photometrischen Parametern realisierbar.

Standardlichtquellen sind das Umgebungslicht (*Ambient Light*) als indirekte Lichtquelle, das Punktlicht, Spotlight und Richtungslicht als direkte Lichtquellen. Dabei erlauben alle eine Änderung ihrer Lichtintensität und Lichtfarbe. Aber nur direkte Lichtquellen ermöglichen weitere Änderungen in der Leuchtdichteabnahme, dem Lichtabfall (*Falloff*) im Randbereich des Lichtvolumens, einer Ausnahme von angeleuchteten Objekten oder einem Schattenwurf der 1. Ordnung. Auf die Besonderheiten jeder dieser Lichtquellen wird im Folgenden kurz eingegangen, um zu verdeutlichen, dass der Lichtquellentyp einen deutlichen Einfluss auf die Gestaltung der Szene einnimmt.

Das Umgebungslicht (*Ambient Light*) als indirekte Lichtquelle strahlt in alle Richtungen mit gleicher Intensität und gewährleistet eine allgemeine Grundhelligkeit. Da sie keinen Lichtabfall berücksichtigt und auch keine Glanzlichter unterstützt, ist ihre Positionierung in der Szene irrelevant. Dabei erzeugt sie flächendeckend ideal diffuse Reflexionen und taucht die Szene in eine flache eintönige Farbschattierung. Für lokale Beleuchtungsmodelle dient das Umgebungslicht als Ersatz für eine globale Beleuchtungsberechnung. Ihre alleinige Verwendung kommt durch ihre Eigenschaft nicht zum Einsatz. Erst durch die Kombination mit weiteren direkten Lichtquellen sorgt das ambiente Licht für die nötige Grundhelligkeit.

Das Punktlicht gehört zu der Gruppe der direkten Lichtquellen und strahlt von einem definierten Punkt in alle Richtungen gleich stark ab. Es bildet sich eine Lichtkugel, deren Lichtabnahme und Schattenparameter gesetzt werden können, und erlaubt dadurch eine natürliche Lichtquelle zu simulieren (s. Abb. 23).

Das Spotlicht entspricht einem Scheinwerfer, der nur in einem gerichteten Lichtkegel ausstrahlt. Die Lichtintensität kann optional von seiner zentralen Lichtachse zu seinen Kegelrändern hin abfallen (*Falloff*) (s. Abb. 23).

Das Richtungslicht entspricht einem parallelen Licht, dessen Lichtquelle im Unendlichen liegt. Es muss, genauso wie das Spotlicht, auf das zu beleuchtende Objekt ausgerichtet werden. Abb. 21 zeigt neben dem Umgebungslicht auch die drei direkten Standardlichtquellen, die mit ihren unterschiedlichen Abstrahleigenschaften eine Lichtkugel (Punktlicht), einen Lichtkegel (Spotlicht) und eine Lichtsäule (Richtungslicht) produzieren.

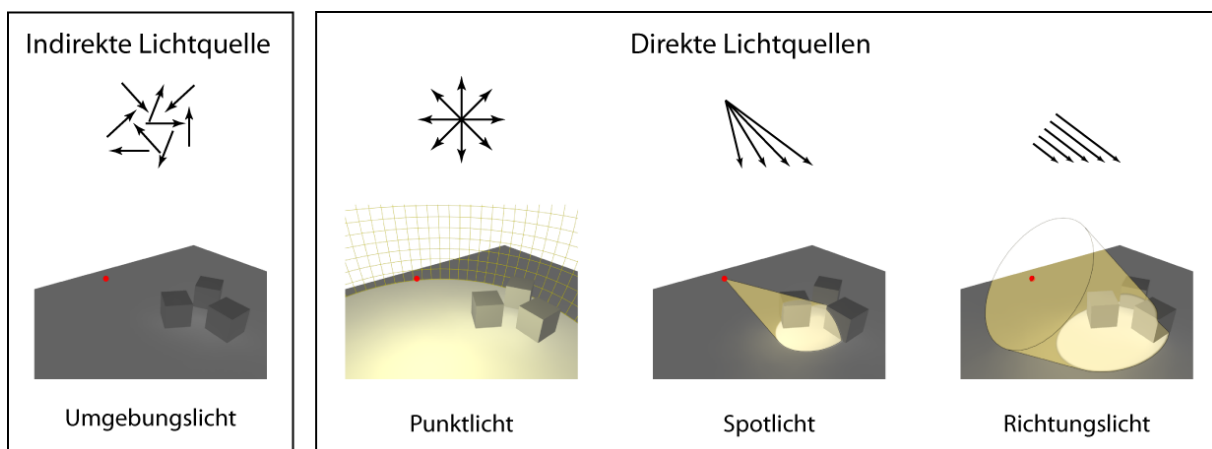


Abb. 21: Indirekte und direkte Lichtquellen

### 3.6 Beleuchtungsmodelle

Die 3D-Computergraphik verfolgt seit jeher das Ziel die unterschiedlichsten physikalischen Begebenheiten aus der realen Welt authentisch für eine virtuelle Szene wiederzugeben. Dabei ist einerseits zum einen die photorealistische Wiedergabe der Wechselwirkung zwischen Licht und Objekt (Watt 2002, S. 10) und andererseits zum anderen die Kombination aus Licht und Schatten in der Szene, die einen starken räumlichen Wahrnehmungsreiz auslösen, entscheidend. Foley schreibt hierzu „Illumination is [...] a powerful cue to the 3D structure of an object“ (Foley et al. 1997, S. 613).

Für die nötige mathematische Beschreibung der Licht/Objekt-Interaktion wird in der Computergraphik zwischen einem lokalen und globalen Beleuchtungsmodell<sup>9</sup> unterschieden.

<sup>9</sup> Beleuchtungsmodelle werden auch als Reflexionsmodelle bezeichnet und dürfen nicht mit Schattierungsmodellen (engl.: shading model) verwechselt werden. Diese werten an ausgewählten Objektpositionen das Beleuchtungsmodell aus und berechnen für die restlichen Objektpunkte des polygonalen Netzes die Farb- und Intensitätswerte.

### 3.6.1 Lokale Beleuchtungsmodelle

Das lokale Beleuchtungsmodell beschreibt lediglich, innerhalb einer neutralen vom Beleuchtungsmodell nicht beeinflussbaren schwarzen Umgebung, die Wechselwirkung zwischen Lichtquellen und einer Objektoberfläche. Die mathematischen Algorithmen berechnen Farbe, Lichtverteilung und Intensität für die Oberfläche für den Zeitpunkt, wo das Licht das Objekt verlässt. So werden die zu bestimmenden Farbpixelwerte für das Objekt nach Blickrichtung, dem Lichteinfallswinkel, der Ausrichtung der einzelnen Facetten im Objekt und durch die Wahl des lokalen Beleuchtungsmodells berechnet. Dabei beschreibt die *bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF<sup>9</sup>)* den Term für das einfallende und reflektierende Licht in den häufigsten lokalen Beleuchtungsmodellen. Die Funktion liefert für jeden austretenden Lichtstrahl bei gegebenem Eintrittswinkel des auftreffenden Lichtstrahls den Quotienten aus Strahlungsdichte und Bestrahlungsstärke, die am Objektmaterial reflektiert werden.

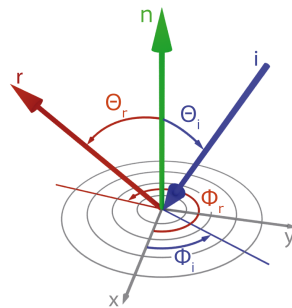


Abb. 22: Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF)

Bei der Verwendung des lokalen Beleuchtungsmodells wird immer nur die erste Reflexion, ob diffus oder gerichtet durch einen direkten Lichteinfall, berücksichtigt (Watt 2002, S. 10; Bender und Brill 2006, S. 278). Das heißt: Eine Berechnung indirekter Beleuchtungsanteile<sup>10</sup> auf abgewandten Objektteilen bleibt hierbei unbeachtet und führt in den betroffenen Bereichen zu nicht ausgeleuchteten schwarzen Flächen (Watt 2002, S. 200). Um die Plastizität durch einen simulierten Körperschatten am Objekt in der Szene zu verbessern, wird ein rein imaginäres Umgebungslicht als Ersatz für eine globale Ausleuchtung mit ihrer indirekten Beleuchtung definiert. Dabei erzeugt man eine allgemeine und konstante Hintergrundhelligkeit (*Ambiente Light*) für die Szene, die dabei keinen Zusammenhang zu den physikalischen Eigenschaften einer indirekten Beleuchtung aufweisen sollte. Damit wird deutlich, eine Abschattung oder Aufhellung durch ein benachbartes Objekt ist im lokalen Beleuchtungsmodell nicht möglich. Der Term für die ambiente Beleuchtung lautet wie folgt:

$$I_a = I_A \cdot r_a$$

$I_a$  = ambiente Beleuchtung  
 $I_A$  = Intensität im Oberflächenpunkt  
 $r_a$  = ambients Reflexionskoeffizient  
 (Stärke der ambienten Hintergrundbeleuchtung)

<sup>10</sup> Indirekte Lichtanteile entstehen durch abgelenkte und reflektierte Lichtpartikel.

Für die Annäherung an eine reale Beleuchtung gibt es unterschiedliche empirische Modelle, die durch ihre fehlende physikalische Grundlage nicht vollständig erklärt werden können (Bender und Brill 2006, S. 285). Die bekanntesten lokalen Beleuchtungsmodelle sind:

- Lambert (Ideal-diffuse Reflexion) (Bender und Brill 2006, S. 280)
- Phong (Erweiterung des Lambert-Modells)
- Blinn (Reduziertes Phong-Modell zur Effizienzsteigerung der Berechnung)
- Fresnel (Betonung und Hervorhebung der durch tangierender Lichtstrahlen betroffener Flächen)

### 3.6.2 Globale Beleuchtungsmodelle

Globale Beleuchtungsmodelle beschreiben hingegen nicht nur die Wechselwirkung zwischen Lichtquelle und Objekt, sondern auch die Wechselwirkung der Objekte untereinander (Bender und Brill 2006, S. 278). Das bedeutet, dass ein beleuchtetes Objekt ebenfalls durch die indirekte Reflexion des Nachbarobjektes in seiner Farbe und Intensität beeinflusst wird. Globale Beleuchtungsmodelle versuchen die Komplexität realer Lichtreflexionen mit den Gesetzen der geometrischen Optik sowie der Energieerhaltung zwischen den Objekten bestmöglich wiederzugeben. Dazu werden oft lokale Beleuchtungsmodelle herangezogen und mit dem Verfahren der Strahlungsverfolgung (Raytracing) oder dem Strahlungsaustausch (Radiosity) erweitert (Bender und Brill 2006, S. 279).

Das Raytracing-Verfahren war das erste globale Beleuchtungsmodell und repräsentiert den Ansatz, den Lichtstrahl nicht von seiner ausgehenden Lichtquelle, sondern von seinem letztendlichen Zielpunkt, dem Bildschirmpixel, zu verfolgen. Dadurch wird der Strahl vom Pixel bis zur Modelloberfläche und anschließend zur Lichtquelle zurückverfolgt. Das hat den Vorteil, dass nur jene Strahlen in der Szene berechnet werden müssen, die tatsächlich im Kameraausschnitt und somit im Pixelbild zu sehen sind. Einen gleichen Ansatz mit umgekehrter Verfahrensweise bilden zwei weitere Modelle, nämlich das so genannten *Light-Tracing*- und das *Eye-Tracing*-Verfahren. Das erste verfolgt den Lichtstrahl von der Lichtquelle aus bis sie ins Leere, das zweite auf das Sichtfeld der virtuellen Kamera treffen.

Das Radiosity-Verfahren verfolgt hingegen ein ganz anderes Ziel. Anstatt der Rückverfolgung des Lichtstrahls werden die Intensitätswerte auf allen Oberflächen der Szene berechnet. Hierzu wird das Oberflächennetz in kleinere Strukturen, so genannte Elemente, unterteilt. Sie dienen hierbei als diffuse Strahler und Reflektoren. Der Algorithmus berechnet auf der Grundlage des Energieerhaltungssatzes<sup>11</sup> dann die reflektierte Lichtmenge, die an jedem einzelnen Netzelement entsteht und an andere Netzelemente weitergereicht wird. Daraus ergibt sich unabhängig von der gewählten Blickrichtung (Betrachtungsposition) für jedes Netzelement ein endgültiger Radiositywert. Dabei hängt die Genauigkeit der Ergebnisse besonders von der Größe des Netzelementes und der Korrektheit vom rein diffusen Reflektorelement ab (Goral et al. 1984).

---

<sup>11</sup> Die Summe aller absorbierten und emittierten Strahlen ergibt gleich Null.



Die Vorteile des einen Verfahrens sind nahezu die Nachteile des anderen. Das heißt: Weder das Radiosity- noch das Raytracing-Verfahren bieten eine umfassende Lösung zur Simulation aller globalen Illuminationseffekte an. Erst durch die Kombination beider Verfahren (*Two-Pass-Verfahren*) lassen sich photorealistische Ergebnisse erzielen.

	Schatten	Spiegelung zwischen Objekten	Transparenzeffekte	Glanzfarbenreflexion (Spekulare Reflexion)	Diffuse Mehrfach- reflexionen
<b>Raytracing</b>	+	+	+	+	-
<b>Radiosity</b>	+	+	-	o <sup>1</sup>	+

<sup>1</sup> nur mit der Kombination mit Raytracing und sehr kleiner Netzelemente umsetzbar

Tab. 2: Vor- und Nachteile zwischen *Raytracing* und *Radiosity*

Eine Sonderform des globalen Beleuchtungsmodells ist das künstlich globale Beleuchtungsmodell (*faked global illumination*). Hierzu wird das lokale Beleuchtungsmodell genutzt, indem geschickt zu einer primären Lichtquelle weitere Lichter in der Szene verteilt oder systematisch auf eine Formprimitive (z.B. Hemisphäre, Ebene) platziert werden. Durch diese Anordnung leuchtet man dunkle Bereiche aktiv aus und simuliert damit eine indirekte Beleuchtung.

### 3.7 Schattierungsmodelle

Die so genannten Schattierungsmodelle (*Shader*) berechnen nur auf ausgewählten Punkten die Beleuchtungsfunktion und ergänzen, je nach Schattierungsmodell, durch Interpolation die restlichen Objektflächenfarben. Bei einer vorausgesetzten nichtfarbigen Lichtquelle kombiniert die Schattierungssimulation somit die passenden Grauwerte (Intensitätswerte) für die Glanzfarbe (s. Abb. 25). Bekannteste Schattierungsverfahren sind Flat-, Gouraud-, Phong- und Blinn-Modelle, die unterschiedliche Glättungsmechanismen zwischen den Grauwerten berechnen (Bender und Brill 2006, S. 279; Häberling 2004, S. 89). Dabei berechnen sie den Farbwert des einfallenden Lichts für jede Facette (Flat), jeden Facettenknoten (Gouraud) oder jedes Pixel auf der Facettenfläche (Phong) (s. Abb. 23) (Möller und Haines 1999, S. 68).

Das Flat-Shading oder die konstante Schattierung färbt unter der Annahme parallel einfallenden farblosen Lichts alle sichtbaren Polygone (Facetten) in Abhängigkeit von ihrem Betrachtungs- und Lichteinfallwinkels unterschiedlich ein. Dabei wird in jedem Rasterpunkt innerhalb einer Facette der gleiche Intensitätswert zugewiesen, ohne benachbarte Facetten dabei zu beeinflussen, was zu einer Verstärkung des Helligkeitsunterschieds in der Wahrnehmung führt (*Mach-Band-Effekt*) und eine klare Facettenstruktur bei der Verfahrensart erkennen lässt (s. Abb. 24 a).

Beim Gouraud-Shading (Gouraud 1971) hingegen erscheint die Oberfläche durch kontinuierliche Farbintensitätswerte runder, da eine lineare Interpolation innerhalb jeder Facette durch die vom Beleuchtungsmodell vorab berechneten Intensitätswerte an den Knotenpunkten stattfindet. Dabei entsteht durch den un stetigen Intensitätsverlauf der Schattierung über mehrere Facetten durch das physiologische Phänomen des *Mach-Band-*

Effektes sichtbare Kanten. Auch im Bereich der Glanzlichter<sup>12</sup> kommt es durch die lineare Interpolation zu Darstellungsungenauigkeiten, weil diese nur auf Polygonknoten erzeugt werden können (s. Abb. 23) (Watt 2002, S. 211). Abhilfe verschafft hierbei ausschließlich eine Netzverdichtung, um die Ungenauigkeit zu minimieren.

Das Phong-Shading (Phong 1975) interpoliert nicht die Intensitätswerte, sondern die Normalenvektoren zwischen den Polygonecken der Facette. Dadurch erfolgt eine stetige Neuausrichtung der Normalen über die interpolierte Strecke, was eine exakten Berechnung der Intensität für jedes Oberflächenpixel durch die Schattierungsfunktion ( $\cos^n$ -Funktion) ermöglicht (s. Abb. 23b und Abb. 24c) (Watt 2002, S. 208; Bender und Brill 2006, S. 291). Mit dem Resultat, dass zum einen der *Mach-Band*-Effekt vermieden (Ware 2004, S. 76) und zum anderen die Glanzlichter lagerichtig innerhalb der Facettenfläche wiedergegeben werden können. Dieses Schattierungsmodell gehört zu den rechenintensiveren Verfahren und wurde ausnahmslos in den globalen Beleuchtungsmodellen angewendet. Durch kontinuierliche Verbesserung der Graphikhardware kommt deren Einsatz zuweilen immer öfters in echtzeitfähigen und interaktiven Anwendungen zu tragen (Bender und Brill 2006, S. 291) und zählt heute zu einen der Standardverfahren.

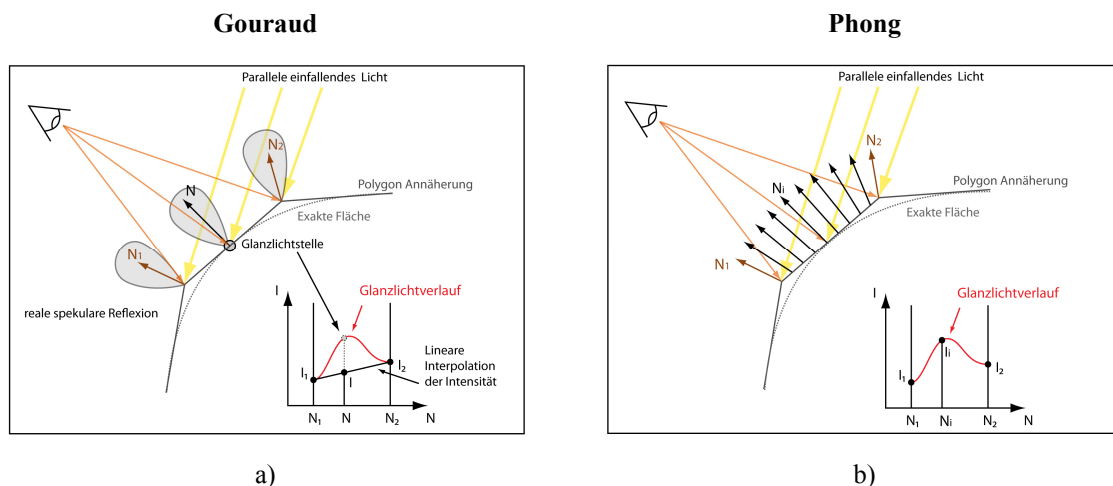


Abb. 23: Vergleich zwischen dem Gouraud- und Phong-Schattierungsmodell

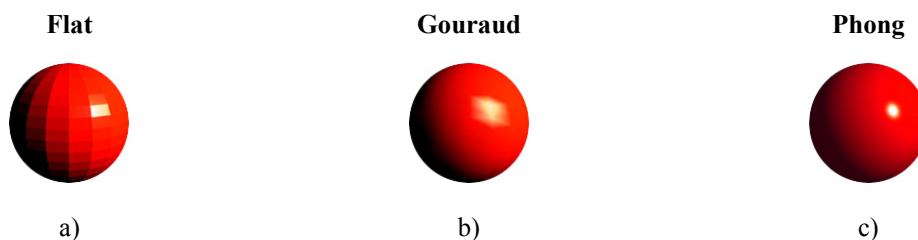


Abb. 24: Tesselierte Kugel mit Flat, Gouraud und Phong Schattierungsmodell

<sup>12</sup> Das Glanzlicht ist eine reale spekulare Reflexion, die durch eine auf ein Objekt ausgerichtete Lichtquelle entsteht und vom Betrachtungswinkel abhängig ist.

Rase hingegen spricht sich gegen die Verwendung der Schattierungsmodelle Gouraud und Phong zur Interpolation der Farbkomponenten und Helligkeitswerte in triangulierten Oberflächen aus, und empfiehlt „ein Höhenmodell mit kleinerer Maschenweite zu interpolieren“, um störende visuelle Effekte zu beseitigen (Rase 1998, S. 122).

Das Blinn-Schattierungsverfahren oder auch Blinn-Phong-Schattierungsverfahren von Jim Blinn bedient sich eines modifizierten Phong Schattierungsmodells. In diesem Verfahren werden die Pixelwerte zwischen den Ecken der Facette mittels des Gouraud- Shaders, anstatt dem rechenintensiveren Phong-Shaders, interpoliert (Blinn 1977). Für weitere technische und mathematische Details der Schattierungsberechnung sei auf folgende Literatur verwiesen (Watt 2002; Xiang und Plastock 2003; Bender und Brill 2006).

### 3.7.1 Farbkomponenten

Die Farbe eines Objektes stellt sich aus einem oder mehreren Farblichtanteilen zusammen und ist vom gewählten Shading-Verfahren abhängig. So handelt es sich beim Flat-Schattierungsverfahren um einen Lambertschen Strahler mit ideal diffuser<sup>13</sup> Reflexion, deren Streulichtfarbe nur durch den Beleuchtungswinkel zwischen Lichtquelle und Flächennormale in seiner *Farbhelligkeit* beeinflusst wird (Bender und Brill 2006, S. 279) und dementsprechend keine Umgebungs- und Glanzfarbanteile besitzt.

Für die Schattierungsverfahren Gouraud, Phong und Blinn besteht die Farbe eines Oberflächenpunktes aus drei Farblichtanteilen: der Umgebungsfarbe (*ambient shading*), der Streufarbe (*diffuse* oder *Lambertian shading*) und der Glanzfarbe (*specular shading*) (s. Abb. 25) (Ware 2004, S. 36).

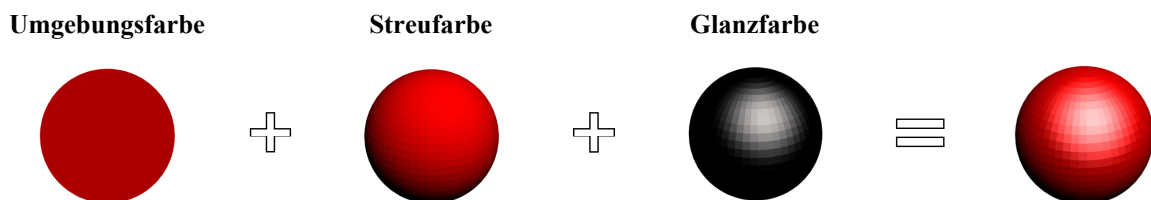


Abb. 25: Farbkomponenten: Umgebungsfarbe, Streufarbe und Glanzfarbe

### 3.8 Ebene geometrische Projektionen

Um den 3D-Raum für die Ausgabe auf einem 2D-Ausgabemedium vorzubereiten bedarf es der Projektion. Dies erfolgt, wie aus Abb. 26 ersichtlich, über die grundlegenden planaren Zentral- und Parallelprojektionen. Sphärische Projektionen werden der Computergraphik nur selten eingesetzt und werden hier nicht näher diskutiert. Beispiel für sphärische Projektionen sind Zylinderprojektionen für Panoramaabbildungen oder Darstellungen gnomonischer<sup>14</sup>

<sup>13</sup> Ideal Diffus bedeutet, dass sich der reflektierende Lichtanteil in einem Oberflächenpunkt in alle Richtungen gleich ausbreitet.

<sup>14</sup> Gerade Linien, die nicht durch die Bildmitte laufen, werden gekrümmt abgebildet (*Fish-Eye-Projektion*).

Zentralprojektionen und finden sich in der einschlägigen Literatur wieder (Imhof 1963; Terribilini 2001; Hake et al. 2002; Xiong und Turkowski 1997).

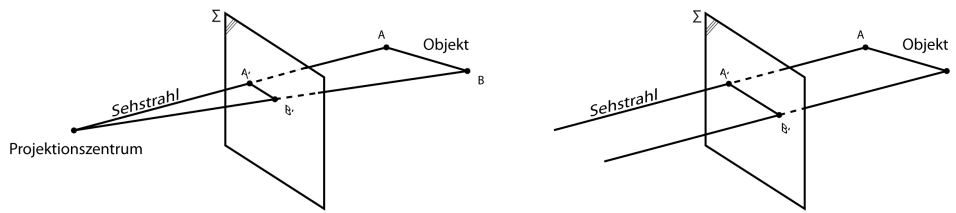


Abb. 26: Zentralprojektion [links] und Parallelprojektion [rechts]

Bei der Zentralprojektion oder perspektivischen Projektion gehen die Sehstrahlen von den Objektpunkten  $A$  und  $B$  aus und bündeln sich in einem gemeinsamen Projektionszentrum. Dieses kann analog für das menschliche Auge stehen und kommt deswegen dem monokularen Sehen sehr nahe. Zwischen Projektionszentrum und dem Betrachtungsobjekt (*Sujet*) befindet sich die Projektionsebene ( $\Sigma$ ), die abhängig von ihrer Orientierung zum Objekt in rechtwinkliger (orthogonaler) oder schiefwinkliger Lage definiert wird. Dadurch bestimmt man die spätere Projektionsart. Die Schnittpunkte  $A'$  und  $B'$  auf der Bildebene sind die projizierten Ergebnisse der Sehstrahlen von den ausgehenden Punkten  $A$  und  $B$  (s. Abb. 26). Eine perspektivische Projektion ist somit gegeben, wenn der Abstand des Projektionszentrums einen endlichen Abstand zur Bildebene aufweist. Dabei wirkt der subjektive Eindruck des *Sujets* näher und greifbarer als bei Parallelprojektionen. Ruht das Projektionszentrum hingegen im Unendlichen, liegt eine Parallelprojektion vor und das *Sujet* wirkt objektiver und distanzierter. Abb. 27 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen ebenen geometrischen Projektionen, die den namensgleichen Perspektiven entsprechen, wieder.

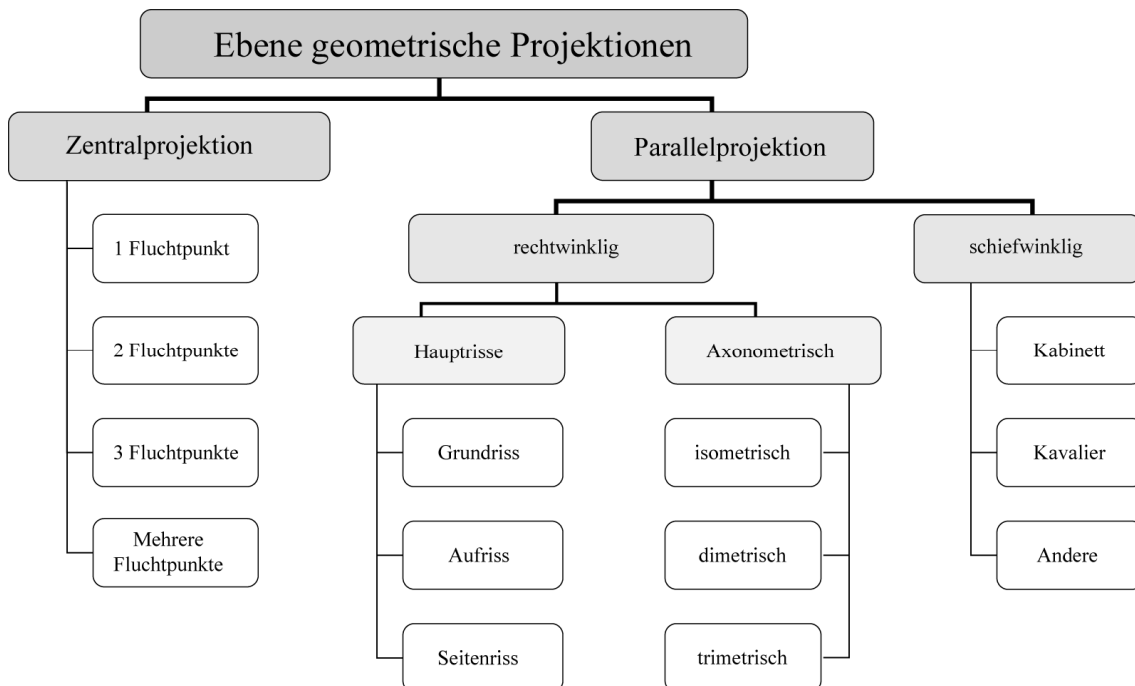


Abb. 27: Zentral- und Parallelprojektionen

Bei der Zentralprojektion (Punktperspektive) konvergieren raumparallele Strecken in einem gemeinsamen Fluchtpunkt und erzeugen durch die schwindenden Verkürzungen eine stärkere Tiefenwirkung als vergleichbare Parallelprojektionen. So unterliegt das gesamte Abbild,

durch die perspektivische Linearität, einer hohen Maßstabsvarianz, die das *Sujet* in ihrer Erscheinung geometrisch verzerrt (s. Abb. 28). Für die Darstellung einer virtuellen Szene wird meist auf die Zentralprojektion zurückgegriffen. Diese ist durch ihre Darstellungsverzerrungen dem Menschen am vertrautesten und entspricht einer monokularen Ansicht mit eindeutig definiertem Standpunkt. Sie wird für die bildschirmbasierte Darstellung virtueller Szenen meist herangezogen. Dabei variiert, abhängig von der Betrachtungshöhe, die Horizontlage und damit der räumliche Eindruck (*Frosch-*, *Normal-* oder *Vogelperspektive*). Bei Rotation der Projektionsebene ( $\Sigma$ ) verändert sich die Fluchtpunktzahl eines Objekts zwischen einer *Einpunkt-* (Projektionsebene steht parallel zur einer Objektebene), einer *Zweipunkt-* (Projektionsebene steht parallel zur einer Objektachse) oder einer *Dreipunkt-Perspektive* (Projektionsebene steht zu keiner Objektachse parallel). Daraus ergeben sich bei der Existenz mehrerer unterschiedlich zur Projektionsebene ausgerichteten Objekte multiple 1-, 2- und 3-Fluchtpunktverhältnisse (s. Abb. 28).

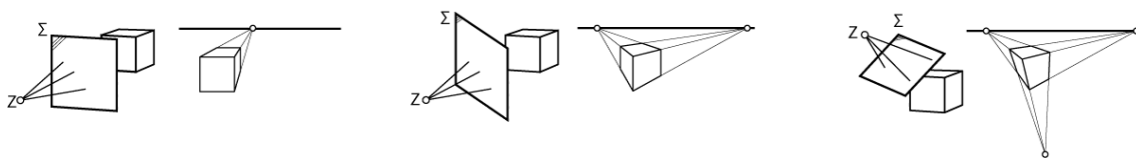


Abb. 28: 1-/ 2-/ 3-Fluchtpunktprojektionen [von links nach rechts]

Parallelprojektionen sind hingegen längentreu und geben in einem festen Verhältnis das *Sujet* auf der Projektionsebene wieder. Ihre Anwendung findet sich vorwiegend im Planungswesen der Architektur und Konstruktion (Dodge et al. 2008, S. 207). Shepard deutet darauf hin, dass sich durch die Verwendung einer rechtwinkligen Parallelprojektion der Größenvergleich von Symbolen einfacher gestalten ließe (Shepherd 2008, S. 207).

Der Einsatz perspektivischer und paralleler Projektionen offenbart sich auch in der Computerspiele-Industrie. Eine Sonderform zeigte sich Anfang der 90er-Jahre in einer abgewandelten Form der Parallelprojektion, nämlich in der verwendeten Xonometrische Darstellung<sup>15</sup>. Sie schaffte durch ihre *Vogelperspektive* die Grundlage für Strategie- und Simulationsspiele auch *God-Games* (Poole 2000, S. 48–49) genannt (Prosch 2005). Ihre Darstellung der Größenverhältnisse war aber nicht vollkommen frei von Verzerrungen. Perspektivische Darstellungen wurden erst später für eine neue Spielgeneration herangezogen, die sich in der *Ego-Perspektive* (*first-person-perspective*) zeigte und ihren Einsatz in der 3D-Spiele- und Datenvisualisierung fand (Watt 2002, S. 186; Dodge et al. 2008, S. 207). Umfangreiche Untersuchungen, um die gute Erfassbarkeit perspektivischer Darstellungen zu beurteilen, stammen aus der Arbeit von Kraak (Kraak 1988). Dabei wurden bekannte dreidimensionale kartographische Inhalte auf ihre Fähigkeit zur Informationsübermittlung analysiert. Kraak stellte für bestimmte Anwendungen eine bessere Erfassbarkeit in perspektivischen Darstellungen gegenüber bekannten Haupttrissen fest. Rase vermutet, dass die Resultate von Kraak durch eine höhere graphische Qualität noch besser ausgefallen wären (Rase 1998, S. 141).

<sup>15</sup> In der Literatur wird diese Spielperspektive häufig irrtümlicherweise als isometrische Darstellung bezeichnet.

### 3.9 Bildsynthese

Die Bildsynthese ist der abschließende Prozess der 3D-Graphikpipeline. Unter der Bildsynthese versteht man das Errechnen der virtuell konstruierten Szene mit all ihren geometrischen Oberflächenmodellen, ihren dazugehörigen Materialien, deren Lichtverhältnissen und der Analyse der gegenseitigen Verdeckung entlang der Sichtachse der virtuellen Kamera. Dabei wird jedes einzelne Farbpixel im Kamerasichtfeld berechnet und das vollständig prozessierte Abbild der Szene als 2D-Bitmap gespeichert. Für die Bildsynthese existieren unterschiedliche Verfahren der Prozessierung, die geläufigsten Renderer sind der Scan-Line-, der Mental-Ray- und der Pov-Ray-Renderer.

Der Scan-Line-Renderer verarbeitet zeilenweise das gesamte Kamerasichtfeld von oben nach unten und unterstützt zusätzlich das Light-Tracing- und das Radiosity-Verfahren.

Der Mental-Ray-Renderer hingegen rendert in so genannten *Buckets*. Dies sind quadratische Zellen, in denen der Renderprozess iterativ durchlaufen wird. Ihre Prozessierungsreihenfolge hängt vom gewählten Verfahren ab und kann wie im Hilbert-Verfahren von der Höhe des Rechenaufwandes für den Bucketwechsel beeinflusst werden. Der Mental-Ray-Renderer generiert im Gegensatz zum Scan-Line-Renderer die Lichtsituationen physikalisch exakte, was das Korrekte Einrichten und Simulieren aufwändiger Beleuchtungseffekte, wie beispielsweise Raytrace-Reflexionen, Raytrace-Refraktionen oder *Kaustiken*<sup>16</sup>, erübrigt.

Das Pov-Ray-Verfahren verarbeitet nicht wie andere Renderer die zugrunde liegenden Oberflächenmodelle, sondern verwendet ausschließlich mathematisch basierte Formeln und Körper. Es beherrscht wie der Scan-Line-Renderer das Raytracing und die daran angepasste Radiosity-Berechnungen. *Kaustiken* hingegen können dabei nur über vereinfachte *Photon Maps*<sup>17</sup> erstellt werden.

### 3.10 Ausgabemedium

Das digitale Ergebnis kann auf sehr unterschiedlichen Ausgabemedien, wie z.B. in der monokularen (*Monitor, Beamer*) oder binokularen (*3D-Monitoren, Shutterbrillen* oder *Head-Mounted-Displays*) Darstellungsform wiedergegeben werden. Das verbreitetste Ausgabemedium bleibt aber weiterhin der Monitor, der durch die technologische Weiterentwicklung der Monitortechnik sein Auflösungsvermögen weiter steigerte und zu einem Wechsel des Röhrenmonitors hin zu den flachen TFT- und LCD-Monitoren führte.

Da von einem empfohlenen Betrachtungsabstand (nach DIN 66234) von 50 cm ausgegangen werden kann, ist durch eine feinere Rasterung (größere Bildpunktdichte) moderner Monitore

---

<sup>16</sup> Die *Kaustiken* sind geometrisch gebündelte Lichtstrahlen, die durch Lichtbrechungen von gewölbten optischen Körpern hervorgerufen werden.

<sup>17</sup> Zählt wie das Ray-Tracing zu den Particel-Tracing-Methoden, deren Ziel es ist, den Strahlenfluss der globalen Beleuchtung in einer Szene durch Strahlenverfolgung effizient zu berechnen.

von einer verbesserten Auflösung<sup>18</sup> digitaler Karten für das menschliche Auge auszugehen (s. Tab. 3). Malic untersuchte 1998 anhand von Röhrenmonitoren mit Streifenmasken- und Lochmasken-Technologie die Mindestgrößen von linearen graphischen Trivialen (z.B. Dreiecken, Linien) in Abhängigkeit von ihrer Ausrichtung und Form. Daraus ergaben sich für die Bildschirmdarstellung bis zu zehnmal größere Werte als bei konventionell gedruckten Karten, deren Ergebnisse Malic auf die Bildschirmtechnologie und seiner gewählten Auflösung zurückführte (Malic 1998). Neudeck begründet die Übertragung von Malics Ergebnisse bezüglich des Röhrenmonitors auf Flüssigkristallmonitore damit, dass die Bildpunkte eine nahezu gleiche Größe besäßen (Neudeck 2001, S. 61). Neudeck stellt weiterhin fest, dass die bisherigen Untersuchungen zur Bestimmung kartographischer Mindestgrößen für die Bildschirmdarstellung ausschließlich einen Millimeterbezug besitzen, der immer in Abhängigkeit von der Bildpunktdichte stehe. Er empfiehlt daher eine monitorunabhängige Angabe in Bildpunkteinheiten zu definieren. Weiterhin geht Neudeck davon aus, dass bei einer Bildschirmauflösung von 118p/cm (300ppi) die gleichen Mindestgrößen wie aus der kartographischen Printgestaltung möglich seien (Neudecker 2001, S. 62). All diese Untersuchungen beziehen sich auf 2D-Darstellungen digitaler thematischer Karten oder ihrer geometrischen Triviale. So müsse auch bei einer 3D-Darstellung die Mindestgröße der Raumlinien, gerade in den distanzierteren Bereichen, berücksichtigt werden, um das geforderte Mindestmaß nicht zu unterschreiten (Terribilini 2001, S. 80). Dabei spielt nicht nur das Mindestmaß eine Rolle, sondern auch die Intensitätsveränderung der Farbgebung, die durch das Beleuchtungsmodell der 3D-Graphik variieren kann. Neudeck stellte schon für 2D-Bildschirmkarten richtungsabhängige Intensitätsunterschiede an dünnen Linien fest. Sie wiesen bei einem diagonalen Verlauf von 45° ein Intensitätsmaximum auf. Darüber hinaus konnte das Unterschreiten der Mindestgrößen nur durch das *Anti-Aliasing*-Verfahren im 2D-Raum vermieden werden (Neudeck 2001, S. 65).

<b>Betrachtungsabstand</b>	
Klassische Karte (analog)	20–50 cm
Monitor (digital)	50–70 cm

Tab. 3: Betrachtungsabstand für Karte und Monitor

Durch die Beleuchtung der dreidimensionalen computergraphischen Eigenschaften mit ihrer meist naturalistisch geprägten Ausrichtung, wird gerade auf dem Gebiet der Kartographie, mit ihren abstrahierten und morphologisch anmutenden Darstellungen der Umwelt, eine nähere Betrachtung notwendig, um diese in der späteren Arbeit gegenüberstellen zu können. So wird im folgenden Abschnitt auf die klassische Kartographie mit ihren Kommunikationsprozessen, graphischen Gestaltungsmöglichkeiten, Gestaltungsregeln und Konventionen, eingegangen.

---

<sup>18</sup> Das Auflösungsvermögen des Auges liegt bei konventionellen Karten mit geringem Kontrast bei einer Linienbreite von 0,08mm (Hake et al. 2002, S. 110).

## 4 Grundlagen zur kartographischen Abstraktion

Die Kartographie befasst sich seit jeher mit der Aufbereitung georäumlicher Informationen aus der Umwelt für die visuelle Informationsvermittlung über die Karte. Dabei erfolgt die Informationserhebung für eine bestimmte Zielgruppe immer nach der Aggregation, der Selektion und der Hervorhebung von Informationen. Das Ergebnis dieser Vorgänge ergibt in der klassischen Kartographie die ebene Karte und ein maßstabstreues abstrahiertes, generalisiertes und reduziertes orthogonales Abbild der realen Umwelt. Das Ziel liegt darin, den Kartennutzer in den Aufgaben der Orientierung, der Navigation, der Informationsgewinnung, der Informationsanalyse, der Wissensgewinn, der Dokumentation und der Archivierung von georäumlichen Daten zu unterstützen (Bollmann und Koch 2001b, S. 29). Dabei muss der Kartennutzer einerseits einen Informationsverlust bezüglich der Räumlichkeit durch den Übergang vom realen Umfeld zur Karte hinnehmen, andererseits erhält er aber gleichzeitig einen Informationsmehrwert, dadurch dass er großräumige Flächen überblicken kann. Des Weiteren erhält der die Möglichkeit für ihn relevante Fragen im Zusammenhang mit bestimmten Objekte unmittelbar zu erfassen, die mit einer unmittelbare, also direkten, Umweltbetrachtung nicht zu erreichen wäre.

Der große Gestaltungsspielraum innerhalb einer Karte ermöglicht es nicht nur, ihre thematische Aussage zu optimieren, sondern auch die Wahrnehmung des Kartennutzers sowohl im positiven als auch im negativen Sinne gezielt zu beeinflussen. So unterliegen Karten beispielsweise den politischen, militärischen, industriellen oder zivilen Interessen. Hierbei kann durch Eingriff in die Lagegenauigkeit, den generellen Informationsgehalt und der graphischen Gestaltung Einfluss auf die Aussagegenauigkeit bzw. -bedeutung der Karte genommen werden. Ein Beispiel verdeutlicht diese Wirkung anhand zweier politischer Karten, zusammengetragen von Monmonier. Die beiden Karten „Then and now! 1914 and 1939“ zeigen die Intension über die politische Situation Deutschlands zu seinen neutralen wie feindlichen Nachbarstaaten von 1914 und 1939. Hierbei soll der Kartenbetrachter von dem scheinbar vorteilhaften Mächteverhältnis für das *Deutsche Reich* vor dem *Zweiten Weltkrieg* überzeugt werden. Denn der Betrachter hat bei der Karte von 1939 das Gefühl, nur Großbritannien und Frankreich seien feindliche Staaten, während andere europäische Staaten einen neutralen Status hätten (Monmonier 1996, S. 99ff).

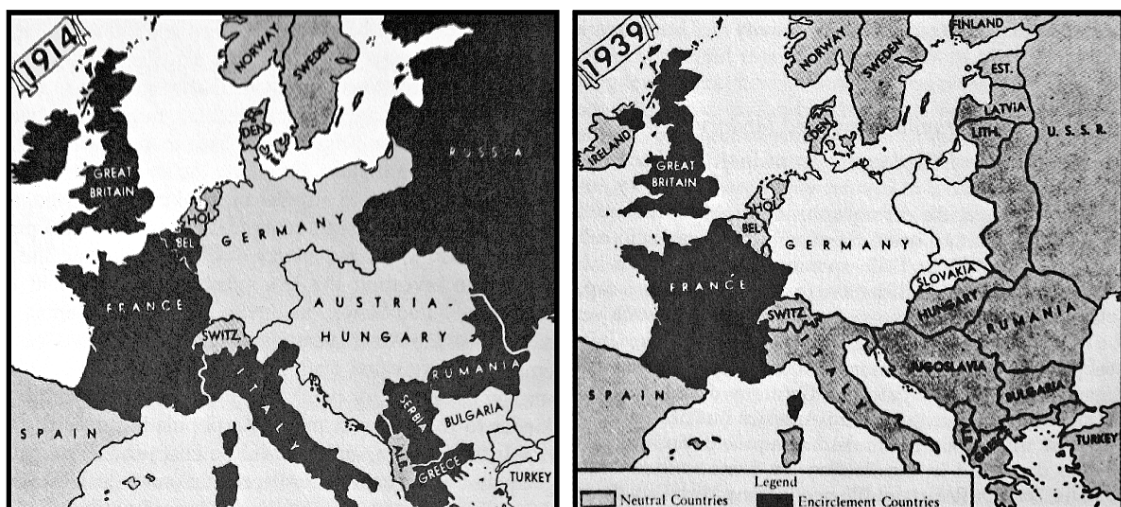


Abb. 29: "Then and Now 1914 and 1939" ( Monmonier 1996, Figure 7.9, S. 100)



Unabhängig von der gewünschten Kartenaussage und der geforderten Thematik verfolgt der Kartograph immer das Ziel, die Kartengraphik nach den folgenden Grundsätzen zu erstellen:

- Guten Lesbarkeit
- Beachtung ästhetischer Aspekte
- Erstellen eindeutiger Aussagen
- Ausschluss unwesentlicher bzw. unwichtiger Informationen
- Beachtung vereinbarter Konventionen
- Verwendung eindeutiger assoziativer Symbolik
- Effiziente Kartenherstellung
- Einhaltung verlangter Lagegenauigkeit

Bevor der Kommunikationsprozess für die Erstvermittlung von georäumlichen Informationen zwischen Kartenautor und Kartenleser beginnt, kommt es zunächst zu einer Analyse und Festlegung der Nutzeraspekte, welche für die zu erreichenden Zielgruppe von Relevanz ist.

#### **4.1 Nutzeraspekte**

Da Karten ein mediales Produkt zur Vermittlung geographischer Aussagen durch zeichenbasierte Formen sind, besteht für den Kartographen das wichtigste Ziel das Medium dem Kartennutzer so anschaulich und verständlich aufzubereiten, dass dieser einen Mehrwert in seiner Nutzung und Analyse sieht. Für die Kartenkonzeption sollte daher der von Freitag geforderten pragmatischen Nutzeranalyse vor der Herstellung und Anwendung Rechnung getragen werden (Freitag 1977, S. 61). Das bedeutet, der Kartograph versucht sein Kartenprodukt auf das Profil eines bestimmten Nutzers oder einer Nutzergruppe abzustimmen, was durch die Vielfalt der Nutzerinteressen nur schwer realisierbar ist. Dies führt zu einer erzwungenen Priorisierung und Reduzierung dieser Aspekte in der grundlegenden Kartenkonzeption mit dem Ziel, dennoch nutzerrelevante Informationen vermitteln zu können. Nach Wissen lassen sich Nutzerkreise „hauptsächlich in der Art des Hintergrundwissens, der Herangehensweise bei der Interpretation der Information sowie der Vertrautheit mit abstrakten und komplexen Darstellungen“ differenzieren (Wissen 2007, S. 203).

Für die Konzeption und Realisierung zielgerichteter neuer Kartentypen ergeben sich psychologische, physiologische und soziometrische Einflüsse, die in folgender Aufstellung ihre Erwähnung finden. Die Kriterien erheben dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit und legen nur einen Querschnitt der vielfältigen Nutzeraspekte offen.

- Psychologische Einflüsse: z.B. Medienakzeptanz, Kartenverständnis, Gewohnheit, fachlicher/kartographischer Wissenshintergrund, Abstraktionsvermögen, räumliche Vorstellungskraft, Motivation
- Physiologische Einflüsse: z.B. Farbfehlsichtigkeit, Blindheit
- Soziometrische Einflüsse: z.B. Alter, Geschlecht, Kulturkreis (Korpi und Ahonen–Rainio 2010)

#### **4.2 Kommunikationsprozess**

Im kartographischen Kommunikationsprozess existieren für den Ablauf der konventionellen Kartenerstellung unterschiedliche theoretische Ansätze, die diesen in seinen physischen, psychologischen oder kognitiven Ablauf beschreiben. Das von Hake et al. vorgestellte

kartographische Kommunikationsnetz stellt für die konventionelle Kartenerstellung einen guten Überblick über diesen Prozess dar (Hake et al. 2002, S. 22). Hierbei wird von einer bestehenden Situation im Georaum ausgegangen, die messtechnisch aus unterschiedlichen Fachdisziplinen erfasst oder durch Experten erhoben wurde. Der Fachmann leitet aus den digitalen, analogen oder in mentaler Form vorliegenden fachbezogenen Umweltdaten ein *Primärmodell* ab und übergibt im weiteren Kommunikationsprozess dieses an den Kartographen. Dieser reichert das *Primärmodell* mit seinen kartographischen Mitteln zu einem *Sekundärmodell* in analoger oder digitaler Form an und stellt das Ergebnis als fertiges Kartenprodukt dem Kartenleser zur Verfügung. Erst aus der vollbrachten Interpretation zwischen Karteninhalt und Umwelt, durch den visuell-kognitiven Prozess des Kartennutzers, bildet sich das gedanklich generalisierte *Tertiärmodell* bzw. die *Vorstellungskarte (mental map)* aus (s. Abb. 30).

Der soeben beschriebene und einseitige Kommunikationsfluss zwischen den Teilprozessen besteht ausschließlich in der Vermittlung neuer Umweltinformationen für den Benutzer. Durchläuft dagegen das kartographische Produkt eine Analyse, so bilden sich weitere Iterationsprozesse aus, die das *Primärmodell* des Fachmanns bzw. das *Sekundärmodell* des Kartographen beeinflussen und letztendlich wiederum eine Auswirkung auf die kartographische Gestaltung und somit auf die Wahrnehmung des Benutzers hat (Buziek 2003).

Liegen dem Fachmann obendrein die georeferenzierten Daten in einer Datenbank vor und ist dem Benutzer ein direkter Zugriff auf die reinen Fachdaten des *Primärmodells* gestattet, wird ein weiterer Kommunikationsprozess ausgelöst (s. Abb. 30), der aber dem Benutzer einen höheren Verarbeitungsaufwand für die Auswertung abverlangt (Hake et al. 2002, S. 20).

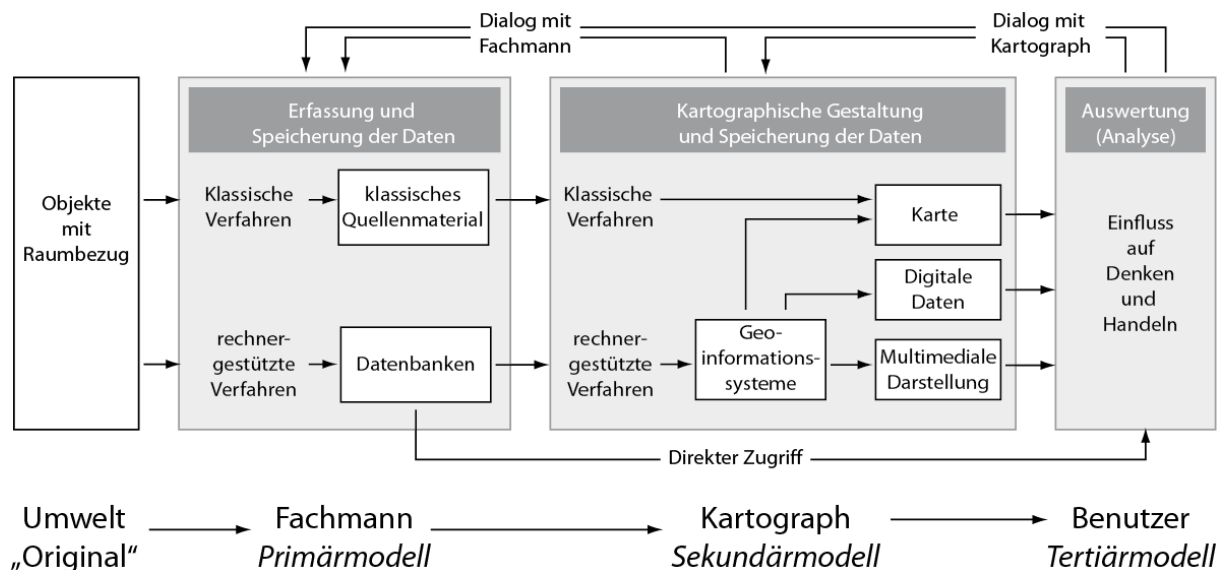


Abb. 30: Kartographisches Kommunikationsnetz

Bei einer rechnergestützten Kartenerstellung bildet sich durch die geometrischen, semantischen und temporalen Objektbeschreibungen des fachbezogenen Umweltausschnittes das *Primärmodell* aus, das frei von jeglicher kartographischer Gestaltung ist. Erst durch dessen Umsetzung formt sich ein *Digitales Objektmodell (DOM)* aus. Für die fehlerfreie kartographische Weiterverarbeitung muss eine widerspruchsfreie Konsistenz zwischen den existierenden *Primärmodellen* verschiedener Fachdisziplinen vorhanden sein. Ist dies gegeben, kann das *DOM* für die kartographische Gestaltung des *Sekundärmodells* heran-

gezogen werden. Das Ergebnis ist ein virtuelles, nicht sichtbares *Digitales Kartographisches Modell (DKM)*, das erst durch die Wahl eines passenden Ausgabemediums dem Benutzer als Ergebnis vorliegt (Hake et al. 2002, S. 152).

### 4.3 Objektrelation in der Karte

Die konventionelle 2D-Karte gibt die Umwelt als generalisierte und abstrahierte Draufsicht mit ihren georäumlichen Grundriss- und Strukturformen wieder. Da Kartographiken georaumbezogene Informationen vermitteln, besteht eine logische Beziehung (*Relation*<sup>19</sup>) der Karte zur Umwelt (*Karte-Umwelt-Relation*) und der georäumlichen Objektlage (*Lage-relation*). Durch die visuelle Informationsentnahme aus der Karte und ihren meist unmittelbaren Vergleich zu der Wirklichkeitssituation bilden die Relationen das notwendige Bindeglied, um überhaupt eine Handlung (orientieren, planen, informieren, modifizieren) zu ermöglichen. Dabei stellt sich immer die Frage wo, wie und wann das Objekt in der Umwelt vorkommt. Das erfolgt in der Kartographie durch die drei grundsätzlichen Unterscheidungen des räumlichen, sachlichen und zeitlichen Objektbezugs.

#### 4.3.1 Räumlicher Bezug

Der räumliche Bezug eines Objektes behandelt die Klärung des Sachverhalts, wo und in welcher Form das Objekt zu seiner Umwelt steht. Dabei wird zwischen diskreten und kontinuierlichen Vorkommen unterschieden.

Das Diskretum untergliedert sich weiter in Objekt-, Verbreitungs- und Bezugsflächen in realer, also gegenständlicher, wie auch sachlicher Art:

- Objektflächen liegen absolut vor und repräsentieren ein Objektvorkommen, das sich klar von Nachbarflächen abgrenzt. Hake et al. verdeutlicht dies durch „Wo Wald ist, kann kein See sein“ (Hake et al. 2002, S. 15).
- Verbreitungsflächen verdeutlichen die Ausbreitung des Objekts in Flächenform. Diese lassen auch eine Überlappung in Mischgebieten zu, wie beispielsweise Karten über Pflanzenarten oder den Sprachraum.
- Bezugsflächen erklären sich nur durch ihren Sachverhalt, d.h. durch die Zuordnung statistischer Werte auf ihre bezogene Fläche. Beispiel hierfür sind Choroplethenkarten über die unterschiedlichen Bevölkerungsdichten in Stadtvierteln.

Merkmale des Diskretums	Art des Objekts	
	Gegenstand	Sachverhalt
<b>Absolutes Vorkommen (Objektfläche)</b>	Gebäude, Gewässer, Wald, Bodenart, geologische Struktur	Verwaltungsbereich, Rechtsgebiet

<sup>19</sup> Die Relation definierte Bollmann als eine „logische Beziehung zwischen zwei und mehreren Dingen“ (Bollmann 2001, S. 283).

<b>Relatives Vorkommen (Verbreitungsflächen)</b>	Pflanzenart, Tierart, Volksstamm, Hausform	Sprache, Beruf, Konfession, Seuche
<b>Flächenbezogene (Bezugsflächen)</b>	–	Bevölkerungsdichte, Produktionsmenge

Tab. 4: Gliederung der Diskreta (nach Hake et al. 2002)

Das Kontinuum zeichnet sich durch einen stetige nicht unterbrochene und unbegrenzte Ausdehnung über die Fläche oder den Raum aus. Dabei kann zwischen realen Kontinua und Modellen in flächenhafter oder raumfüllender Art unterschieden werden.

- Reale Kontinua zeichnen sich durch sichtbare und nur messbare Kontinua, deren Stetigkeit nicht immer erfüllt sein muss, aus.
- Modelle basieren auf einem physikalischen oder geometrischen Ansatz bezüglich ihrer flächenhaften oder raumfüllenden Darstellungen (Hake et al. 2002, S. 16).

Merkmal des Kontinuums		Art des Kontinuums	
		Flächenhaft	Räumlich
Reales Kontinuum	sichtbar	Oberflächen des Geländes, des Grundwassers, des Meeres	Lithosphäre, Hydrosphäre
	nur messbar	Fläche gleicher Temperatur	Schwerefeld, Wetterdaten
Modell-Kontinuum	physikalisch	Oberfläche des Geoids	Klimadaten
	geometrisch	Oberfläche des Rotationsellipsoids, Isodeformaten im Kartennetz	Isochronen

Tab. 5: Gliederung der *Kontinua* (nach Hake et al. 2002, S. 16)

### 4.3.2 Sachlicher Bezug

Die vier in der Kartographie definierten Skalenniveaus für den sachlichen Objektbezug lauten: Nominal-, Ordinal-, Intervall- und Ratioskalen. Sie besitzen einen besonderen Stellenwert, da ihre Eigenschaften die Basis für die kartographische Gestaltung bildet und frühzeitig berücksichtigt werden muss (Tainz 2001b, S. 330). Dabei bezieht sich ihre semantische Information immer auf das Wesen des Objekts und nimmt Bezug auf dessen Art (Qualität) oder die im Zusammenhang stehende Menge (Quantität):

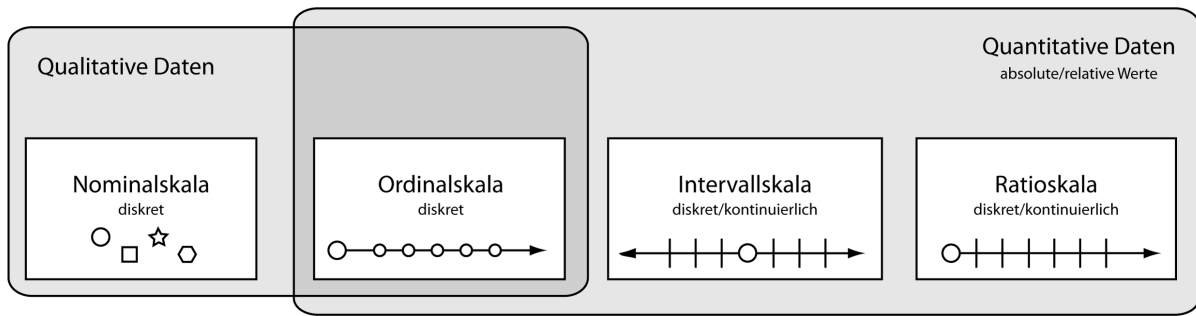


Abb. 31: Qualitative und quantitative Daten

## Qualitative Daten

In diese Kategorie fallen alle Daten, die durch ihre Eigenschaft, Art, Beschaffenheit, Position oder geordneten Beziehungen (z.B. die räumliche Folge von Bach zum Fluss) einer Klasse zugeordnet werden können. Sie geben daher Auskunft auf die Frage: „Was ist wo zu finden?“ (Imhof 1972, S. 63; Hake et al. 2002, S. 17). Ein weiteres Merkmal ist ihr ausschließlich diskreter Bestand, da ihre Objektattribute immer separier- und differenzierbar sind (Schröder 1985, S. 28). Sie zählen daher zu den nominal-skalierten Daten, da sie als willkürliche Reihenfolge vorliegen und keine Skalenbegrenzungspunkte besitzen. Eine klassenweise Weiterverarbeitung ist nur im Sinne einer Überprüfung auf deren Gleichheit oder Existenz möglich (z.B. See, Meer, Fluss) (s. Abb. 32) (Tainz 2001b, S. 330; Slocum et al. 2005, S. 60).

Eine Ordinalskala lässt sich auf gleichmäßig geordnete oder gestufte numerische Reihenfolgen (Kalt–Warm–Heiß) anwenden und zählt daher eher zu den geordneten Qualitäten (Hake et al. 2002, S. 18), wohingegen Slocum et al. die Skala den Quantitäten zuordnet (Slocum et al. 2005, S. 60). Sie besitzen nach Tainz einen definierten Anfangspunkt und verlaufen in einem festgelegten und gleichem Abstand auf einem nicht definierten Endpunkt zu (Tainz 2001b, S. 330). So lassen sich mit ordinal-skalierten Daten klassenbedingte Rangfolgen wiedergeben (s. Abb. 32).

	Nominale Daten	Ordinale Daten	Intervall- und ratioskalierte Daten
Punkt	Flughafen	<b>Flughäfen</b> International National Regional	<b>Population</b> 40-60 Bewohner 20-39 0-19
Linie	Straße	<b>Straßen</b> Autobahn Landstraße Pfad	<b>Höhenlinien</b> 
Fläche	Park	<b>Einkommen</b> viel mittel gering	<b>Höhenschichten</b> 60 Meter 40 20 0

Abb. 32: Nominal-, Ordinal- und Intervall- /Ratioskalierte Daten

## Quantitative Daten

Unter quantitativen Daten versteht man Daten, die gewöhnlich eine numerische Angabe über eine bestimmte Menge, Größe, Intensität, etc. beinhalten. Sie beantworten daher die Frage: „Wie viel ist wo?“ (Hake et al. 2002, S. 17). Objekteigenschaften sind zudem intervallskaliert, wenn sie gleichgroße monotone Skalenabstände aufweisen (Tainz 2001b, S. 330). Sie zeichnen sich außerdem dadurch aus, dass nur ein definierter Nullpunkt besteht, wie z.B. die Temperaturangabe  $0^\circ$  in der Celsiusskala und sich die Skala nach beiden Seiten stetig *isoton*<sup>20</sup> und *antiton*<sup>21</sup> ausbreiten kann (s. Abb. 31).

Für ratioskalierte Objekte gelten die gleichen Eigenschaften wie bei der Intervallskalierung, nur mit dem Unterschied, dass nun mit einem absoluten Nullpunkt, der identisch mit dem Daten-Nullpunkt ist, begonnen wird, wie z.B. 0 für die statistische Einwohnerzahl. Die Skala wächst nur zu einer Seite hin stetig monoton, zum offenen Ende, an (s. Abb. 31) (Tainz 2001b, S. 330).

Durch ihre numerisch definierten Abstände, der Intervallskalenwerte, ist die Bildung von Differenzen und Mittelwerten gegeben (*lineare Transformation*). Wobei durch die Angabe von absoluten Werten, der ratioskalierten Skala, auch die Bildung von Mengenwerten unterstützt wird (*multiplikative Transformation*) (Tainz 2001b, S. 330).

### 4.3.3 Zeitlicher Bezug

Der zeitliche Bezug behandelt das Objektverhalten hinsichtlich der temporären Veränderung und behandelt nach Hake et al. die zentrale Frage: „Wann war das Objekt wo und wie?“ Dabei wird zwischen statischem und dynamischem Verhalten innerhalb einer kartographischen Darstellung unterschieden (Hake et al. 2002, S. 18). Das statische Verhalten entspricht einem aktuellen Istzustand der räumlichen Situation, während das dynamische Verhalten eine Zeitspanne wiedergibt. Z.B. wird das städtische Wachstum oder die Entwicklung der Verkehrsströme in einer thematischen Karten über einen bestimmten Zeitraum dargestellt.

## 4.4 Elemente der Kartengestaltung

Die Grundelemente Punkt, Linie und Fläche bilden die Basis für die anschließende kartographische Gestaltung. Die daraus erstellten Kartenzeichen und Diagramme sowie der Einsatz von Halbtönen und Kartenschriften ermöglichen eine gute Differenzierung, Bewertung oder Assoziation der Kartenobjekte (Hake et al. 2002).

---

<sup>20</sup> Monoton steigend

<sup>21</sup> Monoton fallend

#### 4.4.1 Kartenzeichen

Kartenzeichen repräsentieren und verorten Begriffe oder Gegenstände in einer Karte (s. Abb. 33). Sie bilden daher deren Struktur. Kartenzeichen bestehen aus drei Elementen: indexikalische Zeichen (mit Verweisfunktion), Flächenkartenzeichen (maßstäblich fixierte Grundrissabbildung) und Signaturen (Koch 2002a, S. 452). Letztgenannte untergliedern sich weiter in symbolische und ikonische Signaturen. Während die symbolischen Signaturen entweder sinnbildlich oder allegorisch sein können, wird im Bereich ikonischer Signaturen zwischen bildhaften (steigender Ikonizität), assoziativen und geometrischen Signaturen (fallender Ikonizität) unterschieden (Koch 2002a, S. 452, MacEachren 1995, S. 262).

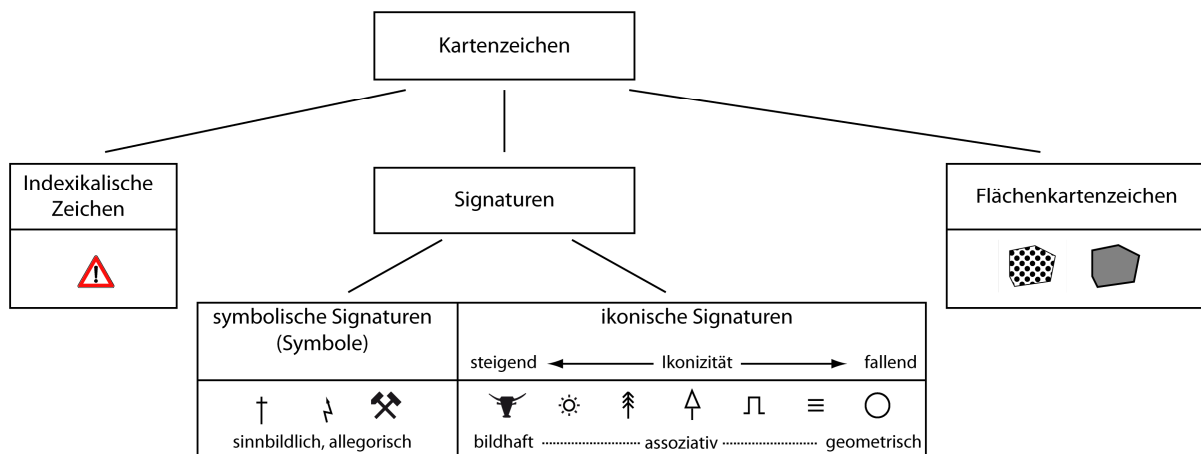


Abb. 33: Kartenzeichen (Koch 2002a, S. 452)

#### 4.4.2 Graphische Variablen

Der Reichtum an Kartenzeichen entsteht durch die vielfältigen Kombinationen einer begrenzten Anzahl von graphischen Variablen. Die graphischen Variablen bzw. visuellen Variablen wurden 1967 von Bertin zum ersten Mal in seinem graphischen Regelwerk<sup>22</sup> SÉMIOLOGIE GRAPHIQUE vorgestellt. Es beinhaltet die sechs Variablen: *Größe* – *Farbe(ton)* – *Farbhelligkeit* – *Form* – *Richtung* und *Muster (Korn)* in einem 2D-Bezugssystem (Bertin 1967). Morrison verfeinerte 1974 Bertins Farbvariablen mit der zusätzlichen graphischen Variable *Farbsättigung* und fügte dem *Muster* eine *Ausrichtung* hinzu (Morrison 1974, S. 123). 1990 untergliederte Caivano die graphische Variable *Textur* als eine Verbindung aus *Richtungsabhängigkeit*, *Größe* und *Dichte* (Caivano 1990). MacEachren erwog das *Muster* als eine übergeordnete graphische Variable mit ihren zusammengesetzten Elementen der *Form* – *Größe* – *Orientierung* – *Textur (Korn)* und *Anordnung* (MacEachren 1995, S. 273). Des Weiteren stellte MacEachren fest, dass sich durch die Empfehlung von Morrison eine graphische Variable für *Musterausrichtung* aufzunehmen, auch unregelmäßige Muster beschreiben ließen, die bei anderen Taxonomien (z.B. Bertin oder Caivano) versagten (MacEachren 1995, S. 273). Er selbst führte die Variable *Klarheit (Clarity)* ein, die sich in

<sup>22</sup> Taxonomie

den Variablen *Schärfe (Crispness)*, *Auflösung (Resolution)* und *Transparenz (Transparency)* weiter unterteilten (MacEachren 1995).

Nach Bertin bieten sich die Variablen *Form* und *Farbe* nur für die Codierung von qualitativen Daten, die Variablen *Textur* und *Richtung* für qualitative und quantitative Daten, sowie die Variablen *Größe* und *Helligkeit* nur für quantitative Daten an (s. Tab. 6). Die Variablen *Größe* und *Helligkeit* sind geeignet, geordnete Wertstufen wiederzugeben, dabei muss die logische Ordnung der des ausgestalteten Elements entsprechen. Ist diese in beiden Fällen konsistent, so kann auf eine Legendendarstellung verzichtet werden (Bertin 1982, S. 197). Durch ihre Variation verändern sie ihre Größe bzw. ihre Helligkeit, das sich bei abnehmenden Werten auf ihre Sichtbarkeit bzw. ihrer flächenhaften Unterscheidung nachteilig auswirkt (Bertin 1982, S. 197). Eine Anordnung von gleichabständigen Helligkeitsstufen wiederholt sich häufig in der Darstellung von linearen wachsenden Wertstufen flächiger Elemente. Eine Größenabstufung hingegen bietet darüber hinaus die Möglichkeit, ratio- oder intervallskalierte Daten proportional ansteigend darzustellen.

<b>Graphische Variable</b>	<b>Qualitativ</b>	<b>Quantitativ</b>
<b>Form</b>	+	-
<b>Farbe</b>	+	-
<b>Textur</b>	+	+
<b>Richtung</b>	+	+
<b>Größe</b>	-	+
<b>Helligkeit</b>	-	+

Tab. 6: Nutzen der klassischen graphischen Variablen nach Einschätzung von Bertin

Während Bertin sich bei seiner Taxonomie auf konventionellen Karten mit seinen punkt-, linien- und flächenhaften Signaturen bezieht, entwickelte Wilkinson seine Theorie über Graphiken aus Sicht der digitalen rechnergestützten Verarbeitung. Wilkinson schlüsselte dafür Bertins Verbindung zwischen Form- und Texturattributen zu eigenständigen Attributen auf, mit der Begründung, die ästhetischen Attribute müssen unabhängig voneinander reagieren. Dabei stelle er die Bedingung auf, dass sich diese mit ihren gegenseitigen Veränderungen zueinander kohärent und konsistent in der erstellten Graphik verhalten müssen (Wilkinson 1999). So differenzierte Wilkinson die Variablen *Größe*, *Form* und *Orientierung*, die Bertin für die Beschreibung der äußeren Objektform und der inneren *Texturmuster* verwendete. Wilkinson bildete seine geometrisch geordnete Tabelle ästhetischer Attribute mit sieben von Bertin abgeleiteten Attributen, der *Position (position)*, der *Größe (size)*, der *Form (shape)*, der *Orientierung (orientation)*, der *Helligkeit (brightness)*, der



*Farbe (color)* und der *Granularität*<sup>23</sup> (*granularity*) ab. In Abb. 34 repräsentieren die Spalten die geometrischen Formen *Point*, *Line*, *Area*, *Surface* und *Solid* die Zeilen, die vier Superklassen *Form*, *Color*, *Texture* und *Optics*.

	Point	Line	Area	Surface	Solid
Form					
Size	• • •	≡ ≡ ≡	□ □ □	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Shape	• ■ ▲	≡ ≡ ≡	△ □ ▭	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Rotation	◀ ▶ ▶	≡ ≡ ≡	□ □ □	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Color					
Brightness	● ● ○	≡ ≡ ≡	■ ■ □	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Hue	● ● ●	≡ ≡ ≡	■ ■ ■	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Saturation	● ● ●	≡ ≡ ≡	■ ■ ■	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Texture					
Granularity	◊ ◊ ◊	≡ ≡ ≡	■ ■ ■	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Pattern	◊ ◊ ◊	≡ ≡ ≡	■ ■ ■	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Orientation	◊ ◊ ◊	≡ ≡ ≡	■ ■ ■	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Optics					
Blur	● ● ●	≡ ≡ ≡	■ ■ ■	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭
Transparency	● ● ●	≡ ≡ ≡	■ ■ ■	▭ ▭ ▭	▭ ▭ ▭

Abb. 34: Geometrisch geordnete ästhetische Attribute aus Wilkinson (Wilkinson 1999)

Durch die Aufschlüsselung der graphischen Grundelemente nach ästhetischen und mathematischen Aspekten gelingt es Wilkinson, diese nach ihrer Geometrie, ihren ästhetischen Attributen (*Form*, *Farbe*, etc.), ihren statistischen Methoden, ihrer Skalierung und ihrem Koordinatensystem als ein allgemeingültiges System für den computergestützten Einsatz zu definieren.

### 4.4.3 Raster- und Vektorprinzip

In der rechnergestützten Verarbeitung lassen sich die Kartenzeichen mit ihren graphischen Variablen im Raster- oder Vektorformat visualisieren. Rasterbilder unterscheiden sich grundsätzlich zu Vektorbildern in ihrem festen geometrischen Aufbau. Durch eine rasterförmige Anordnung, vergleichbar einer  $m \times n$ -Matrix, besitzt jeder Rasterpunkt, auch Pixel genannt, einen Farbwert. Das bedeutet, dass ein Rasterbild immer eine flächendeckende Farbinformation hat. Hauptmerkmale eines Rasterbildes ist somit seine zweidimensionale Bildgröße (Breite, Höhe) und seine gewählte Farbtiefe für das Pixel. Aus diesen Werten berechnet sich die spätere Speichergröße eines digitalen Rasterbildes.

<sup>23</sup> Granularität verdeutlicht die räumliche Frequenz einer Textur.

Seine Vorteile liegen in seiner einfacheren Bildanalyse komplexer Inhalte, z.B. der Flächenkalkulation, und der Bildgestaltung oder der Gestaltung von Farbverläufen. Die Nachteile sind stufenbildende Effekte (*Aliasing*) an kontrastreichen Übergängen, Qualitätsverluste durch Rasterbildung bei starker Vergrößerung und die daraus resultierende eingeschränkte Skalierbarkeit der meist speicherintensiven Graphiken.

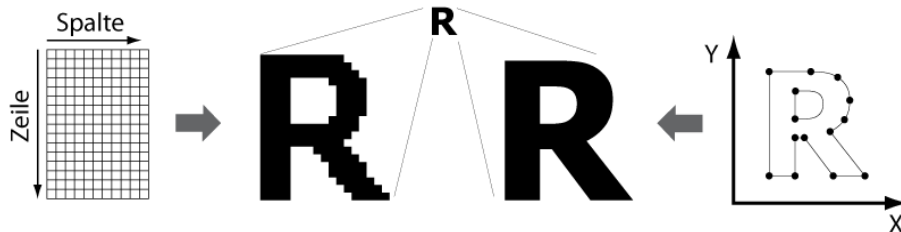


Abb. 35: Vergleich zwischen Raster- und Vektorgrafik

Bei einem Vektorbild werden nicht wie im Rasterbild die Pixelinformation gespeichert, sondern die enthaltenen Bildobjekte in ihrer Struktur beschrieben. Dies erreicht man durch die Kombination graphischer Formprimitiven wie Linie, Kreis, Polygon oder Splines. So ist es möglich, einen Kreis im Vektorbild durch die gespeicherte Information von Mittelpunkt, Radius, Linienstärke, Farbe und Füllung zu beschreiben. Daraus ergibt sich bei einfach strukturierten Inhalten ein geringeres Speichervolumen als bei vergleichbaren Rastergraphiken. Bei Vektorgraphiken liegen die Vorteile in der unbegrenzten Skalierbarkeit, dem meist geringeren Speicherbedarf und dem nichtvorhandenen Treppeneffekt an seinen kontrastreichen Übergängen. Die bessere graphische Qualität wird damit begründet, dass die Rasterisierung erst dann erfolgt, nachdem der Ausschnitt und die Projektion für das Ausgabemedium gewählt worden ist (Malic 1998; Bill 1999). Dieser Vorgang wird auch als *Software Zoom* bezeichnet. Zu dessen Nachteilen zählen hingegen die aufwändigere Kalkulation von Flächenberechnung, die speicherintensive Beschreibung komplexer Bilder und die anspruchsvolle Gestaltung von Farbverläufen. Für Vektorgraphiken verwendet man grundsätzlich für die Flächenfarbe eine Vollfarbe bzw. ein vollflächiges Muster. Daher können Farbverläufe in der Fläche entweder durch standardisierte mathematische Vorgaben (z.B. zirkulare, lineare Verläufe) realisiert werden, oder durch Kombination einer Vollfarbfläche mit einem frei gestaltbaren *Alpha-Kanal-Verlauf*<sup>24</sup>. So kann vereinfacht gesagt werden, dass die Vorteile der Vektorgraphik die Nachteile der Rastergraphik und umgekehrt sind. Eine tabellarische Zusammenfassung findet sich unter anderem unter Zanini wieder (Zanini 1998, S. 51).

<sup>24</sup> Ein *Alpha-Kanal* beinhaltet entweder einen monochromen Helldunkelverlauf oder die abgrenzenden Farben Schwarz und Weiß eines Bildbereichs. Dabei bedeutet die Farbe Schwarz volle *Transparenz* (Durchsichtigkeit), die Farbe Weiß volle *Opazität* (Undurchsichtigkeit). *Alpha-Kanäle* werden hierbei immer mit einer weiteren Ebene kombiniert, die Farben und Formen beinhalten können. So lassen sich flächenhafte Bereiche in ihrer Deckkraft beeinflussen.

#### 4.4.4 Minimaldimension und Verdeckungsgrad

Für die Minimaldimension von Signaturen wird für Printmedien von einer theoretischen Auflösbarkeit des Auges von 0,02mm und für die bessere Lesbarkeit von 0,08mm ausgegangen. Bei der Bildschirmdarstellung mit einer Auflösung von 72ppi liegt diese bei einer theoretischen Auflösung von einem Pixel. Der empfohlene Bereich aber für die praktische Anwendung bei einer Auflösung von 2–3 Pixeln. Dies entspricht einer Druckauflösung von 0,7–1,05 mm (Häberling 2004, S. 66).

Der Verdeckungsgrad, der im unmittelbaren Bezug zur graphischen Zeichendichte steht, wird durch Zeichenform, -größe und -verteilung in Abhängigkeit vom Kartenausschnitt beeinflusst. So kann eine Verdeckung von relevanten Grundkarteninformationen in planaren Karten vermieden werden, indem man wohlüberlegt die Kartenzeichen platziert. Bei digitalen interaktiven Karten mit den gängigen Navigationsfunktionen, wie *Zoom* und *Pan* und den daraus resultierenden Maßstabswechseln, können solche Verdeckungen deutlicher hervortreten. Neudeck unterscheidet zwischen maßstabsunabhängigen und -abhängigen Kartenzeichen (Neudeck 2001, S. 54). Wobei die Maßstabsunabhängigkeit den Verlust der graphischen Proportionen und die Maßstababhängigkeit die Variation der graphische Dichte bewirkt (Neudeck 2001, S. 98). Um folglich das Gesamtbild und die Lesbarkeit digitaler Karten in der Bildschirmdarstellung zu erhalten, muss die graphische Zeichendichte, nach Neudeck, gerade für Punktzeichen mit quadratischer bzw. rechteckiger Ausprägung und bestehender überhöhten Hintergrundverdeckung weitaus stärker in ihrer Anzahl als in der klassischen Kartendarstellung reduziert werden (Neudeck 2001, S. 98).

#### 4.5 Wahrnehmung & Kognition der Kartenzeichen

Durch den zirkulären Vorgang des Kommunikationsprozesses (s. Abb. 30, S. 50) lassen sich drei weitere Prozessabläufe differenzieren (s. Abb. 36). Diese sind Gestaltung, Kognition und Feedback.

Die Gestaltung bewirkt die Bildung des *Sekundärmodells* und führt somit zu einem fertigen Kartenprodukt.

Der Kognitionsprozess setzt durch den Benutzer ein, der daraus das *Tertiärmodell* ableitet und mit dem Ergebnis entweder eine Handlung oder ein Modifikationsbestreben auslöst. Unter Kognition ist hierbei der informationsverarbeitende Prozess auf menschlicher mentaler Ebene zu verstehen. So geht es dabei darum, Neues zu lernen und Wissen zu verarbeiten.

Das Feedback fängt bei der Kartenmodifikation an und geht in den zirkulären Ablauf auf das *Primär-* oder *Sekundärmodell* über.

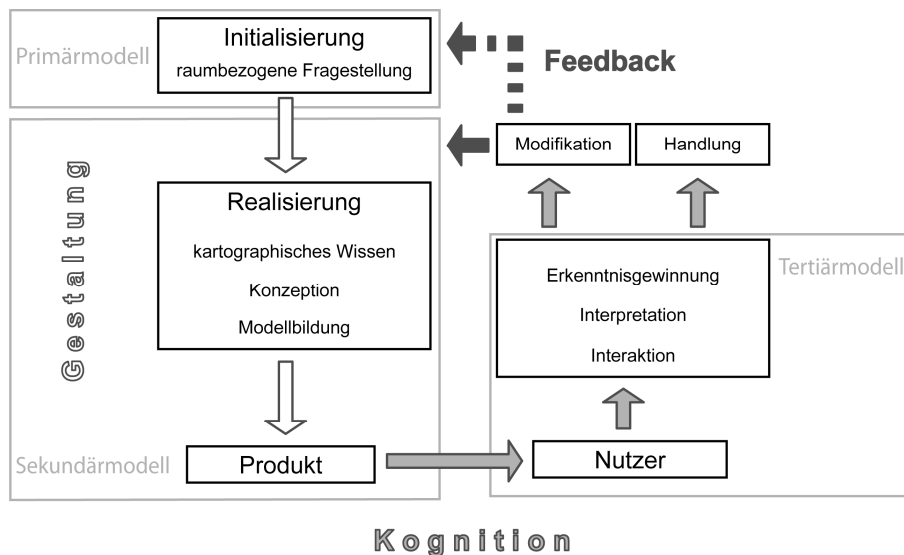


Abb. 36: Gestaltung – Kognition – Feedback (abgeleitet von Kriz 2001, S. 231, 232)

Das nach angewandten Gestaltungsregeln angefertigte Kartenprodukt mit seinen Kartenzeichen, Diagrammen und Texten stellt einen wichtigen Informationsträger dar, der den Kognitionsprozess beeinflussen, die Interpretation verbessern und so zum schnelleren Erkenntnisgewinn beitragen kann. Obgleich die meisten Gestaltungsregeln aus Erfahrungswerten oder empirischen Wahrnehmungsversuchen stammen, wurden auf dem Gebiet der kognitiven Wahrnehmung nur wenige graphische Variablen aus der konventionellen Kartographie untersucht. So konnte durch Reaktionstests nachgewiesen werden, dass die Art des menschlichen Wahrnehmungsprozesses zur Bestimmung von Farbreihen von den gewählten Farben abhängt. So lösen Farben, die sich durch ihre *Farbhelligkeit* unterscheiden, einen präattentiven<sup>25</sup>, Farben mit einer Farbtonvariation einen kognitiven Prozess<sup>26</sup> aus (MacEachren 1995, S. 135). Nach den Ansätzen Swientys wurde der kognitive Prozess mittels *Eye-Tracking*-Verfahren für die Wahrnehmung der graphischen Variable *Farbton* anhand drei unterschiedlicher Punktsignaturklassen innerhalb planarer Stadtkarten umgesetzt (Swienty 2008). Für weiterführende Literatur sei auf Olson, Montello und Swienty verwiesen (Olson 1984; Montello 2002; Olson 2006; Swienty et al. 2007).

Die visuelle Wahrnehmung und Kognition von Kartenzeichen beruht auf den Erkenntnissen der menschlichen Gestaltwahrnehmung. Durch sie ergibt sich aus einzelnen graphischen Elementanordnungen eine ganzheitliche Form. So werden deren Phänomene durch die Gestaltpsychologie zusammengefasst und durch zehn allgemeingültige Gestaltgesetze beschrieben. Insbesondere das Gesetz der Prägnanz, das durch den „Zusammenschluss von Elementen [...] eine möglichst geschlossene, stabile, in sich folgerichtige und einfache Gestalt ergibt“, weist einen hohen Grad an Invarianz auf (Hake et al. 2002, S. 111). Das heißt, ein Kartenzeichen, welches auf diese Weise erkannt werden konnte, ist unabhängig gegenüber jeder Veränderung der Lage, der Ausrichtung, der Skalierung, der Farbe, des Kontrasts und

<sup>25</sup> Ohne Aufmerksamkeit bedeutet eine schnelle, automatische und unbewusste Verarbeitung.

<sup>26</sup> Mentaler aktiver Prozess zur Informationsverarbeitung.

der geringen geometrischen Modifikation. Daraus ergeben sich für die konventionelle Kartengestaltung folgende allgemeingültige Gestaltungsgrundsätze (Hake et al. 2002, S. 111):

- Eine graphische Differenzierung zwischen den Elementen (Kartenzeichen) durch eine möglichst weitreichende Nutzung aller graphischen Gestaltungsmittel.
- Die Ausgewogenheit der graphischen Zeichendichte. Neudeck nennt für konventionelle Kartenwerke als Faustregel eine graphische Zeichendichte von höchstens zwei Flächentönen, zwei Positionssignaturen und zwei Linien pro Quadratzentimeter (Neudeck 2001, S. 98).
- Die Gewährung des Kontrasts und der Objektrennung zwischen den Farben und dem Hintergrund. Dazu zählt auch die Freistellung zwischen den Gestaltungsmitteln.
- Die Berücksichtigung des Darstellungskontexts zur Verbesserung des Verständnisses für Strukturen, Rangfolgen oder Wertigkeiten.
- Das Vermeiden bzw. Umgehen von optischen Täuschungen durch ungünstige Farb- oder Formkombinationen. Dazu zählen beispielsweise der *Mach-Band*-Effekt, der den Übergang von zwei angrenzenden Helligkeiten kontrastiert, der *Simultankontrast*, der die Wahrnehmung der Vordergrundhelligkeit durch den Hintergrund beeinflusst und das *Hermann-Gitter*, dessen Kreuzungspunkte weißer Linien auf schwarzem Grund dunkler erscheinen.
- Die Berücksichtigung von Gewohnheit und Erwartungen des Kartennutzers. Hierzu zählen beispielsweise die assoziierbare Farbaussage, das Vorwissen ikonischer Signaturen, der Lichteinfall in Schummerungen oder die erwartete Nordausrichtung in der Karte. MacEachren deutet drauf hin, dass es zu Fehlinterpretationen kommen kann, wenn ein bekanntes und gebräuchliches Symbol eine vermeintlich andere Bedeutung besitze (MacEachren 1995).

## 4.6 Farben in der Karte

In der kartographischen Gestaltung spielen Farben eine bedeutende Rolle. Sie unterstützen die Kartenthematik durch die Abstimmung des Farbkontrasts, der Farbwirkung und der Farbassoziation, um zu einer farbharmonischen Karte zu gelangen. Nach Imhof kann durch eine gute Farbwahl die Schönheit einer Karte hervorgehoben (Imhof 1972, S. 144) werden und somit die Wahrnehmung unterstützend beeinflussen. Ferner können Farben aus kommunikationstheoretischer Sicht als Informationsträger dienen oder zur besseren Strukturierung genutzt werden mit dem Ziel, optimierend auf die Informationsvermittlung einzuwirken (Großer und Schoppmeyer 2001, S. 222).

Werden Farben zur Strukturierung von Karteninhalten eingesetzt, kann man diese weitgehend frei wählen. Ihre Bedeutung wird in konventionellen Kartenprodukten durch eine angefügte Legende entweder graphisch oder schriftlich erläutert. So liefern topographische Karten mit ihren farblich klar trennenden, linearen Signaturen eine deutliche Differenzierung zwischen den einzelnen Karteninhalten. Dagegen bedarf es bei der Farbauswahl zur Optimierung der Informationsvermittlung großer Sorgfalt, um wichtige von unwichtigen Informationen zu trennen (Großer und Schoppmeyer 2001, S. 222). Farben können dabei in der Kartengestaltung sichtbare, wie auch nicht sichtbare Phänomene, wiedergeben. Zu den nichtsichtbaren Phänomenen in einer Karte zählen weitgehend alle statistisch erhobenen Werte (Einwohnerzahl, Einkommen), nicht georaumerfassende Messverfahren (Schalldruck, Windeffekte, Temperatur) oder durch georaumerfassende Messverfahren gewonnene

Einzelwerte von Höhen- und Tiefenkoten aus der Geodäsie sowie deren Ableitung zu Isolinien und Schichtstufendarstellungen. Dadurch kann man alle in der Umwelt nicht sichtbaren Vorkommnisse bezeichnen, die durch ihre numerische Erhebung einen Raumbezug aufweisen oder durch dessen Erhebung abgeleitet worden sind. Sichtbare Phänomene, wie Gebiets- und Vegetationsgrenzen, sowie reale Umweltobjekte, werden oftmals als Basisbezug herangezogen, um nichtsichtbaren Phänomenen eine räumliche Relation zur Umwelt zu liefern. So stellt eine in ihren Farben aufgehellte und vereinfachte topographische Karte mit ihrem realen Raumbezug eine Basiskarte für thematische Karten dar. Die Ausgestaltung der Darstellungsschicht für deren thematische Inhalte wird nach den Gestaltungsgrundsätzen farblich stärker betont und bildet dadurch eine Informationshierarchie aus.

Kommen Farben für die Ausgestaltung von Karten zum Einsatz, muss auch dem geplanten Ausgabemedium Beachtung geschenkt werden, da im digitalen Verarbeitungsprozess die Farbübertragung zwischen den Gerätekomponenten nicht frei von Fehlern ist. Im Übertragungsprozess der Farben zwischen den Peripheriegeräten des Computers zur elektronischen Kommunikation und Reproduktion (*Monitor, Farbdrucker*) besitzt jedes dieser Komponenten ihre eigene Farbcharakteristika. Um deren Farbabweichungen annähernd zu kompensieren, werden gerätebezogene Farbprofile und geräteunabhängige Austauschfarbräume festgelegt, wodurch maßgeblich die Übertragungssicherheit der Farbwerte verbessert wird. Dabei unterliegen die Farbwerte aber weiterhin den spektralen Monitorabweichungen, den Produktionstoleranzen der Monitorhersteller, den Differenzen zwischen Hardware und Software, den unterschiedlichen Funktionsprinzipien der Drucker oder dem verwendeten Farbdruckmittel. Unabhängig von der Problematik im Verarbeitungsprozess schränkt sich der nutzbare computerbasierte additive Farbraum, der weitaus größer ausfällt als die der Körperfarben, zusätzlich durch die Wahl seiner digitalen Anwendung ein. So reduziert sich beispielsweise bei einer Bildschirmkarte, die über das Internet bereitgestellt wurde, der Farbraum auf eine webbrowsersfähige Farbpalette.

Die für die Kartengestaltung genutzte Farbgebung basiert in konventioneller Sicht auf bestimmten Richtlinien und Grundsätzen, die aus der Lehre der klassischen Malerei (Farbharmonie, Farbästhetik) und durch die Weiterentwicklung kartographischer Erfahrungswerte gewonnen wurden. Dabei definiert sich in der Kartographie die Farbgebung nach folgenden Punkten:

- Die Wahl von Komplementfarben für bipolare Skalen
- Die Darstellung von Qualitäten durch Farbtonvariationen, geprägt von Quantitäten durch Farbhelligkeitsvariationen
- Der Variation von *Farbton* und *Farbhelligkeit* zur Darstellung einer gewünschten Farbstufenanzahl innerhalb eines Kontinuums
- Die Nutzung der Farbassoziationen (Warm–Kalt/Hell–Dunkel/Trübung) und der Farbkonventionen
- Die Aufhellung oder Grautondarstellung von Basiskarten zur klaren Trennung der kräftigeren Darstellungsschicht (Kraak und Ormeling 1996, S. 126)
- Die Beachtung von Farbwirkungen bei physisch und psychisch eingeschränkten Personen, wie beispielsweise Farbfehlsichtigkeit (Rot-Grün-Blindheit) oder durch Epilepsie (fotosensitive Anfälle verstärkt durch Rot-Blau-Kombinationen)
- Weitere Konsensvereinbarungen auf Landes-, Nutzer- und Verlageebene (Großer und Schoppmeyer 2001, S. 223)

Für die Farbharmonie ergeben sich die allgemein gültigen kartographischen Empfehlungen für alle Karteninhalte aus der:

- klaren Farbtrennung zwischen Linien- und Flächenfarbe
- hellere Farbtöne bei flächenhaften als bei punk- und linienhaften Kartenzeichen
- Schwarz als kontrastreiche Farbe für kleine Schriften und feine Linien (0,1–0,2 mm)
- unbunte Farben zur Dämpfung farblicher Dissonanzen und Trennung ähnlicher Farben
- Konturlinien innerhalb weißer Flächen als Grauton
- sparsamer Einsatz kräftiger Farben, z.B. nur in kleinen Flächen

## 4.7 Farbskalen

Frühzeitig wurde erkannt, dass durch gezielte Farbabstufungen eine logische Reihe gebildet werden kann. Peucker legte im Jahre 1898 für seine flächenhafte Farbausdehnungen von Höhenstufen (*hypsometrische Methode*) folgende Aufstellung für seine Theorie der Farbenplastik zugrunde und beeinflusste zu seiner Zeit die Kartenentwicklung nachhaltig (Hake et al. 2002, S. 433):

- Je höher, desto heller (Helligkeitsreihe)
- Je höher, desto farbsatter (Sättigungsreihe)
- Je höher, desto wärmere Farbtöne (Spektralreihe)

Imhof unterscheidet für die Höhendarstellung über dreizehn unterschiedliche Farbskalen, die abhängig vom Kartenmaßstab gewählt werden. Dazu zählen kontrastreiche und spektrale Farbskalen, die durch Farbassoziation und Erinnerungsprojektion begründet wurden. Ebenso verwendete er Farbskalen von Peucker und Helligkeitsskalen für Darstellungen in umgekehrter Reihenfolge nach „Je höher, desto dunkler“ (Imhof 1965, S. 333). Dabei stellt Imhof fest, dass die Verwendung kontrastreicher Farbfolgen die Kontinuität der Geländeform zerstörte und für die Gestaltung einer Höhenabstufung ungeeignet ist (Imhof 1965, S. 335). Dagegen unterstützt eine kontrastarme Farbabstufung die klarere Abtrennung von Höhenzonen, auf die nicht verzichtet werden kann (Imhof 1965, S. 343). Begründet wird dies damit, dass sich durch die Wahl beliebiger Farbtöne keine geordnete Struktur erzeugen lässt. Des Weiteren ermöglicht die Anwendung variierender Helligkeitswerte eine aufsteigende bzw. absteigende Reihenfolge (Ware 2004, S. 128). Dadurch überwiegt, wie schon Imhof feststellte, die Helligkeitsvariation gegenüber der Farbvariation für die Gestaltung von Höhenfarbstufen. Aber auch eine Helligkeitsvariation von Grautönen kann zu Interpretationsfehlern führen, die McGranaghan in einem Test nachweisen konnte. So klassifizierte er zwei U.S. Staaten unterschiedlich, indem er einen Bundesstaat einen dunkleren flächigen Grauton als Maximalwert zuwies. Das Ergebnis der Untersuchung ergab, dass nur 30% der Testkandidaten die Bedeutung des dunklen Grautons als einen größeren bzw. höheren Wert richtig erkannten. Dabei wurde nachweislich die Entscheidung der Testkandidaten durch den gewählten Hintergrund (Weiß, Grau oder Schwarz) beeinflusst (McGranaghan 1989, MacEachren 1995, S. 135).

Die aus der kartographischen Literatur bekannten Farbskalen beziehen sich meist auf analoge Ausgabemedien, wie der Printgestaltung, und berücksichtigen daher die Darstellbarkeit auf digitale Ausgabegeräte nicht. Neudeck griff diese Problematik auf und untersuchte, hinsichtlich ihrer Darstellung für thematische Karten, Morgensterns (1974) physiologisch gleichabständig definierte drei- bis achtstufigen Grautonskalen auf unterschiedlichen

Bildschirmtypen. Er stellte ihre Differenzierbarkeit zwischen den angrenzenden Halbtönen bis zu einer 7-stufigen Skala fest. Wies aber gleichzeitig darauf hin, dass im achtstufigen Skalenverlauf die hellste Stufe einen zu geringen Kontrast zum Bildschirmhintergrund lieferte (Neudeck, 2001, S. 70). Diese Erkenntnis verdeutlicht die Problematik in der Übertragung von Farbskalen aus dem analogen in den digitalen Ausgabebereich aufgrund der geringen Varianz im *Farbton* durch den Informationsträgerhintergrund.

#### 4.7.1 Farbgestaltung und -nutzung für Temperaturwerte

Farben besitzen Farbwirkungen und lösen beim Menschen unterschiedliche Assoziationen aus, die vom ureigenen Verständnis, kulturellen Einflüssen, persönlichen und beruflichen Erfahrungen abhängen und somit variieren können. Dagegen ist die Temperaturwahrnehmung von Farben für den Menschen in seiner Assoziationswirkung als weitgehend beständig anzusehen. Sie verdeutlicht eine klare *Warm-Kalt-Wirkung* beim Betrachter und lässt eine weitaus geringere Farbvariation als bei anderen Karteninhalten zu. Der Kartenautor muss somit die assoziative Farbwirkung in seiner Gestaltung berücksichtigen, um die Erwartung des Kartennutzers zu erfüllen. Zu den assoziativen Farben, die eine *Warm-Kalt-Wirkungen* hervorrufen, zählen die Farben Rot, Orange, Gelb, Blau und Blaugrün (Großer 2001, S. 224).

- Die Farben Rot, Orange und Gelb stehen für Trockenheit, Wärme, Hitze, Zunahme oder Unruhe, wobei die Farbe Rot auch die Bedeutung der Warnung und der Gefahr in sich trägt.
- Die Farben Blau und Blaugrün stehen für Nässe, Kälte, Abnahme oder Ruhe, aber auch für Wasser.

Dabei ist vollständigshalber zu erwähnen, dass weitere Farbbedeutungen mit diesen Farben in Verbindung stehen. So verbindet der Mensch unter anderem die Farbe Rot auch mit Liebe, Hass oder Zorn, die Farbe Blau mit Harmonie, Zufriedenheit oder Erleuchtung.

Die Temperaturvariationen lassen sich wie Geländehöhenvariationen durch eine Farbskala bzw. Farbreihe beschreiben. Hierbei werden sie in einer geordneten Folge von gleichabständigen, unterscheidbaren Farben unter Veränderung des *Farbtons*, der *Farbhelligkeit* und/oder der *Farbsättigung* darstellen. Ist die Äquidistanz nicht gegeben, entsteht nach der Lehre der Farbharmonie eine unharmonische Farbreihe. Für Farbreihen werden nach Tainz Vollflächen<sup>27</sup> herangezogen, die meist in ihrer *Farbhelligkeit* (*brightness/value*) und ihrem *Farbton* (*hue*) variieren (Tainz 2001a, S. 307). Durch ihre gestalterische Abstimmung sind sie in ihrer Reihenfolge fehlerfrei bestimmbar, müssen aber zu der Verdeutlichung ihrer Wertstufen über eine Legendenbeschreibung charakterisiert werden.

Der Übergang zwischen benachbarten Farben in der Reihe kann entweder monopolar oder bipolar ausgeführt sein. Einen kontinuierlichen monopolaren oder bipolaren Farbgradienten zu bilden, ist durch ineinander verlaufende Grund- und Mischfarben technisch möglich (s. Abb. 37).

---

<sup>27</sup> Vollflächen sind in ihrer gesamten Ausdehnung in Farbton und Tonwert konstant (Hake et al. 2002, S. 121).



Monopolare Temperaturfarbskalen haben ihren Ausgangswerte am Ende einer Farbskala (ratioskaliert) und visualisieren bei einer Temperaturdarstellung nur eine thermale Werteeichtung. So beginnen sie meist mit einem gedeckten Weiß und gehen in einen kontinuierlichen Farbverlauf bzw. in diskrete Farbstufen einer Farbreihe über, bis sie ein sattes Rot bzw. Blau erreichen. Der gedeckte Weißton in der Ausgangsfarbe sorgt für den benötigten Kontrastunterschied zum Weißpunkt des Trägermaterials einer Druckmedienausgabe. Die Endfarben besitzen aufgrund der Farbintensität der Primärfarben eine eher reduzierte *Farbhelligkeit*, was ihre Farbe kräftiger erscheinen lässt. Das entspricht dem menschlichen Temperaturempfinden und ist fehlerfrei interpretierbar, dabei ergänzen weitere Temperaturfarben wie Gelb und Orange mit ihren variierenden Helligkeitswerten die Temperaturfarbskala.

Ein bipolarer Verlauf deckt zwei gegenläufige Wertereihen/-folgen durch eine Komplementärfarbandarstellung ab. Mit einem mittleren bis hellen Grauton in der Mitte der Farbskala, der nach Brewer als die *kritische Klasse* bezeichnet wird, und den Ausgangswert des Farbschemas repräsentiert, breitet sich der bipolare Verlauf zu beiden Seiten hin gleichmäßig aus (Brewer 2005).



Abb. 37: Bipolarer (oben) – monopolarer (unten) Farbverlauf

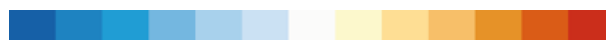


Abb. 38: Bipolare Farbreihe

Für eine thermische Aussage verläuft die Helligkeitsabstufung über die Farbkonvention *Warm-Kalt-Wirkung* von Blau als Kältewerte über in ein neutrales gedecktes Weiß bis sie auf der gegenüberliegenden Seite in einem dunklen Rot münden. Dies führt bei Farbreihen, durch die *kritische Klasse* in der Mitte, immer zu einer ungeraden Farbklassenanzahl (s. Abb. 38).

#### 4.8 Farbmodelle in Computergraphik und digitaler Kartographie

Wissenschaftlich definierte Farbmodelle, hardwareorientiert wie auch benutzerorientiert, stellen die Voraussetzung für eine geeignete Farbgestaltung dar. Eine grundsätzliche Anforderung besteht darin, additive und subtraktive Farbmischsysteme für geräteabhängige Farbbereiche (*Gamut*) zu spezifizieren.

Die hardwareorientierten Farbmodelle entsprechen der technisch-physikalischen Farbbeschreibung der Ausgabegeräte, dabei wird zwischen dem RGB-Farbordnungssystem für additive Farbmischungen und dem *CMYK*-Modell für die subtraktiven Farbmischungen unterschieden. Beide Farbsysteme stehen sich diametral gegenüber und lassen sich auf einem gemeinsamen Kubus abbilden (Foley et al. 1997, S. 585). Die Unbuntöne Weiß und Schwarz stellen jeweils den Maximalwert der beiden Mischsysteme dar und verbinden diese durch die Unbunt- oder Grauwertlinie. Durch ihre Abhängigkeit voneinander wird beim Mischen zweier Grundfarben (*Primärvalenzen*) des einen Systems die Grundfarbe des anderen Systems erzeugt (s. Abb. 39). Dabei ist eine direkte Farbfestlegung bzw. eine

Änderung durch den Benutzer weniger geeignet. Denn für eine Helligkeitskorrektur eines *Farbtone* in diesen Modellen ist eine nichtproportionale Änderung der anderen miteinander korrelierenden Farbkomponenten erforderlich (Brown und Feringa 2003, S. 39).

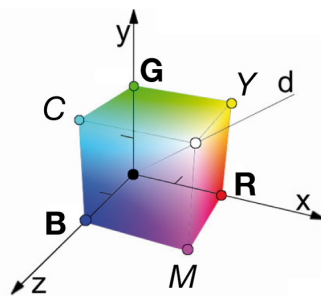


Abb. 39; RGB- und CMY-Farbmodell mit Grautonlinie d

Durch diese Eigenschaften erfolgte die Weiterentwicklung auf der Basis des *RGB*-Farbraums hin zu benutzerorientierten Farbmodellen (Brown und Feringa 2003, S. 41). Sie unterscheiden sich von hardwareorientierten Modellen darin, dass die Farbkomponenten, die näherungsweise die physiologisch-psychologische Farbwarnahme des Menschen repräsentieren, getrennt von der Helligkeitsangabe behandelt werden. Ihre Umformung erfolgt durch die Rotation der Grauwertachse in die Senkrechte und der Verebnung der *Primärvalenzen* des *RGB*- und *CMY*-Farbmodells. Die Länge der vertikalen Grauwertachse variiert in Abhängigkeit des beschriebenen Farbmodells. So verteilen sich die Unbuntfarben im *HSV*-Modell nur bis auf die verebneten *Primärvalenzen*, da Weiß als Buntton definiert wurde. Das *HSV*-Modell ist eines der ersten benutzerfreundlichen Farbmodelle in der Computergraphik und kann über die Eigenschaften *Farbton* (*Hue*), *Sättigung* (*Saturation*) und *Helligkeit* (*Value*) beschrieben werden. Die Farbabfolge im Modell entspricht der Reihenfolge des *CIE*-Normfarbraums und beginnt mit der Winkelangabe  $0^\circ$  für die Farbe Rot, folgend mit Gelb – Grün – Cyan – Blau – Magenta. Die Angabe für die Sättigung steigert sich radial zur *Unbuntachse* und erzielt seinen reinen *Farbton* am äußersten Rand bei einem Helligkeitswert von 1. Der Helligkeitswert verläuft dagegen senkrecht zum „Farbkreis“, d.h. parallel zur *Unbuntachse* und bestimmt die physikalische Leuchtstärke der Farbe (s. Abb. 40).

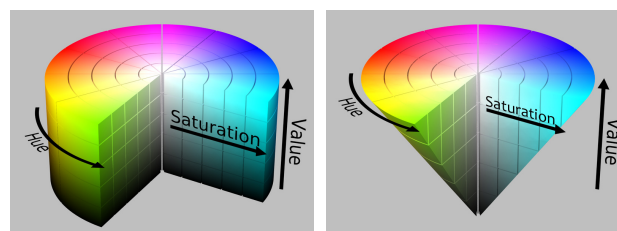


Abb. 40: HSV- Modell

Die zylindrische Form kann an den Stellen der Gleichfarbigkeit für alle Farbtöne, dies entspricht Bereichen mit geringen Helligkeitswerten und hoher Sättigung, zu einem auf der Spitze stehenden Kegel zusammengefasst werden. Aufgrund der Behandlung der Farbe Weiß als Buntton, kann Weiß die gleiche Sättigung aufweisen wie ein beliebig anderer *Farbton*. Das wirkt sich aber bei einer Dunkelstufenänderung nachteilig aus. Das bedeutet: Bei einer Bildumwandlung von bunt zu unbunt ist eine Änderung mit nur einer Variablen nicht möglich. Diese nachteilige Eigenschaft greift das *HSL*-Modell auf, welches die Farbe über die Variablen *Farbton* (*hue*), *Sättigung* (*saturation*) und der relativen *Helligkeit* (*lightness*)

bestimmt. Es leitet sich wiederum aus dem *RGB*-Modell ab, verebnet aber nicht wie das *HSV*-Modell den Weißton auf die Ebene der *Primärvalenzen*. Dadurch bildet sich ein Doppelkegel aus, er erzielt seine volle *Farbsättigung* bei einem mittleren Helligkeitswert von 0,5 (s. Abb. 41). Eine Reduzierung der Buntheit zu einem Grautonbild lässt sich durch dieses Modell ausschließlich über die Variable *Sättigung* erzielen.

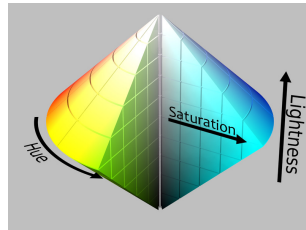


Abb. 41: HSL-Modell

Abgeleitet vom ursprünglichen *HSV*-Farbmodell existieren noch weitere Farbmodelle, so z.B. das *HSB*-Farbmodell mit absoluter Helligkeitsangabe (*Hue/Saturation/Brightness*) oder das *HSI*-Farbmodell mit seiner Lichtintensitätsangabe (*Hue/Saturation/Intensity*). Die gebräuchlichsten Farbmodelle sind für die Bildbearbeitung oder für eine direkte Farbwahl mittels Farbpipette weiterhin das *HSV*-Modell bzw. das *HSL*-Modell. Dabei liefern sie durch die lineare Interpolation bedingt zwischen zwei identischen, aber in verschiedenen Farbräumen, definierten Farben völlig unterschiedliche Ergebnisse. Erst von der französische COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIREAGE (*CIE*) festgelegte Spezifikation des *CIE-L\*u\*v\** für Lichtfarben und des *CIE-L\*a\*b\** für Körperfarben können Transformationsfehler zwischen den unterschiedlichen Farbmodellen vermieden werden, da die *CIE*-Farbräume eine geräteunabhängige Darstellung gewährleisten und einen Farbverlust bei der Umwandlung vermeiden (CIE S 014-4/5 von 1976; ISO 11664-4/5).

Weiterführende Literatur über die Spezifikation des Normfarbraums, der *Uniform Color Space (UCS)* Farbräume mit ihren *CIE-L\*u\*v\** und *CIE-L\*a\*b\** Farbräumen, dessen euklidische Abstände annähernd den gleichen menschlichen Empfindungsabständen entsprechen, findet sich unter Falk und Welsch (Falk et al. 1986; Welsch und Liebmann 2004).

## 4.9 Schummerung

Die Schummerung ist neben den Schattenschraffen und den Reliefdarstellungen von Tanaka (Tanaka 1950) eine entscheidende kartographische Gestaltungstechnik, die dazu dient, den räumlichen Eindruck in einer planaren Karte durch einen höheren plastischen Eindruck zu steigern (Imhof 1965, S. 183). Durch die visuellen Erhebungen der stetigen flächenhaften Helldunkelverläufe wird versucht, dem Kartennutzer die Zugänglichkeit und folglich das Kartenverständnis zu erleichtern. Bei der Schummerung oder auch *Schattenplastik* wird zwischen der Böschung-, Schräglicht- oder der Kombinationsschummerung unterschieden.

- Die Böschungsschummerung wird durch ein senkrechtes paralleles Licht simuliert. Durch ihre unabhängige Hangexposition und ihre weißen ebenen Flächen entsteht ein objektives Schummerungsbild. Aufgrund ihrer eingeschränkten Anschaulichkeit wird sie nur selten genutzt.
- Die Schräglichtschummerung oder Schräglichtschattierung (Imhof 1965, S. 183) wird durch ein schräg einfallendes Richtungslicht simuliert, was zu einem anschaulichen

Ergebnissen führt. Dabei kommt es zu einer leichten gleichmäßigen Grautönung in den horizontalen Bereichen, welche die weitere Kartengestaltung und -inhalte nachträglich negativ beeinflusst.

- Die Kombinationsschummerung nutzt die Vorteile beider Verfahren. Das erzeugt in den Lichthängen eine dezente, in den Schattenhängen eine starke Schattierung, mit einem hohen Weißton in den Ebenen. Mokronowski postulierte, dass „nur die Schummerung mit kombinierter Beleuchtung [...] ein anschauliches und unverfälschtes Bild“ liefere (Mokronowski, S. 46 ff).

Wie in der Malerei wird meist auch in der Kartographie die Lichtquelle links oben positioniert. Dies entspricht in den konventionellen Karten einer nordwestlichen Platzierung. Der wirkungsvollste Effekt entsteht nach Yoëli bei einem Azimut von  $135^\circ$  und einem Zenitwinkel von  $45^\circ$  (Yoëli 1967). Bei einer gegenüberliegenden Platzierung der Lichtquelle mit einem Azimut von  $315^\circ$  käme es zur bekannten Reliefumkehrung im Gefälleverlauf (Berge werden zu Täler, Täler zu Berge) (MacEachren 1995, S. 143) (s. Abb. 42).

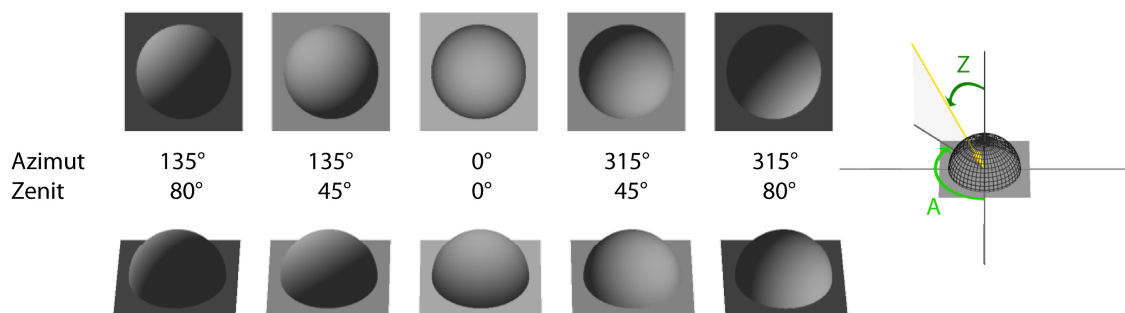


Abb. 42: Beleuchtungsvarianten

Mit Hilfe der Schummerung wäre theoretisch eine Interpretation der Hangneigung denkbar, dies kann aber nur in den Schattenzonen der Hänge gewährleistet werden. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die geometrische Genauigkeit, wie beispielsweise bei Höhenlinien, nicht erreicht wird (Imhof 1965, S. 183) und infolge entstehender Kontrasteffekte (z. B. *Mach-Band-Effekt*) die Genauigkeit der Darstellung reduziert werden müsste (Ware 2004, S. 93). Ein weiterer Nachteil zeigt sich bei Verwendung nur eines parallelen strahlenden Richtungslichts, das bei quer zur Lichtquelle liegenden Hanglagen zu harten Kontrasten im Schattenbereich führt und für einen fehlenden Kontrastunterschied bei ineinander übergehenden Hanglagen mit gleichen Beleuchtungswinkeln sorgt (s. Abb. 43). Eine Abhilfe verspricht hierbei die Variation der Beleuchtung, die in den oben genannten Problembereichen, die Lichtrichtung lokal verändert und so eine Kontrastdämpfung bzw. einen Kontrastunterschied hervorruft (Imhof 1965, S. 202). Das Resultat kann im konventionellen Schummerungsverfahren je nach Variation unterschiedlich ausfallen und liegt so im Ermessen des Kartenautors.

Im Bereich der Computergraphik ist eine individuelle manuelle Lichtrichtungsänderung an explizit notwendigen Stellen nicht möglich, da die Lichtquellen in den lokalen bzw. globalen Beleuchtungsmodellen die gesamte Oberfläche beeinflussen. Das heißt, um den Effekt der Beleuchtungsvariation zu erzielen, bedarf es der Simulation einer diffusen Ausleuchtung. Dies kann durch Platzierung mehrerer lokaler idealisierter Lichtquellen (*faked global lighting*) (s. Abb. 45) oder dem Einsatz eines globalen Beleuchtungsmodells mit realen physikalischen

Lichteigenschaften, welche die Eigenschaften von Streulichtern bzw. indirekten Reflexionen in seinen Berechnung mit einbezieht, erfolgen (s. Abb. 46). Rase zeigte in seinem Beispiel anhand eines kontinuierlichen Oberflächenmodells über die landschaftliche Attraktivität Deutschlands, dass eine computergraphisch angewandte Beleuchtungssimulation schon mit einer Lichtquelle zu einem plastischen Reliefergebnis führt (Rase 1998, S. 124).

Das folgende Relief, in Anlehnung an Imhofs Beleuchtungsvariationen, variiert in seiner Ausleuchtung aufgrund dreier unterschiedlicher computergraphisch erzeugter Beleuchtungsberechnungen (Imhof 1965, S. 205). Die Ausleuchtung von Abb. 43 wurde mit einer lokalen Hauptlichtquelle nach den Werten von Yoëli ausgerichtet. Abb. 44 und Abb. 45 zeigen die Veränderung mit einer zweiten Hilfslichtquelle von recht oben, die ihren Einfluss in Abb. 45 durch eine grüne Lichtquelle besser verdeutlicht. Abb. 46 veranschaulicht die computergraphische Simulation von partiellen Lichtänderungen durch ein globales Beleuchtungsmodell.

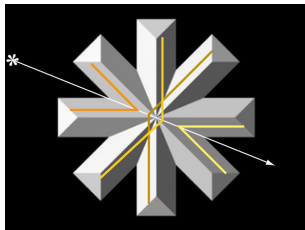


Abb. 43: Schummerung mit einer Lichtquelle nach Yoëli

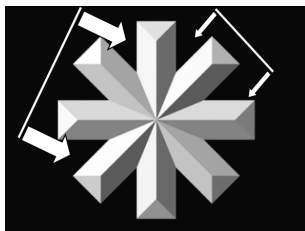


Abb. 44: Schummerung mit zwei Lichtquellen



Abb. 45: Einfluss der Nebenlichtquelle in Grün



Abb. 46: Schummerung durch globales Beleuchtungsmodell

## 4.10 Thematische Kartengestaltung

Es existiert eine Vielzahl möglicher Darstellungsformen und -techniken, um geocodierte Sachverhalte generalisiert und auf verschiedenen Ausgabemedien (*Papier, Monitor, Smartphones*) wiederzugeben. In der gängigen kartographischen Literatur findet sich vor allem die Unterscheidung zwischen thematischen und topographischen Karten (Arnberger 1977; Hake et al. 2002, S. 27). Während in der thematischen Karte die Hervorhebung räumlicher Strukturen von einer oder mehreren geographischen Attributen oder Variablen, wie beispielsweise die Bevölkerungsdichte, gezeigt wird (Slocum et al. 2005, S. 2), stellt die topographische Karte vorwiegend die Form, Gliederung und Bedeckung (Imhof 1972, S. 12) der Erdoberfläche dar.

Die Grenze zwischen thematischer und topographischer Karte ist nicht klar definiert, da jede topographische Karte thematische Inhalte (z. B. politische Grenzen) enthält. Werden „graphisch betonte thematische Darstellungen“ auf eine topographische Karte platziert, so wandelt sich diese zu einer thematischen Karte (Hake et al. 2002, S. 27). Demnach können Themakarten mit ihren thematischen Bezug klar zu der Gruppe der thematischen Karten zugeordnet werden.

Einer der ersten und bekanntesten thematischen Temperaturkarten in der Geschichte der Kartographie dürfte die Isothermenkarte von Alexander von Humboldt aus dem Jahre 1817 sein. Weitere kartographische Gestaltungen folgten zur Darstellung umweltbezogener Temperaturdaten mit dem Ziel, diese anschaulich für den Kartenleser aufzubereiten. Dabei etablierten sich in der konventionellen Kartographie aber nur zwei typische Ausgangsformen in der Kartengestaltung, zum einen die Isolinienkarte<sup>28</sup> und zum anderen die daraus abgeleitete Schichtstufenkarte<sup>29</sup> für kontinuierliche und diskrete Daten.

### Isolinienkarten

Isolinienkarten zeichnen sich durch die Interpolation gleicher Werte, die durch Verknüpfung geobasierter Punktdaten abgeleitet wurden, aus. Dabei hängt das Resultat bei einer automatischen Interpolation vom genutzten Algorithmus ab und kann demnach sehr unterschiedlich ausfallen. Einige Interpolationsmethoden und deren Ergebnisse werden bei Slocum vorgestellt (Slocum, McMaster et al. 2005). Ihre Bedeutung in einer Karte variiert mit ihrer Datengrundlage. Aus Höhenkoten gewonnene Höhenlinien (*Isohypsen*) einer topologischen Karte geben die Geländeformen in festen Höhenabständen wieder. Meteorologische Wetterdaten hingegen verdeutlichen den barometrischen Druck (*Isobaren*) und deren Temperatur (*Isothermen*) über ein geographisches Gebiet. Dabei bilden sich unterschiedlich dichte Bündelungen (Scharungen) aus, deren veränderte Dichte einen Grad für die Steigung im Gefälleverlauf verdeutlicht. Die Linienanordnung erklärt zwar das Gefälle, aber nicht dessen Richtung. Dieser Nachteil besteht in unübersichtlichen und kleinräumigen Gebieten,

---

<sup>28</sup> Isolinienkarte: isoline, contour oder isarithmic map.

<sup>29</sup> Schichtstufenkarte: isogram map oder hyposmetric tints.

da die Interpretation von steigenden oder fallenden Werten durch fehlende Informationen an der Isolinien nicht abzuleiten sind (Phillips 1984). Abhilfe schaffen gerade in kleinräumigen Darstellungen von Senkenbereichen die Platzierung von Richtungspfeilen oder Fallstrichen in Fallrichtung bzw. der Einsatz von positiven oder negativen Vorzeichen (Imhof 1965, S. 165). In großräumigeren Bereichen behilft man sich mit der Ausrichtung der Hauptlinienbeschriftung. Hierbei wird entweder die Isolinie im Kartenbild für die Beschriftung unterbrochen oder an den offenen Isolinienenden außerhalb des Kartenausschnittes platziert. Beide Methoden berücksichtigen die Orientierung der Schrift entweder hangaufwärts oder aufrecht orientiert (Imhof 1965, S. 163). Das bedeutet nach der Lehre der Typographie, dass die Grundlinie der Schrift parallel zur Isolinie verläuft. Im hangaufwärts orientierten Fall weist der Schriftfuß zur Talseite hin. Im aufrecht orientierten Fall orientiert sich die Schrift zur Lesbarkeit hin, welche den Schriftfuß zur Blattunterkante ausrichtet. In beiden Fällen wird eine gleichmäßige Verteilung der Beschriftung angestrebt, um eine flächige Abdeckung der nötigen Angaben für den Kartennutzer zu erzielen.

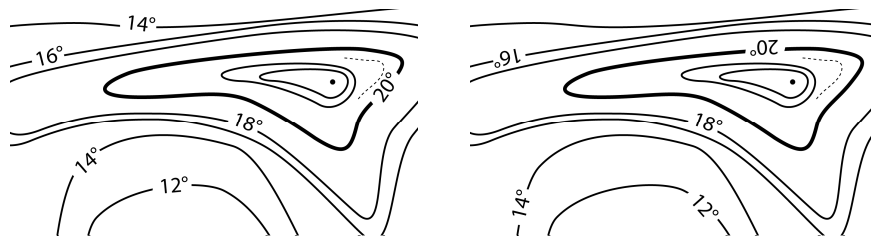


Abb. 47: Isolinienkarte – aufrecht [links] und hangaufwärts orientiert [rechts]

Der Vorteil von Isolinien ist ihr uneingeschränkter Einsatz innerhalb des gewählten Kartenausschnittes. Das bedeutet, dass sich die Grenzen des wiedergegebenen Wertebereichs für die Isolinien ausschließlich an den natürlichen Grenzen der zugrunde gelegten Daten orientieren. Diese sind beispielsweise Angaben von Berghöhen, Tiefenwerte von Gewässern oder auch Temperatur-Extrema, aus dem darzustellenden geographischen Gebiet. Einschränkungen finden sich grundsätzlich bei Isolinienkarten bei kleinen Maßstäben (1:200.000) und bei flach auslaufenden Geländeformen, wo ihr reliefartiger Zusammenhang durch die gewählte Äquidistanz verloren geht.

Darüber hinaus entwickelten sich weitere Verfahren, Isolinien mit Linienfarben anzureichern, um Informationen über den Gebietstyp (*Regionalfarben*) bzw. die Gefällrichtung zu vermitteln oder durch unterschiedliche Linienstärken den plastischen Eindruck eines Reliefs zu erhöhen. Ein Beispiel für wechselnde Isolinienfarben ist die Deutschen Topographische Karte. Sie variiert ihre Farbgebung in Abhängigkeit zu dem darunterliegenden Gelände, so überlagern die satteren Isolinienfarben die darunter befindlichen Regionalfarben.

Isohypsen	Topographischer Bereich
Schwarz	Fels und Gestein
Braun	Vegetation
Blau	Wasser

Tab. 7: Farbwahl der Isohypsen in einer deutschen topographischen Karte

In klimatischen Karten ist diese Darstellung aus einer mittleren Höhe mit dem Gelände nicht möglich, da außer dem Lagebezug keine weitere semantische Verbindung zum Gelände besteht. Die Messdaten werden daher nach ihren Isowerten entweder durchgehend monochrom oder mit einer farblichen Temperaturabstufung für die Darstellung in der Gradientenrichtung über den vorhandenen Wertebereich eingefärbt. Die Darstellungsgenauigkeit von Isolinienkarten bleibt dabei im Vergleich zu Schichtstufenkarten, nach Imhof, auch nach der notwendigen Generalisierung für den geplanten Kartenmaßstab präziser (Imhof 1965). Für eine Kombination innerhalb Isolinienkarten mit anderen linienhaften Objekten befürwortet Rase mit den Einschränkungen, dass keine besonderen Isoliniensignaturen verwendet werden und die vorhandene Scharung nicht zu dicht ausfällt (Rase 1998, S. 101). Dabei sollten nach Dent die Isolinien dicker als die Liniensymbole ausfallen (Dent 2008, S. 165). Weitere bekannte Varianten von Isoliniendarstellungen sind schattenplastische Höhenkurven und steigende bzw. fallende Strichstärken zur Höhe (Imhof 1965, S. 172; Rase 1998, S. 92). Diese Verfahren veranschaulichen die Gefällrichtung über *Hell-Dunkel*-Effekte in der Linie oder durch ihre veränderte Linienstärke. Dadurch kann auf weitere Elemente zur Anzeige der Gefällrichtung wie dem Einsatz von *Gefällepfeilen* verzichtet werden. An ihre konstruktiven Grenzen stößt die Methode der ansteigenden Linienstärke bei einer zu großen Isolinienanzahl oder einer zu dichten Scharung im steileren Gefällebereich.

### Schichtstufenkarten

Schichtstufenkarten entstehen durch die logisch geordnete Einfärbung der Flächen zwischen benachbarten Isolinien (s. Abb. 48). Nach Tainz sollte man für die Flächenfarben des abgesetzten Schichtenverlaufs Farbreihen aus Vollfarben heranziehen, da sie meist in ihrer *Farbhelligkeit* (*brightness/value*) und ihrem *Farbton* (*hue*) variieren (Tainz 2001a, S. 307). So ist es möglich, auf Konturlinien (Slocum et al. 2005, S. 288) wie auch auf die Beschriftung zu verzichten, ohne die Karteninterpretation zu beeinträchtigen. Aufgrund der Tatsache, dass Schichtstufenkarten durch ihre gestuften Flächenfarben das Stetigkeitsprinzip der kontinuierlichen Daten unterdrücken, kann nur mithilfe einer geschickten Farbwahl in Bezug auf die Schichtstufen ein Stetigkeitsverlauf erzeugt werden (Hake et al. 2002, S. 481). Imhof betont in seinem Ansatz, die Bedeutung der Flächenfarbtöne, weil sie Bereiche zusammenfassen, den Überblick erleichtern, das Thema charakterisieren und die Schönheit der Karte bei guter Farbwahl hervorheben (Imhof 1972, S. 144).



Abb. 48: Schichtstufenkarte

Durch einen entsprechenden diskreten Farbverlauf bzw. einen assoziierbaren Farbverlauf (z.B. Blau für Kälte, Rot für Wärme) vermitteln die Schichtstufenkarten implizit die



Gefälleinformation, die durch die Komplementierung einer Legende Interpretationsfehler ausschließen lässt. Für diesen Kartentyp wirkt sich einzig nur ihre notwendig größere Klassifizierung aufgrund der begrenzten Differenzierbarkeit der Flächenfarben nachteilig aus (s. Abb. 48). Dies hat zur Folge, dass die Genauigkeit im direkten Vergleich zur Isolinienkarte geringer ausfällt und die Schichtstufenkarte eher in kleinräumigen Bereichen ihre Anwendung findet (Imhof 1965). Zusätzlich weist Rase bei der Anwendung von Schichtstufen (*Isoflächen*) auf die reduzierte Möglichkeit weiterer „Darstellungselemente oder -formen auf der gleichen Karte“ hin (Rase 1998, S. 101).

Hinsichtlich der Wahrnehmungs- und Kognitionseffekte stellte Phillips 1984 in seinen Untersuchungen Schichtstufen- und Isolinienkarten gegenüber. Mit der Annahme, dass ein erheblicher Prozessierungsunterschied notwendig sei, um sich mental ein Bild mit flächen- bzw. linienhaften Elementen vorzustellen und dem Betrachter möglich sei ohne Vorwissen und Erfahrung eine Reliefdarstellung zu einem mentalen Bild zu verarbeiten. Dabei stellte er fest, dass bei flächig eingefärbten Schichten, die eine klare Trennung dieser auch bei einem größeren Kartenausschnitt bewirken, implizit eine mitgelieferte Gefälleinformation überwiegt, um ein mentales 3D-Bild zu prozessieren (Phillips 1984). Phillips ordnete seine Erkenntnisse den kognitiven Prozessen *low-level-processing* oder *level-one-tasks* zu, deren Begriffe auf Olson und Board zurückgehen (Olson 1976; Board 1984). Diese beiden untersuchten anhand von Zeichen, diejenigen kognitiven Prozesse, die für die Wahrnehmungsunterschiede zwischen den graphischen Variablen *Farbe*, *Form* und *Größe* verantwortlich waren. Dabei lösen Schichtstufenkarten bei einer Helligkeitsabstufung der Farben nach den Farberkenntnissen kognitiver Reaktionstests einen präattentiven Prozess beim Betrachter aus.

Eine Verbesserung erzielten Kumler und Groop mit dem Einsatz eines kontinuierlichen Farbverlaufs über den gesamten dargestellten Wertebereich der Schichtstufenkarte (Kumler und Groop 1990). Sie untersuchten anhand einer Kombination aus einer herkömmlichen Isolinienkarte, einem Blockbild und einem kontinuierlichen Farbverlauf die effektivste Informationsvermittlung. Hierzu stellten sie in einer umfassenden Studie mit 67 Studenten gezielte Testfragen (Suche nach der größten Höhe, etc.) und stellten fest, dass die Verbindung zwischen dem kontinuierlichen Farbverlauf und der überlagerten Isolinien-darstellung die beste Variante für die Informationsvermittlung sei (Kumler und Groop 1990, S. 288). So konnte die Transferleistung, assoziierte Farbwerte aus der Legende mit denen der Karte zu vergleichen, reduziert werden (Slocum et al. 2005, S. 288). Ein vergleichbares Beispiel stammt von Eyton, der sein kontinuierliches Farbschema aus dem spektralen Farbbereich generierte und dieses mit schwarzen Isolinien kombinierte (Eyton 1990).

Ware kombinierte dagegen einen kontinuierlichen flächigen Farbverlauf mit überlagerten farblichen Isolinien über den gesamten Höhenbereich einer Seekarte (Ware 2004, S. 134). Er ging davon aus, dass die Einfärbung der Konturlinien mit Pseudofarben eine sinnvolle Unterstützung für unerfahrene Kartennutzer darstelle. Auch auf Expertenseite ergibt sich zur Entscheidungsfindung eine mögliche Verbesserung durch die schnellere Erfassung von Datenzusammenhängen (Ware 2004, S. 133). Kennelly und Kimerling (2001) griffen hingegen die Methode von Tanaka auf und ergänzten seine Isoliniendarstellung mit Flächenvolltönen. So entwickelten sie eine Schichtstufenkarte mit schattenplastischen monochromen Höhenkurven (Slocum et al. 2005, Color Plate 51).

Nach der Darlegung der Gestaltungsmöglichkeiten und Konventionen, die aus Erfahrung, aus empirischen Ergebnissen und kognitiven Test für konventionellen Karten gewonnen werden konnten, wird im folgenden Abschnitt auf die Gegenüberstellung der Unterschiede zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Verfahren zur Kartenerstellung näher eingegangen.

## 5 3D-Computergraphik versus 2D-Kartographie

In der 3D-Computergraphik verfolgt man das Ziel der naturalistisch exakten Beschreibung der Umweltobjekte unter Berücksichtigung ihrer physikalischen Eigenschaften. Ihre oftmals geometrisch reduzierte Oberflächenrepräsentation von realen Objekte wird mit aufwändigen Materialtexturen und Beleuchtungsverfahren zu realitätsnahen, authentisch wirkenden Szenen gestaltet. Aus diesen Erfahrungen und Erkenntnissen entstanden die ersten virtuellen 3D-Stadtmodelle. In ihrer konstruktiven Gestaltung auf GIS-basierenden *Primärmodellen* wurde der hohe Realitätsgrad mit komplex erstellten photorealistischen Gebäudetexturen erbracht (Zanini 1998). Dabei vernachlässigte man die Anforderungen an bestimmte Nutzergruppen wie auch die adäquate Informationsvermittlung nach dem Motto „Weniger ist mehr!“.

Durch die prozessualen Bemühungen von Döllner et al. seit 2003 auf dem Gebiet der illustrativen Computergraphik und des *Nicht-Photorealistischen-Rendering* (*NPR*<sup>30</sup>) wurde der hohe Photorealismus reduziert und der Abstraktionsgrad erhöht (s. Abb. 49). In der nicht-photorealistischen Computergraphik findet beispielsweise eine skizzenähnliche Linien-gestaltung entlang von Kantenverläufen statt. Die Farben und die Detaildichte werden durch Dämpfung (Aufhellung) bzw. Herausnahme der Flächentextur und durch Simulation diffuser Schattenbereich entlang der Grundrisskante reduziert (Döllner et al. 2003; Döllner et al. 2006; Döllner 2007; Döllner 2007).

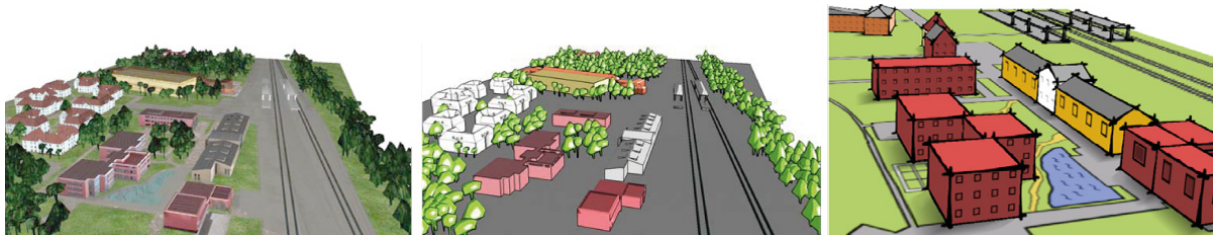


Abb. 49: Photorealistisch, NPR und NPR mit Schattenwurf [von links nach rechts] (Döllner und Buchholz 2005)

Weiterführende Literatur über *NPR*-Techniken und Darstellungen finden sich in der einschlägigen Literatur von Gooch und Goldstein (Gooch und Gooch 2001; Goldstein 1999).

Ein weiterer Schritt der Abstraktion im rechnergestützten Graphikprozess für virtuelle 3D-Stadtmodelle konnte durch Lorenz et al. verzeichnet werden. Hier sind besonders die von ihm geschaffenen multiperspektivischen Ansichten<sup>31</sup> seiner depressiven und progressiven Perspektive auf der Grundlage von Hölzel und Berann zu nennen. Der Übergang zwischen den Perspektiven zeigt eine Kombination aus naturalistisch wirkenden und abstrahierten Darstellungen. So bilden Satellitenbilder und Grundrisskarten bzw. Stadtkarten die Basistextur für den gekrümmten Flächenverlauf, die mit einem digitalen Stadtmodell und ihren *Points Of Interest* (*POI*) angereichert wurden (Lorenz et al. 2009, S. 175). So

---

<sup>30</sup> Abstrakte Darstellungen in der Computergraphik, die nicht den naturalistischen Gedanken der Computergraphik entsprechen, werden auch *Non-Photorealistic-Rendering* (*NPR*) bezeichnet.

<sup>31</sup> Bestehend aus der Vogelperspektive, dem Übergangsbereich und der Zentralperspektive.

verschmilzt die 3D-Computergraphik immer mehr mit den Bereichen der kartenverwandten Darstellungen.

Dagegen hatte die konventionelle Kartengestaltung immer die Aufgabe, eine metamorphische orthogonale Darstellung der Umwelt in einer maßstabsgetreuen 2D-Karte zur optimalen Informationsvermittlung für den Kartennutzer wiederzugeben. Mit dem Verlassen der Draufsicht in perspektivischen Kartenprojektionen erreichte die Karte für den Kartennutzer eine weitere Steigerung hinsichtlich ihrer Anschaulichkeit. Hierbei flossen Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Bereich der Malerei in die kartographischen Regelwerke und Gesetze ein. Dabei galt für lange Zeit die 2D-Zeichenebene als die grundlegende Konstruktionsebene für die orthogonalen bzw. perspektivischen Kartenprojektionen, wobei ein fester Standortbezug und Kartenblattausschnitt gegeben war. Die digitale kartographische Verarbeitungstechnik hat sich schon seit Jahren in der 2D-Computergraphik etabliert. Der Übergang in die dritte Dimension ist dagegen eine Herausforderung in diesem Bereich, allerdings ist ihr Mehrwert in der Fachwelt nicht ganz unumstritten.

Durch die kartographischen 3D-Visualisierungen, den sogenannten kartographischen Raumbildern (Hake et al. 2002, S. 176; Buchroithner und Schenkel 2001, S. 116), die über echte räumliche Konstruktionsräume erstellt wurden, werden nicht nur die allgemeingültigen Gestaltungsregeln aus der 2D-Kartographie beeinflusst, sondern auch der Herstellungsprozess verändert. Das heißt, die Gestaltung der Kartengraphik unterliegt der erreichten approximierten Umweltinterpretation der 3D-Computergraphik mit ihren Beleuchtungs- und Schattierungsmodellen sowie ihren Materialeigenschaften. Im Produktionsprozess kann die Festlegung des Bildausschnitts durch eine virtuelle Kamera ebenso nach der konstruktiv geometrischen Gestaltung erfolgen und ist nicht wie im zweidimensionalen perspektivischen Produktionsprozess vorab notwendig. Abb. 50 verdeutlicht den Wechsel der Prozessabfolge beim Gestaltungsschritt zwischen 2D- und 3D-Autorensystemen.

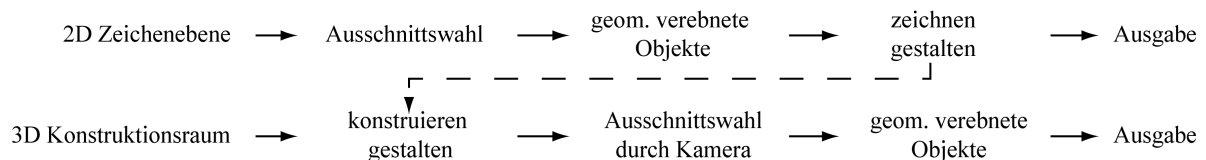


Abb. 50: Vergleich der 2D-Zeichenebene bezüglich des 3D-Konstruktionsraums

Die Bezeichnung 2D-Zeichenebene stammt aus der Herleitung, die sich über die künstlerische und zeichnerische Erstellung auf einer planaren Grundlage definiert. Eine räumliche Abbildung ist das Ergebnis verebneter geometrischer Projektionen für diese Ebene. Dagegen leitet sich der 3D-Konstruktionsraum aus dem Zusammenhang ab, dass es den Zeichenvorgang als solchen nicht mehr gibt. Die Gestaltung erfolgt über körperhaft (räumlich) konstruierte Formprimitive und ihrer anschließenden Modellierung. Abb. 51 zeigt die Verflechtung beider Visualisierungsverfahren und ihre grundlegenden Unterschiede in der Dimension, der Projektion, der Datengrundlage und der Darstellungsabsicht.

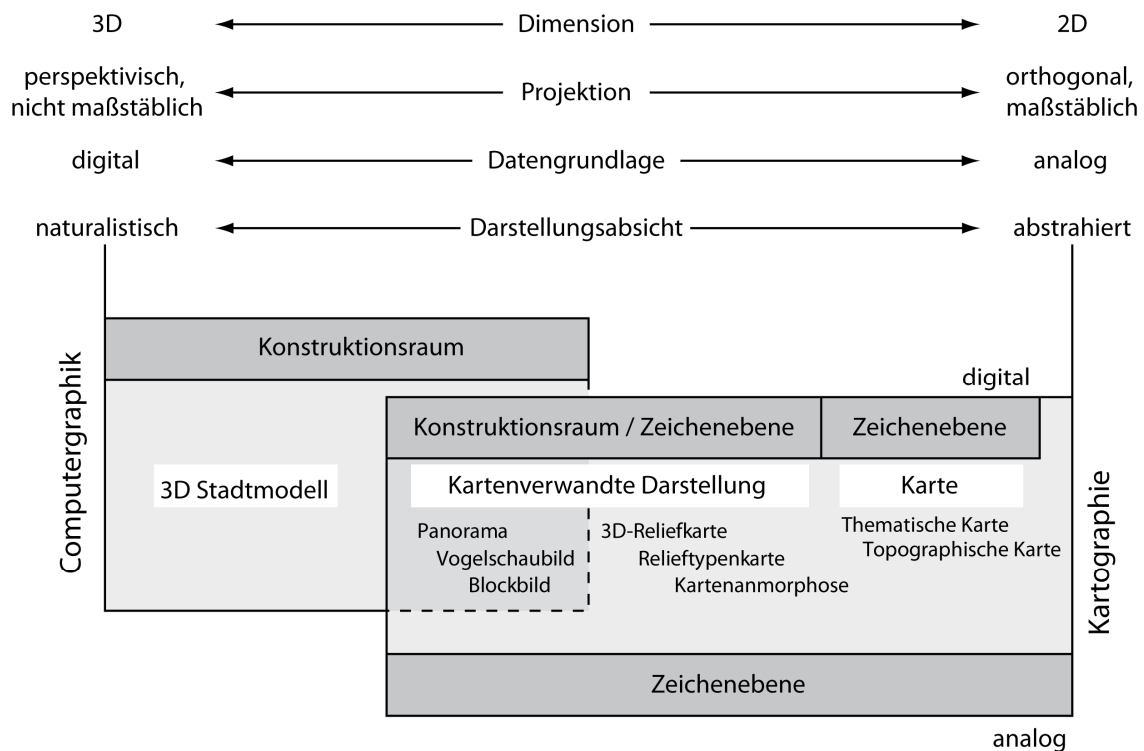


Abb. 51: Konstruktionsraum der 3D-Computergraphik versus 2D-Kartographie

Tab. 8 verdeutlicht hierbei noch einmal die Unterschiede zwischen 3D-Computergraphik und 2D-Kartographie. Zu den unterschiedlichen Approximationsansätzen für die Darstellung der Umwelt und ihrer ausgehenden Gestaltungsdimension für Zeichnung und Konstruktion oder dem freien Standortwechsel kommen noch weitere Unterschiede hinzu.

Markant ist hierbei, dass in einer 3D-Umgebung immer das Objekt zur Plastizitätssteigerung mit einer Schattierung versehen wird. Diese wäre vergleichbar mit einer untrennbaren Verbindung einer konventionellen Kartengraphik mit einer Schummerung. Folglich wird aufgrund der Farbkonstanz der Farbgradient in einem Objekt als gleich wahrgenommen, jedoch ist die Farbe im Nahbereich ohne den Objektzusammenhang erkennen zu können als eigener Farbton zu erkennen. Dies erschwert den Vergleich mit einer Legende, wenn die Farbe als Informationsträger dient.

Eine weitere Besonderheit der 3D-Computergraphik ist, die Visualisierung kartographischer Grundelemente, wenn diese mindestens eine in sich stimmige und geschlossene Fläche repräsentieren. Das heißt, ihre *Knoten-Kanten-Flächen*-Relationen müssen fehlerfrei sein und dürfen keine Verschränkungen oder identische Knoten enthalten. Daraus ergeben sich für die Bildung von Linien zwei Varianten der Visualisierung, damit diese im Renderverfahren als ein sichtbares Element erscheinen: Erstens, das Gestalten einer Umrisslinie (*Kontur*), da eine Linienbreite so nicht existiert, was zu einer Flächenbildung führt, oder zweitens, die Umformung zu einem Körper (Quader, Zylinder).

Darüber hinaus ist der Einsatz der konventionellen Kartometrie zur Analyse und Bewertung in räumlich perspektivischen Darstellungen mit ihren maßstabs- und größenverzerrenden Einflüssen, dies entspricht einer kartenverwandten Darstellung, nicht zu (s. Tab. 8).

	<b>3D-Computergraphik</b>	<b>2D-Kartographie</b>
<b>Approximation zur Umwelt</b>	physikalisch naturalistisch	abstrakt metamorphisch
<b>Gestaltungsdimension</b>	Konstruktionsraum	Zeichenebene
<b>Gestaltungsgrundlagen</b>	Gestaltungsansätze, Empfehlungen	Gestaltungsregeln/-gesetze, Empfehlungen
<b>geometrische Verortung</b>	mehrdeutig	Eindeutig
<b>Objektdarstellung</b>	räumliche Körper	verebnetes räumliches Abbild
<b>Punkt</b>	Kreis	Kreis (min.0,3mm)
<b>Linie</b>	Polygon, Spline	Linie (analog) Polygon, Spline (digital)
<b>Linienbreite</b>	Umriss-/Konturlinie	Linienstärke
<b>Fläche</b>	Mesh, Splineflächen, NURBS	Fläche (analog) geschlossene Polygon- /Splinefläche
<b>Flächenfüllung</b>	Vollfarbe/Mapping (Mapping durch Material oder Textur)	Vollfarbe/Muster/Verlauf
<b>Grundhelligkeit</b>	ambiente Lichtquelle (global)	Zeichengrundlage
<b>Ausleuchtung</b>	lokale/globale Lichtquellen	nicht vorhanden
<b>Helligkeit</b>	Blickrichtungsabhängig	konst. gleichmäßig
<b>Plastizität</b>	Schattierung	Schummerung
<b>Ansicht</b>	Kamerasichtfeld	Draufsicht
<b>Kartenergebnis</b>	Szene	Sekundärmodell
<b>Kartenmaßstab</b>	variiert	Konstant
<b>Kartometrie</b>	eingeschränkt möglich	uneingeschränkt möglich

Tab. 8: Unterschiede zwischen 3D-Computergraphik und 2D-Kartographie

Weitere Merkmale mit ihren Vor- und Nachteilen lassen sich aus Tab. 9 ersehen. Ihre Betrachtung stützt sich ausschließlich auf die digitale Verarbeitung zur Kartenerstellung im 2D- und 3D-Computergraphikbereich. Die konventionelle digitale Kartographie kann hierbei unter dem Bereich der 2D-Computergraphik eingeordnet werden.

3D-Computergraphik	2D-Computergraphik
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Freie Standortwahl</li> <li>+ Leichte Veränderbarkeit der Objekte</li> <li>+ Hohe gestalterische Variation</li> <li>+ Wechsel der Projektionsarten</li> <li>+ Räumliche Entzerrung bei überlagerten Einzelobjekten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Farbhelligkeit bleibt konstant</li> <li>+ Schummerung lokal veränderbar mittels gerasterte Grautöne</li> <li>+ Layerstruktur</li> <li>+ Maskierung- /Filtertechnik</li> <li>+ Farbton bleibt erhalten</li> <li>+ Keine Veränderung der Schraffurweite</li> <li>+ Anwendung konv. Gestaltungsregeln</li> <li>+ Multiperspektive Darstellungen</li> <li>+ Keine mathematischen physikalischen Zwänge und Abhängigkeiten</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Exakte Konstruktion notwendig</li> <li>– Lichteffekte beeinflussen die gesamte Szene</li> <li>– Farbhelligkeit variiert durch Licht-, Schattierungsmodell, Blickwinkel und Bildsynthese</li> <li>– Schattierung abhängig von Lichtmodell und Bildsynthese</li> <li>– Texturkompression bei flachen Blickwinkel</li> <li>– Verdeckung durch räumliche Nachbarobjekte</li> <li>– Keine Anwendung konv. Gestaltungsregeln</li> <li>– Projektionsart Software abhängig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kein Standortwechsel möglich</li> <li>– Verdeckung durch Überlagerung</li> <li>– Körper müssen verebnet konstruiert werden</li> <li>– Digitale Farbverläufe nur schwer umsetzbar</li> </ul>

Tab. 9: Vor- und Nachteile der 3D-Computergraphik und 2D-Computergraphik

Durch das Fortschreiten der Computertechnologie hält die dritte Dimension immer mehr Einzug in die kartographischen Darstellungen. Mit der Erfassung echter 3D-Daten, ihrer räumlichen Analysemöglichkeiten und ihrer räumlichen Visualisierungstechniken wird ihre Umsetzung immer wirtschaftlicher und populärer. Bereits in der Architektur, der Landschaftsplanung oder in virtuellen Stadtmodellen kommt die dritte Dimension zum Einsatz. Dabei hat sie nach Robertson den entscheidenden Vorteil, dass es dem Betrachter leichter fällt, räumliche, der realen Welt näher liegende Szenen zu interpretieren (Robertson 1990). Auch Patterson weist auf die natürliche menschliche Tendenz hin, räumliche Informationen eher in Profile als in planare Abbildungen zu visualisieren (Patterson 1999). Erfolgt deren Visualisierung zusätzlich nach Prinzipien der menschlichen Wahrnehmung, so ist der Prozess der Informationsvermittlung nach Strothotte am besten gegeben (Strothotte 1998). Das heißt, räumliche Darstellungen könnten demnach gerade unerfahrenen Kartenlesern zugutekommen, die Schwierigkeiten haben, sich aus einer klassischen planaren Karte ein räumliches *Tertiärmodell* vorzustellen und dieses in Relation zur realen Umgebung zu setzen. Shepherd propagiert darüber hinaus nicht nur die Vorteile der virtuellen räumlichen Darstellung durch den natürlichen Zugang, d.h. es werden keine mentalen Transformationsleistungen zwischen den Dimensionen benötigt. Sondern er betont auch den größeren Visualisierungsraum für die Entflechtung von Symbolüberlagerungen, einem Problem der 2D-Kartengestaltung, und die Einbringung weiterer Datenvariablen wie beispielsweise eines  $z$ -Wertes (Shepherd 2008, S. 201ff).

Dagegen beschränkt sich der Nutzen zentralperspektivischer 3D-Darstellungen nach Lind und Bingham auf die Gewinnung eines generellen Überblicks. Da räumliche Zusammenhänge in einer perspektivischen Darstellung, wie der Analyse von euklidischen Distanzen oder ihrer Formen, an ihre möglichen Grenzen stößt (Lind et al. 2003).

Unabhängig von den Eigenschaften und Einflüssen der georäumlichen Darstellung entstehen für den Kartennutzer weitere Veränderungen in der Kartenrepräsentation. So muss er auf seine Vorkenntnisse, die er aus dem 2D-Kartenraum erlangt hat, weitgehend verzichten. Darunter fallen beispielsweise das Wissen über die allgemeingültige Nordausrichtung zum oberen Kartenrand hin, die erwartete Symbolvariation und Gestaltung nach den Regeln klassischer Taxonomien oder der nicht mehr konstante Verdeckungsgrad der Kartenelemente. Zusätzlich erfolgt die Standortbestimmung meist in einem kleinräumigeren informations-reduzierteren Bereich als bei informationsreicheren 2D-Karten. Auch das Abgreifen von Maßen ist meist nicht mehr gegeben und erschwert außerdem die Einschätzung der räumlichen Ausdehnung der Szene.

So ergeben sich durch das nicht mehr uneingeschränkt nutzbare, klassische kartographische Benutzerwissen für den Kartenautor neue Aspekte, die er für die Gestaltung der räumlichen Szene berücksichtigen muss.

## **5.1 Karten und kartenverwandten Darstellungen**

Die kartographischen Darstellungen teilen sich in Karten- und kartenverwandten auf. Karten sind das orthogonale Abbild der realen Umwelt auf ein 2D-Ausgabemedium. Kartenverwandte Darstellungen dagegen verlassen die orthogonale Sicht (außer bei Globen, Profilen und Kartenanamorphosen) und bilden die abstrahierte Umwelt über Parallel- bzw. Zentralprojektionen auf das 2D-Ausgabemedium ab. Hake et al. unterscheidet für kartenverwandte Darstellungen zwischen ebenen und körperhaften Darstellungen unabhängig von ihren statischen oder dynamischen Eigenschaften (Hake et al. 2002, S. 176).

### **5.1.1 Real existierende kartenverwandte Darstellungen**

Ebene kartenverwandte Darstellungen, beispielsweise Panoramen, Blockbilder, Vogelschaukarten, senkrechte und schiefe Axonometrien zeigen die Kartengraphik aus unterschiedlicher zentral- oder parallelperspektivischer Sicht (Tab. 10). Sie betonen die Anschaulichkeit (Plastizität) gegenüber konventionellen Karten unter Zurückstellung geometrischer Genauigkeit und finden sich oftmals im Tourismusbereich, beispielsweise für lokale Gebietsübersichtskarten, Schaukarten am Ortseingang oder in der Geologie.



Art der Projektion		Lage der Projektionsebene		
		horizontal	schräg	Vertikal
Parallelprojektion	Senkrecht zur Projektionsebene (senkrechte Axonometrie)	Karte als Stereodarstellung	Blockmodell	Profil
	schräg zur Projektionsebene (schiefe Axonometrie)	Militärperspektive	–	Kavaliersperspektive
Zentralprojektion	Projektionszentrum für das gesamte Bild	Senkrecht-Luftbild, Stereo-Darstellung	Schräg-Luftbild, Vogelperspektive, Blockbild	terrestrisches Meeresbild, Panorama
	Projektionszentrum nur für jeweils ein Bildelement	Zellenabfassung der Fernerkundung		–

Tab. 10. Ebene kartenverwandte Darstellungen (Hake et al. 2002, S. 176)

Unter körperhaften kartenverwandten Darstellungen sind real existierende, räumliche Modelle zu verstehen, so unter anderem Globen, hochgeprägte Reliefkarten, analoge Stadtmodelle und Gips- oder thermoplastische Reliefmodelle (*STM*<sup>32</sup>) aus dem Bereich der klassischen Kartographie. Abb. 52 zeigt ein Reliefmodell (*Geoplastik*) im Maßstab 1:5.000 des Kartographen Carl Meili aus dem Jahre 1903 über das Gebiet Säntis (Schweiz). Ihre traditionelle Herstellungstechnik kann im Vergleich zu den heutigen *Rapid-Prototyping*-Verfahren unter Mair nachgelesen werden (Mair und Grieder 2005).

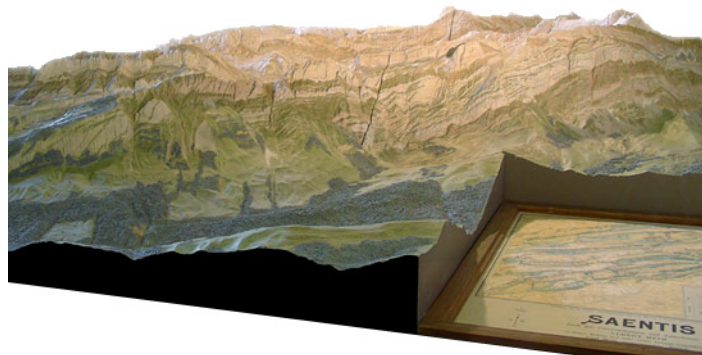


Abb. 52: Reliefmodell von Carl Meili (1903) von Säntis (Schweiz) 1:5.000, 184 x 192 cm

Eine kurze Abhandlung über die historische Entwicklung ebener und körperhafter kartenverwandter Darstellungen und ihrer zukünftigen Darstellungsformen finden sich unter Buchroithner wieder (Buchroithner 2007).

### 5.1.2 Virtuelle kartenverwandte Darstellungen

Aus einer perspektivischen virtuellen Sicht entsteht bei der Draufsicht auf eine ebene Kartographie ein orthogonales Abbild, was einer konventionellen Karte gleichkommt.

<sup>32</sup> Solid Terrain Models

Verlässt man dagegen die Draufsicht, ergibt sich eine kartenverwandte Darstellung. Das heißt, die perspektivischen Einflüsse auf dieser Kartographie sind ersichtlich. Verzichtet man auf den Sonderfall der Draufsicht, bleibt nur die kartenverwandte Darstellung in der weiteren Betrachtung übrig. Die Differenzierung der Begrifflichkeit zwischen ebener und körperhafter Darstellungsform kann auch auf den virtuellen Raum übertragen werden. So stehen die Begriffe ebene und körperhafte Darstellung in der folgenden Arbeit ausschließlich für kartenverwandte Darstellungen im virtuellen Raumbezug. Dabei bezieht sich ihre Bedeutung nicht auf das Ganze, wie die komplette Szene eines Stadtmodells, sondern auf die einzelne Gebäudefassade. Somit dient das virtuelle Stadtmodell als Träger (Basismodell) für die dargestellten ebenen bzw. körperhaften kartenverwandten themalen Kartenentwürfe.

### **Ebene Fassadendarstellungen**

Ebene Darstellungen für eine Fassadenkarte lassen sich als eine raster- oder vektorbasierte Karte umsetzen.

Beim rasterbasierten Ansatz wird auf eine stark abstrahierte Fassadenoberfläche ein 2D-Rasterbild als Textur gemappt. Die Darstellungsqualität und -genauigkeit der Fassadentextur unterliegt hierbei der Bitmapauflösung und den geometrischen und radiometrischen Korrekturen. Ihre Visualisierung kann dabei durch den Einsatz von Bildpyramiden<sup>33</sup> oder Texturkachelungen für eine große Spanne an Betrachtungsabständen zwischen Betrachter und Fassadentextur computergraphisch abgedeckt werden. Erst wenn der Betrachtungsabstand für die Texturauflösung unterschritten wurde, kommt es im Nahbereich zu sichtbaren Rasterartefakten. Der Vorteil von Rastertexturen liegt im Detailreichtum, der bei einem gleichzeitig minimalen Geometrieaufwand in der Oberflächenstruktur, meist eine naturalistische Ausprägung hat. Das ermöglicht eine hohe Variationsvielfalt in der Gestaltung, da komplexe Texturen großflächig ersetzt, kombiniert oder verändert werden können. Ein topologischer Zusammenhang der dargestellten Details in der Textur existiert dabei aber nicht. Ihre Verwandtschaft zur naturalistisch anmutenden virtuellen 3D-Stadtmodellen liegt nahe, unterscheidet sich aber in der Tatsache, dass die Texturen nicht kartographisch für den Benutzer aufbereitet wurden und somit nur als entzerrte Phototextur unklassifiziert vorliegen.

Ebene Darstellungen auf vektorbasierten Ansatz beschreiben die vorhandene Information in einer ebenen Kartendarstellung ausschließlich aus Formprimitiven mit ihren *Knoten-Kanten-Relationen*. Ihre Flächen werden mit Vollfarben gefüllt und ersetzen dadurch die Texturierung. Ihr Vorteil liegt in der gleichbleibenden Auflösungsqualität, selbst im Nahbereich ohne sichtbaren Rastereffekt. Dagegen spricht ihre Verwendung für komplexe bzw. detailreiche Texturdarstellungen. Ihr Einsatz bietet sich daher besonders in der abstrakten und generalisierten Darstellungsform von Karteninformationen bei der kartographischen Aufbereitung für Fassadenkarten an.

---

<sup>33</sup> Bildpyramiden generieren aus dem Ausgangsrasterbild Bilder geringerer Auflösung, um diese individuell zum Betrachtungsabstand zu laden. Dadurch wird ein Performancegewinn in einer virtuellen begehbaren Welt erreicht. Das Verfahren heißt auch *Mid-Mapping*.

## Körperhafte Fassadendarstellungen

Körperhafte Fassadendarstellungen können als kontinuierliche und diskrete Oberflächen beschrieben werden und sind vergleichbar mit statistischen Oberflächen. Statistische Oberflächen unterscheiden sich durch kontinuierliche und diskrete (gestufte) Daten (Slocum et al. 2005, S. 371; Kraak und Ormeling 1996 S. 142), deren Ziel es ist, die thematische Aussage zu verstärken, Extremwerte hervorzuheben und identische Datenwerte durch Schichtenbildung (*Aggregation*) zu vereinheitlichen.

Kontinuierliche stat. Oberflächen mit ihrer stetigen Ausdehnung bilden über eine begrenzte Fläche ein Kontinuum, das nach Cuff und Mattson über qualitative und quantitative Daten realisierbar ist (Cuff und Mattson 1982, S. 19).

Gestufte stat. Oberflächen (prism maps) werden nach Kraak wie folgt beschrieben: „The prism map is a thematic map in which geographic areas, often administrative area, are raised above the map base to a level corresponding with the statistical values for the areas.” (Kraak 1988, S. 23). Dabei sprechen sich Cuff und Mattson für diese Darstellungen aus, da sie eine hohe visuelle Anschaulichkeit und effektive Kommunikationsmöglichkeit böten (Cuff und Mattson 1982). Dies wird mit einer effizienteren Identifizierung und Interpretation von Höhenunterschieden im Vergleich zu Grau- oder Farbwertdarstellungen begründet. Cuff und Bieri betonten, dass selbst unterschiedlich große Ausgangsflächen und die damit stark variierende resultierende Volumendifferenz in gestuften stat. Oberflächen die Interpretation nicht beeinflussten, da die Aussage der eingesetzten Höhenwerte entscheidend seien (Cuff und Bieri 1979).

Eine Unterscheidung zwischen gestuften und kontinuierlichen Oberflächen ist nur bei Rasterdaten sinnvoll. Vektordaten dagegen geben einen flächenbezogenen Bezug auf eine Gebiets-/Themengrenze vor, was ihre Verwendung eher für gestufte Oberflächen geeignet macht. Darüber hinaus beeinflusst die zugrundeliegende Datenaufösung der Rasterdaten das spätere Erscheinungsbild. So kommt es zu störendem Datenrauschen im Resultat, wenn die Datendichte zu hoch gewählt wurde. Entscheidend ist hierbei die Datenthematik, so erlauben Temperaturwerte, aufgrund ihrer Kontinuität, eine Kartendarstellung in maximaler Auflösung, ohne einen Komplexitätsanstieg zu erwarten (Sieber et al. 2009, S. 193).

Eine erste computerbasierte Aufbereitung von statistischen Oberflächen wurde von Jenks mit seiner geglätteten *Fischnetzstruktur* sowie von Tobler mit gestuften Oberflächen und senkrechten Seitenflanken umgesetzt (Jenks 1963; Tobler 1974). Ihre unterschiedlichen Darstellungsformen basieren auf verschiedenen Algorithmen. So lassen sich kontinuierliche *Fischnetzstrukturen* durch übliche Geländealgorithmen (2.5D) beschreiben, deren Bildpixel jeweils eine unterschiedliche 2D-Geokoordinate besitzen. Für die Berechnung von gestuften Oberflächen mit ihren senkrechten Flanken versagt diese Methode aufgrund der nicht vorhandenen doppelten Punktfolge für die senkrechten Netzstrukturen. Ein Ergebnis ließe sich nur durch computergraphische Verfahren oder einer Veränderung der Datengrundlage erzielen. Jenks Beispiel einer geglätteten Oberfläche stellt hierbei eine typische Blockbild-darstellung dar.

## 5.2 Gestaltung von digitalen kartenverwandten Darstellungen

Bei der Erstellung von kartenverwandten Darstellungen gibt es unterschiedlichste Verfahren der Kartenerstellung. Wird auf einer 2D-Zeichenebene eine räumliche Darstellung ergänzt, handelt es sich um eine verebnete räumliche Darstellung dieses Objekts. Das bedeutet, es können alle bekannten klassischen Gestaltungsregeln für die Kartenerstellung herangezogen werden. Ihr Betrachtungsstandort zum *Sujet* muss im Voraus festgelegt und ein Wechsel kann nur durch einen erneuten zeichnerischen Aufwand verändert werden. Erfolgt deren Gestaltung hingegen in einer echten 3D-Umgebung, ist ein Standortwechsel jederzeit möglich. Es greifen jedoch die Einflüsse der Perspektive oder der Schummerung, wie sie aus dem Bereich der 3D-Computergraphik bekannt sind. Durch sie existieren bis heute keine vergleichbaren Taxonomien wie nach dem Vorbild Bertins, die ihre Gültigkeit für eine Gestaltung im virtuellen 3D-Raum besitzen. In den letzten Jahren wurde Bestrebungen unternommen, diesen durch Gestaltungsaspekte (Häberling 2004), Darstellungstechniken (Sheppard 2005) oder deren Einflüsse (Shepherd 2008) beschreibbar bzw. erklärbar zu machen.

Häberling fasst drei allgemeingültige Gestaltungsgrundsätze für die kartenbasierte Symbolisierung zusammen, die auch für den 3D-Raum ihre Gültigkeit besitzen (Häberling 2004, S. 26). Dazu zählen:

- Das Versehen von bedeutungsgleichen Objekten mit gleichen Signaturen
- Gestaltung einer eindeutigen Differenzierung und Wahrnehmbarkeit von Signaturen und flächenhaften Mustern
- Die Komplexitätsreduzierung der symbolischen Gestalt bei kleinerer Signaturendarstellung

Weiterführende Literatur und Überlegungen zur den Gestaltungsaspekten räumlicher Symbolisierung findet sich bei Häberling (Häberling 2004, S. 64). Für die Gestaltung einer räumlichen Szene sollen nun einige Aspekte näher betrachtet werden, die für die dritte Dimension von Bedeutung sind und auf der gestalterischen Sicht, der Aussagekraft und den Erkenntnissen der menschlichen Wahrnehmung basieren bzw. allgemein gültig sind.

### 5.2.1 Räumlich-konstruktiv

#### Minimaldimensionen

Für die Bestimmung punkthafter minimaler Symboldimensionen bietet sich das Berechnungsverfahren von Terribilini an (Terribilini 2001, S. 84ff), nach dem die Minimaldimension im Bereich ihrer kleinsten Ausprägung bestimmt wird. Diese findet sich entlang der Blickrichtungssachse wieder ( $\beta=0^\circ$ , s. Abb. 53b). Eine Abstimmung für lineare Signaturen ist dagegen problematisch, weil durch perspektivische Verzerrungen sich diese über den gesamten Bildbereich unterschiedlich verändern (s. Abb. 53a).

Wenn nun die Minimaldimension für eine körperhafte lineare Signatur festgelegt wird, kommt es in den Randbereichen zu steigenden Größen- und Winkelverzerrungen. Das heißt, bei der Wahl einer zu engen körperhaften Schraffung bzw. einer zu engen Isolienscharung ist die Wahrscheinlichkeit einer räumlichen Verdeckung benachbarter Kartenzeichen sehr groß. Folglich muss entweder die räumliche Ausdehnung, gerade bezüglich der Höhe, oder ihre Signatordichte berücksichtigt werden.

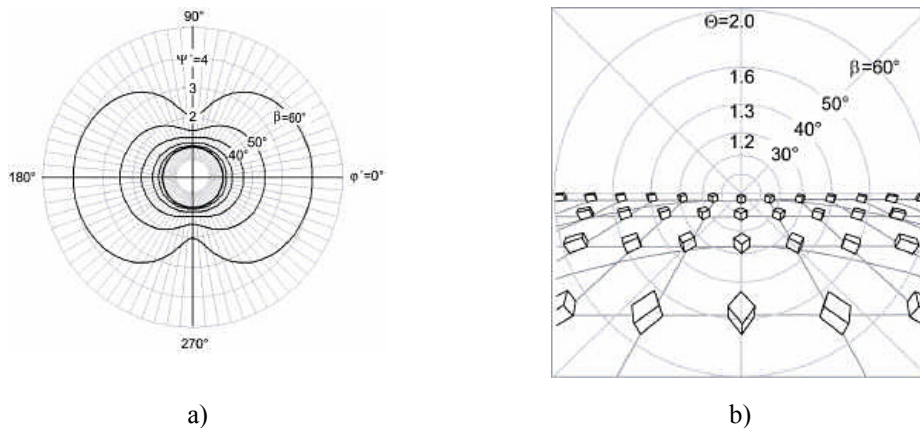


Abb. 53: Verzerrungskurven und ihre Einflüsse (aus Terribilini 2001)

Dabei nimmt der maximale Betrachtungsabstand einen wichtigen Einfluss auf die Kalkulation der Minimaldimensionen ein, der bei zu großen Abständen zu einer erhöhten Verdeckung in den Aufstandsflächen führt und als Folge wertvolle Informationen aus dem Kartenhintergrund (Basiskarte) überlagert.

### Signaturdetails

Die Kriterien für eine visuelle räumliche Informationsdarstellung müssen laut Sheppard durch die *Präzision*, die *Repräsentation*, die *visuelle Klarheit*, die *Relevanz*, die *Legitimität*, die *Validität* der Wahrnehmung (Wahrnehmung und Auffassung der Visualisierung durch den Betrachter) und die *Zugänglichkeit* zur visuellen Information erfüllt sein (Sheppard 2005). Diese Bedingungen unterliegen den computergraphischen und perspektivischen Einflüssen, was zu einer Veränderung der konventionellen Kartenzeichen führt. Das verdeutlicht, dass Signaturen mit hohem Detailreichtum, dies gilt meist für Punktsignaturen mit hoher Ikonizität, in ihrer Gestalt, geometrisch oder texturlich reduziert dargestellt werden sollten. Dies kann bis zu einer Neugestaltung des aus der konventionellen Kartengestaltung übernommenen 2D-Kartenzeichens führen.

### Graphische Variablen

Die klassischen Gestaltungsregeln mit ihren graphischen Variablen sind in der räumlichen Anwendung nur begrenzt umsetzbar. Dies wird durch die computergraphischen Prozesse wie auch durch die Perspektive beeinflusst. Die Zusammenhänge machen sich dann bemerkbar, wenn die graphischen Variablen auf einer gekrümmten Fläche angewendet werden (nicht komplanar) und sich in Richtung eines oder mehrerer Fluchtpunkte hin bewegen. Die sieben visuellen Variablen *Richtung*, *Größe*, *Farbe*, *Farbhelligkeit*, *Muster*, *Form* und *XY* nach Bertin werden folgendermaßen beeinflusst.

Die Variable *Richtung* unterliegt den wechselnden Flächenausrichtungen der Oberfläche zum Betrachter und verändert dadurch ihre ursprüngliche Orientierung.

Ähnlichen Einflüssen ist die Variable *Größe* ausgesetzt, die sich abhängig vom Betrachtungsabstand und der gewählten Projektionsart in ihrer Größe verändert. Gleichartige Elemente werden dabei durch die Größenkonstanz verändert und täuschen evtl. einen nicht vorhandenen Tiefeneindruck vor.

Die graphische Variable Farbe mit ihrer Helligkeit richtet sich nach dem Einfallswinkel der Lichtquelle und der Blickrichtung der virtuellen Kamera. Dabei treten bei farblichen Objekten gleicher räumlicher Ausrichtung die Helligkeitsveränderungen gleichmäßig auf, was zur Folge hat, dass der Farbabstand zwischen den Farben gleich bleibt. Das bedeutet, es kann von einer farblichen Differenzierung von Flächen gleicher Orientierung bei einer Veränderung der Lichtquelle oder dem Betrachtungswinkel ausgegangen werden, wenn die Farbe noch einen Rest an *Farbhelligkeit* besitzt. Das wiederum verlangt folgende Überlegung: Farbreihen, die ihre Stufen durch Helligkeitswerte repräsentieren, müssen ihre Helligkeitsspreizung mehr von einem mittleren Grauton ausgehen lassen, um eine Helligkeitsveränderung in beide Richtungen optimal abfangen zu können und so die farbliche Differenzierung länger zu gewährleisten. Dabei stellt die Farbe für die Ausprägung des Raumeindrucks einen monokularen Hinweis für den Kartennutzer bereit. Bei einem Farbhelligkeitsverlauf in einer figuralen Einheit entsteht nicht der Eindruck von separaten Farbtönen, sondern eines *Farbtöns*, der aufgrund der veränderten Ausrichtung der Oberflächenfacetten zur Beleuchtungsrichtung variiert. Die empfundene Gleichfarbigkeit zweier unterschiedlicher Farbtöne wird auch als Farbkonstanz bezeichnet und liefert dem Gestaltgesetz der Prägnanz eine wichtige Grundlage. Da nicht nur die Farbwerte unterschieden werden, sondern auch ein aus der Erfahrung gelernter räumlicher Zusammenhang zwischen Farben, Beleuchtung und geometrischer Ausrichtung, ergibt sich aus der mentalen Leistung eine geschlossene, folgerichtige und einfache Gestalt. Abb. 54 und Abb. 55 verdeutlichen diesen Zusammenhang.

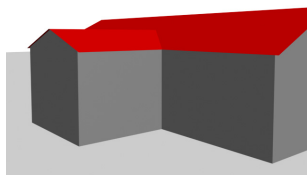


Abb. 54: Fernbereich – Wahrnehmung eines Gebäudes



Abb. 55: Nahbereich – Wahrnehmung nur zweier Farben

Darüber hinaus ist es empfehlenswert, qualitative Daten, deren Differenzierung über unabhängige Farbwerte erfolgt, in ihren Farbabständen größer als im 2D-Bereich zu wählen und die Farbabstufung quantitativer Daten, die in einem farblichen Zusammenhang stehen, zu reduzieren.

Die graphische Variable Muster unterliegt den Veränderungen der perspektivischen Einflüsse. Dabei kommt es in Fluchtpunktichtung zu einem ansteigenden Texturgradienten und einer möglichen Unterschreitung der Minimaldimension. Das heißt, die Linienabstände und die Linienbreite werden entlang der Tiefe komprimiert. Ein weiterer Einfluss besteht in der Abhängigkeit zwischen Flächenausrichtung und Betrachter, die im Vergleich zu einer konventionellen Karte nicht konstant ist und klar voneinander trennbare Muster erfordert. Eine Klassifizierung der thematischen Merkmale nach Schraffurweite, Linienbreite oder Orientierung würde unweigerlich zu Interpretationsfehlern bzw. zu erschwerten Signaturerfassung führen. Abhilfe verspricht hierbei die Verwendung weitgehend raumresistenter Muster, die sich nur in ihrem Texturgradienten geringfügig ändern und unabhängig von ihrer Orientierung sind. Gemeint ist damit der Einsatz von punkthaften Mustersignaturen wie Kreis, Kreuz oder eines Gengons. Kombiniert man diese mit großen Rasterweiten ist auch die

Texturdichte bei ungünstigen Betrachtungswinkeln bis zu einem bestimmten Grad regulierbar.

Die Variable *Form* bleibt unter den Einflüssen der perspektivischen Verzerrungen infolge ihres hohen Grads an Invarianz der Prägnanz und der Formkonstanz weitgehend erhalten und kann durch die menschliche Wahrnehmung als solche auch in Teilen wieder erkannt werden.

Die Adaption der Variable *XY* lässt sich nur für ebene Karten im 3D-Raum anwenden, darunter fallen auch die Texturierung von komplanaren Oberflächen wie Fassaden, die mit einer planaren Map mit ihren Mapping-Koordinaten  $u$  und  $v$  belegt werden können.

Eine neuere Variable zu Bertins visuellen graphischen Variablen wird in dieser Arbeit behandelt, die *Transparenz*. Sie gehört neben den Variablen *Schärfe* (*Crispness*) und *Auflösung* (*Resolution*) zur Gruppe *Klarheit* (*Clarity*) (MacEachren 1995) und ist als computergraphische Variable eine einfach umzusetzende Materialeigenschaft. Ihre Verwendung löst unterschiedliche Sinneseindrücke aus (Metelli 1985). Dabei wird zwischen wahrgenommener und physikalischer Durchsichtigkeit unterschieden. Ein Objekt wird erst dann als durchsichtig wahrgenommen, wenn es selbst sichtbar ist und sich vom Hintergrund, wenigstens zum Teil, abhebt. So kann Luft nicht wahrgenommen werden, Nebel dagegen schon. Metelli leitet aus mathematisch analytischen Untersuchungen von zweidimensionalen in sich überlagerten Flächen eine Regel zur Bestimmung der Transparenz ab. Dabei werden Bereiche eingegrenzt, die zwei in sich kreuzende Linien (die so genannte X-Kreuzungen) aufweisen.

Die Linien unterteilen den Bereich in vier Sektoren, deren Helligkeitsbeziehungen in horizontaler und vertikaler Richtung von der menschlichen Wahrnehmung erfasst und danach auf eine vorliegende Transparenz bewertet werden. Der Grad der Umkehrungen (*reversing*) gibt Aufschluss über die Entscheidungsfindung. So werden die Flächen ohne Umkehrung (*non-reversing*, Abb. 56a) und mit einfacher Umkehrung (*single-reversing*, Abb. 56b) als Transparenz wahrgenommen, wobei im ersten Fall die Tiefenanordnung mehrdeutig zu sehen ist. Die doppelte Umkehrung (*double-reversing*, Abb. 56c) dagegen wird als nicht transparent wahrgenommen.

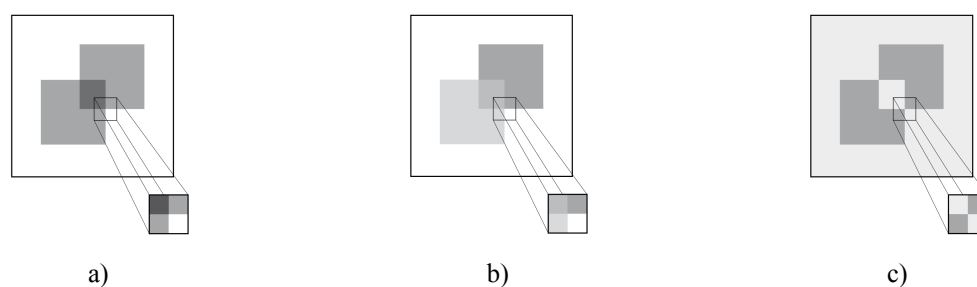


Abb. 56: Metellis X-Kreuzungen der Transparenzen

Weitere allgemeine Voraussetzungen transparente Objekte als solche erkennen zu können sind:

- Das erkennbare Auftreten von Hintergrundstrukturen
- Die Differenzierung zwischen Objekt und Hintergrund
- Die Wahrung der figuralen Einheit (s. Abb. 57b, c)
- Der geschlossene Kantenverlauf am Objekt
- Die Plausibilität der Farbabstufung im Objekt (X-Kreuzung)

So wird die Wahrnehmbarkeit von *Transparenz* durch *Form*, *Farbe*, ihrer Interposition und den Hintergrund bestimmt. Dabei ist die erste Bedingung unabhängig von der Objektgestaltung, beeinflusst, aber durch ihre Strukturbedingung die eigentliche Wahrnehmbarkeit eines vorgelagerten transparenten Objektes. Somit ist beispielsweise ein halbtransparenter Quader vor einem unstrukturierten Hintergrund nicht als transparenter Körper zu erkennen (s. Abb. 57a). Erst durch Anordnung eines nicht homogenen Hintergrundes bzw. weiterer dahinter angeordneter Objekte wird die transparente Materialeigenschaft sichtbar (s. Abb. 57b und c).

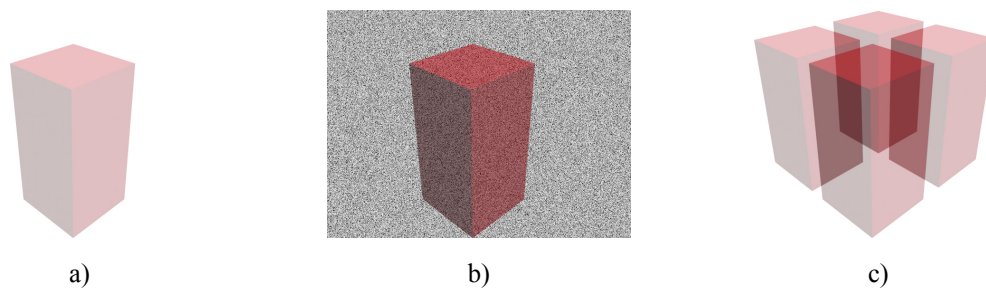


Abb. 57: Transparenter Körper a) ohne Hintergrund b) mit inhomogen und c) körperhaften Hintergrund

Je stärker die *Transparenz* zum Einsatz kommt, desto schwächer fällt die *Farbsättigung* und der Farbgradient für den Tiefeneindruck aus. Um den Tiefeneindruck wieder stärker hervorzuheben, besteht die Möglichkeit, die betroffenen Objekte mit einer Drahtgitterstruktur bzw. einer Konturlinie zu versehen (s. Abb. 123–Fenstersignatur). Eine Drahtgitterstruktur beinhaltet auch die innere Kantengeometrie des Oberflächenkörpers, eine Kontur dagegen nur die äußere Umrisslinie des Objektes, welche in Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel und der Objektgestalt variieren kann. Anzumerken sei an dieser Stelle, dass bei einer dynamischen Visualisierung die passive Bewegungsparallaxe einen zusätzlichen Tiefenreiz beim Betrachter auslöst und sich dadurch die Problematik des reduzierten Tiefeneindrucks verringert. Nach Shepard ist der Einsatz von *Transparenz* sinnvoll, um die entstehende Verdeckung durch räumliche Objekte zu minimieren (Shepherd 2008, S. 209 ff). Dabei unterscheidet er zwischen der für alle Zeichen verwendeten *Transparenz* (*equally reduced opacity*), der umgebenden oder teilweise verdeckenden *Zeichentransparenz* (*focus-oriented opacity*), und der vom selektierten Zeichen benachbarten distanzabhängigen *Transparenz* (*distance-oriented opacity*), um das im Fokus stehende und selektierte Zeichen freizulegen.

## 5.2.2 Räumlich-perspektivisch

### Maßstab und Verzerrung

Durch die perspektivische Projektion unterliegt der gesamte Abbildungsbereich einer variierenden Maßstabsänderung (MacEachren 1995, S. 141), was zu einer Form- und Größenveränderung der Objekte führt. Das bedeutet, die maßstäblichen Verhältnisse einer solchen Szene sind unbestimmt und nicht durch standardisierte graphische oder numerische Maßstabsangaben aus der konventionellen Kartographie zu erfüllen. Dies verlangt nach neuen Überlegungen der Maßstabgestaltung. So kann dies durch Platzieren von Zusatzelementen, wie einem arrangierten Objekt bekannter Objektgröße (Personenprofil) oder einem Objekt mit fester Größe und perspektivischer Ausrichtung zum untersuchenden Objekt, erfolgen.



## Texturkompression (Texturgradient)

Texturkompression ist eine darstellungsverändernde Eigenschaft, die ausschließlich ein Phänomen der Projektion ist. Das meint, dass durch die Wahl der Projektionsart oder durch einen Standortwechsel sich die Texturdichte bzw. Texturperspektive auf der Oberfläche verändert. Die Einflussgrößen sind nach Gibson der Betrachtungswinkel und der Betrachtungsabstand (Gibson 1973b, S. 256). Auch die Lesbarkeit von Texturen mit Textinhalten (*Infoboard*) ist nach Shneiderman bei einem Betrachtungswinkel unter 15 Grad nicht mehr gegeben und sollte vermieden werden (Shneiderman 2003). Eine weitere Betrachtung zur Vermeidung der Texturkompression findet sich unter den räumlich-konstruktiven Aspekten.

## Verdeckung

Alle Projektionsarten haben das Defizit der räumlichen Verdeckung, hervorgerufen durch benachbarte Objekte oder durch ihre eigene Oberflächenstruktur (z.B. DGM). So führt ein zu flach gewählter Betrachtungswinkels gegenüber der Szene zu einer unweigerlichen Verdeckung und somit zu einer Einschränkung in der Informationsübermittlung. Rowles versuchte anhand von regelmäßigen DGMs durch unterschiedliche Betrachtungswinkel die Geländehöhe zu schätzen und kam zu dem Ergebnis, dass keine besonderen Einschränkungen zwischen 15 Grad und 78 Grad zu verzeichnen waren. Unterhalb von 15 Grad äußerte Rowles dagegen einerseits Bedenken wegen der erhöhten Verdeckung von Kartenteilen, vermutete aber andererseits die Unterstützung durch räumliche Tiefenreize (Rowles 1978). Dem kann in einer Szene durch die graphische Variable *Transparenz*, einer gezielten Ausdünnung der Objektdichte, der Reduzierung der Objekthöhe oder der Verdrängung von Einzelobjekten sowie der gezielten Überhöhung selektierter Objekte entgegengewirkt werden.

### 5.2.3 Räumlich-physikalisch

Für die Plastizität von Objekten sind in der Computergraphik die Beleuchtung und Schattierung durch mathematische Modelle annähernd physikalisch gut beschrieben und beeinflussen dadurch die Anschaulichkeit der räumlichen Szene.

## Helligkeitsänderung

Die Helligkeitsänderung an einer Oberflächenfacette eines Objektes entsteht durch Veränderung der Lichteinstellungen (z.B. Lichtquelle, Lichtintensität, Lichtabfall) oder des Betrachtungswinkels. Das kann bei ungünstigen Betrachtungswinkeln zu einem kompletten Verlust der *Farbhelligkeit* in der Facette führen (s. Abb. 58).

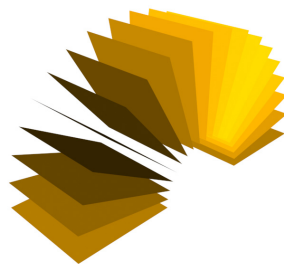


Abb. 58: Helligkeitsänderung abhängig von der Betrachtungsrichtung

Eine gestalterische Alternative zur Informationsvermittlung bietet sich über die graphische Variable *Muster* an, deren Information auch bei Helligkeitsänderung eindeutig entschlüsselbar bleibt und nur den perspektivischen Veränderungen unterliegt. Ansätze zur Kompensation dieser Einflüsse sind im Kapitel 5.2.1 – Graphische Variablen näher erläutert.

### **Schattierung**

Die Schattierung bzw. Schummerung wird durch das Schattierungsmodell realisiert. Ausgehend vom Beleuchtungsmodell wird das Schattierungsmodell für die gesamte Szene errechnet. Ein Ausschluss des Beleuchtungseinflusses ist für Einzelobjekte technisch umsetzbar, für Facetten eines Objektes dagegen nicht. Das heißt, eine lokale Korrektur der Beleuchtungssituation durch gezielte lokale Aufhellung dunkler Schattenhänge ist, wie man sie aus der analog gestalteten Kombinationsschummerung kennt, durch die Standardverfahren der 3D-Computergraphik nicht umsetzbar. So würde eine platzierte Punktlichtquelle in einem DGM zur Ausleuchtung eines Schattenhangs immer auch die benachbarten Lichthänge mit einschließen, was eine Überstrahlung dieser Flächen zur Folge hätte. Eine Regulierung über einen distanzabhängigen Lichtabfall wäre technisch möglich, erfordert aber für jeden Schattengang eine individuelle Abstimmung.

Ihr gestalterischer Aspekt liegt folglich eher in der gesamten Schattierung der Szene, die durch ihre physikalische Darstellung von Schatten oder diffusen Schattenzonen für die Bestimmung der Objekthöhenlage innerhalb einer abstrakten Darstellung geeignet ist.

Einen Vergleich mitsamt seinen Ergebnissen von unterschiedlichen Softwarepaketen aus dem Bereich der Geoinformatik und der digitalen Bildverarbeitung wurde von Van Dorn vorgenommen und soll hier nicht weiter beschrieben werden (Van Dorn 2002).

### **Beleuchtung**

In einer räumlich abstrahierten Szene eines urbanen Außenbereichs geht der Betrachter durch seine Erfahrungen und Erwartungen davon aus, dass der Lichteinfall von oben kommt. Das legt somit die Beleuchtungsausrichtung durch die obere Hemisphäre einer Szene fest. Ihr Einfluss wirkt aber erst dann, wenn Helligkeitsunterschiede im Objekt zu erkennen sind. Ist die Lichtquelle zu hart (stark) gewählt, gehen Strukturen und Konturen im Licht unter. Für eine angemessene Ausleuchtung in der Szene muss die gesamte Lichtmenge aller Lichtquellen auf der Oberfläche ermittelt werden. Dieser Prozess, der aus dem Bereich der Photographie stammt, kann durch punktuelle Lichtmessung in der Szene oder im späteren Renderprozess durch korrigierende Algorithmen erfolgen. Das garantiert die Erhaltung von Strukturen in dunklen wie auch hellen Flächenpartien.

Eine weitere Steigerung der natürlichen Lichtwahrnehmung kann durch diffuse Schatten in den Kantenübergängen der Aufstandsflächen der Objekte erreicht werden. Die computergraphischen Verfahren sind hierbei globale Beleuchtungsmodelle.

## **5.3 Technologien der räumlichen Darstellungen**

Für die Kartenerstellung nutzen Kartographen immer die zeitgemäßen technischen Verfahren. Waren es früher Graviergriffel und Stift, so wurde daraus in den letzten zwanzig Jahren Computer und Graphiktablett (Brunner 1995, S. 67). Die Vorteile der rechnergestützten Verarbeitung liegen im weitaus größerem Potenzial der Darstell- und Reproduzierbarkeit von

Karten als in der klassischen Verarbeitungsweise, da durch sie zusätzliche graphische Variablen wie *Transparenz* oder *Schärfe* (MacEachren 1995), temporale- und non-temporale Animationen (Dransch 1995), Interaktionen (Dransch 2001) und Echtzeitdarstellung von kartenverwandten Darstellungen (Kersting 2002) möglich sind.

Dabei ist die richtige Wahl eines geeigneten Softwarepakets, das den benötigten Funktionsumfang abdeckt, nicht immer zufriedenstellend. Das heißt, raumbezogene Daten werden für gewöhnlich durch ein Geoinformationssystem repräsentiert, das eine reduzierte Editierbarkeit in der graphischen und multimedialen Veränderung für die Kartengestaltung anbietet. So schreibt Dodge „offering of current GIS [...] software vendors, whose focus is mainly on spatial data management and analysis“ (Dodge et al. 2008, S.216). Brunner postuliert, dass die GIS-basierten Kartenergebnisse noch unter der erwarteten und gewohnten Qualität des Kartenlesers liege und noch weiterer „erheblicher Forschungs- und Entwicklungsarbeit“ bedürfen (Brunner 1995, S. 67).

So bieten namhafte Anbieter von GIS-Systemen Zeichenwerkzeuge zur klassischen Kartengestaltung (Eicher et al. 2010) an, schränken aber gleichzeitig durch ihr geschlossenes System die graphische Gestaltung mit neuen Ideen ein. Um diesen Missstand teilweise entgegen zu wirken, werden Schnittstellen zu Entwicklungsumgebungen (SDK<sup>34</sup>), eigene Skriptsprachen oder Editierungswerkzeuge (Eicher et al. 2010, S.176) für Neuentwicklungen angeboten. Dabei werden einerseits herstellerseitig Grenzen des erlaubten Programmzugriffs und andererseits durch die vorhandene Programmstruktur softwarebedingte Einschränkungen für die graphische Gestaltung gesetzt. Das bedeutet einen erheblichen Programmieraufwand und steht in keinem Verhältnis zum graphischen Potenzial von so genannten Autorensystemen.

Autorensysteme bieten hierbei nicht nur ausgereifte Verarbeitungswerkzeuge für die Kartengestaltung, sondern auch eine große Anzahl von Austauschformaten, an. Dabei greifen sie für die Optimierung von Verarbeitungsprozessen auf eigene Scriptsprachen oder Schnittstellen zu anderen Programmiersprachen wie C++ zurück. Scriptsprachen zeichnen sich hierbei durch ihre reduzierte und dem Graphikprogramm angepasste Sprache im Vergleich zu konventionellen Programmiersprachen wie C++ oder Java aus, die ein leichteres und schnelleres Programmieren von Prozessabläufen oder Modulen ermöglicht (Epstein 1999). Autorensysteme haben hingegen ihre Nachteile in der fehlenden Datenbankanbindung und der damit verbundenen Analysemöglichkeit sowie in der fehlenden bzw. ungenauen Unterstützung georeferenzierter Daten (Koussoulakou 1999, S. 285).

Weiterhin können diese Softwarepakete unabhängig von ihrem Funktionsumfang klar in 2D- und 3D-Autorensysteme unterschieden werden. Bekannte Anbieter im 2D-Bereich ist der kommerzielle Hersteller ADOBE mit seinem Produkt Illustrator, im 3D-Bereich der Hersteller AUTODESK mit 3dsMax und Maya. Macromedia Director von ADOBE bietet als kommerzieller Anbieter zusätzlich zum 2D-Bereich das 2D/3D-Autorensystem mit zusätzlichen multimedialen Funktionen an. Im Open-Source-Bereich finden sich Inkscape für 2D- und Blender

---

<sup>34</sup> SDK: Software Development Kit

im 3D-Bereich wieder, die in ihrer Funktionalität den kommerziellen Anbietern in nichts nachstehen und in manchen Bereichen umfassendere Funktionen (z. B. Austauschformate) zur Verfügung stellen, aber in der Summe klare Defizite in der Anwendung besitzen.

Ein weiteres Autorenwerkzeug stammt aus dem Bereich der Computerspiele-Industrie. Es ist das Produkt Unity3D. Es umfasst nur eingeschränkte Gestaltungsmöglichkeiten, dafür besitzt es die notwendigen Austauschformate zu allen gängigen 2D- und 3D-Autorensystemen und kombiniert diese für die spätere interaktive *Real-Time*-Visualisierung mit einer *Game-Engine*. Darüber hinaus unterstützt Unity3D weitere multimedialen Fähigkeiten der Animation, Interaktion und Vertonung für die Anreicherung der 3D-Szene.

Aus dem Planungs- und Konstruktionsumfeld existieren weitere Autorensysteme, die sich immer mehr der 3D-Visualisierung nähern. Die so genannten *Computer Aided Design (CAD)* Programme unterstützen georeferenzierte Datenverarbeitung ebenso wie im Architekturbereich genutzte Datenbankanbindung mit unterstützender bauspezifischer Objektbibliothek (*CAAD*<sup>35</sup>). Eine Konstruktion im 3D-Raum mit hinterlegter 3D-Bauelementebibliothek findet sich nur in wenigen Produkten wie Nemetschek oder ArchiCAD wieder. Bei den computergraphischen Gestaltungsmöglichkeiten und ihrer Anbindung zu *Real-Time*-Systemen anderer Ersteller sind aber noch Entwicklungsarbeiten zu tätigen, da beispielsweise Oberflächen ihre Netztopologie nur unzureichend dem der Computergraphik gängigen *vef-Graphen* entsprechen oder bestimmte Oberflächenbeschreibungen (*CSG, NURBS*) von *Real-Time*-Systemen nicht erkannt werden.

	Autorensystem		CAD	3D-GIS
	2D	3D		
Topologie	–	–	–	+
Datenbankanbindung	– / –	–	(+)	+
Datenanalyse	–	–	–	+
Georeferenzierte Daten	–	–	+	+
Graphische Gestaltung	+	+	–	–
Echte räumliche Koordinaten	–	+	+	(+)
Räumliche Modellierung	–	+	+	–
Animation	+	+	(+)	(+)

---

<sup>35</sup> *CAAD*: Computer Aided Architectural Design

Interaktion	+	+	(+)	(+)
Real-Time fähig	+	+	(+)	(+)
Import Funktionalität	+	+	(+)	(-)
Export Funktionalität	+	+	(+)	(-)
Vektorformat	+	+	+	+
Rasterformat	+	+	-	+
+ wird unterstützt   (+) wird nur eingeschränkt unterstützt   - wird nicht unterstützt				
* Identische Punkte mit unterschiedlichen Höhenwerten (z-Werten) werden für ihre Analysemöglichkeit in ihrer Lage leicht versetzt in der Datenbank vorgehalten. Das heißt vertikale Flächen sind nicht mathematisch korrekt ausgerichtet.				

Tab. 11: Autorensystem versus CAD und 3D-GIS

Da die Schwächen des einen Systems die Stärken des anderen sind (s. Tab. 11) wurde erstmals eine Verbindung zwischen GIS und dem multimedialen Autorensystem Macromedia Director von der ETH ZÜRICH und ETH BOARD in Kooperation mit SWISSTOPO und dem SWISS FEDERAL STATISTICAL OFFICE (SFSO) realisiert (Sieber und Huber 2007, S. 171). In ihrem Produkt Atlas der Schweiz ermöglichen Zusatzmodule, so genannte Map- und Topo3D-Xtras, den Zugriff auf hinterlegte GIS-Funktionalität. Der Entwicklungsaufwand für die Darstellung thematischer und topographischer 3D-Karten ist nicht unerheblich und wurde über die letzten zehn Jahre immer weiter verfeinert.

Eine komplette Neuentwicklung stellt die ehemals vom HASSO-PLATTNER-INSTITUT in der Computer Graphics Systems Gruppe entwickelte Lösung des LandXplorer von AUTODESK dar (Döllner et al. 2003; Döllner und Walther 2003). Ihre Entwicklung konzentriert sich auf die multimediale Präsentation urbaner 3D-Räume mit Datenbankbindung, Analysefunktionalität und dem Open-Source-Austauschformat CityGML. Das System vereint GIS-Fähigkeiten mit einer leistungsfähigen Render-Engine und ermöglicht vorhandene 2.5D und 3D-Stadtmodelle in Echtzeit zu visualisieren. Für ihre graphische (Aus-)Gestaltung werden aber umfassende Programmierungskennnisse abverlangt. Deren Bedingung für die Visualisierung die vorherige Datenhaltung aller relevanter georeferenzierter Informationen in einer Datenbank bzw. im CityGML-Austauschformat sind. Ist eine zu visualisierende Thematik nicht vorhanden, muss die Datenbank erweitert bzw. die Datenbankstruktur tief greifend angepasst und für LandXplorer verständlich gemacht werden. Erst dann erfolgt die graphische Gestaltung und deren Möglichkeit graphische Variationen für die gewünschte thematische Repräsentation zu entwerfen.

Ein weiteres Konzept stellt Germanchis et al. in der Visualisierung des Queenscliff vor (Germanchis et al. 2007). Durch die Kombination von georeferenzierten Geländedaten aus einem GIS-System mit 3D-Modellen aus einem Autorensystem und der virtuellen Spielumgebung CryEngine konnte der Freiheitsgrad durch die Interaktion für die Kartenerkundung noch weiter gesteigert werden. Wegen der von CRYTEK nicht vorgesehenen Datenbankbindung musste auf eine Datenbankabfrage verzichtet werden. Germanchi et al. (2007) zeigt aber ein gutes Beispiel dafür, wie man moderne Systeme aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen

für die Darstellung georeferenzierter Daten schnell und interaktiv für den Nutzer kombinieren konnte.

Für die Konzeption von thermalen Fassadenkarten im städtischen Bezug stellt sich in dieser Arbeit daher die Frage, welcher Visualisierungsweg für die Entwicklung von 2D- und 3D-Thermalkarten, so genannten *Mock-Ups*<sup>36</sup>, nutzbar ist, unter der Voraussetzung, dass die vorliegenden thermalen Informationen alle eine vertikalen Ausrichtung zur Fassade besitzen. In den 2D-Kartenentwürfen können die thermischen Fassadenmerkmale durch einen Aufriss in ein ebenes digitales Ausgabemedium überführt werden. Bei den 3D-Kartenentwürfen liegt die Geometrie in einem kartesischen Koordinatensystem vor und es bedarf der echten vertikalen Anordnung der thermischen Merkmale im Raum. Darüber hinaus treten nicht nur thermale Merkmale in der Fassade vielschichtig auf, sondern liegen als Messbilddaten in unterschiedlichen elektromagnetischen Farblichtspektren und evtl. Zeitperioden vor, die wiederum im Datenbankmodell erfasst werden müssen. So entsteht viel mehr die Herausforderung, ein Datenbankmodell für die angepasste Datenhaltung in einem 3D-GIS zu entwerfen als sich mit der Thematik der kartographischen Gestaltung auseinander zu setzen. Dies ließe sich erst nach erfolgreicher Implementierung neu entwickelter Gestaltungstools umsetzen. Ausschlaggebend ist aber hierbei die eingeschränkte Variationsvielfalt der graphischen Gestaltungsmöglichkeiten, die einen entscheidenden zeitlichen wie auch personellen Faktor aufweisen.

Weitere Kriterien für die Erstellung von thermischen Fassadenkarten ist die problemlose Datenimportierung, die einfache Editierbarkeit zur graphischen Gestaltung sowie die leichte Implementierung in weiterführende Softwarepakete. Slocum befürwortet dies durch den Einsatz von gebräuchlichen und zugänglichen desktopbasierten Applikationen, ohne Verwendung spezieller Hardwarelösungen, für die Forschung (Falk et al. 1986; Slocum et al. 2001).

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte fiel die Entscheidung im 2D-Bereich auf das vektorbasierte Autorensystem Illustrator von ADOBE mit der Option der weiterführenden Implementierung in SVG-Code für webbasierte, interaktive Darstellungen. Im 3D-Bereich bedurfte es eines Wechsels zu einem räumlichen Softwarepaket. Die Wahl fiel hierbei auf das Autorensystem 3dsMax von AUTODESK als Pendant zu Illustrator. Für den optionalen Einsatz in *Real-Time*-Systemen auf die Spiele-Engine Unity3D von UNITY TECHNOLOGIES als Pendant zum 2D SVG-Viewer. Dabei wird ein vergleichbarer Weg wie von Germanchis beschrrieben, der sich durch die Wahl der Softwarepakete unterscheidet. Die für die freie Gestaltung von unterschiedlichen Kartentypen mit variierenden Dimensionen, festgelegten Softwaretools bedürfen nun der Fokussierung der eigentlichen Thematik. Die in dieser Arbeit die Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) zur Anreicherung städtischer Fassadenkarten bedeutet. Im folgenden Abschnitt soll auf die physikalischen Eigenschaften dieser Informationsquelle und ihrer konventionellen Anwendung in der Bauthermographie näher eingegangen werden.

---

<sup>36</sup> *Mock-Ups* sind Prototypenentwicklungen, deren Entwürfe durch einfache Techniken und Verfahren schnell umgesetzt werden können und so relativ bald eine Vorstellung vom geplanten Ergebnis liefern.

## 6 Thermographie und Darstellung thermaler Informationen

Die Thermographie ist bezeichnend für ein berührungsloses und zerstörungsfreies, über Wärmebildkameras durchgeführtes Messverfahren, das die nicht sichtbare Infrarotstrahlung für den Menschen sichtbar darstellt. Das Messergebnis hängt dabei vom Wellenlängenbereich des IR-Kamerasystems, den äußeren Aufnahmebedingungen und den Erfahrungen des Operators, der durch sein Fachwissen die Merkmale als solche interpretieren und klassifizieren kann, ab. Der thermographische Einsatzbereich ist vielfältig und findet sich in der industriellen Fertigung, bei medizinischen Untersuchungen, im Bereich der Fernerkundung oder in der Bauthermographie.

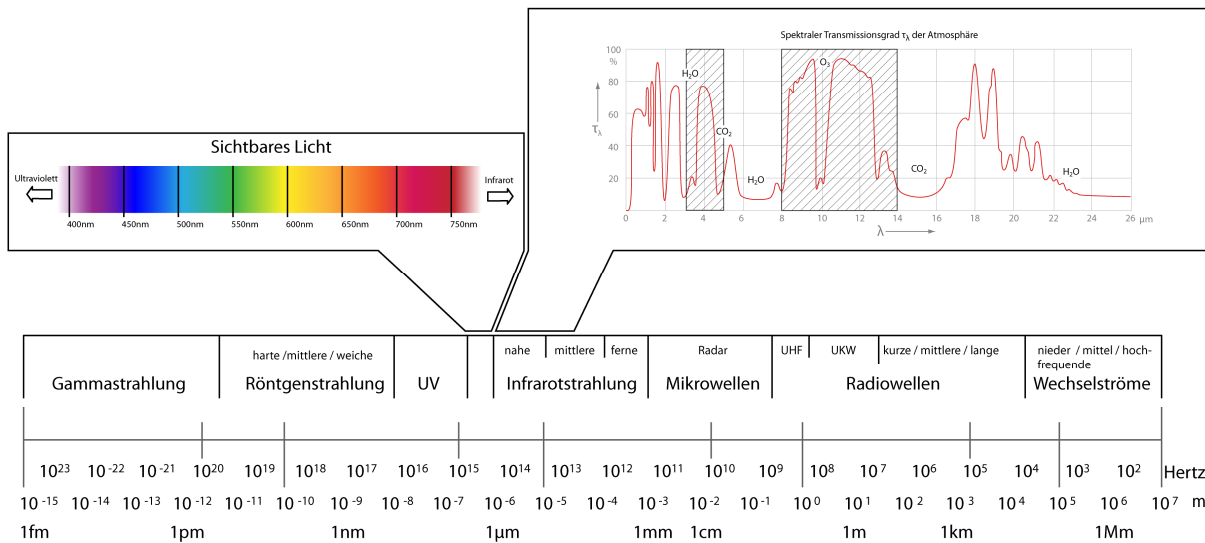


Abb. 59: Gesamtes elektromagnetisches Spektrum

Das Spektrum der Infrarotstrahlung befindet sich zwischen dem sichtbaren Wellenlängenbereich und dem Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums (s. Abb. 59). Es beginnt am roten sichtbaren Wellenlängenbereich bei einer ungefähren Wellenlänge von  $0,78\mu\text{m}$  und erstreckt sich bis ca.  $100\mu\text{m}$  an die Grenzen des Mikrowellenbereiches. Der nutzbare Bereich für Thermographiesysteme ist deutlich kleiner und verläuft im Bereich zwischen  $0,78$  und  $14\mu\text{m}$  (s. Tab. 12).

Name		Wellenlängenbereich	Einsatz in der Thermographie
<b>NIR</b>	Nahes Infrarot	$0,78-3\mu\text{m}$	Nein
<b>MIR</b>	Mittleres Infrarot	$3-7\mu\text{m}$	Ja
<b>LIR</b>	Langwelliges Infrarot	$7-14\mu\text{m}$	Ja
<b>FIR</b>	Fernes Infrarot	$> 14\mu\text{m}$	Nein

Tab. 12: Infrarotwellenlängenbereiche (Schuster und Kolobrodov 2004, S. 12).

## 6.1 Messstreckeneinfluss durch atmosphärische Transmission

Aufgrund des berührungslosen Messverfahrens kann die Infrarotstrahlung vom Messobjekt bis zur Infrarotkamera eine unterschiedlich weite Distanz durch die Atmosphäre zurücklegen. Diese beeinflusst indes mit ihren chemischen Verbindungen des Wasserdampfs ( $H_2O$ ), des Kohlendioxids ( $CO_2$ ) und des Ozons ( $O_3$ ) die Infrarotstrahlung in Abhängigkeit von ihrer ausgesandten Wellenlänge durch Absorption, Streuung und Reflexion unterschiedlich stark (Glückert 1992, S. 43), was zur Durchlässigkeit<sup>37</sup> oder Dämpfung führt. Zwei markante Bereiche im Wellenbereich der Infrarotstrahlung mit hohem Transmissionsgrad  $\Gamma_\lambda$  in der Atmosphäre stellen die *atmosphärischen Fenster* dar (s. Abb. 60 – schraffierte Bereiche). Sie werden repräsentiert durch einen kurzwelligen Bereich von 3–5  $\mu m$ , der bei Messdistanzen über 10 Metern eine erfassbare Abschwächung durch die Atmosphäre offenlegt, und durch einen langwelligen Bereich von 8–14  $\mu m$ , der auch über größere Messdistanzen keine signifikante Abschwächung des IR-Signals aufweist.

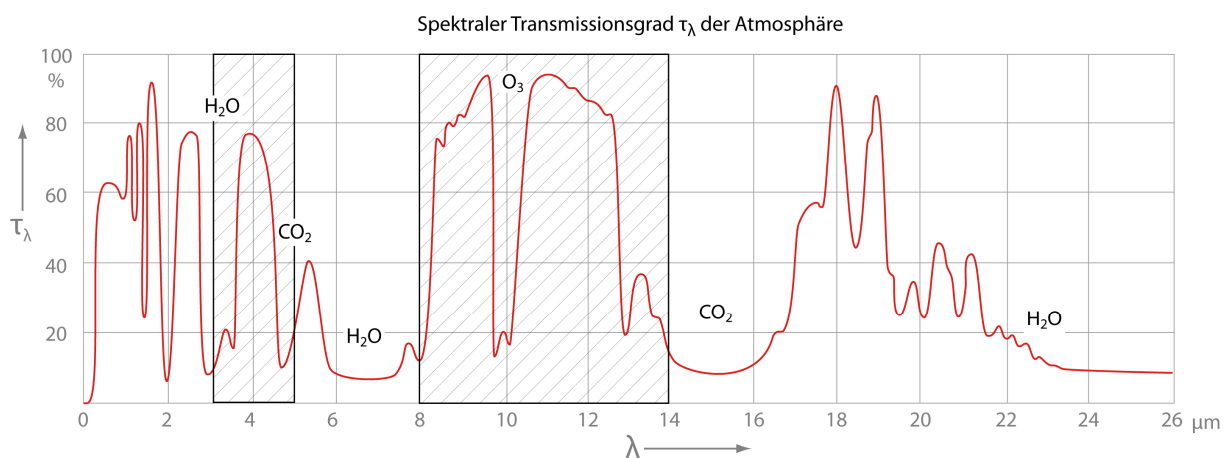


Abb. 60: Erweiterte Abbildung des spektralen Transmissionsgrades der Atmosphäre nach Albertz (Albertz 2007)

Glückert geht bei einer thermischen Übertragung von wenigen Metern bei atmosphärischen Normalbedingung von einer vernachlässigbaren Größe aus, welche bei luftgestütztem System aber nicht mehr gegeben ist und dadurch die Wahl des Detektors entscheidend beeinflusst (Glückert 1992, S. 43).

Weiterführende Literatur zur *atmosphärischen Transmission* finden sich unter anderem in Schuster (Schuster und Kolobrodov 2004, S. 73).

## 6.2 IR-Kamerasystem und Bauthermografie

Thermalkameras machen sich das physikalische Phänomen der schwingenden Molekularstruktur der Körper zu Nutze, um deren emittierende Strahlungsintensität mittels gekühltem Quantendetektoren und den darin auslösenden fotoelektrischen Effekt mithilfe eines Photonen Zählers zu erfassen (s. Abb. 61). Das so detektierte schwache thermische Spektrum wird elektronisch verstärkt und die kontinuierlich im Messbild verlaufenden thermalen Werte

<sup>37</sup> Transmission



in digitale Rasterbilder bzw. in Bildsequenzen für die spätere Videoverarbeitung abgelegt. Eine Halbton- oder Farbdarstellung ist das unmittelbare Ergebnis eines Thermogramms. Für die bessere Interpretation der Ergebnisse bieten Gerätehersteller unterschiedliche Farbverläufe für die Thermogrammdarstellung an, die durch eine am Rand platzierte Farbskala die Decodierung des gewählten Farbverlaufs im Thermalbild erleichtert. Zusätzlich kann der Fachmann durch platzierte Messknoten einzelne Temperaturwerte explizit für seine Analyse herausstellen.

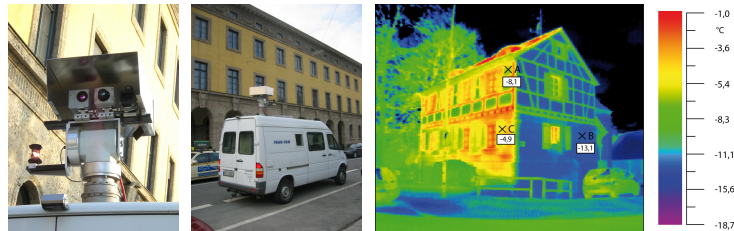


Abb. 61: Mobiles Thermalkamerasystem für zwei unterschiedliche Wellenlängen

Die technischen Werte von Thermalkameras für die Bauthermographie liegen in einem maximalen Messbereich von  $-40$  bis  $+250$  °C mit einer Messgenauigkeit ( $MRTD$ <sup>38</sup>) von bis zu  $\pm 1$  K bzw.  $\pm 1\%$  des Ablesewertes und einer thermischen Empfindlichkeit ( $NETD$ <sup>39</sup>) bis zu unter  $0,03$  K. Die Marktführer liefern mit ihren größten Sensoren eine Bildauflösung von  $640 \times 480$  Pixeln bei einem Sichtfeld ( $FOV$ <sup>40</sup>) von  $12$  bis  $45$  Grad.

In der Bauthermographie arbeitet man in den üblichen Temperaturbereichen von  $-20$  bis  $+80$  °C mit einem zu erwartenden Strahlungsmaxima im Wellenbereich von  $8$  bis  $14$  Mikrometern. Aufgrund des gedämpften Transmissionsgrades durch die Atmosphäre zwischen  $5,1$ – $7,9$   $\mu\text{m}$  werden heutzutage vorwiegend für Thermalkamerasysteme die Bereiche im mittleren ( $3$ – $5$   $\mu\text{m}$ ) und langwelligen Infrarot ( $8$ – $12$   $\mu\text{m}$ ) genutzt (s. Tab. 12). Kurzwellige Systeme sind gegenüber Einflüssen terrestrischer Rückstrahlung<sup>41</sup> unempfindlicher als vergleichbar langwellige Systeme. Dabei unterliegt der langwelligere Bereich einem geringeren Einfluss bei unmittelbarer Sonneneinstrahlung. Der spektrale Messbereich der handelsüblichen Thermographiekameras ist jedoch meist so stark begrenzt, dass eine Anwendung des *Stefan-Boltzmann-Gesetzes* nicht möglich ist.

In der Bauthermographie ist grundsätzlich der Wärmetransport zwischen unterschiedlichen Temperaturgefällen benachbarter Körper bzw. Medien von Interesse. Der Wärmestrom fließt solange vom höher zum niedriger temperierten Körper bis sich eine Ausgleichstemperatur eingestellt hat (Wild 1998, S. 172). Wegen eines Temperaturunterschieds zwischen Innenraum und Außenumgebung kommt es im Mauerwerk und bei Fassadenöffnungen zu

<sup>38</sup>  $MRTD$ : Minimum Resolvable Temperature Difference

<sup>39</sup>  $NETD$ : Noise Equivalent Temperature Difference

<sup>40</sup>  $FOV$ : Field Of View

<sup>41</sup> Unter terrestrischer Rückstrahlung versteht man den zusätzlichen Strahlungseinfluss von erwärmter Nachbar- bzw. Gegenfassaden.

einem permanenten Wärmestrom, der im Bauwesen als stationäre Größe betrachtet werden kann. Das heißt, eine Änderung der Wärmeübertragung über einen längeren Zeitraum (Winterperiode) ist nicht zu erwarten (Wild 1998, S. 173). Dies gilt selbst auch für Thermographiemessungen, deren Messumgebung sich während der Messung stationär oder quasistationär in ihrem Temperaturverhalten ändert. Darunter ist eine geringe Schwankung der Lufttemperatur im Außen- wie auch im Innenbereich zu verstehen. Grundsätzlich unterscheidet man drei Arten des Wärmeenergieaustausches mit jeweils eigener physikalischer Gesetzmäßigkeit:

- Wärmestrahlung
- Wärmeströmung (*Konvektion*)<sup>42</sup>
- Wärmeleitung

Für die Detektion dieser drei Arten hat es sich in der Praxis als praktikabel erwiesen, dass das Temperaturgefälle zwischen Außen- und Innenraumluft nicht unter 15K liegen sollte (VATH 2010), um auch noch potenziell schwache Fehlstellen an der Außenfassade detektieren zu können. Bei einer bauthermographischen Messung werden meist nur relative Temperaturen erfasst, da es hierbei weitgehend auf das thermale Verhältnis zwischen den unterschiedlichen Baustoffen ankommt. Eine absolute Temperatur für den detektierten Baustoff (Material) kann erst dann ermittelt werden, wenn vorab der Emissionswert erfasst wurde, oder sich ein bekannter Emissionswert zuordnen lässt. Bei einer kleinräumigen und flächenhaften Erfassung der Temperaturverteilung können dadurch die Einflüsse von Wärmemerkmalen wie beispielsweise Wärmebrücken erkennbar gemacht werden. Nach Flohrer (Flohrer 2002) eignet sich der Einsatz der Bauthermographie besonders zur Aufdeckung von:

- Wärmedämmfehlern
- Luftleckagen
- unplanmäßigen Energieverlusten
- ergründen schlechten Bauklimas
- Erfassung von Bauschäden

Fehlerfreie Ergebnisse einer bauthermographischen Untersuchung sind nur dann zu erwarten, falls bestimmte Einflussgrößen beachtet werden (Flohrer 2002). Zu diesen Größen zählen:

- die Umgebungstemperatur
- der Wärmeübergang (innen/außen),
- die Abkühlung, Erwärmung und Befeuchtung durch klimatische Einflüsse
- eine direkte und diffuse Wärmeeinstrahlung, beispielsweise durch Sonne, Heizquellen, Lichtquellen usw.
- die spezifische Wärmekapazität des Baumaterials

Der hohe zeitliche Aufwand einer üblichen bauthermographischen Untersuchung wird vom BUNDESVERBAND FÜR ANGEWANDTE THERMOGRAPHIE E.V. (VATH) und der DEUTSCHEN

---

<sup>42</sup> Nach Wild ist die „Hauptantriebskraft für unkontrollierte Leckageströmungen [...] im mitteleuropäischen Klima der Winddruck“, dem so genannten Staudruck auf der Leseite eines Gebäudes (Wild 1998, S.174).

GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG (DGZFP) durch das Einhalten notwendiger Messrandbedingungen und der zeitintensiven Interpretation und Bewertung der Thermogramme begründet. Die VATH veranschlagt für ein Einfamilienhaus zwei Stunden vor Ort und einer Auswertung mit Prüfbericht von 6–8 Stunden. Darüber hinaus betont die VATH, dass eine Außenmessung nur als orientierende Messung für Qualitätssicherung von Wärmedämmverbundsystemen, Leckageortung im Flachdachbereich und in der Fachwerkthermographie herangezogen werden kann und somit eine Sonderstellung innerhalb der Thermographie einnimmt. Dies kann aber schon durch die erste Thermographieaufnahme in Abb. 63 eines detektierten aufsteigenden Heizungsrohres in einem Neorenaissance- Gebäudes eindrucksvoll widerlegt werden. Übliche bauthermographische Untersuchungen wie Taupunktbestimmung in den Zimmerecken zwecks Untersuchung der Schimmelbildung oder der Erfassung von Geschoßdeckeneinbindungen sowie der Aufnahme von undichten Dachbereichen sind laut VATH durch eine Außenaufnahme nicht möglich. Ein weiterer Einsatzbereich für die Außenthermographie findet sich in der Bauphysik. Hier geht es um die Lokalisierung geeigneter Ort des wenige Quadratzentimeter großen Wärmestrommessers.

### 6.3 Detektion thermaler Strukturen

Eine Detektion thermischer Strukturen an Gebäuden erfolgt meist aufgrund der empfohlenen Temperaturdifferenz bzw. der kürzeren und schwächeren Sonneneinstrahlung in den Wintermonaten. Eine Ausnahme bilden hierbei wärmespeichernde Baustoffe wie Holz mit ihrer Speicherkapazität von 2000–2100J/kgK. Durch ihre thermale Eigenschaft ist die Detektion hier deutlich sinnvoller in die wärmere Jahreszeit zu legen als in die sonst übliche winterliche Messdekade. Der Einsatzbereich dieser Baustoffe findet sich in der Fachwerkthermographie für verputzte Holztragwerke wieder. Eine so klare Trennung der wärmespezifischen Strukturen ist durch den großen Unterschied zwischen den Speicherkapazitäten der angrenzenden Baustoffe begründet.



Abb. 62: Gebäude: Historisches Massivgebäude – Fachwerkhaus – Fertighaus

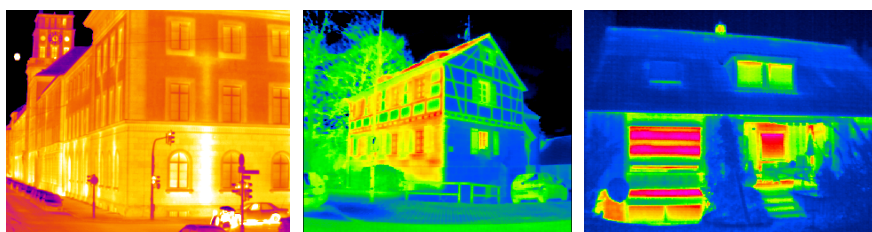


Abb. 63: Messbildaufnahme: Historisches Massivgebäude – Fachwerkhaus – Fertighaus

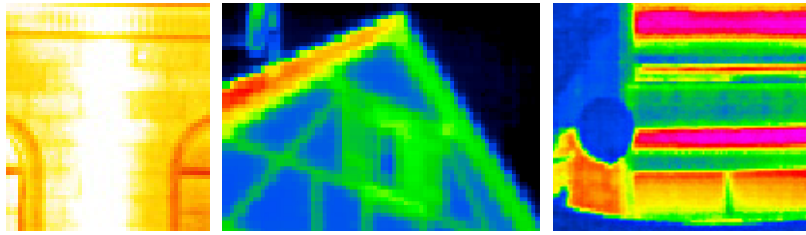


Abb. 64: Detailausschnitt: Massivgebäude – Fachwerkhaus – Fertighaus

Abb. 63 und Abb. 64 zeigen Thermogramme aus dem Bereich der Bauthermographie. Das erste Thermogramm stellt ein historisches Gebäude in einer massiven Steinausführung dar. Hier sieht man die Ziegelstruktur, die Steigleitung des Heizungssystems, die Materialübergänge und die metallischen Elemente der Fensterrahmen. In der mittleren Abbildung ist ein zweistöckiges Fachwerkhaus dargestellt, das eine sonnenbeschienene linke Seite aufweist und im Schattenbereich das verputzte Fachwerk klar hervortritt. In der rechten Thermographieaufnahme erscheint ein Fertighaus der 70er-Jahre, dessen gemauertes Kellergeschoss anscheinend unzureichend isoliert und die hölzerne Lattenstruktur unter der Schalung zwischen der Panoramascheibe und dem Kellergeschoß deutlich zu sehen ist. Das heißt, dass durch die Thermographie alle in der Außenschale eines Gebäudes liegenden thermischen Differenzen zwischen physisch existierenden Stoffen berührungslos erkennbar sind. Folglich können in der Außenfassade vorhandene Versorgungssysteme (Heizung/Wasser), die Materialbeschaffenheit, der Bauzustand (Risse), die baulichen Veränderungen sowie Konstruktionsformen und -elemente thermographisch mit unterschiedlich großem Aufwand erfasst werden. Dabei zeichnen sich punkt-, linien- und flächenhafte Strukturen ab, die sich in kartographische Formprimitive überführen lassen.

Ein interessanter Aspekt ist die Betrachtung thermaler Strukturen in der Mauertiefe von punkt- und linienhaften Thermalquellen, welche ihre Strahlung in das umgebende Baumaterial emittieren. Das verdeutlicht, je tiefer die thermische Struktur liegt, umso länger braucht der Temperaturtransfer an die Oberfläche. Während dieser Zeit breitet sich aufgrund des physikalischen Bestrebens auf Temperatúrausgleich das Temperaturgefälle zu allen Seiten gleichmäßig aus und tritt als unterschiedlich breite thermale Struktur flächig an der Fassadenoberfläche auf. Inwiefern durch die Breite der thermischen Ausdehnung auf die genaue Tiefe geschlossen werden kann, bleibt ein Forschungsthema der Bauphysik.

Das vielversprechende zerstörungsfreie und berührungslose Messverfahren stößt aber auch an seine physikalischen messtechnischen Grenzen. So schließen besondere bautechnische Strukturen eine erfolgreiche Messung aus. Dazu zählt das Doppelmauerwerk, das ein innen liegendes Luftpolster aufweist und eine notwendige Temperaturtransmission der thermischen Strukturen aus dem Tragmauerwerk an das vorgelagerte Blendmauerwerk durch die Luftschicht verhindert. So ist eine Leckagemessung von außen unmöglich. Eine anderweitige Einschränkung besteht in den meteorologischen Rahmenbedingungen der Aufnahmesituation, sodass eine Messung bei schlechten Witterungsbedingungen (Regen, Nebel) und bei Windgeschwindigkeiten über 3 m/sec (10,8 km/h) nicht durchführbar ist.

#### 6.4 Messtechnisch bedingte thermale Farbdarstellung

Die grundlegenden Messdaten einer thermalen Kamera liegen in einer Grautonskala mit 256 Werten vor. Herstellerbedingt können unterschiedlichste Farbskalen eingesetzt werden (s. Abb. 65). Übliche Farbgradienten sind hierbei das elektromagnetisch sichtbare Farb-

spektrum mit einem Farbverlauf von Violett – Blau – Grün – Gelb – Orange – Rot, der Farbverlauf physikalisch *erhitzter Körper* mit den Farben Blau – Violett – Rot – Gelb – Weiß und einem assoziativen Farbverlauf von Blau – Hellblau – Weiß – Hellrot – Rot.

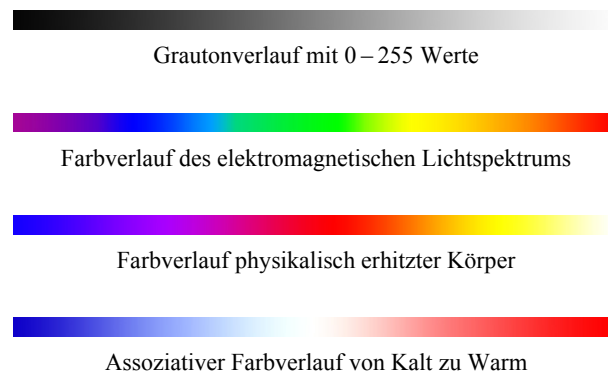


Abb. 65: Auswahl herstellerbedingter Thermalfarbskalen

Da die Farbgebung als Farbreihenfolge für kontinuierlich verlaufende thermale Messdaten innerhalb eines Bildes eingesetzt wird, entscheidet die Wahl der Farbreihenfolge über eine fehlerfreie bzw. fehlerhafte Interpretation einer thermalen Fassadenaufnahme. Somit kann die attentive Einschätzung des Temperaturverlaufs fehlerhaft sein, die nur durch eine am Bildrand platzierte Farbskalenangabe, korrekt entschlüsselt werden kann. Dies geschieht gerade dann, wenn der farbliche Verlauf als fälschlicherweise bekannt angenommen wird.

## 6.5 Interpretationsfehler

Die menschliche Wahrnehmung richtet sich sehr stark nach dem visuellen Reiz und nimmt sichtbare Informationen in Bildern als existierende Strukturen wahr. Diese Wahrnehmung trifft auf eine photographische Aufnahme des sichtbaren elektromagnetischen Farbspektrums auch zu. Das heißt, die Bildinformation, die der Operator in seiner Auswertestation erkennt, ist sichtbar. Thermographische Kameras hingegen erfassen Temperaturen aus dem Infrarotbereich, die außerhalb des menschlichen Farbspektrums liegen. Sie erfassen daher das thermische Verhalten sichtbarer wie auch unsichtbarer Elemente und können darüber hinaus verdeckte Elemente für das menschliche Auge sichtbar machen.

Da in einem Thermogramm nicht die visuelle, sondern die thermale Strahlung erfasst wurde, kann es zu Interpretationsfehlern der vorliegenden Temperaturergebnisse kommen. Das liegt zum einen an zeitlich versetzten Vorkommnissen, an konstruktionsbedingten Besonderheiten, an vorliegenden Oberflächenmaterialien und in der gewählten Farbdarstellung des Messbildes. Dies führt bei Nichtbeachtung der äußeren Begebenheit unweigerlich zu einer Fehlinterpretation der Aufnahme. Anhand von vier typischen Beispielen wird kurz auf die unterschiedlichen Interpretationsfehler eingegangen:

- Eine zeitliche Verfälschung tritt beispielsweise bei geöffnetem Fenster auf, welches unmittelbar vor der thermalen Messkampagne geschlossen wurde. Ist dieses Vorkommnis dem Fachmann nicht bekannt, so kommt es zwangsläufig zu einer Fehlinterpretation aufgrund der thermisch aufgeheizten Außenfassade durch die vorab ausgeströmte Innenraumluft.
- Eine konstruktionsbedingte Verfälschung liegt dann vor, wenn warme Luftmassen sich an der Gebäudestruktur fangen. So kann sich eine vermeintlich entdeckte Wärme-

- leckage unterhalb des Traufvorsprungs als Wärmenest entpuppen, das durch erwärmt aufsteigende Luftmassen nahe der sonnenbeschienenen Außenfassade verursacht wurde.
- Eine materialbedingte Verfälschung ergibt sich durch die verwendeten Baustoffe und Materialien, die durch ihre Oberflächenstruktur das Messergebnis beeinflussen. So verfälschen es glatte und spiegelnde Oberflächen, indem sie nicht ihre materialeigene Oberflächentemperatur, sondern die reflektierten emittierenden Objekttemperaturen aus ihrem Umfeld wiedergeben. Das lässt die Schlussfolgerungen zu, dass Metalldächer und metallisch eingefasste Simse die kalten Temperaturen des Himmels annehmen, Fenster, bedingt durch ihre Ausrichtung, als thermale Spiegelbild der Umgebung zu sehen sind. Der Nachteil liegt in der Erfassung der Temperaturwerte reflektierender Objekte und wird in der Praxis durch eine Veränderung des Opakwertes oder der Oberflächenrauheit durch Materialpreparation erreicht.
  - Eine farbliche Verfälschung kann durch die unbedachte Wahl des Farbverlaufs in einem Thermogramm erfolgen. Sie wird durch eine farbliche Fehlinterpretation infolge unterschiedlicher Farbassoziationen, des fachlichen Vorwissens seitens des Betrachters und der Verbindung zwischen Farbwahl und Messobjekt verursacht. So würde die Farbskala *erhitzter Körper* anstelle eines assoziativen Temperaturverlaufs in der detektierten Fassade beim Betrachter zu einer möglichen Fehlinterpretation führen, wenn auf einer Farbskala am Bildrand auf Dechiffrierung verzichtet werden würde. Grund der Fehleinschätzung wäre dann, dass die Farbe Weiß (in diesem Fall glühend) einen weit-aus höheren Temperaturwert besitze als die Farbe Rot. Rot als *Farbton* steht im Allgemeinen für Wärme und löst eine stärkere Assoziation beim Menschen aus als die Farbe Weiß. Diese zählt dagegen beim Laien zu einem neutralen Farbwert, der eher einen Ausgangswert für einen intervall- oder ratioskalierten Verlauf bestimmt. Das hat zur Folge: In einem Farbverlauf würde die Farbe Weiß als Zwischenwert oder Grundwert wahrgenommen. Somit wäre der Gradient falsch interpretiert.

Das Feld der Thermographie zeigt wie komplex die Erfassung von fehlerfreien absoluten bzw. relativen Temperaturwerten ist. Schon vor der Messaufnahme muss der örtlichen und meteorologischen Situation Rechnung getragen, und dem baulichen Bestand Beachtung geschenkt werden, um das Messbild fehlerfrei beurteilen zu können. Die Auswertung eines Thermogramms mit seinen Temperaturwerten und thermischen Strukturen für die Anreicherung metamorpher Kartographiken auf einer Gebäudefassade und ihrer damit verbundenen Aufbereitung nutzerrelevanter Informationen für unterschiedliche Zielgruppen fällt in den Bereich der kartographischen Visualisierung. Dabei spielt eine klare Farbgebung der Temperaturdarstellung eine wichtige Rolle, da es nicht nur im Thermogramm, sondern auch in einer aufbereiteten Thermalkarte zu Fehlinterpretationen kommen kann.

Im folgenden Abschnitt werden auf diese Punkte eingegangen. Diese dienen dann zur Gestaltung der thermalen 2D- und 3D-Karten. Als Grundlagen stehen hierbei eine korrigierte Thermalaufnahme (IR-Bild) und die Ausgangskarte bzw. das Ausgangsmodell zur Verfügung.

## 7 Thermale Informationen an der Gebäudefassade

Die Thermographie bietet die Möglichkeit, nichtsichtbare thermische Informationen für die Fassade zu erfassen. Dabei lassen sich diese als Grundlage für die Visualisierung, zur Analyse und zum Verstehen der thermischen Phänomene in thematische Karten oder kartenverwandte Darstellungen umsetzen.

Durch die Digitalisierung und deren computerbasierte Prozesse ist eine dynamische Visualisierung von echten bauthermographischen Abläufen durchführbar. Dies erfordert aber eine Datenerhebung über einen längeren Zeitraum, d.h. eine oberflächlich thermale Veränderung findet im Laufe eines Tages kontinuierlich durch die Umgebungstemperatur und Sonneneinstrahlung statt, die bauthermischen Eigenschaften bleiben hingegen bis auf wenige kurzzeitige Veränderungen (z.B. offenes Fenster) konstant und verändern sich nur durch einen jahreszeitbedingten Temperaturwechsel oder einen eingetretenen Gebäudeschaden (Wasserschaden, Rissbildung, etc.). So stellt die thermale Momentaufnahme der Gebäudefassade einen guten Istzustand für die non-temporale Darstellung dar.

Für die Vorstellung unterschiedlicher Kartenentwürfe werden auf Darstellungsformen aus dem Bereich der Kartographie, Meteorologie und Geologie zurückgegriffen und an die räumliche Thematik und Dimension adaptiert. Dabei spiegeln die digitalen 2D-Kartenentwürfe das thermische Verhalten in der Gebäudefassade auf konventionelle kartographische Weise wider. Ihre Gestaltung ist für die Thermalstrukturen hoch ikonisch geprägt mit dem Ziel, durch die für den Kartennutzer nicht bekannten Kartenzeichen möglichst assoziativ zu vermitteln. In den digitalen räumlichen und körperhaften kartenverwandten Darstellungen werden die Isothermen, das Quaderraster, das Profilrelief und das Digitale Fassadenmodell vorgestellt, welches die räumliche Ausdehnung der Temperaturwerte über ihre Form verdeutlichen und durch angepasste Kartenzeichen die klassifizierte Thermalstrukturen aufnehmen soll. Die aus Thermogrammen logisch ableitbare Tiefe der thermischen Strukturen in der Fassade kann durch ein baukonstruktives Fachwissen nur grob erfolgen. Ihre Kategorisierung erlaubt keine metrischen Angaben. Für ihre Informationsvermittlung wird sie in die Signaturgestalt integriert und nur über die Werte *oberflächlich*, *verdeckt* und *tief liegend* unterschieden.

Für die Distanz- und Größenschätzung in der räumlich perspektivischen Darstellung werden bekannte Raumhilfen (Fassadengitter, Aufrissformen) für die Anreicherung an der Fassade verwendet, wie auch neue Raumhilfen (Distanzfächer, perspektivischer Maßstabsbalken) vorgestellt, die unterstützend auf die Abschätzung einwirken sollen.

### 7.1 Zielgruppen

Inwieweit die Aufmerksamkeit der Nutzer auf die thermalen Informationen mit einem Gebäudebezug in einer angereicherten Fassadenkarte gelenkt werden kann, hängt von der individuellen Ausgangssituation jedes einzelnen Nutzers ab. Unter Nutzer sind alle die Personen gemeint, die ein Interesse an der thematischen Umweltsituation in Form einer kartographischen Darstellung hegen. Dabei ergeben sich für diese Thematik unterschiedliche Nutzergruppen (s. Tab. 13).

Die erste Nutzergruppe besteht aus dem Gebäudeeigentümer. Dieser verfolgt das Interesse der Aufdeckung von Leckagen, dem Schutz des Innenraumklimas (Schimmeldetektion), der

Einschätzung der Bausubstanz, der Bau- bzw. Sanierungskontrolle oder der Untersuchung von Optimierungsmaßnahmen zur Wärmedämmung. Die eigentlichen Messwerte verlieren dagegen eher an ihrer Bedeutung. Innerhalb dieser Gruppe kann weitgehend von Laien ausgegangen werden, welche die thermalen Strukturen eines IR-Messbildes nicht ohne eine Aufbereitung zu thermalen Fassadenkarten fehlerfrei interpretieren können.

Der Thermograph kann als weitere Nutzergruppe gesehen werden. Dieser bringt dagegen vorhandenes Fachwissen über physikalisches und bautechnisches thermale Verhalten in die Thermogramminterpretation bzw. thermale Karteninterpretation mit ein. Dabei agiert er im Interesse des Auftraggebers. Mit seinem Wissenshintergrund führt er eine Analyse und Bewertung durch. Dabei nutzt er einzelne Temperaturwerte und betrachtet den Verlauf von Temperaturübergängen zur Einschätzung konstruktions- und materialbedingter Situationen. Er ist somit der Gruppe der Fachleute zuzuordnen.

Der Bauphysiker als dritte Nutzergruppe bezieht seine Motivation aus der Bestimmung von Materialeigenschaften, des thermischen Materialverhaltens oder deren konstruktiven fehlerfreien Ausführungen. Er zählt mit seinem umfassenden Fachwissen zur Expertengruppe.

Eine weitere Nutzergruppe bildet das Stadtplanungs- oder Bauamt, dessen Interesse in der Analyse des städtischen Lokalklimas liegt, welches durch Wärmespeicherprozesse und dem Aufheizverhalten versiegelter Bereiche beeinflusst wird. Dazu zählen alle künstlich erschaffenen urbanen Objekte wie Straßen und Gebäude. Da sie ihren Fokus bezüglich der Einschätzung und Beurteilung mehr auf den gesamtstädtischen Bereich richtet, findet die Analyse kleinräumiger Bereiche, beispielsweise thermischer Fassadenmerkmale, nur geringe Beachtung. Das Stadtplanungs- oder Bauamt vertritt durch seinen Wissensstand die Gruppe der Fachleute. Ihre Zielgruppe wird in der weiteren Arbeit durch ihr eher großräumig geprägtes Interesse an der thermalen Situation nicht weiter berücksichtigt.

	<b>Gebäude- eigentümer</b>	<b>Thermograph</b>	<b>Bauphysiker</b>	<b>Stadtplanungs- /Bauamt</b>
	Laie	Fachmann	Experte	Fachleute
Zustandsanalyse	+	+	+	-
Sanierungskontrolle	+	+	-	-
Temperaturwerte/ -verhalten	-	+	+	+
Materialeigenschaft (Wärmekapazität / Emissionswert / Aufheizverhalten, ...)	-	-	+	-

Tab. 13: Nutzergruppen

## 7.2 Klassifizierung thermaler Informationen

Nach Hake (Hake et al. 2002, S. 16) handelt es sich bei der Temperatur um ein reale messbares Kontinuum, das sich für die spätere Auswertung als originäre Information behandeln lässt. Erfolgt eine Klassifizierung der thermalen Strukturen, kommen Diskreta



hinzu, die sich in punkt-, linien-, und flächenhafte Objekte unterscheiden. Aufgrund der Datengrundlage eines lokalen kleinräumigen und flächigen thermalen Rasterbildes besteht ein kontinuierlicher Temperaturverlauf über die gesamte Fassadenfläche, welcher sich durch geometrische Formprimitive und seine qualitativ-relativen Vorkommen aggregieren lässt. Quantitative Aspekte kommen erst dann zum Tragen, wenn Isothermen extrahiert werden oder eine thermale Veränderung am Gebäude über die Zeit feststellbar wird.

Thermische Strukturen sind räumlich unterschiedlich ausgeprägt und können in die drei Grundelemente Punkt, Linie und Fläche untergliedert werden (s.Tab. 14). Die Wahl ihrer Klassifizierung und Repräsentation hängt dabei nicht von der Wirkung ab, die sie auf der Oberfläche zeigen, sondern von ihrer Ursache in der Fassade. So verursacht ein lokaler Wasserschaden, der als ein punkthafter Ursprung zu sehen ist, eine flächenhaft thermische Auswirkung an der Oberfläche.

So beinhalten die Fassadenkarte nicht nur klassifizierte sichtbare Elemente wie Türen oder Fenster, sondern auch die ursachebedingten Wärmequellen, der punkt- und linienhaften Strukturen und die flächenhaften Wärmeeinträge. Folgende Tabelle zeigt mögliche identifizierbare thermische Strukturen im Gebäudebereich.

<b>Punkt</b>	Installationen (Maueranker, Bewährung), Wärme-/Kältebrücken
<b>Linie</b>	Heizungsrohre, Risse, Fugen, Fachwerkkonstruktionen, Materialübergänge, Fallrohre, Blenden, Simse
<b>Fläche</b>	Fenster, Türen, Baustoffe, Wärmeeintrag in das Fassadenmaterial (Wasserleckagen)

Tab. 14: Thermische Strukturen im Gebäudebereich

Darüber hinaus lassen die Strukturen nicht nur Rückschlüsse auf ihre konstruktionsbedingte Tiefe zu, sondern auch auf ihre gegenseitige Überlagerung, die sich in eine thermale Tiefeninformation klassifizieren lässt. So kann gesagt werden, dass thermale Einflüsse, die ausschließlich aus thermodynamischen Prozessen in der Fassade gewonnen wurden, weitgehend als Objektgegenstand mit *relativen Vorkommen (Verbreitungsflächen)* bezeichnet werden können (s.Tab. 15). Das bedeutet, es können mehrere thermale Strukturen in einer wahrnehmbaren und klassifizierbaren Größe innerhalb einer begrenzten Fläche (z.B. Fassadenfläche) verteilt vorliegen. Deren Objekteigenschaft ist es, überlappend in Erscheinung zu treten. So überlagern sich nicht nur einzelne, sondern mehrere klassifizierbare Objekte aus unterschiedlichen Mauerschichten, die auf der Fassadenoberfläche gleichzeitig in Erscheinung treten (Heizungsrohre – Baustoffe – Simse) und in ihrer Größe und Ausdehnung als thermale Signatur eindeutig sind.

Ein *absolutes Vorkommen* wie es das Prinzip „Wo Wald ist, kann kein See sein“ (Hake et al. 2002, S. 15) darlegt, kommt in einer thermalen Karte nur in den Bereichen vor, die in der gleichen räumlichen Fassadentiefe thermisch klassifizierbare Strukturen aufweisen.

<b>Relatives Vorkommen</b>	Über die Tiefe auflaufende thermische Strukturen die an der Fassadenoberfläche zu Tage treten
<b>Absolutes Vorkommen</b>	Parallel zur Fassadenebene in der Mauerschicht vorkommende thermale Strukturen

Tab. 15: Relatives und absolutes Vorkommen

### 7.2.1 Tiefe der thermalen Strukturen

Aufgrund des thermalen Aufnahmeverfahrens ist nur eine Erfassung der unmittelbaren Oberflächentemperatur an der Fassade möglich. Durch die thermische Ausprägung in ihrer Lage, Form und Größe sowie durch Fach- und Erfahrungswissen können häufig Rückschlüsse auf die Art und Ursache und auf die ungefähre Tiefe der detektierten Strukturen gefunden werden. So ist bei einer Detektion von Heizungsrohren, Fachwerk oder Fugen eine zwar nur grobe, aber dafür logische räumliche Anordnung der Tiefe möglich, die für den Kartennutzer als zusätzliche Information angeboten werden kann. Für die Symbolisierung bedeutet dies, dass im oder am Symbol zusätzlich eine graphische Variable für die Übermittlung der Tiefeninformation einzusetzen ist.

### 7.2.2 Fiktive thermale Strukturen

Bei den Kartenentwürfen kommen fiktive thermale Strukturen zur Anwendung, die aus dem reinen thermalen Bild so nicht ableitbar sind. Das bedeutet, dass Teile des Heizungssystems, z. B. Heizungsrohre und unter Umständen auch Heizkörper, in ihrer Lage als nominale Daten erkannt werden können: Eine Klassifizierung ihres individuellen Heizgrads hingegen als ordinale Daten noch nicht möglich ist. An dieser Stelle soll die Möglichkeit aufgezeigt werden, wie in Zukunft thermal aufbereitete Fassadenkarten mit verfeinerten thermographischen Messungen und nutzbaren georeferenzierten *Facility-Management-Daten* sowie mit den Erkenntnissen aus der Bauphysik angereichert werden könnten, da Heizkörper einen massiven und aktiven Wärmeeintrag in der Fassade bedeuten.

## 7.3 Korrelation zwischen Thermalstrukturen und Fassadengeometrie

Heutige virtuelle Stadtmodelle versuchen durch photorealistische Gebäudetexturen möglichst realitätsnah bzw. durch Einsatz von *NPR* diese für den Betrachter noch einfacher und anschaulicher zu gestalten (Gooch und Gooch 2001; Goldstein 1999). Dabei kann auf eine texturfreie Darstellung oder eine geometrische Untergliederung des Gebäudes nicht verzichtet werden, wenn dort bestimmte Bereiche mit zusätzlichen Informationen angereichert werden sollen, da ein Kartenzeichen auf einer homogenen unifarbene Fassadenfläche nur schwer einer bestimmten Lage zuzuordnen ist. Der fehlende Bezug zur realen Gebäudefassade legt daher nahe, eine Texturierung der äußeren Gebäudehülle zu gestalten und somit eine Verbindung zwischen digitaler Karte und realer Begebenheit herzustellen. Jahnke et al. beleuchtet in seinen *NPR*-Darstellungen die mögliche Abstraktion von realen Gebäudetexturen bis hin zu noch zuordenbar reduzierten Texturbeispielen. Dabei spielen Fenster, Türen und das farbliche Erscheinungsbild der Fassade eine tragende Rolle (Jahnke et al.

2011). Um die farblichen Aspekte von diesen Überlegungen zu umgehen, wurde für die Thermalkartenentwürfe ausschließlich Gebäudeöffnungen und markante sichtbare Gebäudestrukturen als Konturlinie lagetreu verwendet. Damit minimierte man die Gefahr der *farblichen Überfrachtung*, dem sogenannten *visual clutter* (Phillips & Noyes 1982), die durch zusätzliche flächenhafte farbliche Signaturen verursacht werden kann.

Für die räumliche Lageverbindung (*Affinität*) zwischen thermalen und real-sichtbaren Informationen werden Fenster und Simse (Sohlbänke) als Signaturen in die Karte mit eingebracht. So bleibt der Zusammenhang (*Relation*) zwischen den sichtbaren Fassadenelementen und den nicht-sichtbaren thermalen Strukturen weiterhin bestehen. Das heißt, ein Verzicht auf eine real sichtbare Fassadenstruktur erschwert die Zuordnung thermaler Informationen, da ihre thermischen Strukturen nur unzureichend den sichtbaren realen Strukturen in der Fassade entsprechen. Dies wird schon dadurch deutlich, dass emittierende Strahlung aus der Fassade durch physikalische Eigenschaften, wie Thermik, oder äußere Bedingungen, wie Wind, in ihrer Lage versetzt werden würden.

## 7.4 Datensatz

Die zugrundeliegenden *Primärmodelle* aus den unterschiedlichen Fachdisziplinen bestehen aus einem Thermogramm, einer Phototextur, einem Gebäudemodell und einem räumlich begrenzten Stadtmodell. Für ihre Darstellung als 2D-Karten und als perspektivische kartenverwandte Thermalfassadenkarten wurde der Datensatz entsprechend aufbereitet. Dabei weist die dargestellte Gebäudefassade für die späteren Kartenentwürfe eine Länge von 66,2 Metern mit einer Höhe von 18,5 Metern auf, dies entspricht für die entzerrten Texturen einem Bildverhältnis von 1:3,6.

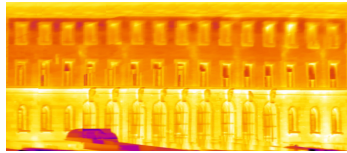
### 7.4.1 Thermales Basisbild

Das Thermogramm aus einer Thermalkamera stammt aus einem mobilen Aufnahmeverfahren entlang der Ostfassade des Bestelmeyer Gebäudes der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN (TUM). Wie in Abb. 66 veranschaulicht, ist die Bildqualität der IR-Aufnahme nicht vergleichbar mit den Auflösungen heutiger digitaler Kameras. So liegt die theoretische Bildauflösung konstruktionsbedingt bei 96ppi<sup>43</sup> mit einer Farbtiefe von 24bit<sup>44</sup>. Für die spätere Nutzung als Ausgangsbild wurde das IR-Rohbild mit den nötigen Korrekturen manuell nachbearbeitet und mit einer Auflösung von 300ppi für die weitere Verarbeitung gespeichert. Als entzerrtes und skaliertes IR-Einzelbild steht diese planare unklassifizierte IR-Textur für die 2D- und 3D-Thermalkarten zur Verfügung.

---

<sup>43</sup> ppi (pixel per inch) entspricht der Anzahl von Bildpunkten auf einer Länge von einem *Inch* (2,54cm).

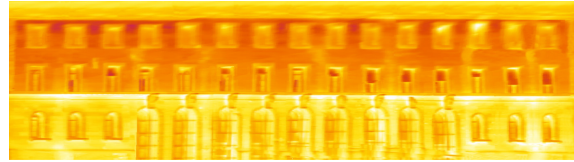
<sup>44</sup> 24bit entspricht für jeden einzelnen *Farbkanal* (Rot, Grün oder Blau) einer Farbvariation von 8bit bzw.  $2^8 = 256$  Farben. Daraus ergibt sich aus den drei Kanälen eine Farbvariation von 16.777.216 Farben ( $2^{24}$ ).



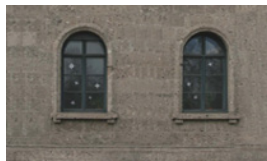
IR-Rohbild



Entzerrte Phototextur



Entzerrtes und korrigiertes IR-Ausgangsbild



300ppi Auflösung



96ppi Auflösung

Abb. 66: IR-Rohbild [oben], Phototextur [links], korrigiertes IR-Bild [rechts], Auflösungsunterschiede [unten]

## 7.4.2 Reales Basisbild

Zur Verbesserung der Anschaulichkeit und des Verständnisses der real sichtbaren Ausgangssituation wurde von der betreffenden Teilfassade ein Rasterbild im sichtbaren Farblichtspektrum mittels einer Digitalkamera aufgenommen. Es dient zugleich auch als Bindeglied zur Thermaltextur. Das reale Basisbild gründet sich auf mehreren Einzelbildern, die durch photogrammetrische Verfahren entzerrt, miteinander verrechnet und radiometrisch angeglichen wurden. Der unterschiedliche Detaillierungsgrad zwischen sichtbaren und thermalen Basisbild ist ausschließlich auf die Sensorauflösung des Kamerasystems zurückzuführen (s. Abb. 66).

## 7.4.3 Digitale Gebäudemodelle

Das zur Verfügung gestellte 3D-Gebäudemodell der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN für die thermale Fassadendarstellung stammte aus einer vermessungstechnischen Diplomarbeit im Level of Detail 2 (LOD2) (Firsching et al. 1999). Die geometrische Struktur umfasst die geodätische Aufnahme der Gebäudeumrisse, der First- und Traufhöhen sowie der Dachstrukturen. Ihre Modellbildung besteht aus Einzelflächen, die zu einem *B-Rep*-Körper überführt werden musste, um eine fehlerfreie Schattierung durch das computergraphische Schattierungsmodell an den Übergangflächen gewährleisten zu können.

Bei den angrenzenden Gebäuden des städtischen Teilausschnittes handelt es sich nach der Überführung des von der STADT MÜNCHEN zur Verfügung gestellten 2.5D Shape Datensatzes, um ein Gebäudemodell im LOD2. Das Stadtmodell stellt hierbei eine fehlerfreie *B-Rep*-Repräsentation dar und kann unmittelbar für weitere gestalterische Zwecke eingesetzt werden.

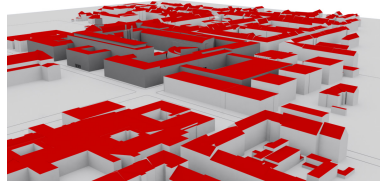


Abb. 67: TUM (Grau) und Umgebung (Weiß) in LOD2

## 7.5 Aufbereitung des thermalen Bildes

Wegen der kontinuierlichen Thermaldatengrundlage wurde für die nachfolgenden Isolinien- und Schichtstufendarstellungen das Ursprungsbild in mehrere Temperaturstufen unterteilt. Kraak und Ormeling sehen für die wahrnehmbare Kategorieanzahl auf einen Blick sieben Farbtöne für linienhafte und acht Farbtöne für flächenhafte Elemente vor (Kraak und Ormeling 1996, S. 126). Hierbei handelt es sich um Maximalwerte in der Farbgebung. Um aber die Differenzierung der Farben in der perspektivischen Darstellung zu verbessern, wurde auf die maximale Farbzahl verzichtet und im Gegenzug die Abstände zwischen den Farben erhöht. So reduziert sich die Gesamtzahl in der Segmentierung für die ratioskalierten flächenhaften Darstellungen auf sieben festgelegte Stufen.

### Tontrennung

Für die Gestaltung von vektorbasierten und somit frei skalierbaren Isolinien- und Schichtstufenkarten wurden die farbcodierten Temperaturwerte im gerasterten thermalen Ausgangsbild auf die oben genannte Kategoriezahl reduziert. Dabei konnten die Farbtöne durch unterschiedliche Methoden gruppiert und in ihrem *Farbton* verändert werden.

Bei der ersten Methode zur Aufbereitung kontinuierlicher Temperaturinformationen wurde ein Standardverfahren der Bildanalyse, die Tontrennung, verwendet. Sie bezieht sich auf jeden einzelnen Farbkanal und bedarf vorab der Umwandlung in ein Grautonbild. Wird dies nicht berücksichtigt, kommt es zu einer falschen Anzahl der Tonwertstufen, da die Tontrennung in einem Farbbild für jeden einzelnen Farbkanal erfolgt. Das heißt, bei einer Tontrennung eines *RGB*-Bildes in zwei gewünschte Farbstufen ist das Ergebnis ein Farbbild mit sechs Farbtönen. Um dies zu vermeiden, wurde das Farbbild in ein Grautonbild umgewandelt und in exakt sieben Tonwertstufen überführt.

Da die Abstufung der Tonwerttrennung ausschließlich gleichabständig über den gesamten Grautonbereich (0 bis 255) erfolgt, musste zuerst das Histogramm über den gesamten Grautonbereich gespreizt werden, um eine fehlerfreie Tontrennung zu erzielen. Eine individuelle Bestimmung der Tonwertstufen, wie beispielsweise im graphisch-statistischen Ansatz des *Break-Point*-Verfahrens (Kraak und Ormeling 1996, S. 143) zur Festlegung der Kategoriengrenzen, kann in diesem Prozess nicht berücksichtigt werden.

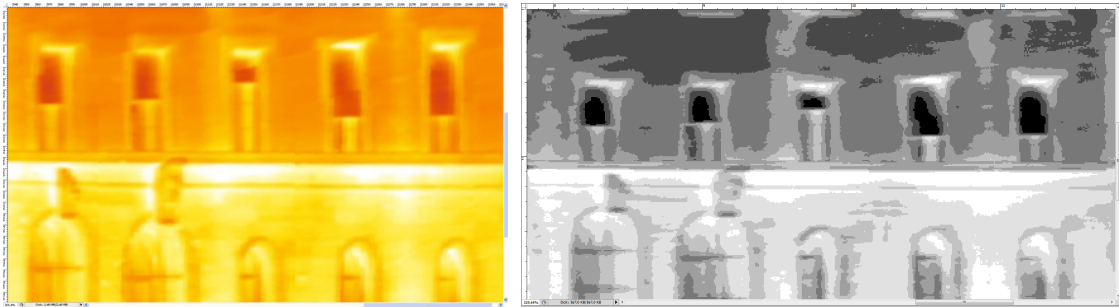


Abb. 68: IR-Ausgangsbild [links] und Tontrennung in 7-Stufen [rechts]

Eine weitere Vorgehensweise, den Farbraum auf eine definierte Anzahl von Farben zu reduzieren, ist das Verfahren der indizierten Farben. Bei der Indizierung erhält jedes Bildpixel statt dem Farbwert einen Farbindex, der auf eine gemeinsame Farbpalette referenziert wird. Die indizierten Farben können durch system- oder lokalbedingte Farbräume bestimmt werden. Eine systembedingte Indizierung bedeutet die Verwendung einer gleichabständigen mit 256 Farben festgelegte *RGB*-Farbpalette mit 8-bit Farbtiefe durch das vorliegende Betriebssystem: Eine lokalbedingte Indizierung erstellt dagegen eine eigene Farbpalette mit bis zu 256 Farben und einer 8-bit Farbtiefe, die sich in perzeptive, selektive oder adaptive Methoden untergliedert. Dabei wird die gewählte Anzahl der Tonwertstufen in Abhängigkeit des gewählten Prozesses ungleichmäßig auf das Histogramm<sup>45</sup> verteilt.

Abb. 69 zeigt im linken Beispiel eine 7-stufige perzeptive Farbpalette, die auf das menschliche Auge abgestimmt ist. Das rechte Beispiel stellt das indizierte Ergebnis einer selektiven Farbpalette dar, welches der perzeptiven Farbpalette ähnelt, aber den größeren Farbflächen eine höhere Bedeutung zukommen lässt. Mit dieser Methode wird unter anderem die größte Farbintegrität garantiert. Die adaptive Variante ist eine weitere Methode, eine Farbpalette zu erstellen. Dabei werden Farben in die Farbpalette aufgenommen, die am häufigsten im Bild vertreten sind. Sie entsprechen beim thermalen Bild aber exakt der selektiven Farbpalette und werden somit nicht weiter ausgeführt.

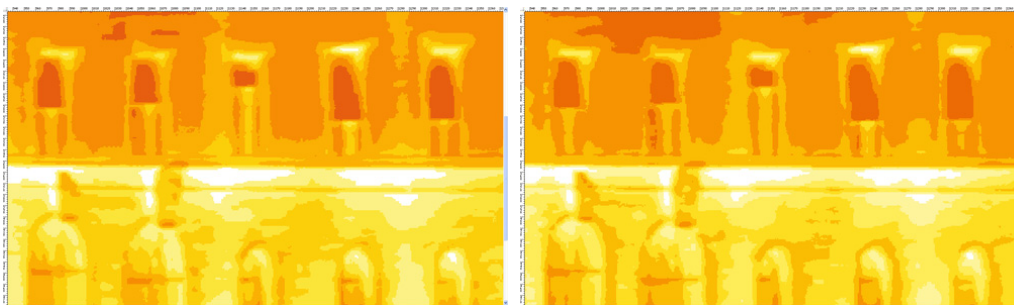


Abb. 69: Perzeptiv [links] und selektiv indizierte 7-Farbstufen [rechts]

Der unmittelbare Vergleich zwischen der Tontrennung und der Indizierung unterscheidet sich nur in wenigen Details. So zeigen die indizierten Farbpaletten eine feinere Abstufung im

---

<sup>45</sup> Das Histogramm listet die Häufigkeitsverteilung aller im Bild vorkommenden Farbwerte über den gesamten Tonwertbereich auf. So entsteht eine Abfolge von Grautonanteilen für jeden Farbkanal über einen Bereich von 0 bis 255 Tonwerten.

wärmeren unteren Fassadenbereich als beim Verfahren der Tonwerttrennung. Deutlich treten bei der selektiven Indizierung die großflächigen Bereiche zu Tage als in der perceptiven Indizierung. Dabei wird die grundlegende thermale Aussage der Fassade mit beiden Methoden nur unwesentlich verändert wiedergegeben und lässt sich als Zwischenergebnis für die anschließende Vektorisierung einsetzen.

Ein weiteres Verfahren der Tonwerttrennung ist die manuelle statistische Methode zur Bestimmung von quantitativen Datensprüngen. Als Ansatz dient hierbei die *Break-Point*-Methode (Kraak und Ormeling 1996, S. 143). Dazu werden alle vorhandenen Werte einer Menge (z.B. Einwohnerzahl) aufsteigend sortiert und graphisch auf markante Wertesprünge untersucht. Dieses Verfahren lässt sich auch in einem Histogramm eines Thermalbildes umsetzen, um markante Sprünge zu erfassen. Dabei ist der entscheidende Unterschied, dass durch die aufsteigende Sortierung nicht die Temperaturmaxima mit ihren Wertsprüngen erfasst werden, sondern die unterschiedlichen vorkommenden Temperaturwertemengen in der Fassade. Als Wertemengen dient hierbei die Pixelanzahl gleicher Grautonwerte, die durch das Histogramm des Thermalbildes repräsentiert werden. Mittels der *Break-Point*-Methode sortiert man die einzelnen Grautonanteile in ihrer Menge aufsteigend und legt sieben markante Stufen manuell fest. Aufgrund der vorher festgehaltenen Positionen der ursprünglichen Grautonwerte können die gesetzten *Break-Point*-Stufen dem ursprünglichen Histogramm als Tontrennstufen zugewiesen werden. Das Ergebnis bildet ein in markante Tonwertenanteile getrenntes Grautonbild (s. Abb. 70 und Abb. 71).

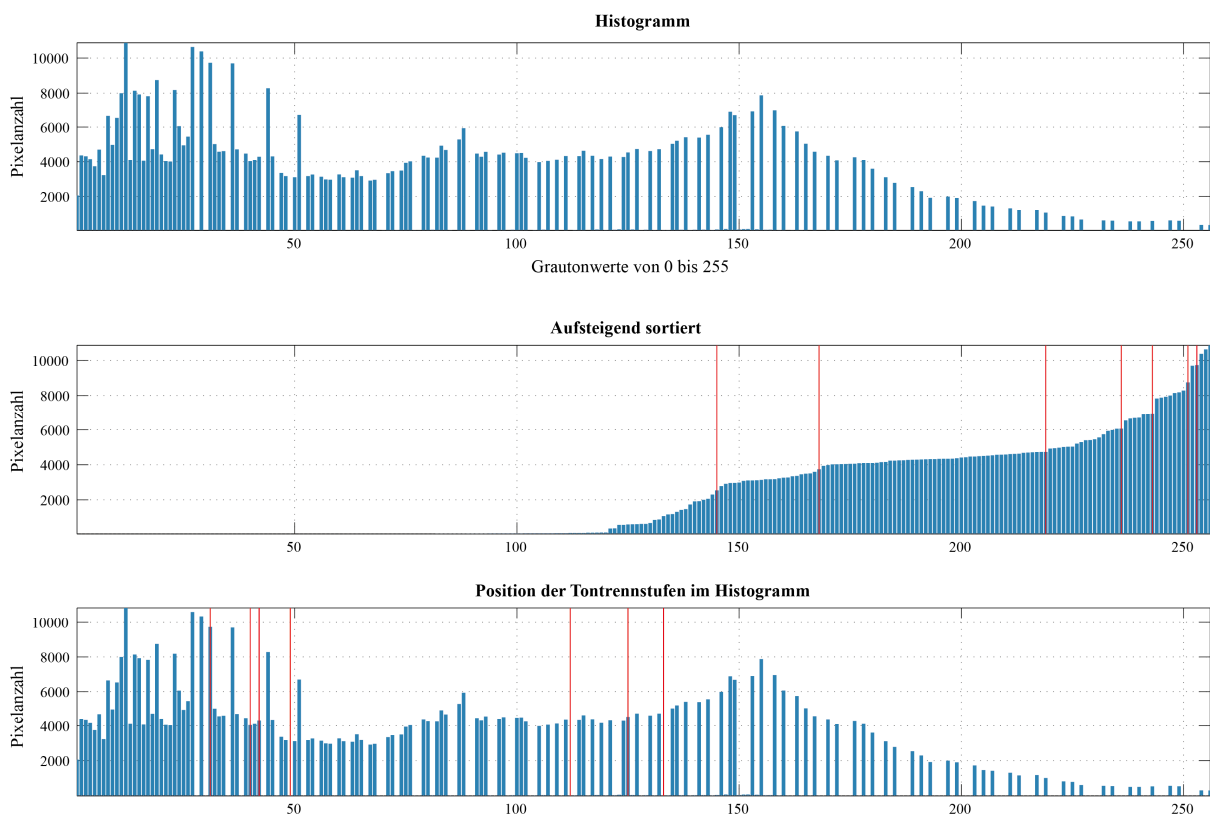


Abb. 70: Histogramm [oben] – Grautöne aufsteigend sortiert und Break-Points gesetzt (rot) [mitte] – Rückführung auf Grautonwerte [unten]

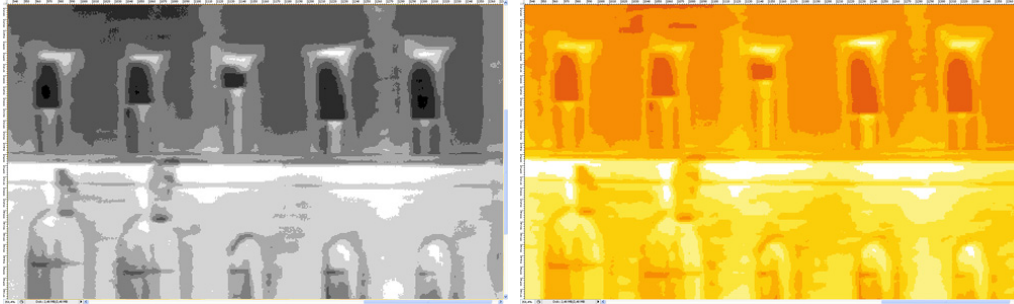


Abb. 71: Break-Point-Verfahren [links] und perzeptiv indizierte Farben [rechts]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Resultate durch die Wahl der Methode eindeutige Unterschiede in der Tonwertgruppierung aufweisen. Die signifikanten Strukturen hingegen, wie die vertikalen Temperaturlinien und ihre lokal vorkommenden Temperaturmaxima, bleiben in allen angewendeten Methoden erhalten und liefern vergleichbare Ergebnisse.

### Vektorisierung

Eine semiautomatische Vektorisierung von farblich segmentierten Rasterbilddaten ist heute durch unterschiedliche Softwaretools durchführbar. So bieten geanalytische (ArcGIS), mathematische (MatLab) wie auch graphische Programme (Illustrator) Vektorisierungsfunktionen an. Ihre Genauigkeit der Datenumwandlung hängt dabei nicht nur vom ausgehenden Rasterbild, sondern auch vom verwendeten Verfahren ab.

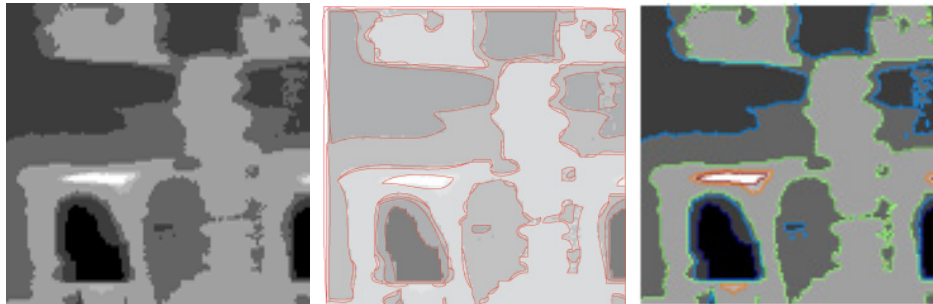
Graphische vektorbasierte Autorensysteme erzeugen durch eine Art Abpaufunktion angenäherte kubische Bézierkurven entlang der Grautonübergänge, nehmen aber in ihrer Extraktion zum einen keine Rücksicht auf den benachbarten Linienvorlauf (Topologie) und zum anderen auf den eigenen Richtungsverlauf nach einem prozessierten Knotenpunkt. Dadurch kommt es durch die Vektorisierung bei der Isolinienscharung zu Überschneidungen und im Isolinienverlauf zu untypischen sprunghaften Richtungsveränderungen. Diese lassen sich durch unabhängig voneinander agierende Geradentangenten im Knoten begründen. Außerdem ist eine starke Generalisierung der extrahierten Isolinien durch den Einsatz von Bézierkurven und ihren teilweise gegenläufigen Krümmungsverlauf aufgrund ihrer fehlenden Topologie zu erkennen.

Mathematisch und geanalytisch basierte Programme erstellen hingegen durch kurze gerade Liniensegmente mit ihrer Konturfunktion eine exakte Vektorisierung entlang der Tonwertübergänge. Durch die Anzahl der Konturschritte kann die Isolinienscharung angepasst und durch den Interpolationsgrad optimiert werden. Dabei kommt es als unmittelbare Folge einer zu geringen Rasterbildauflösung des IR-Bildes zu treppenstufigen Vektorisierungsergebnissen.

Für die Verbesserung der Vektorisierungsergebnisse in beiden semiautomatischen Verfahren wurde das Ausgangsbild in seiner vorliegenden Bildauflösung erhöht. Dabei erfolgte das Resampling durch ein schrittweises bikubisches Hochrechnen mit anschließendem Glätten durch einen *Gaußschen Weichzeichenfilter*. Durch die so eingebrachten Zwischenwerte entlang der kontrastreichen Tonwertübergänge konnte der Treppenstufeneffekt (*Aliasing*) gemildert werden. Daraus ergab sich im Resultat des Graphikprogramms ein deutlich näherer Verlauf der Bézierkurven am Tonwertübergang mit weiterhin bestehenden sprunghaften



Richtungswechseln im Isolinenverlauf. Dagegen reduzierte sich deutlich der Treppenstufeneffekt im mathematischen wie auch im geanalytischen Programm durch die feinere Rasterung und die weicheren Grautonübergänge an den Kanten (*Anti-Aliasing*). Damit erzielte man einen glatteren (generalisierteren) Isolinenverlauf, der darüber hinaus einen deutlich geringeren fehlerhaften Rauschteil von Kleinstpolygonen im Vektorbild aufwies.



7-stufiges Tonwertbild, kubische Splines und kurze Liniensegmente [von links nach rechts]

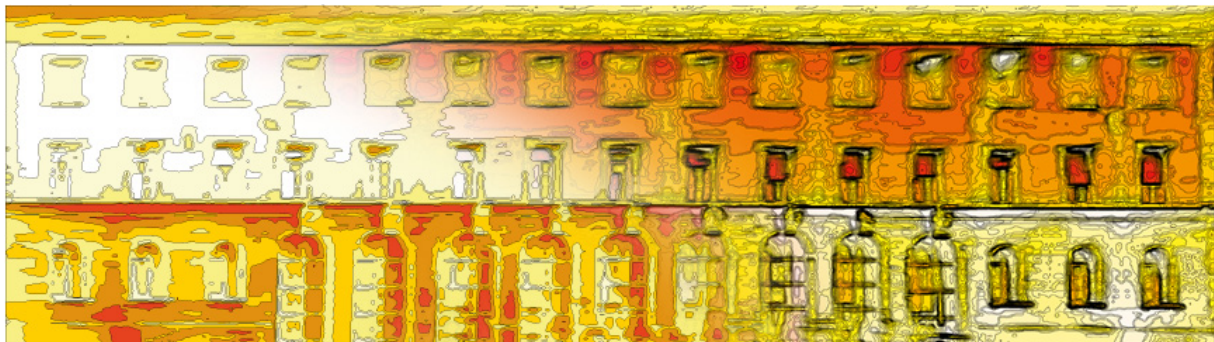


Abb. 72: Vektorisierungsergebnis 7-stufig [linke Hälfte] und 31-stufig [rechte Hälfte]

Zwischen den vorgestellten zwei Methoden lieferte die mathematische Methode aus dem Tonwertbild den genaueren Vektorverlauf. So wurde für die Schichtstufenkarte ein 7-stufiges Tonwertbild, für die später vorgestellte Isokarte ein 31-stufiges Tonwertbild (sieben Hauptisotherme mit vier dazwischen liegenden Isotherme) für die Vektorisierung verwendet (s. Abb. 72). Die Ergebnisse bilden aus kartographischer Sicht die *Primärmodelle*, die als Grundlage für die nachfolgenden Kartenentwürfe dienen. Ihre Ausgestaltung mit entsprechender Farbgebung und Linienwahl erfolgte erst im anschließenden Prozessschritt (*Sekundärmodell*).

## 7.6 Auswahl der Farbskalen

Die Gestaltung eines geeigneten Farbschemas hängt vom Detektionsergebnis der thermalen Rohaufnahme ab. Das bedeutet, dass erst durch die Sichtung und Analyse (*Aggregation*) aller thermalen Strukturen ein geeignetes Farbschema gewählt werden kann.

So würde bei der Verwendung von ausschließlich kühleren Strukturen (z.B. Wasserschäden) die Farbe Blau im Farbschema zwingend erscheinen, um durch die Farbwirkung die Aufmerksamkeit in diesen Bereich zu lenken. Existieren dagegen noch wärmere thermale Vorkommen (z.B. Wärmeleckagen), so ist der Wechsel von einer monopolaren blauen zu einer bipolaren blau-roten Farbskala zwingend gegeben. Auch bei einer Thematisierung der Isolierungsqualität einer Wärmedämmung könnte ein bipolarer Farbverlauf eingesetzt werden, deren mittlerer Ausgangswert die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Isolierung

wiedergibt und die vorhandenen Temperaturschwankungen auf der Fassade in gegenläufige Richtungen verdeutlicht.

Um Wärmeleckagen in der Fassadenkarte im Interesse des Kartennutzers zu verdeutlichen, bietet sich gerade bei homogenen Wärmeverhältnissen eine rötlich gefärbte monopolare Farbskala für die Temperatureinfärbung an, da immer mit einem geringen Wärmeverlust aus der Fassade zu rechnen ist. Dadurch kann schon frühzeitig in der Analyse auf die vorliegende Situation hingewiesen werden, ohne dass der Kartennutzer über das explizite Wissen der klassifizierten Merkmale verfügen muss.

## 7.7 Farbschema

### 7.7.1 Diskretes Farbschema

Aufgrund der vorliegenden homogenen Temperaturen im IR-Ausgangsbild und des fehlenden klassifizierbaren thermalen Basiswertes für einen Temperaturmittelwert wurde auf einen bipolaren Verlauf verzichtet. Die Anordnung der ratioskalierten Thermalstufen wurde über ein 7-stufiges Farbschema von nahezu Weiß bis Dunkelrot nach der Regel „Je höher desto dunkler“ bzw. von nahezu Weiß bis Türkisblau nach der Regel „Je tiefer desto dunkler“ im *HSB*-Farbmodell festgelegt (s. Tab. 16, Tab. 17 und Abb. 73). Dabei bleiben die kalkulierten Farbabstände ( $\Delta E$ ) zwischen den benachbarten Farben für die klare Differenzierung eines jeden einzelnen *Farbtons* über dem Mindestmaß von  $5\Delta E$  Einheiten erhalten, unter der Bedingung ihrer Unterscheidbarkeit auch in einer Grauton Darstellung. Weiß als *Farbton* für den Ausgangswert wurde im Farbschema entsprechend kartographischen Konventionen angepasst und entspricht keinem reinen Weißton. Bei der früheren Verwendung von Papier als weißem Trägermaterial bestand besonders die Notwendigkeit sich bezüglich des weißen *Farbtons* abzuheben. Auch bei digitalen Karten ist davon auszugehen, dass der Kartennutzer die Informationen auf ein klassisches weißes Trägermaterial für seine Analyse überträgt. Dadurch ist es sinnvoll, ebenso bei digitalen Karten die Farbe Weiß als gedeckten Weißton einzubringen. Für die 7-stufigen Farbtonreihen wurden Farben mit einem Farbabstand von mindestens 15 Einheiten gewählt und im *HSB*-Farbmodell definiert (s. Tab. 16, Tab. 17 und Abb. 73).

	Rot			Hellorange			Hellgrau
H	7	21	33	26	35	53	0
S	86	90	81	58	59	20	0
B	80	85	90	97	99	99	98

Tab. 16: Diskretes Farbschema Rot [s. Anhang]

	Türkisblau			Hellblau			Hellgrau
H	206	200	198	203	205	207	0
S	100	100	85	49	29	16	0
B	65	77	83	88	93	95	98

Tab. 17: Diskretes Farbschema Blau [s. Anhang]

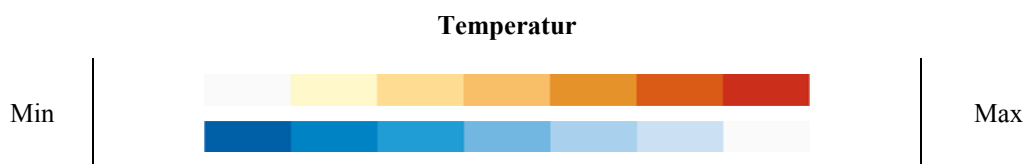


Abb. 73: 7-stufiges Farbschema

## 7.7.2 Kontinuierliches Farbschema

Für kontinuierliche Farbverläufe zwischen Isolinien spricht sich Dent aus, der gegen die Verwendung von Flächenfarben oder Schraffuren zwischen Isolinien aufgrund des widersprechenden Stetigkeitsprinzips ist (Dent 1999, S. 203). Auch Hake et al. stellt das fehlende Stetigkeitsverhalten von Farbstufen fest, welche nicht dem der kontinuierlichen Werte entsprechen und sich dieses Modell daher nur um einen Kompromiss handeln könnte (Hake et al. 2002, S. 481; Imhof 1972, S. 145). Tests von Kumler kommen zu ähnlichen Resultaten, indem die besten Ergebnisse durch die Kombination aus Isolinien und kontinuierlicher Darstellung für 2D-Kartenwerke erzielt wurden (Kumler und Groop 1990). Auch Scharlach stellt sein kontinuierliches Farbschema in einer 2D-Umgebung anhand einer Lärmkarte vor (Scharlach 2002, S. 98). Er empfiehlt für die fehlerfreie Interpretation die Verwendung eines kontinuierlichen Grautonschemas mit farblich abgestuften Isolinien, anstatt einer diskreten Farbtonskala. Diese Kombination ist aber eher kritisch zu sehen, da die Verlaufsrichtung wiederum von der farblichen Isolinienabfolge abhängt. Grund hierfür ist die nicht klare Wertevermittlung (laut/leise) der Farben Schwarz und Weiß im kontinuierlichen Grautonverlauf. Dies geht auf eine Studie mit grautonfarbigen Choroplethenkarten zurück, deren Wertigkeitsbestimmung nicht eindeutig ausfiel und zusätzlich durch die Farbgebung des Hintergrunds beeinflusst wurde (McGranaghan 1989, MacEachren 1995, S. 135). Hierbei sei zu erwähnen, dass sich die Bewertungen, Erkenntnisse und Empfehlungen von Dent, Hake, Kumler und Scharlach auf konventionelle 2D-Karten beziehen.

Für die Gestaltung des kontinuierlichen Farbschemas über die Kartenfläche kam das IR-Bild mit seinen 256 indizierten Farben zum Tragen (s. Abb. 74). Das heißt, die Farbschemagestaltung erfolgte unmittelbar im Rasterbild des korrigierten Thermalbildes, welches die

Kontinuität der Werteveränderung in der Thermalkarte schon in sich trägt. Die bestehende Farbpalette des IR-Bildes wurde hierbei durch neue indizierte monopolare Farbschemas ersetzt (s. Abb. 75).

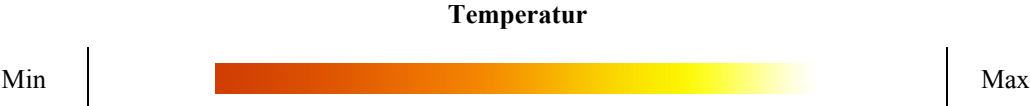


Abb. 74: Farbschema des Thermogramms

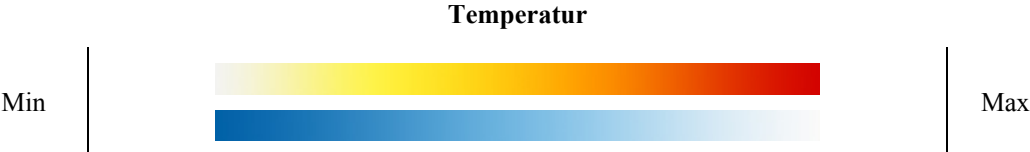


Abb. 75: Farbschemaentwürfe für die Thermalkarte

## 8 Thermale 2D- und 3D-Kartenentwürfe

Nach dem kartographischen Kommunikationsprozess bilden die Ausgangsdaten IR-Bild, Phototextur und Stadtmodell in LOD2 die *Primärmodelle*. Durch die Aufbereitung des IR-Bildes konnten die Isothermen-, die Schichtstufen- und die daraus resultierende Isokarte als Basiskarten im 2D-Bereich abgeleitet werden. Für die 3D-Ausgangsmodelle (Basismodelle) wurden die Ergebnisse der 2D-Kartenentwürfe, das korrigierte IR-Bild und das Displacement-Verfahren aus der Computergraphik für die räumlich ebenen wie auch körperhaften Kartentypen herangezogen. Die Ergebnisse aus der Modellierung liegen für die weitere kartographische Ausgestaltung im 2D- und 3D-Bereich bereit.

Nach den Schritten der Symbolisierung und der gestalterischen Veränderungen der Ausgangskarten bzw. -modelle ist das *Sekundärmodell* abgeschlossen und kann für den Kartennutzer auf den Monitor visualisiert werden. Abb. 76 gibt einen Überblick über die vorgestellten Kartenentwürfe aus dem 2D- und 3D-Bereich.

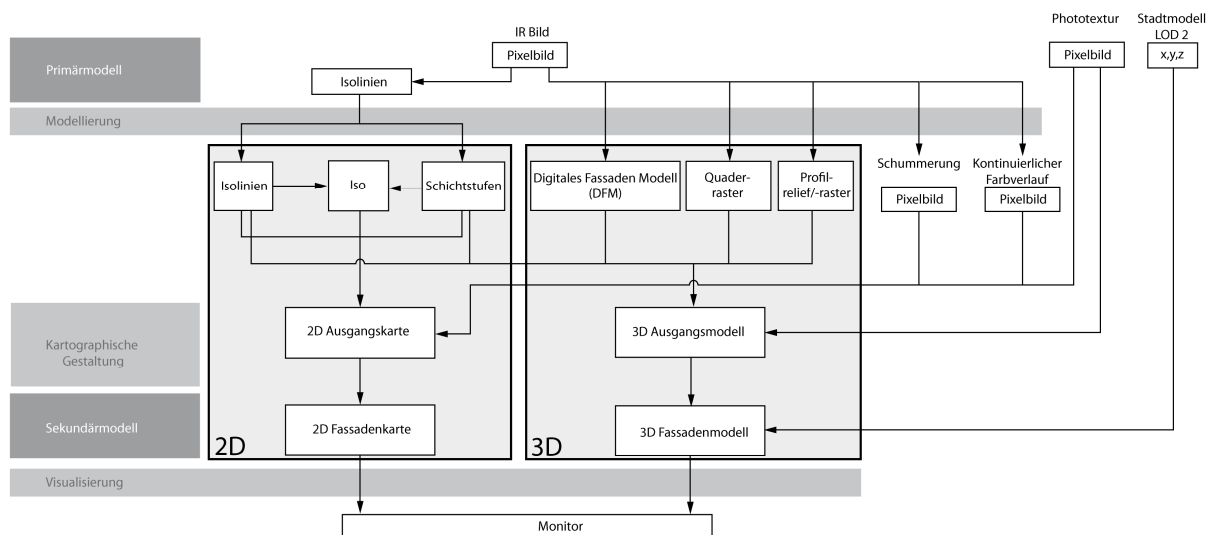


Abb. 76: Übersicht über die Thermalkartenentwürfe [s. Anhang]

### 8.1 Thermale 2D-Kartenentwürfe

Die nun vorgestellten thermalen 2D-Kartenentwürfe unterscheiden sich durch drei unterschiedliche Basiskartentypen und ihrer nutzerabhängigen Ausgestaltung im Kartenblatt sowie in den Legendenbeschreibungen. Ihre Ergebnisse fallen daher in den Bereich der konventionellen thematischen Kartographie und verdeutlichen die thermographische Darstellung. Als erste Basiskarte wird die klassische Isolinienkarte vorgestellt.

#### 8.1.1 Isolinienkarten

In der Isothermendarstellung wurde auf bekannte Formen der Temperaturdarstellung bzw. der Temperaturvermittlung über die graphischen Variablen *Farbhelligkeit*, *Farbton* und *Linienstärke* zurückgegriffen. Dabei ist die Variabilität für die Gestaltung zur Wertevermittlung grundsätzlich durch die Festlegung der Äquidistanz und den abzubildenden Raum mit seinem Informationsgehalt bestimmt. Aufgrund des lokal begrenzten Fassadenbereichs und der geringen Informationsdichte ist die Verwendung dieser Variablen möglich.

Die Grundlage der Isothermen bilden die Vektorisierungsergebnisse, die mit den oben aufgeführten graphischen Variablen zur Ausgangskarte bzw. Basiskarte des *Sekundärmodells* überführt wurden (s. Abb. 77a–b). Bei der Farbgebung der Isothermenlinien basieren diese auf der Multiplikation der Nachbarfarben des diskreten Farbschemas. Sie sind identisch mit den später vorgestellten *Schichtgrenzisolines* des Isokartenentwurfs. Dabei wurde die Anzahl der Temperaturfarbwerte bei den 7-stufigen wie auch bei den 31-stufigen Isothermen auf sieben begrenzt.

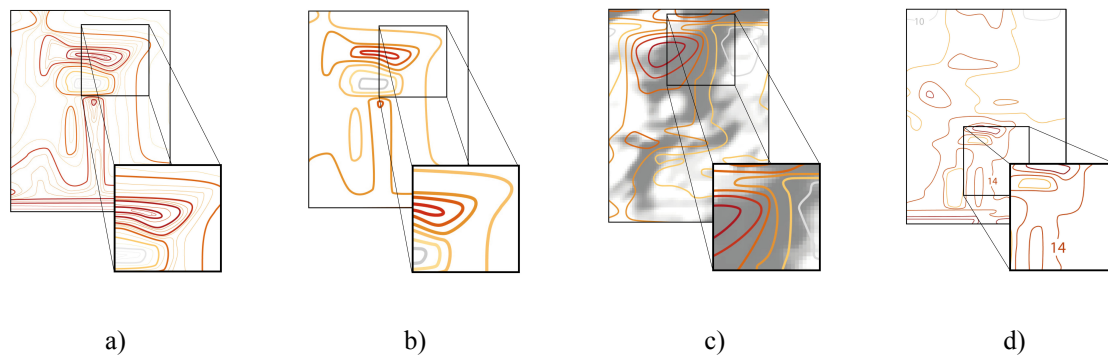


Abb. 77: Isothermen – 31-stufig, 7-stufig, 7-stufig mit Schummerung und 7-stufig mit Beschriftung [von links nach rechts]

Zur Variation der Linienfarbe und der Linienbreite wurden zwei Basiskartenvarianten einmal mit einer Schummerung und einer aufrechterorientierten Temperaturbeschriftung umgesetzt (s. Abb. 77c–d). Die hinterlegte Schummerungstextur der Abb. 77c und Abb. 78d konnte aus der räumlichen Darstellung des thermalen IR-Bildes über eine Höhenkarte mitsamt einer globalen Beleuchtung gewonnen werden. Da Linienfarbe und Legendenbeschreibung den Kartenleser bereits über die Wertigkeit der Isothermen informieren, ist die Beschriftung in Abb. 77d redundant. Sie unterstützt aber das unmittelbare Auslesen der Werte innerhalb des Kartenbereichs.

## 8.1.2 Schichtstufenkarten

Schichtstufenkarten sind in der Kartographie eine weitere klassische Darstellungsform für die Temperatur. Ihre Farbübergänge gehen hierbei von einem Flächenfarbton in den anderen über. Um an den Schichtstufenübergängen eine stärkere Farbtrennung zu gewährleisten, wurden zwischen den Farbflächen zusätzliche Isothermen eingefügt. Der Ausgangsdatensatz bildete wiederum das vektorisierte IR-Bild ab. Die Vollfarben der Schichtflächen entsprechen denen des diskreten Farbschemas und die Linienfarben der Isothermen der Multiplikation durch die Schichtflächenfarben (s. Abb. 78a–b). Diese sind somit deckungsgleich mit der vorherigen Isothermendarstellung. Die Anzahl der Schichtflächen begrenzt sich durch das definierte diskrete Farbschema auf sieben Temperaturstufen.

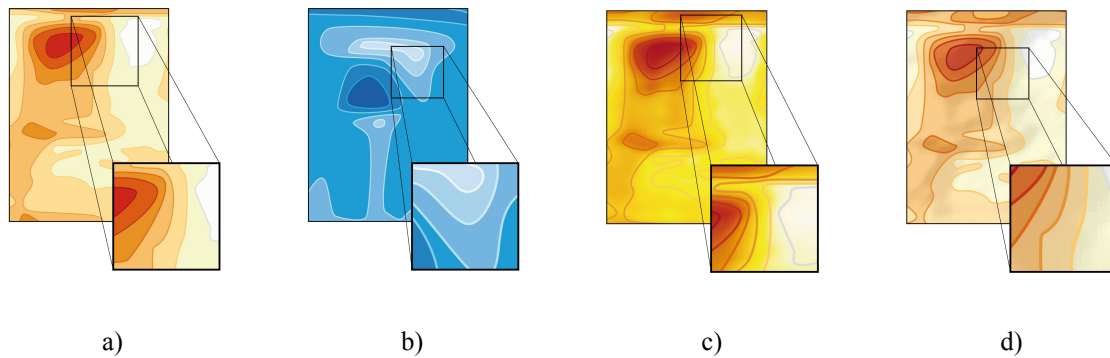


Abb. 78: Schichtstufen – Vollfarben mit Isothermen in Farbschema rot, im Farbschema blau, kontinuierliches Farbschema mit Isothermen, Vollfarben mit Schummerung [von links nach rechts]

Weitere Variationen zu den zwei Vollfarbendarstellungen bilden der kontinuierliche Farbverlauf mit Isothermen und eine Schichtstufenkarte (s. Abb. 78a) mit hinterlegter Kombinationsschummerung (s. Abb. 78c, d). Dabei wurde zum einen die Kontinuität der Temperaturwerte hervorgehoben, zum anderen die Plastizität in der Schichtstufenkarte erhöht.

Farbfreie Variationen wurde durch eine ausgewählte Mustergestaltung umgesetzt mit dem Ziel, die flächigen Volltonschichten zu umgehen, um ein *visual cluttering* durch die Farbe bei der Verwendung mit farblichen Linien- und Punktsignaturen in der überlagerten Deckschicht einer Karte zu vermeiden (s. Abb. 79). Zusätzlich erlaubt die Basiskarte beim Verzicht auf die farbliche Ausgestaltung der Deckschicht eine schwarzweiße Darstellung für Printmedien bzw. eine Temperaturvermittlung der Schichtstufen auch für Personen mit Farbfehlsichtigkeit. Die Entwürfe finden sich im Anhang wieder und sollen als Anregungen dienen, Flächenfüllungen durch Punktdichtemuster nach Beispielen von Bertin umzusetzen (Bertin 1967, S. 98).

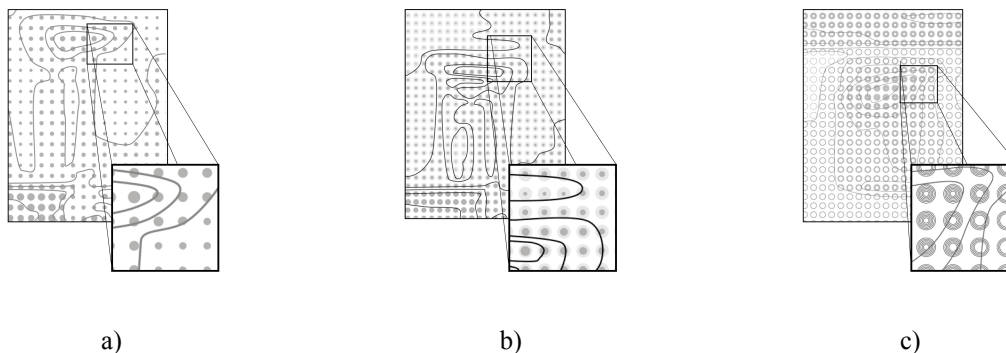


Abb. 79: Schichtstufen – flächenhafte Punktsignaturen mit variierenden Punktdurchmessern ohne Referenzkreis, mit Referenzkreis und Wertigkeit über Ringanzahl [von links nach rechts]

### 8.1.3 Isokarten

In diesem Abschnitt werden die vorab vorgestellten Kartentypen der Isothermen- und Schichtstufenkarte miteinander kombiniert und als Isokarte<sup>46</sup> bezeichnet (s. Abb. 80). Sie umgeht die Nachteile des einen Kartentyps, indem sie die Vorteile des anderen Kartentyps nutzt. Das heißt, Schichtstufenkarten sind durch ihre begrenzte mögliche Farbgebung gezwungen, die ursprüngliche Scharungsdichte der herangezogenen Isolinienkarten auszudünnen, liefern aber im Gegenzug die nötige Gefällerrichtung durch ihre Farbgestaltung mit. Isolinienkarten besitzen dagegen eine höhere Informationsdichte und zeigen dafür den unterschiedlichen Gefälleanstieg an, aber nicht dessen Richtung. So kombiniert die Isokarte beide Kartentypen bei weitgehendem Erhalt ihrer Informationsdichte mit der grundlegenden Bedingung der gleichen Datengrundlage von Isothermen- und Schichtstufenkarte.

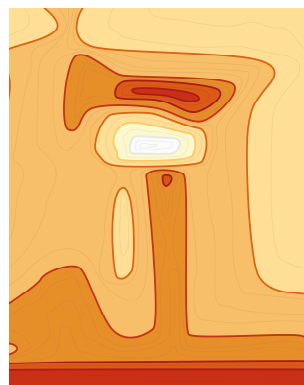


Abb. 80: Isokarte

Der Entwurf basiert auf einer digitalen Karte am Monitor, welche über ein Bildbetrachtungsprogramm bzw. über einen Internetbrowser dargestellt werden soll und somit ein Minimum an Navigationsmöglichkeiten wie *Zoom* und *Pan* anbietet. Die Isokarten werden dabei farblich so kombiniert, dass die zwischen den Schichtflächen befindlichen Isolinien nur im Nahbereich in Erscheinung treten und in großräumiger Darstellung durch die Flächenfarben der Schichtstufen getilgt werden. Dies geschieht aufgrund einer reduzierten *Farbhelligkeit* und *Linienstärke*, welche einen geringen Quantitäts- und Qualitätskontrast hervorrufen. Für das Farbschema wurde das diskrete Farbschema herangezogen und mit weiteren Farbwerten ergänzt.

Die Namensgebung der Isolinien richtet sich nicht nach ihrer hierarchischen Funktion vergleichbarer Isoliniennamen, wie Haupt- und Hilfsisolinien, sondern nach ihrer räumlichen Lage in der Schichtstufendarstellung. So wird zwischen Schichtgrenzisolinien und Schichtisolinien unterschieden. Schichtgrenzisolinien verlaufen entlang der Vollfarbenübergänge und besitzen eine größere Linienbreite (2pt) als die innerhalb der Vollfarbenflächen liegenden Schichtisolinien (0,5pt). Durch diesen Ansatz erhöht sich die Linien-

---

<sup>46</sup> Isokarte aus **Isogram** map (Schichtstufenkarte) und **Isoline** map (Isolinienkarte).



scharung in der Fläche und somit der Informationsgehalt in der Schichtstufe, nicht aber die überschaubare Anzahl der (Schicht-)Flächenfarben.

### Farben der Schichtgrenzisolinien

Schichtgrenzisolinien sind für die Vermittlung zusätzlicher Informationen in einer Schichtstufenkarte nicht zwingend notwendig. Sie können jedoch unterstützend auf die farbliche Trennung zwischen den Farbflächen einwirken. Für deren Farbgebung wurden die angrenzenden Flächenfarben des diskreten roten Farbschemas miteinander multipliziert, was zu einem dunkleren *Farbton* und zu schärferen Grenzen führte (s. Abb. 81). Im blauen Farbschema erfolgte dagegen eine Aufhellung der Isolnien durch eine negative Multiplizierung der Farbwerte.

In beiden Farbschemas bildete die ursprüngliche Farbe der Schichtgrenzisolinien, die zwischen den ersten und zweiten Vollfarben lag, eine Ausnahme. Durch die Multiplikation bzw. negative Multiplikation ist ihr farblicher Unterschied zur ihren Nachbarfarben zu gering und verlangte nach einer manuellen Korrektur auf die *HSB*-Werte (0°, 0%, 86%) für ein helles Grau. Eine Berechnung der Farbabstände ( $\Delta E$ ) zu den Nachbarfarben ergab durchgehende Werte über 10  $\Delta E$  Einheiten, die als klar zu trennende Farben wahrnehmbar sind.

### Farben der Schichtisolnien

Zwischen den Schichtgrenzisolnien kommen die wesentlich dünneren Schichtisolnien zu tragen. Sie entsprechen dem gleichen *Farbton* und der gleichen *Farbsättigung*, wie die darunterliegenden Flächenfarben. Ihre Differenzierung erfolgt nur über die um 5% reduzierte *Farbhelligkeit* im roten und blauen Farbschema. Ab dem dritten Wert im blauen Farbschema musste durch die Zunahme der dunklen Farbtöne und dem fehlenden Farbkontrast zu den Schichtisolnien die *Farbhelligkeit* um 10% erhöht werden, was zu einer generellen Aufhellung führte. Im gesamten Verlauf bewegen sich im roten Farbschema die Farbabstände unter 5  $\Delta E$  Einheiten, im blauen Farbschema liegen sie dagegen knapp unter 10  $\Delta E$  Einheiten.

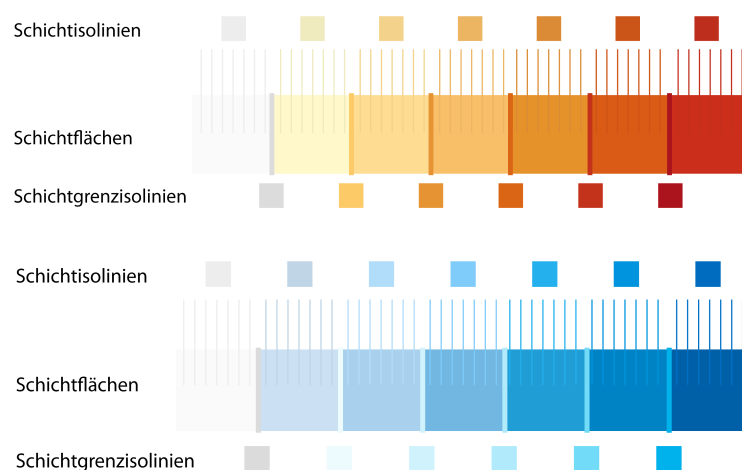


Abb. 81: Farbschema für Isokarten [s. Anhang]

Durch die gewählte kontrastarme Farbgebung und der dünnen Linienstärke der Schichtisolnien soll der erwünschte Effekt einer Auslöschung der Isolnien in der Schichtfläche, bei

einer Verkleinerung des Maßstabs, erzielt werden. Eine Maßstabsänderung kann hierbei beispielsweise durch die computergestützte Zoom-Funktion oder der Variation des Betrachtungsabstands erfolgen. Gleichbedeutend eines *LOD* variiert der Karteninhalt ohne aber dabei einen rechnergestützten Prozess zur Berechnung des Distanzkriteriums zu benötigen. So bleibt die Lesbarkeit der Isokarte aufgrund der sich reduzierenden Detaildichte durch das auslöschende Merkmal der Scharung bei Verkleinerung des Maßstabs erhalten.

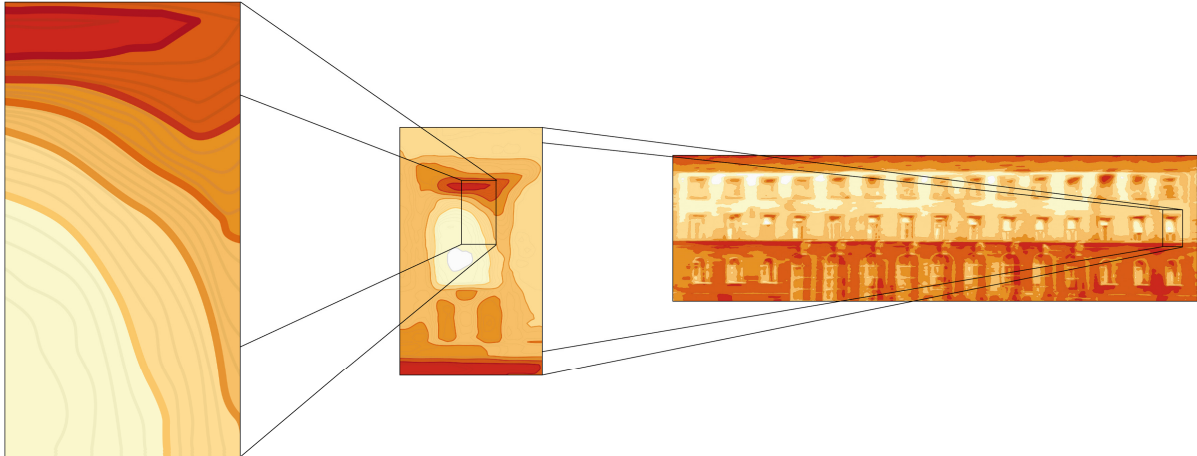


Abb. 82: Informationsvariation der Isokarte [s. Anhang]

Abb. 82 zeigt die Informationsvariation in der Isokarte zwischen verschiedenen Betrachtungsabständen. Bezüglich erster und zweiter Abbildung ist deutlich der Übergang zwischen der Isolinienkarte mit 31-Stufen zur 7-stufigen Schichtstufe zu erkennen. Dabei bleibt diese bis zur kompletten Ansicht über die gesamte Fassadenbreite als solche erhalten.

#### 8.1.4 Symbolisierung der thermalen Strukturen

Zur Anreicherung der Grundkarte (Basiskarte) mit thematisch ausgewählten punkt-, linien- und flächenhaften Signaturen werden in diesem Kapitel Signaturen in ihren Kategorien vorgestellt, die bewusst auf bekannte Signaturen aus dem Bereich der Wärme- und Kälte-darstellung verzichten. Der Grund hierfür liegt im eventuell falschen Verstehen durch eine wissensgeleitete Assoziation. Ihre Gestaltung sollte deshalb in ihrer Art weitgehend klar und reduziert gehalten werden mit der Vorgabe, dass jede Signaturgruppe deutlich voneinander differenzierbar ist und sich klar von der darunterliegenden flächigen Farbinformation abhebt. Für die Symbolisierung der nominalen (z.B. Wärmebrücken) und ordinalen Daten (z.B. Heizungskörper und Heizwert) kamen die graphischen Variablen *Farbe*, *Form*, *Schraffur* (*Körnung*, *Textur*) und *Helligkeit* zur Anwendung. Dabei erhalten die entsprechenden Signaturen ihre Sinnhaftigkeit bzw. Bedeutung nur durch den thermalen Zusammenhang.

Die aus dem thermalen Ausgangsbild klassifizierten Merkmale sind Wärmebrücken sowie einzelne Steigleitungen des Heizungssystems in ihrer Einfachheit als nominale Information wiedergegeben. Eine ordinale Einstufung oder ihre explizite Klassifizierung, wie sie in manchen Signaturen wieder zu finden ist, kann mit dem momentanen thermalen Erkennungsgrad rein aus einem Thermogramm noch nicht erreicht werden.

## Oberflächenrauheit

Die Oberflächenbeschaffenheit des vorliegenden Baumaterials steht im unmittelbaren Einflussbereich äußerer thermischer Strahlungseinflüsse. So verändern sich durch die Oberflächenrauheit nicht nur die Größe der Oberfläche und deren Emissionswert, sondern auch das Reflexionsverhalten und daraus ihre Temperaturmessbarkeit. Die Symbolisierung wurde mit den Materialsignaturen entsprechen kombiniert und ist in den drei Stufen: Glatt, Rau und Grob festgelegt (s. Abb. 83).



Abb. 83: Signaturen für die Oberflächenrauheit

## Baustoffe und Fassadenelemente

Aufgrund der Tatsache, dass Baustoffe im räumlichen Gebäudeverbund meist flächendeckend vorkommen, wurde für ihre Symbolisierung ein möglichst geringer Verdeckungsgrad gewählt. Eine Verwendung flächiger halbtransparenter Farben anstelle der unbunten Musterung über einer farbigen Schichtstufendarstellung war nicht haltbar, da eine additive Farbmischung bei einer Bildschirmdarstellung die Folge ist und sich dadurch der farbliche Gradientenverlauf der Basiskarte unterschiedlich verändert. Somit wird die Interpretation der Farbuordnung erschwert. Hingegen ermöglicht die Verwendung einer Musterung in Grautönen die Unterscheidung zwischen Schichtfarben und der gerasterten Form der Flächensignatur. Dies wird auch von Rase in Folge der unterschiedlichen graphischen Ausprägungen bestätigt (Rase 1998, S. 101). Daher fiel die Entscheidung für eine geringe Verdeckung der darunterliegenden Informationen auf einer musterbasierten Flächensignatur mit weiter Rasterung und dünner Linienstärke.

Die so entworfenen Baustoffsignaturen mit ihren geometrischen und symmetrischen Formen erschließen sich dem Kartenleser erst durch ihre *Zeichen-Bedeutungs-Relation* aus der Legende. Eine seitlich zur Baustoffsignatur angebrachte Signatur verdeutlicht die Oberflächenrauheit des Baustoffs und steht nur in der Legende zur Verfügung (s. Abb. 84).



Abb. 84: Signaturen für die Baustoffe

Eine weitere Signaturform bilden die Fassadenelemente. Sie dienen als Bindeglied (*Lagerrelation*) zu den thermalen nicht sichtbaren Informationen. Für die Lageverbindung wurden abstrahierte Fenster und Simsvorsprünge als linienhafte Signaturen in den Fassadenkarten platziert (s. Abb. 85).

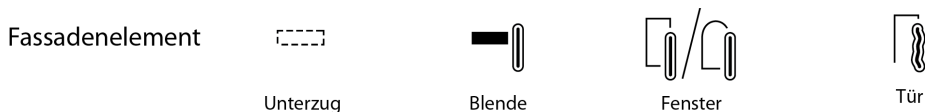


Abb. 85: Signaturen für die Fassadenelemente

## Aufheizverhalten

Das diagrammatische Zeichen zeigt das Aufheizverhalten als Füllstandswert an. Dabei stellt die rechteckige äußere Form die Referenz zum inneren roten Füllbereich dar. In vier Stufen wird das Aufheizverhalten an der Fassade visualisiert (s. Abb. 86). Durch seine Signaturform bedingt, ist eine genaue Verortung in der Karte gerade bei dünnen oder linienhaften Materialschichten (z.B. Sims, Vorsprüngen) nicht gegeben. Abhilfe verspricht ein in der klassischen Gestaltung eingesetztes dreiecksförmiges Zeigersymbol, dessen Platzierung in den unteren Signaturbereich gelegt wird.



Abb. 86: Signaturen für das Aufheizverhalten

## Äußere thermale Einstrahlung

Eine weitere Signaturgruppe gibt Aufschluss über das Strahlungsverhalten der Materialien bei einer äußeren Bestrahlung. Gemeint ist hierbei der Einfluss der Sonne, der das Aufheizverhalten einer Gebäudefassade abhängig von ihrem Strahlungsverhalten unterschiedlich stark beeinflusst. So lassen sich diesbezüglich in der Physik vier Unterschiede festhalten. Eine gerichtete und diffuse Reflexion, eine Absorption und eine Transmission. Da eine Reflexion immer auch einen Absorptions- oder einen Transmissionsanteil besitzt, wurde für die Symbolisierung nur der bedeutende Strahleneinfluss berücksichtigt. So besitzt das Fenster einen weitaus höheren Transmissionsanteil als einen Absorptionsanteil und wird somit nur mit einer Transmissionssignatur versehen. Dabei zeichnen sich die Signaturen durch einen hohen Grad an Ikonizität aus. Es ergeben sich vier, in ihrem Aufbau ähnliche, Signaturen, die sich erst im stilisierten Wandbereich voneinander unterscheiden (s. Abb. 87).



Abb. 87: Signaturen für die äußere thermale Einstrahlung

## Wärmeleitfähigkeit

Die baustoffbedingte Wärmeleitfähigkeit repräsentiert das natürliche Verhalten der Wärmetransmission durch den Fassadenkörper. Ihre Signatur wird in drei Stufen unterschieden: Gering, Mittel und Groß (s. Abb. 88).



Abb. 88: Signaturen für die Wärmeleitfähigkeit

## Wärmebrücken

Im Bauwesen existieren fünf bedingte Wärmebrücken, deren Darstellung in dieser Arbeit entworfen wurde, aber in den Kartenentwürfen nur eingeschränkt ihre Verwendung fanden. (Begründe, warum) Für die Gestaltung der Wärmebrücken kamen hoch piktorielle Signaturen zum Einsatz. Dabei ergab sich, die Periode des wellenförmigen Pfeils möglichst groß zu

wählen, um auf die Wärmestrahlung hinzuweisen und eine Fehlinterpretation als Funk- oder Radiowellen durch eine zu kurze Periode zu vermeiden. Das Grundelement einer horizontal ausgerichteten, pfeilförmigen Wärmewelle und einer stilisierten vertikalen Wandlinie wurde zu fünf unterschiedlichen Wärmebrückensignaturen aufbereitet und in zwei Variationsreihen umgesetzt (s. Abb. 89).



Abb. 89: Signaturen für die Wärmebrücken

### Fassaden- und Rohrleitungsschäden

„Indexikalische Zeichen rufen keine visuelle Assoziation hervor, sondern stimulieren unmittelbare Vorstellung oder ein direktes Verhalten“ (Bollmann und Koch 2001a, S. 395). Dabei stehen sie immer in Analogie zu einem anderen graphisch verknüpften kartographischen Zeichen. So ist das hinweisende Zeichen als nominale Signatur in Analogie zu einem Warnsymbol entworfen worden, das in Kombination mit einer Gebietsgrenze (Schichtstufe) bzw. in Beziehung zu einem linienhaften Symbol (Steigleitung des Heizungssystems) steht. Die bildhafte Ikonizität innerhalb des Warnsymbols löst hingegen eine entsprechende Assoziation und Kombination mit dem verknüpften kartographischen Zeichen aus. Sie sind somit eine Mischung aus indexikalischer und ikonischer Signatur.

Die Signatur der Staunässe, die einen generellen Feuchtigkeitseintrag in die Fassaden im Bezug zu einer Ausdehnungsfläche symbolisiert, konnte durch drei einzelne Wassertropfen innerhalb eines Warnsymbols verdeutlicht werden (s. Abb. 90).

Mit der Erweiterung dieses Symbols durch rot- bzw. blaugefärbte Tropfensymbole neben einer gebrochenen Versorgungsleitung wurde eine weitere Symbolisierung für Warm- bzw. Kaltwasserschäden im Rohrsystem umgesetzt (s. Abb. 91).



Abb. 90: Signaturen für die Fassadenschäden



Abb. 91: Signaturen für die Rohrleitungsschäden

### Heizungssystem

Dabei handelt es sich um eine rein fiktive Symbolisierung, wenn eine Klassifizierung durch thermische Messung bzw. durch andere Verfahren eine Bewertung der Radiatorzustände erlauben sollte. Die Radiatorsignatur gehört zu den diagrammatischen Symbolen mit einer assoziativen Ikonizität. Mit seinen angedeuteten fünf Lamellen können fünf Wärmegrade den Kartenleser über den Heizungszustand der Radiatoren informieren. Es wurden hierbei zwei Beispiele erstellt, die einerseits die einzelnen Lamellen stufenweise mit der Farbe Rot einfärben, andererseits den Grundkörper des Radiators durch Farbstufen in seiner Tempe-

raturwertigkeit erhöhen. Dabei ließen sich die ordinalen Werte durch eine numerische Thermostatbeschriftung (\*<sup>47</sup>–1–2–3–4) oder durch einen beschriebenen Empfindungsgrad (kalt–lau warm–warm–heiß–sehr heiß) bezeichnen (s. Abb. 92).



Abb. 92: Signaturen für das Heizungssystem

### Tiefeninformation

Aufgrund der unterschiedlich tiefliegenden thermischen Strukturen muss die Tiefeninformation einen festen Bezug zur Signatur besitzen. Dies wurde umgesetzt durch eine zusätzlich farbige Konturlinie entlang der orthogonalen Punkt- und Linien-Signatur sowie durch die komplette Einfärbung der flächenhaften Signaturmuster. Für die Tiefeninformation wurde eine dreistufige Grautonfolge mit folgender Bedeutung gestaltet:

- Strukturen auf der Oberfläche
- Strukturen unterhalb der Oberfläche
- Tiefliegende Strukturen unterhalb der Oberfläche

So reduziert sich der Grautonanteil der Tiefeninformation für die an der Oberfläche befindlichen Strukturen von Schwarz mit 100%, für verdeckte Strukturen unterhalb der Fassadenoberfläche über zu einem dunklen Grau mit 70% und für tiefliegende thermale Strukturen hin zu einem hellen Grau mit 40% (s. Abb. 93 – oben).

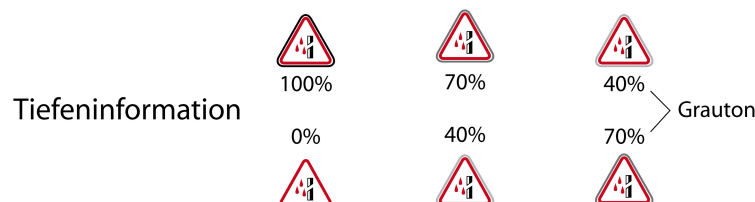


Abb. 93: Signaturen für die Tiefeninformation

Eine weitere Darstellungsvariante wäre der invertierte Wechsel der Grauwerte für die Oberfläche mit Weiß mit 0%, für verdeckte Signaturen im hellen Grau mit 40% und für tiefliegende Signaturen im dunklen Grau mit einem 70%igen Grautonwert nach der Vorgehensweise „Je tiefer desto dunkler“ (s. Abb. 93 – unten).

### 8.1.5 Legenden

Die Legendengestaltung untergliedert sich in mehrere Informationsbereiche. Zu den Karteninhalt beschreibenden Informationen zählen die Sonneneinstrahlung, die Sichtbarkeit,

<sup>47</sup> \* Steht für die Thermostatstellung „Frostschutz“.

die Baustoffeigenschaften, die klassifizierten thermischen Signaturen und der natürlich angelegte Farbverlauf für die Schicht- und Isothermenwerte. Ergänzende Informationen über die Fassadenorientierung, raum-zeitlicher Informationen und Maßstabsangaben finden sich in Gruppe sechs wieder (s. Abb. 94).

- Die erste Gruppe beschreibt den Sonnengang und ihren Einfluss auf die Fassade. Dieser Bereich fasst somit alle äußeren thermischen Einflüsse zusammen und gibt einen Überblick über die meteorologischen Verhältnisse zum Messzeitpunkt. Die Darstellung variiert bezüglich der Nutzergruppe. So erhält der Experte zusätzliche Informationen über meteorologische Verhältnisse und einem Sonnenstandsdiagramm. Dem Laien steht dagegen nur der vereinfachte visualisierte Sonnengang in Draufsicht und Aufsicht zur Verfügung.
- Die zweite Gruppe beschreibt die Sichtbarkeit der thermalen Struktur in drei Schritten. Dafür wurde eine Abfolgebeschreibung graphisch umgesetzt, die das Verständnis zwischen den farbigen Konturlinien und der Signatur besser beschreibt. So illustriert der erste Schritt die Tiefeninformation mit ihren drei Grautönen, der zweite Schritt die thermale Signatur in ihrer Ausgangsform und der dritte Schritt kombiniert diese zu einer Signatur mit Tiefeninformation. Diese Gruppe steht beiden Nutzerkreisen zur Verfügung.
- Die dritte Gruppe stellt alle vorkommenden Baustoffeigenschaften und Oberflächenbeschaffenheiten in geordneten Untergruppen vor und spricht nur den Kreis der Experten und Fachleute an. Dem Laien wird diese Information vorenthalten, da für ihre Interpretation besondere Fachkenntnisse notwendig sind.
- Die vierte Gruppe erklärt die thermalen Strukturen und Einflüsse in geordneter Reihenfolge und soll gerade Laien das Verständnis für die Ursachen eines unplanmäßigen Wärmeaustritts aus der Fassade verdeutlichen.
- Die fünfte Gruppe stellt ein Temperaturschema in Analogie zum natürlich gestalteten Farbschema nach DeLucia und Hiller dar (DeLucia und Hiller 1982). Dabei wurde dieses horizontal von links nach rechts angeordnet, um den Eindruck einer vermeidlichen Höhenentwicklung des Farbschemas, wie es in Höhenkarten zu sehen ist, entgegenzuwirken. Die Anordnung verdeutlicht so eine horizontale Abstrahlung aus der vertikalen Fassadenebene. Ihre Darstellung wird allen Nutzergruppen zur Verfügung gestellt.
- Die sechste Gruppe beinhaltet eine kleine Gebäudedraufsicht der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN im flächig hellen Grauton mit dem unmittelbar aufgenommenen Gebäude im dunkleren Grauton. Die wiedergegebene Fassade dagegen erscheint als dicke schwarze Kante. Die Priorisierung der eigentlichen Fassade im Gebäudeverbund wird dabei durch den Zuwachs des Grautonwerts erzielt. Der Nordpfeil vervollständigt die Ausrichtung der Gebäudeansicht. Bei der Maßstabs- und Lageangabe erfolgte die Gestaltung sowohl numerisch als auch graphisch. Für die Jahreszeitenfolge stehen die piktoriellen Symbole Sonne und Schneeflocke im logischen Zusammenhang zu den vier Jahreszeiten.

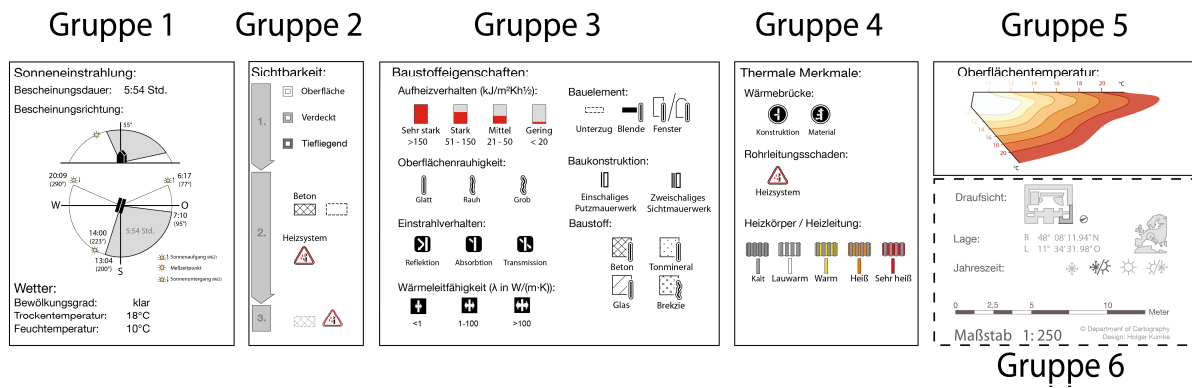


Abb. 94: Legendenaufbau

### 8.1.6 Implementierung

Die Visualisierung des sekundären Kartenmodells wurde in einem vektorbasierten Autorenprogramm erstellt und zeigt das gängige Herstellungsverfahren in der Kartographie. Das Ergebnis liegt als digitale Karte für die Bildschirmdarstellung vor und kann gerastert über ein Bildbetrachtungsprogramm oder durch vektorunterstützende Formate, wie dem Scaleable Vector Graphic (SVG)-Format, in einem Webbrowser wiedergegeben werden. Erfolgt der vektorbasierte Ansatz, bleibt die Darstellungsqualität aufgrund der artefaktfreien Rasterung in den Kontrastübergängen erhalten. Ein Mindestmaß an Interaktionsmöglichkeit bietet die Nutzerschnittstelle von Carto.net mit ihren Navigationswerkzeugen *Pan-*, *Zoom-* und *Undo-*Funktion, die zur Implementierung der eigenen Karteninhalte genutzt werden kann.

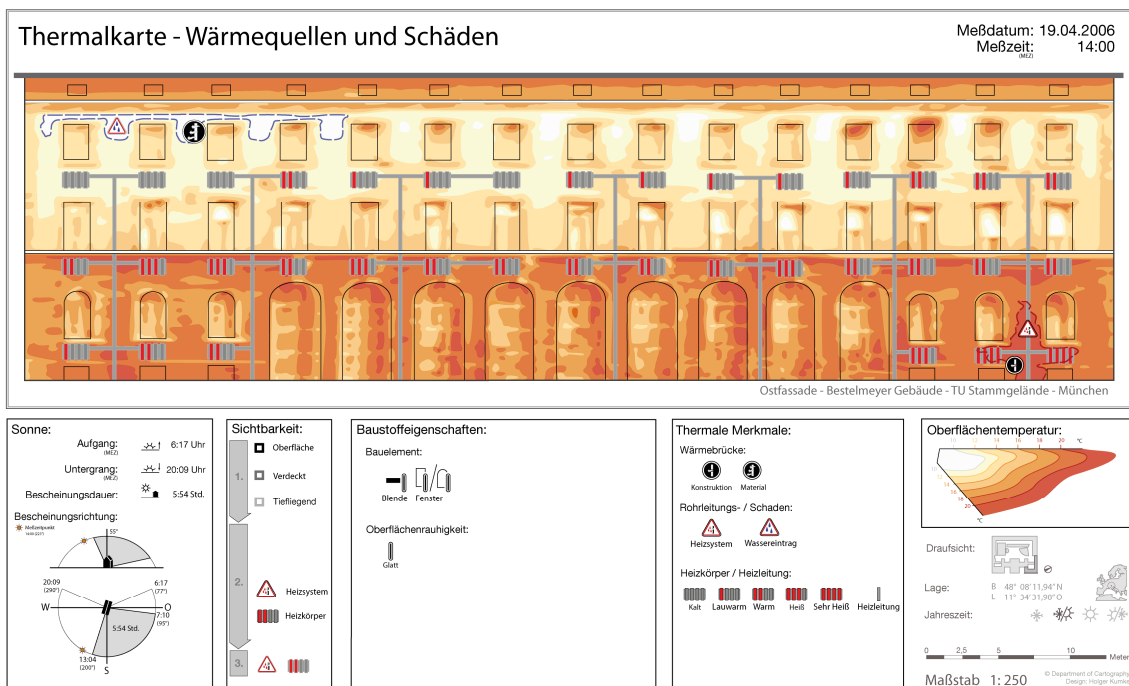


Abb. 95: Auf Wärmequellen und Schäden reduzierte Thermalkarte für Laien [s. Anhang]



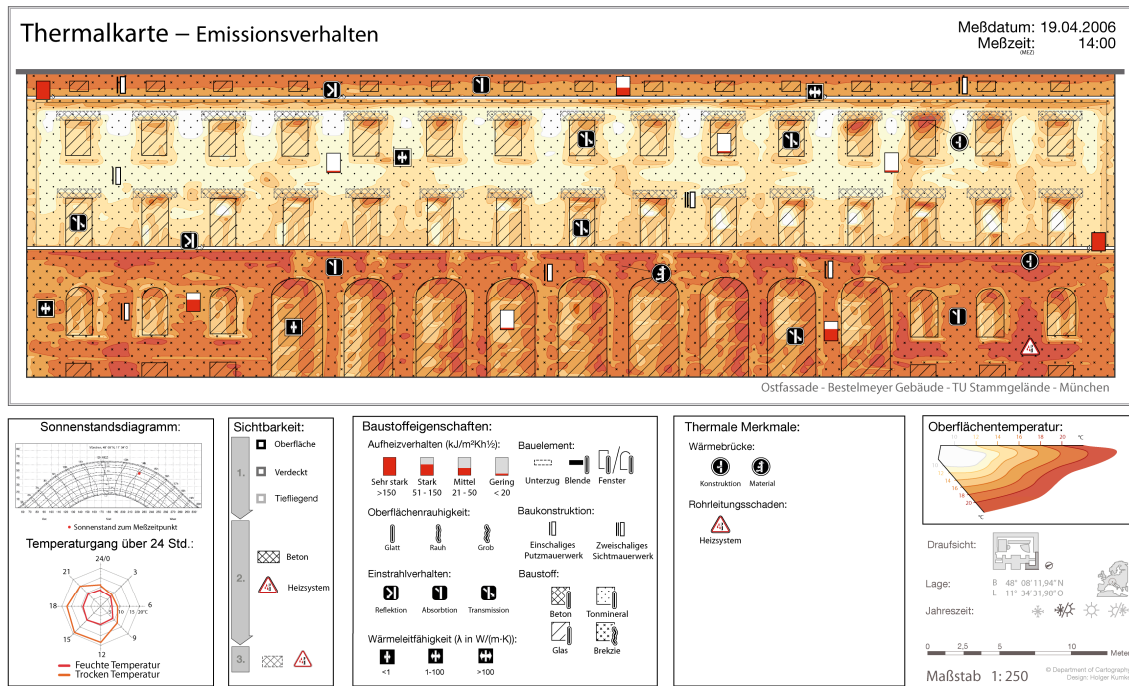


Abb. 96: Physikalisch ausgerichtete Thermalkarte für Experten [s. Anhang]

## 8.2 Thermale 3D-Kartenentwürfe

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Anreicherung ebener und körperhafter Thermalinformationen auf der Gebäudefront eines virtuellen 3D-Stadtmodells. Ihre Darstellung richtet sich nach den Ausgangsdaten der *Primärmodelle* und basiert entweder auf der korrigierten Rastertextur (IR-Bild) oder auf den Vektorisierungsergebnissen des IR-Bildes. Die so aus den *Primärmodellen* geschaffenen *Sekundärmodelle* liegen in ihrer Oberflächenbeschreibung als *vef-Graphen* vor. Dabei zeigen die vorgestellten thermalen 3D-Kartentypen nicht nur unterschiedliche Darstellungsformen zur Visualisierung von Temperaturwerten, sondern versuchen auch die klassifizierten thermalen Strukturen durch Signaturen mit ihren Tiefeninformationen im 3D-Raum adäquat zu repräsentieren. Aufgrund der perspektivischen und computergraphischen Einflüsse muss die Informationsdichte der 3D-Kartentypen im Vergleich zu den thermalen 2D-Kartentypen stärker zurückgenommen werden, was zu einer Entlastung des Kartenbildes führt und die Übersichtlichkeit erhöht. Das hat zur Folge, dass in den räumlichen Kartenbildern eine reduzierte Isothermenanzahl für die Ausgestaltung zu finden ist. Die Entwürfe wurden vorerst als statische Ergebnisse aus zentralperspektivischen, leicht gekippten Vogelschrägsichten (3-Fluchtpunktverhältnisse) entwickelt, deren digitale Daten sich im weiteren Verarbeitungsschritt zu echtzeitfähigen Darstellungen überführen lassen. Ihre Weiterverarbeitung ist aber nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Eine analytische Betrachtung (*Kartometrie*) der vorgestellten Kartenentwürfe ist durch die räumlich virtuelle Begebenheit nur eingeschränkt anwendbar (s.Kap. Visuelle 3D-Raumhelfer, S. 156). Daher wird eher auf die Anschaulichkeit und das Verständnis beim Kartenbetrachter bzw. auf eine neue Sichtweise von thermographischen Darstellungen Wert gelegt.

Es sei hier noch einmal erwähnt, dass sich die Begriffe der ebenen und körperhaften kartenverwandten Darstellung nur auf den Bereich der kartierten Fassade beziehen und somit

nicht das gesamte Stadtmodell, welches ausschließlich als Träger dieser Darstellung dient, zu verstehen ist.

### 8.2.1 Voraussetzung für Linien

Isolinien als Datengrundlage spielen in der thermalen Repräsentation eine wichtige Rolle, ob für Isolinienkarten oder Schichtstufenkarten in 2D- oder 3D-Bereich. Jedoch muss ihre Anwendbarkeit abhängig vom Dimensionsbereich betrachtet werden.

So legen im 2D-Bereich die Parameter: Linienfarbe, Linienstärke und Linientyp (gestrichelt, punktiert) die Gestaltung fest. Dabei wird die Linie erst durch die Linienstärke als solche sichtbar. Bei der Überführung der vektorisierten Isolinien in ein 3D-Autorensystem bleibt nur der Linienverlauf erhalten. Ihre Parametereinstellungen werden dagegen nicht übernommen. Infolgedessen bedarf es entweder der Erstellung einer Umrisslinie im 2D-Autorensystem oder im 3D-Autorensystem der Festlegung eines renderbaren Splines (Polylinie) mit einer Durchmesserangabe bzw. ihrer Umwandlung zur Konturlinien oder einem körperhaften Objekt. Das heißt, erst durch die flächenbildende Maßnahme der Umrisslinie bzw. der Körpergenerierung und der daran anschließenden Triangulierung wird die Linie sichtbar. Würde der Schritt der Konvertierung unterbleiben, käme es infolge der fehlenden flächen- bzw. volumenhaften Ausprägung zu einer nicht renderbaren Isolinie.

### 8.2.2 Ebene Karten in räumlich virtueller Umgebung

Die vektorisierten Isolinien und Schichtstufen aus den zweidimensionalen Kartenentwürfen wurden für die Kartenerstellung im 3D-Bereich herangezogen. Sie dienten dabei als Ausgangsmodell (Basismodell) für die vektor- und rasterbasierten Darstellungen der ebenen kartenverwandten Kartenentwürfe. Ihre Eigenschaften bezüglich ihrer Darstellungsqualität, ihres Darstellungsreichtums und ihrer Variationsvielfalt finden sich im Kapitel 5.1.2 – Ebene Fassadendarstellungen.

Die Platzierung als Rastertextur erfolgt über den planaren Mappingtyp der komplanar zur stark vereinfachten Fassadenebene des Gebäudemodells in LOD2 orientiert/ausgerichtet ist. Das Verfahren ist ein Standardverfahren in der Generierung von virtuellen 3D-Stadtmodellen und kann durch hinterlegte Rasterbilder aus einer Datenbank automatisiert erfolgen. Weitere Rasterbildquellen für die Ausgestaltung des ebenen Kartenbeispiels können hierbei Phototextur im Rasterformat oder farbindizierte Bitmaps angepasster Temperaturverläufe auf der Grundlage des korrigierten Thermogramms sein (s. Abb. 97).

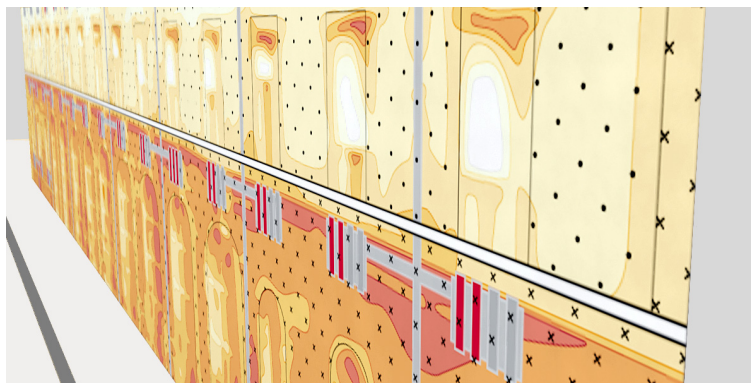


Abb. 97: Ebene Thermalkarte mit Rastertextur (3000ppi)

Eine Platzierung von Vektordaten, als echtes Raumelement, erfordert eine Orientierung über das Weltkoordinatensystem der bestehenden Szene und einer Beachtung der gegenseitigen Objekthöhenlage im Bezug zur Ausgangsebene. Gleichbedeutend einer Layerstruktur im 2D-Bereich wird darüber die Sichtbarkeit der unterschiedlichen Deckschichten gewährleistet. Vektordaten besitzen im Vergleich zu Rasterdaten eine deutlich höhere Knotenanzahl in ihrer geometrischen Beschreibung bei gleichzeitig minimalem Texturaufwand. Ihr Vorteil liegt somit in der Entlastung des hardwarebasierten Graphikspeichers und der damit immer gegebenen optimalen Darstellungsqualität (s. Abb. 98).

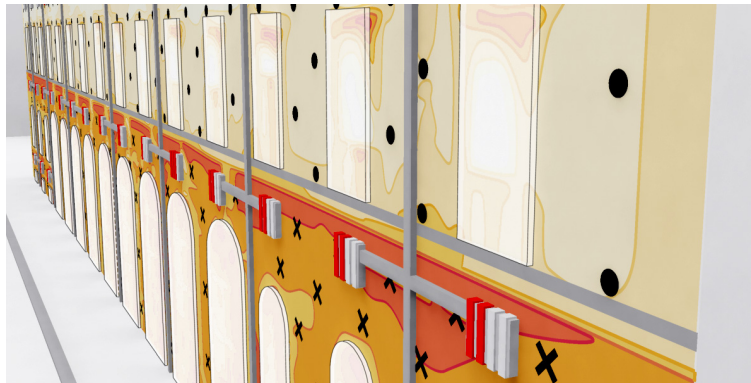


Abb. 98: Ebene Thermalkarte mit Vektortextur

Ebene 3D-Kartenentwürfe ähneln der Ausgestaltung mit ihren punkt-, linien- und flächenhaften Signaturen denen der klassischen Kartengestaltung unter Berücksichtigung der Dimensionsproblematik und der computergraphischen Einflüsse. Das bedeutet, die Karte kann in vielschichtigen Ebenen aufgebaut werden, was sich bei der Verwendung von körperhaften Kartentypen als Ausgangsmodell für die spätere Signaturierung grundsätzlich ändert.

### 8.2.3 Körperhafte Karten in räumlich virtueller Umgebung

Körperhafte Modelle sind vergleichbar mit der Darstellung statistischer Flächen. Sie lassen sich in bündigen und geschlossenen Modellen mit ihren flächenbezogenen Wertestufen bzw. durchgehenden Kontinua darstellen. Kraak spricht sich gegen eine zusätzliche Symbolisierung von statistischen Flächen aus. Wobei eine erneute Betrachtung der möglichen Symbolisierung gegeben ist, wenn zwischen den statistischen Erhebungsflächen Freiräume dafür bestehen.

Im Folgenden werden fünf Temperaturdarstellungen umgesetzt, deren Basis das vektorisierte oder das korrigierte IR-Bild bildete. Dies bedurfte, abhängig vom vorgestellten Kartentyp, einer unterschiedlichen Verarbeitung, die manuell oder semiautomatisch erfolgte.

#### Isothermen mit Flanken

Isohypsen, bekannt durch Darstellungen aus topographisch räumlichen digitalen Karten, werden meist mit einem Digitalen Geländemodell (DGM) kombiniert. Dabei dienen sie als Texturelement für das DGM und erhalten erst durch deren Kombination eine räumliche Ausprägung. In dieser Arbeit werden die Isothermen als ein eigenständiges Element betrachtet. Für ihre Darstellung braucht es, gleichbedeutend einer Linienstärke, die Ausführung einer Kontur- bzw. Umrisslinie. So entsteht ein schlankes, dem Isolinenverlauf folgendes, geschlossenes Polygon. Der zur Fassadenebene komplanare Polygonverlauf liegt

nun als flächenhaftes Objekt vor und seine Sichtbarkeit ist im dreidimensionalen Raum gegeben.

Für seine räumliche Ausprägung als ebene Konturlinie bietet sich nur der Versatz entlang der Fassadennormale an. Dessen Vorteil besteht darin, dass durch die räumliche Entzerrung bei flachem Betrachtungswinkel mehr Raum zwischen den Isolinen vorhanden ist und folglich der Texturgradient geringer ausfällt. Zwei Gründe sprechen aber gegen den räumlichen Versatz flacher Isolinen. Auf der einen Seite werden die Minimaldimensionen der flächenhaften im Raum stehenden Isolinen entlang der Tiefe bei einem zu flachen Betrachtungswinkel unterschritten, auf der anderen Seite geht die Sichtbarkeit der Fläche verloren, wenn die Sichtachse senkrecht zur Flächennormalen steht. Um dies zu umgehen, wurden die Konturlinien als extrudierte Oberflächenkörper (Erhebungsflächen) auf der Fassadenoberfläche definiert. Für die Darstellung der Temperaturwerte bot sich der Einsatz gleichmäßig gestufter wie auch progressiver Höhen an. Wobei ein progressiver Werteverlauf bei homogenen ratioskalierten Datenwerten für eine deutlichere Hervorhebung der Spitzenwerte (*Singularitäten*), als ein stetiger Verlauf, sorgt. Sieber betont das einzelne Spitzenwerte bzw. zentrumsbezogene Daten die Orientierung in der Szene erleichtern und einen schnellen Überblick über große Wertesprünge in den Daten liefern (Sieber et al. 2009, S. 193). So ist die Formengestalt der körperhaften Isothermen vergleichbar mit einem aus dem U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY genutzten Reliefverfahren aus den 50er Jahren.

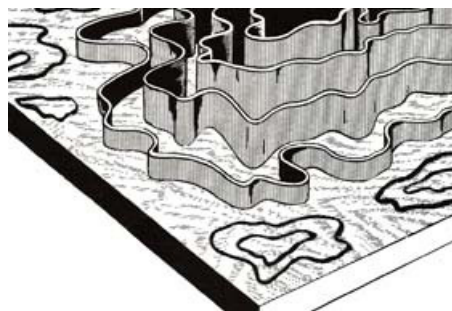


Abb. 99: Bandmethode (Ribbon Method) (Quelle: U.S. Army 1956)

In einer unmittelbaren zentralperspektivischen Draufsicht auf die Fassadenfläche kommt es im Bereich der Deckungsgleichheit zwischen Sehstrahl und Blickrichtung ( $\beta = 0^\circ$ ) entlang der Flächennormalen zum Verlust der räumlichen Erhebungen der körperhaften Isothermen. Es bleibt nur noch die Stirnfläche (Konturbreite) der Isothermen als einziger Informationsträger erhalten (s. Abb. 100). Bei allen anderen Blickrichtungen summiert sich die Breite der Stirnfläche mit denen der Flanke. Daher ist für die Festlegung der Minimaldimension nach Terribilini die Konturbreite bei dieser Form der Darstellung entscheidend.



Abb. 100: Isothermen – Seitenansicht mit Einfluss der Zentralperspektive [links] und Konturbreite als Minimaldimension im Bereich der Blickrichtung[sachse] [rechts]

Tab. 18 verdeutlicht die Wertestufen mit ihren Erhebungen bis zu ihrer maximalen Erhebung von einem Meter. Dabei verteilen sich im stetigen Verlauf die Wertigkeiten gleichabständig, im progressiven Verlauf dagegen durch Verdoppelung ihrer Wertstufen.

Stufen	1	2	3	4	5	6
Stetig [cm]	16,66	33,33	50	66,66	83,33	100
Progressiv [cm]	3,125	6,25	12,5	25	50	100

Tab. 18: Isolinienhöhen

Für die körperhaften Isothermen ergeben sich auf der Fassade des Bestelmeyers Gebäudes mit seiner Gesamtlänge von 66,2 Metern und einer Höhe von 18,5 Metern eine Polygonanzahl von 637.336. Darunter ist die Anzahl der triangulierten Facetten der Polygonnetze aller sechs Isothermenkörper zu verstehen (s. Tab. 19).

Fassade	Länge	Höhe
	66,2m	18,5m
3D-Ausgangsmodell	Isolinien (Konturbreite 1–5 cm)	
	Anzahl	Polygonanzahl
	6	637.336

Tab. 19: Polygonanzahl der Isothermendarstellung

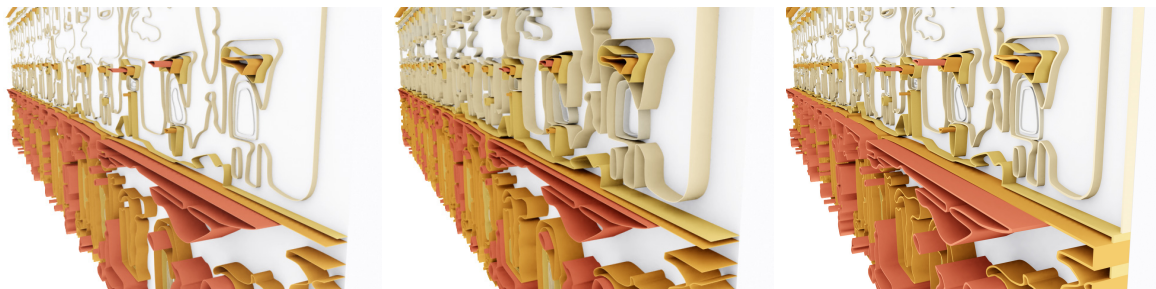


Abb. 101: Variation der Isolinienkarte – progressiver und stetiger Verlauf mit offenem und progressivem Verlauf mit geschlossenen Isolinien [von links nach rechts]

Eine Variation der Farbgestaltung durch ausschließlich farbige Stirnflächen, wie sie in den Schichtstufen vorkommen, ist durch die geringe Flächenausdehnung der Konturbreite als nicht sinnvoll einzustufen. Der Entwurf der Isothermen als Erhebungsfläche hat durch ihre schlanke Silhouette den Vorteil des reduzierten Platzbedarfs auf der Fassadenebene und erlaubt so eine weitere Anreicherung mit räumlichen Signaturen direkt auf der Fassadenebene.

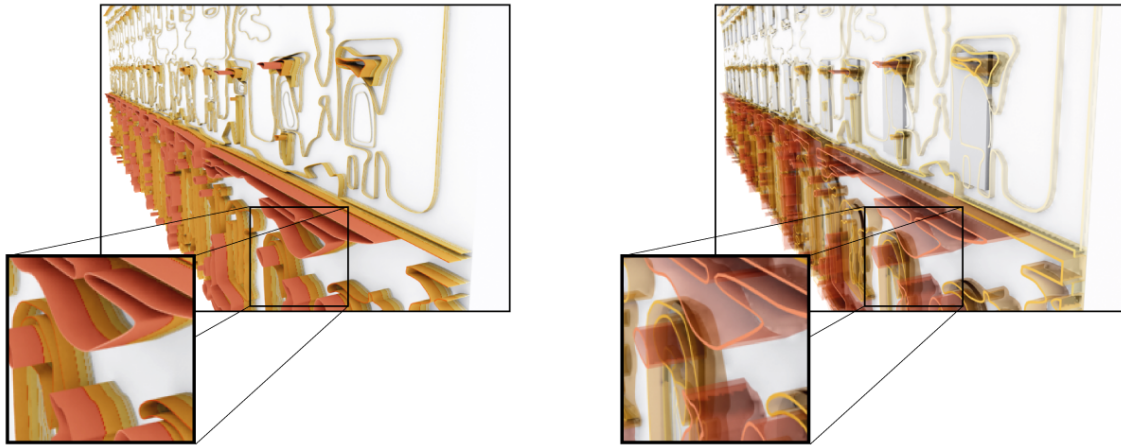


Abb. 102: Varianten der Isolinkarte mit progressiver Farbreihe entlang der Flanke [links] und transparenter einfarbiger Flanke [rechts]

Abb. 102 zeigt links einen progressiven Stufenverlauf mit diskreter Farbreihe im Flankenbereich. Die rechte Abbildung zeigt dagegen eine vollfarbige Stirnfläche mit halbtransparenten einfarbigen Flanken kombiniert mit opaken Fenstersignaturen. Die Wirkung der *Transparenz* ist durch die Anordnung der Isothermen und dem inhomogenen Hintergrund durch das Ausgangsmodell sowie Metallis Merkmalen der X-Kreuzungen gewahrt.

### Schichtstufenkarten

Bei den hier vorgestellten Schichtstufenkarten basieren diese auf der klassischen Schichtstufendarstellung. Sie wurden für die räumlichen Kartenentwürfe adaptiert und entlang der Fassade vertikal ausgerichtet. Dabei dient ein lokales Koordinatensystem in der Fassadenebene, an dem sich die Lageinformation der thermalen Segmentierung orientiert. Ihre Verschiebung in der Höhe erfolgt entlang des Normalenvektors der Fassadenebene und unterscheidet sich im Vergleich zur Isolinkonstruktion nur durch ihren Aufbau. So werden in der Isoliniendarstellung die geschlossenen Polygonlinien mittels eines festgelegten Abstands zur ursprünglichen Isolinie ausgedehnt. Diesbezüglich repräsentiert die Konturlinie um die Isolinie eine bestimmte Linienbreite. Die Darstellung zeichnet sich in diesem Zusammenhang durch ihre eigenständigen und freiliegenden Isolinien aus, die sich in keinem Bereich der Darstellung berühren, überlagern oder überschneiden. Schichtstufen nutzen dagegen für ihren Stufenaufbau zwei benachbarte Isolinien und bilden daraus eine geschlossene Einheit. Sie grenzen aneinander und erzeugen so den Effekt einer Stapelung. Besteht innerhalb einer Schichtstufe ein in sich isolierter tieferer Schichtstufenbereich, so muss dieser von der darüber liegenden Schichtstufe ausgespart bleiben.

Die Datengrundlage für den Aufbau bildet hierbei wiederum das 7-stufige Vektorergebnis des IR-Bildes. Dessen Vorbedingungen für eine fehlerfreie Erhebung (Extrusion) eine überlappungsfreie Linienführung, die Vermeidung identischer Knoten in der Polygonlinie, eine geschlossene Polygonlinie, bestehend aus den benachbarten Isolinien, und der topologische Zusammenhang innenliegender Polygonlinien einer Stufe sind. Die Resultate ergeben, der Stufenanzahl entsprechend, geschlossene Polylinienkörper mit innenliegenden Aussparungen (s. Abb. 103).

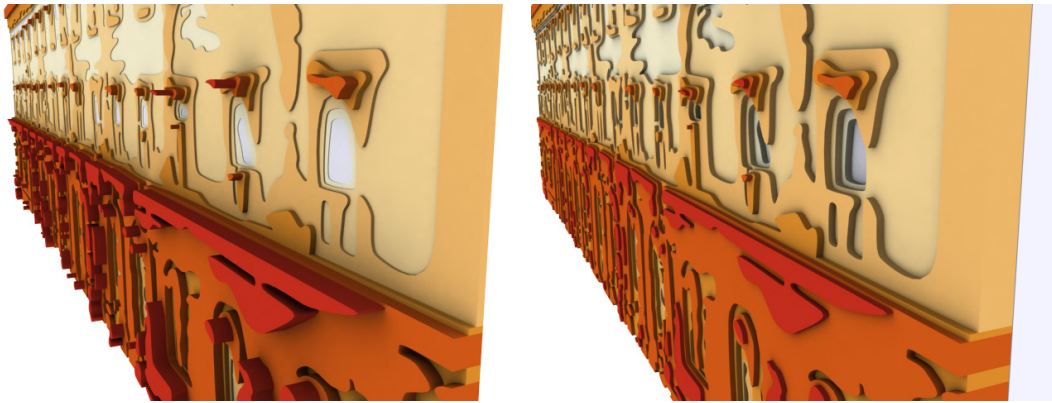


Abb. 103: Variationen der Schichtstufenkarte mit progressiven [links] und stetigen Verlauf [rechts]

Tab. 20 verdeutlicht die Wertestufen mit ihrer maximalen Erhebung von einem Meter. Der stetige Verlauf unterteilt seine sieben Erhebungen zu gleichen Teilen über den Wertebereich wohingegen der progressive Verlauf seine Stufenwerte schrittweise verdoppelt.

Stufen	1	2	3	4	5	6	7
Stetig [cm]	14,3	28,6	43	57	71,5	86	100
Progressiv [cm]	1,563	3,125	6,25	12,5	25	50	100

Tab. 20: 7 Höhenstufen im stetigen und progressiven Verlauf

Durch die Schichtstufen ergibt sich im Vergleich zur Isothermendarstellung eine reduzierte Polygonanzahl. Mit 177.436 Polygonen entspricht dies ungefähr einem Viertel der Isothermenanzahl (s. Tab. 21).

Fassade	Länge	Höhe
	66,2m	18,5m
3D-Ausgangsmodell	Isolinien	
	Anzahl	Polygonanzahl
	7	177.436

Tab. 21: Polygonanzahl der Schichtstufendarstellung

Abb. 104 und Abb. 105 zeigen besondere Formen der Gestaltung. Abb. 104 verdeutlicht Schichten mit diskreten Farbstufen in der Stirnfläche und einem kontinuierlichen Farbschema in der Flanke. In der rechten Abbildung finden sich opake Stirnflächen und halbtransparente Schichtflanken des diskreten Farbschemas.

In Abb. 105 variieren in der linken Abbildung die diskreten Farbstufen nur über die Stirnflächen bzw. in der rechten Abbildung nur über die Schichtflanken. Diese Darstellungen geben einen Einblick in die Variationsmöglichkeit der graphischen Gestaltung und stellen somit nur einen kleinen Ausschnitt der Vorgestellten graphischen Möglichkeiten dar.

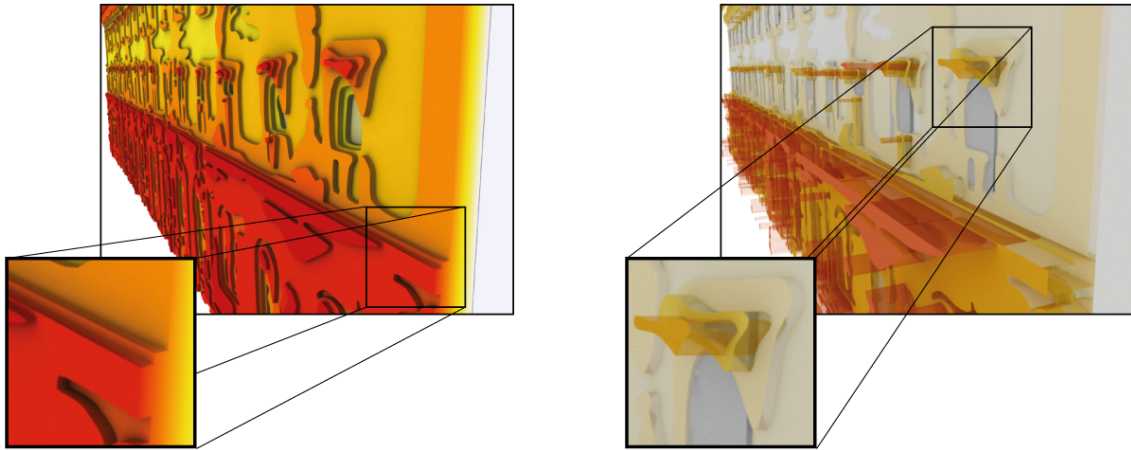


Abb. 104: Varianten der Schichtstufenkarte mit kontinuierlichen Farbschema [links] und diskreten transparenten Farbstufen in den Flanken [rechts] mit jeweils opaken Stirnflächen

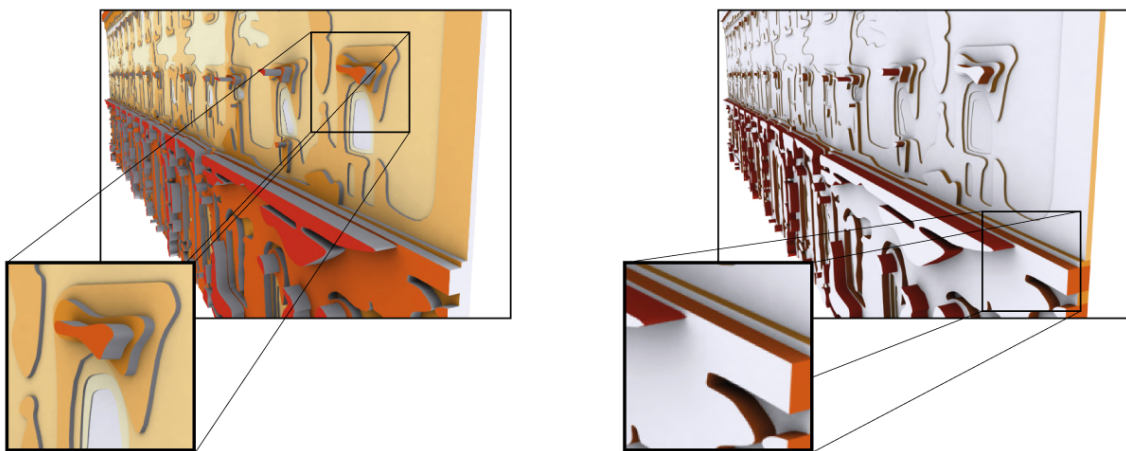


Abb. 105: Varianten der Schichtstufenkarte mit Farbschema nur im Stirnflächenbereich [links] und nur im Flankenbereich [rechts]

### Quaderrasterkarten

Die vorgestellte Quaderrasterkarte ist eine Analogie zur zweidimensionalen Quadrat-rasterkarte. Quadratrasterkarten basieren auf einer festen regelmäßigen Rasterweite, deren Wertigkeit über die quadratische Formprimitive durch Größe und/oder Farbgebung vermittelt wird. Eine Überlagerung mehrerer Informationskategorien anhand der graphischen Variable *Farbe* findet sich in Anlehnung an Bertins Entwürfen in einer planaren Karte über die Bevölkerungszunahme im Vergleich zu Entwässerungsflächen und den bestehenden Höhenunterschieden in einem Beispiel von Kraak wieder (Kraak und Ormeling 1996, Plate 7). Die Umsetzung von einer Quadratrasterkarte zu einer Quaderrasterkarte erfolgte durch die Dimensionserweiterung des Darstellungsraums und ihrer vertikalen Anordnung über die gesamte Fassadenfläche. Durch den Quader als Ausgangsform ergibt sich für die Wertevermittlung eine weitere nutzbare Variable, die *Höhe*, deren Zusammenhang in der graphischen Variable *Größe* festgehalten wird. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, Temperaturwerte in diesen Kartenentwürfen einerseits über die Höhe, andererseits über die Größe seiner Grundfläche (Breite) zu transportieren. In beiden Fällen bleibt bei der Gestaltung eines der Abmaße konstant, das für den perspektivischen Raum das monokulare Tiefenkriterium der Größenkonstanz für den Betrachter liefert.



Die Datengrundlage für die Quaderrasterkarte liefert eine aus dem IR-Bild abgeleitete thermale Höhenkarte, deren Rasterbild die gemessenen Temperaturen als Grauton codiertes Pixelraster wiedergibt. Die Umsetzung zur Quaderrasterkarte erfolgt durch die Berechnung des mittleren Grautonwertes einer jeden Rasterzelle, welche das Maß für die Höhe bzw. Breite des Quaders für seinen stetigen wie auch progressiven Verlauf liefert. Bei der Variation der Höhe wurde zusätzlich ein Abstand zwischen den Quadern eingeführt, der den räumlichen Verbund löst und so eine Verbesserung der späteren Signaturierung verspricht (s. Abb. 106).

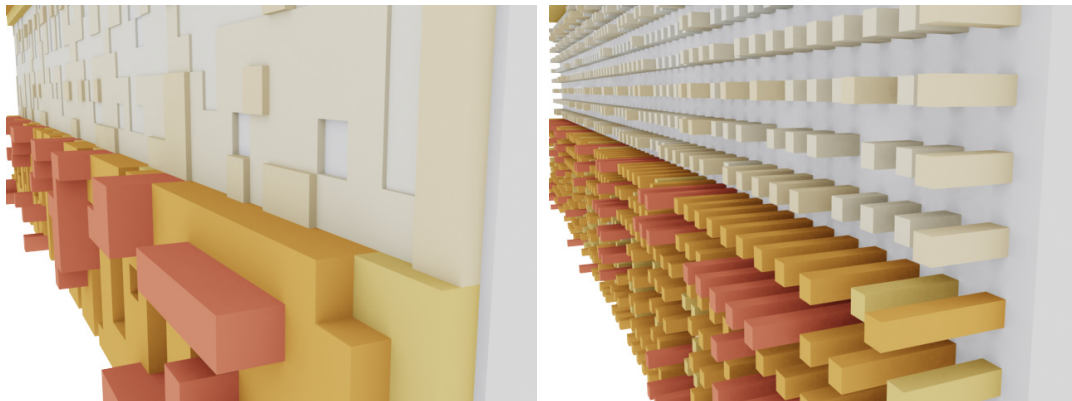


Abb. 106: Quaderrasterkarte ohne [links] und mit Rasterabstand [rechts]

Bei variierender Quaderbreite mit konstanter Höhe wird zusätzlich eine Referenz für die Größenabschätzung der aktuellen Quaderbreite eingesetzt. Dies wurde realisiert durch ein graues Rastergitter im Zwischenraum der Quaderanordnung. Die daraus entstandenen weißen Rasterzellen stellen die maximale Ausdehnung eines Quaders und somit seinen maximalen Temperaturwert dar. Die Distanz zwischen Rasterlinie und Quader verdeutlicht hingegen die Istgröße des Quaders in dieser Rasterzelle und somit seinen Temperaturwert (s. Abb. 107).

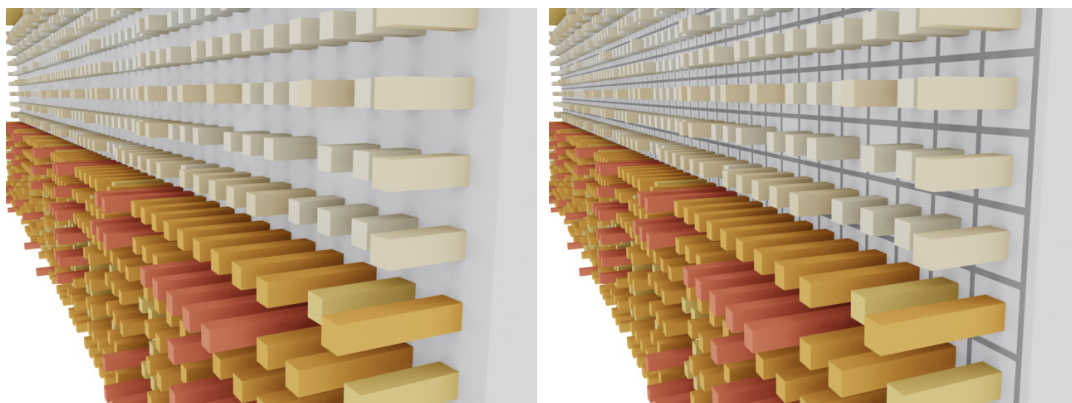


Abb. 107: Quaderrasterkarte ohne [links] und mit Referenzraster [rechts]

Die maximale Höhen- bzw. Breitenausdehnung<sup>48</sup> der kartenverwandten Darstellung beträgt einen Meter und entspricht dem Staffelungsschema der stetigen und progressiven Verläufe

---

<sup>48</sup> Abzüglich des festgelegten Abstands.

aus den Isothermen- und Schichtstufenkarten (s. Tab. 20). Das heißt, es wurden zwecks der Übersichtlichkeit nicht nur die unterschiedlichen Temperaturwerte in einer Rasterzelle gemittelt, sondern auch die Resultate in sieben Höhenstufen bzw. Breitenstufen zusammengefasst.

Durch die Quader reduziert sich aufgrund der einfachen Geometrie die Polygonanzahl im Vergleich zur Schichtstufendarstellung um das 12-fache und erreicht eine Gesamtpolygonzahl von 14.256 (s. Tab. 22). Dabei ist zu beachten, dass für die Quaderanzahl in der Karte von abgerundeten Fassadenlängen ausgegangen werden muss.

Fassade	Länge	Höhe		
	66 (66,2m)	18 (18,5m)		
3D-Ausgangsmodell	<b>Grundkörper Quader (8 Knoten)</b>			
	Breite	Abstand	Anzahl	Polygonanzahl
	0,9m	0,1m	1.188	14.256

Tab. 22: Polygonanzahl der Quaderrasterdarstellung

Die Polygon- und Knotenanzahl der Quaderrasterkarte kann über folgende Formeln bestimmt werden.

$$ObjAnz = \frac{L \cdot H}{(QB + AB)^2}$$

$$Polygonanzahl = 2 \cdot ObjAnz \cdot Seitenzahl$$

$$Knoten = ObjKnt \cdot ObjAnz$$

ObjAnz: Anzahl der Grundkörper

ObjKnt: Knotenanzahl des Grundkörpers

L: Länge Fassade (abgerundet)

H: Höhe Fassade (abgerundet)

QB: Quaderbreite

AB: Abstand zwischen den Quadern

Abb. 108 zeigt mit der Wertevermittlung über die Höhe Darstellungsvariationen in der Farbgebung. Die Gestaltung dieser variiert hierbei in einem kontinuierlichen Farbverlauf, in einer diskreten Farbstufung in Vollfarben und in einer progressiven Farbreihe am Quader. Die rechte Darstellung reduziert die ausgehende Quaderbreite und schafft so die Möglichkeit, Signaturen unmittelbar auf der Fassade zu platzieren.

Abb. 109 zeigt den Einfluss der Wertverteilung über die Breite im stetigen und progressiven 7-stufigen Verlauf der vollfarbigen Quader. Durch die Wahl des progressiven Werteverlaufs können die Maximalwerte stärker herausgestellt werden und schaffen durch die entstehenden Zwischenräume zusätzlich die Möglichkeit für eine denkbare Signaturierung.

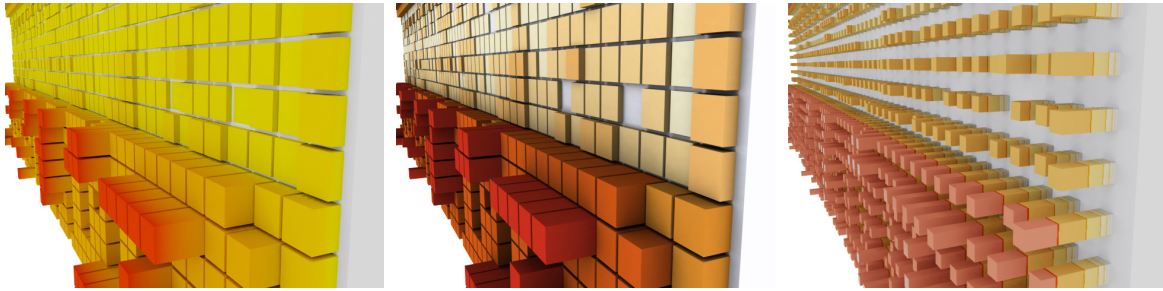


Abb. 108: Quaderrasterkarte mit kontinuierlichem, einfarbigem und gestuftem progressivem Farbverlauf am Quader [von links nach rechts]

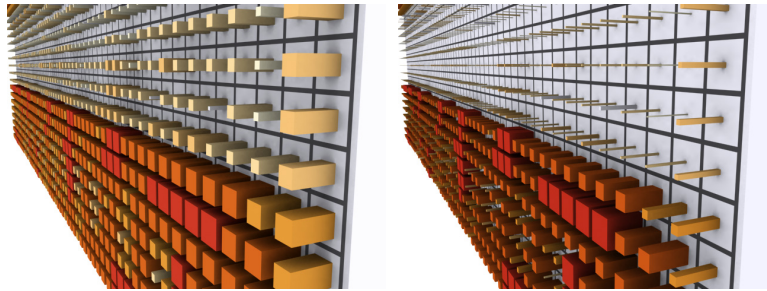


Abb. 109: Stetiger [links] und progressiver Werteverlauf [rechts]

### Digitales Fassadenmodell (DFM)

Wie schon aus geobasierten Fachbereichen bekannt, repräsentieren so genannte Digitale Gelände Modelle (DGM) ein reales Kontinuum eines Geländes. Dabei wird für das digitale Abbild von topologischen Modellen zwischen regelmäßigen<sup>49</sup>, unregelmäßigen<sup>50</sup> und semi-regelmäßigen Gittern unterschieden. Ihre Ausgangsdaten liegen meist als explizite Höhenwerte vor, deren Werte durch unterschiedliche Triangulierungsverfahren zu einem darstellbaren Gittermodell überführt werden. Ihre Genauigkeit und ihr Detailreichtum hängt von der gewählten Messmethode ab und von weiteren zur Verfügung stehenden Metadaten, wie beispielsweise Tesselationen, Bruchkanten und Sattelpunkte für die Einbringung zusätzlicher Strukturinformationen. Dabei lässt sich grundsätzlich sagen, dass die Triangulierung auf einer mehr oder weniger großen Anzahl von Einzelmesspunkten beruht, deren Ergebnis sich nach dem Triangulierungsverfahren und den berücksichtigten Metadaten richtet.

Ein weiteres Verfahren zur DGM-Bildung besteht in der mathematischen Beschreibung durch Approximierungs- oder Interpolationsverfahren. Ihre Höhenwerte liegen in diesem Fall nur implizit vor und werden durch Algorithmen zu einem Modell überführt. Weitere Ausführungen mit entsprechenden mathematischen Ansätzen finden sich unter Foley (Foley et al. 1997).

Der Vorteil eines DGMs liegt hierbei in der schnelleren Erfassung und dem besseren Verständnis der veranschaulichten Darstellung räumlicher Einzelkoordinaten. Als Einzel-

---

<sup>49</sup> Regular Square Grid (RSG)

<sup>50</sup> Triangulated Irregular Network (TIN)

koordinate lässt sich auch ein Grautonwert aus einem Bild mit festem Pixelraster interpretieren. Bekannt ist dies in der Umsetzung von Höhenkarten, die durch 256 Grautonwerte jedem Unbunnton einen bestimmten Höhenwert zuweisen. Der Gedanke liegt nahe, diese Interpretationsform für thermale Bildinformationen auf eine Oberfläche zu transportieren und diese mit der Fassadeebene bündig zu einem Blockbild zu kombinieren. In der weiteren Arbeit wird diese Oberfläche als Digitales Fassadenmodell (DFM) bezeichnet. Grundsätzlich liegt der Unterschied zwischen einem DGM und einem DFM in der Ausrichtung und dem zugrunde gelegtem Koordinatensystem. So wird die Lage im DGM durch die Koordinaten  $x$  und  $y$ , die eines DFMs durch die lokalen Texturkoordinaten  $u$  und  $v$  der Ausgangsfläche beschrieben. Seine Höhenwerte erhält das DGM über den  $z$ -Wert, das DFM über den entsprechenden  $w$ -Wert. So spannt sich entlang eines DFMs ein lokales kartesisches Texturkoordinatensystem mit seinem in der linken unteren Fassadenecke liegenden Ursprung über die Fassadenfläche auf.

Mit einer aus der Infrarottextur abgeleiteten Höhenkarte (Grautonbild) erfolgte die Zuweisung der Erhebungswerte entlang der  $w$ -Achse über das Displacement-Verfahren (s. Kap. 3.3). In Folge des gewählten Verfahrens ist eine Veränderung im hypsographischen Verlauf durch beispielsweise einem progressiven Werteverlauf nur über den Grautonverlauf in der Höhenkarte umsetzbar. Ihre Überhöhung in der Darstellung kann dagegen über das Mapping-Verfahren erfolgen. Ein zusätzliches Kriterium ist das Datenrauschen. Bei dessen Vermeidung bzw. Dämpfung im kontinuierlichen Datenverlauf wird die Wahrnehmung der eigentlichen Werte erleichtert und die Oberfläche für die weitere Gestaltung verbessert.

Der, für das DFM, verwendete Grundkörper bildete eine bikubische Splinefläche. Dieser besteht aus mehreren aneinandergereihten Patchflächen, die über  $C^1$ -stetige Übergänge am Rand stufenfrei miteinander verschmolzen werden. Die Patchfläche wiederum gliedert sich in mehrere Vierecksegmente, deren Verlauf zwischen den Patchecken analytisch interpoliert werden.

Dabei gehen die Flächen genau durch die vorgegebenen Erhebungswerte<sup>51</sup>. Aufgrund der analytischen Freiformfläche verlaufen diese Patchflächen im Vergleich zu den Facetten eines polygonalen Oberflächenkörper (Mesh) zwischen den Erhebungen homogener und reduzieren dadurch den Rauschanteil des zugrundeliegenden IR-Bitmaps (s. Abb. 110).

Im vorgestellten Kartenentwurf mit bikubischen Splineflächen besitzt ein Patch 36 Vierecksegmente. Bei angesetzter Fassadenlänge von näherungsweise 66 Metern und einer Patchunterteilung von 100 Patches auf der gesamten Länge ergeben sich für die Gleichabständigkeit der Kantenlängen bei einer Höhe von 19 Metern eine Patchanzahl von 28 Segmenten. Durch die prozessbedingte Triangulierung der Viereckssegmente verdoppelte sich die Polygonanzahl zusätzlich zu einer Gesamtzahl von 201.600 Polygonen<sup>52</sup>.

---

<sup>51</sup> Dies wäre bei bikubischen Bézierflächen durch ihr Kontrollnetz nicht möglich, da ihre Werte approximiert und nicht interpoliert werden würden.

<sup>52</sup>  $100 \text{ (Patches)} \times 28 \text{ (Patches)} \times 36 \text{ (Vierecksflächen /Patch)} \times 2 \text{ (Triangulierung)} = 201.600 \text{ Polygone}$

<b>Fassade</b>	<b>Länge</b>	<b>Höhe</b>	
	66,2m	18,5m	
<b>3D-Ausgangsmodell</b>	<b>Segmentanzahl</b>		<b>Polygonanzahl</b>
	<b>Länge</b>	<b>Höhe</b>	
<b>Splinefläche</b>	100	28	201.600
<b>Mesh</b>	600	168	201.600

Tab. 23: DFM – Patch und Mesh

Im unmittelbaren Vergleich zwischen der Spline- und der Meshfläche mit identischer Polygonzahl zeigen die zwei Ausgangsflächen im Bereich homogener Werte deutliche Unterschiede im Rauschteil (s. Abb. 110). Das heißt: Für die Generierung des Ausgangsmodells mittels des Displacement-Verfahrens ist, durch den ruhigeren Oberflächenverlauf, der Splinefläche der Vorzug zu geben.

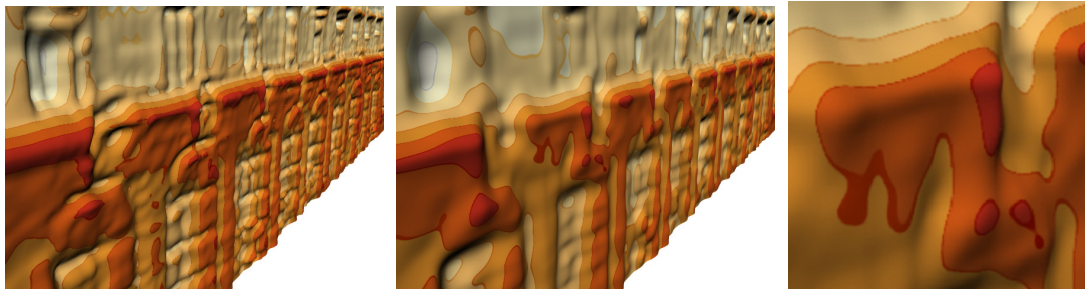


Abb. 110: Mesh- [links] und Splinefläche [mitte, rechts]

Für die bündige Darstellung der Fassadenebene wurde ihre Außenkante blockbildgleich auf die Fassadenebene heruntergezogen. Die auf ein gemeinsames Niveau gebrachte Außenkante verdeutlicht entlang der Flanke die horizontale Schichtungsfolge vergleichbar der natürlichen Farbschemareihenfolge in der Legende (s. Abb. 132) und verstärkt die Stufenfolge in diesem Bereich zusätzlich (s. Abb. 111). Durch die Gestaltung als Blockbild erhöht sich durch Verdoppelung der Außenknoten die Anzahl auf 204.672 Polygone.

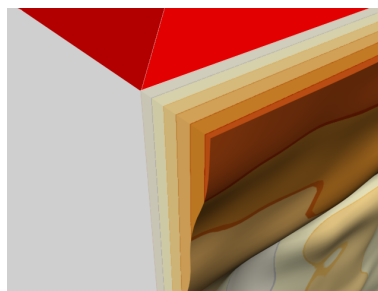


Abb. 111: DFM als Blockbild mit diskretem Farbschema

Abb. 112 zeigt das DFM mit unterschiedlichen Texturierungsvarianten. Vom diskreten opaken Farbschema mit trennenden Isolinien im linken Ausschnitt über eine Kombination mit

Gitterstruktur zur Verstärkung der Strukturform in der Mitte bis zur halbtransparenten DFM-Oberfläche mit Gitterstruktur im rechten Ausschnitt.

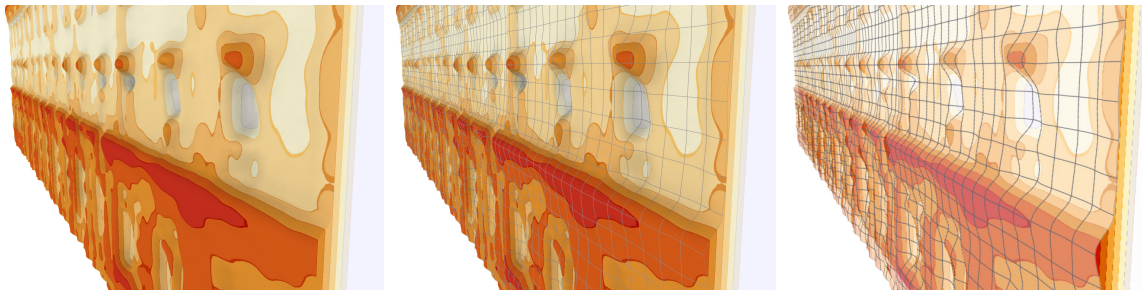


Abb. 112: Variation des opaken DFMs [links] mit Gitter [mitte] und als halbtransparentes DFM mit Gitter [rechts]

Das Verfahren zur Herstellung des DFMs über die Methode des Displacement-Verfahrens mit anschließender Niveauangleichung der Außenkanten zur blockbildgleichen Darstellung und ihrer graphischen Gestaltung konnte mit der Skriptsprache des Autorensystems programmtechnisch automatisiert werden.

### Profilrelief- und Profilrasterkarten

Der Name Profilreliefkarte leitet sich von mehreren hintereinander aufgereihten Profilkarten, mit ihren orthogonalen Seitenansichten in gekreuzter Anordnung und der Kombination mit einem DFM-Relief ab. Die Profilrasterkarte verzichtet dagegen auf das DFM und entspricht einer rasterförmigen Karkasse. Die so gebildete Karkasse ist vergleichbar mit einem aus den 50er-Jahren vom U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY eingesetzten Verfahren zur Relieferstellung. Dabei dienen die im Raster angeordneten Profilverläufe auf einem Träger als Höhenreferenz für die eigentliche Reliefproduktion.

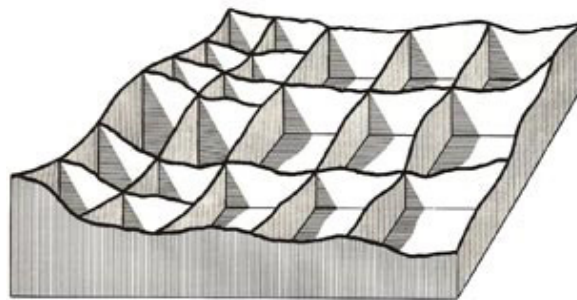


Abb. 113: Zellen Methode (Eggcrate method), Quelle: U.S. Army 1956

Für die Erstellung der virtuellen Profilkarkasse (Profilrasterkarte) wurde die bikubische Splinefläche des DFMs herangezogen und die Profile gleichabständig abgeleitet. Der Prozess stellt folglich den umgekehrten Ablauf der klassischen Relieferstellung dar und wird nun im Näheren beschrieben.

Die Gewinnung der Profile beginnt mit der Zerlegung der DFM-Oberflächenstruktur in horizontale und vertikale Streifen gleicher Rasterabständen und einheitlicher Streifenbreite. Die so erzeugten Streifen werden mit ihren Außenkanten auf das gemeinsame Niveau der Fassadenebene gezogen und bilden nun körperhafte Profilkarten. Ihre Anordnung entspricht einer regelmäßigen gerasterten Karkasse, wobei auf die weitere Unterteilung, wie sie im Abb. 113 zu sehen ist, in den Zellen verzichtet wurde. Für ihre Gestaltung können dabei die gleichen diskreten bzw. kontinuierlichen Farbschemas wie die des DFMs verwendet werden.

Das Resultat ist eine Profilrasterkarte, deren weiterer Gestaltungsschritt durch eine halbtransparente DFM-Oberfläche zur Profilreliefkarte erweitert werden konnte. Durch die halbtransparente Verbindung zwischen den Profilkarten wurde versucht, dem Kontinuitätsanspruch zwischen den Zellen zu genügen.

Fassade	Länge	Höhe
	66,2m	18,5m
	Polygonanzahl	
Profile horizontal	35.986	
Profile vertikal	34.420	
Relief (DFM)	204.672	
Summe	275.078	

Tab. 24: Profilreliefkarte

Abb. 114 stellt eine Auswahl beider Kartentypen mit Profilabständen von zwei Metern gegenüber. Die linke Abbildung zeigt eine Profilrasterkarte mit diskreter Temperaturfarbreihe entlang ihrer Profile, die mittlere und rechte Abbildung eine Profilreliefkarte mit halbtransparenter Reliefüberlagerung in identischer diskreter Farbreihe zu den Profilen bzw. einem kontinuierlichen Farbverlauf. Durch die Verbindung der opaken Profile mit dem halbtransparenten Relief wird versucht, den durch die Transparenz einhergehenden Verlust der Tiefenwirkung entgegenzuwirken.

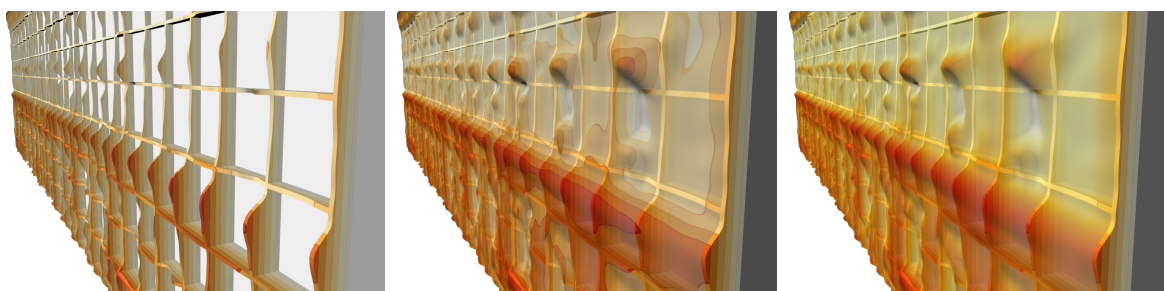


Abb. 114: Profilrasterkarte [links], Profilreliefkarte mit halbtransparentem Relief in diskreter [mitte] und kontinuierlicher Farbgebung [rechts]

## 8.2.4 Kartographische Ausgestaltung

Nach der Erstellung der ebenen und körperhaften 3D-Ausgangsmodelle (Basismodelle) erfolgte die kartographische Ausgestaltung mit volumenhaften Signaturen. Bei der Wahl ihrer Form, Größe und Signaturverteilung variiert diese zwischen den einzelnen Kartenentwürfen. So erlauben ebene, kartenverwandte Darstellungen eine Signaturierung durch Ebenenbildung (Layer) im klassischen Sinne oder durch unterschiedliche Höhen der Signaturkörper

vergleichbar einer Schichtenbildung. Für die körperhaften kartenverwandten Darstellungen müssen dagegen für die Signaturen entweder Freiräume geschaffen, Opakwerte der Ausgangskarte(-modell) verändert oder Signaturen von der eigentlichen Bezugsebene versetzt werden.

Im Bereich der Farbwahrnehmung bleibt bei Variation des Betrachtungswinkels durch die gleichmäßige Helligkeitsveränderung der lineare Farbabstand in einer zusammenhängenden Darstellung mit zugewiesener Farbhelligkeitsreihe gewahrt. Erst durch einen zu flachen Betrachtungswinkel, was zu einem geringen Intensitätswert an der Oberfläche und zu einem erhöhten Schwarzwert in den Farbtönen führt, geht die Möglichkeit der Farbdifferenzierung verloren.

Ein weiterer Effekt entsteht beim Schattenwurf körperhafter Ausgangsmodelle an der Gebäudefassade bzw. durch körperhafte Symbole in Fassadennähe. Dies ruft eine zusätzliche Verschattung an den Nachbarobjekten mit einer Farbänderung hervor. Ihr Einfluss kann aber dann vernachlässigt werden, wenn sich dieser nur auf kleine lokale Bereiche erstreckt und die Farbgebung in der Fläche sowie das Objekt in seiner Formkonstanz erhalten bleibt (s. Abb. 54). Der Mehrwert des Schattenbildes liegt hierbei klar in der Bestimmung der Objekthöhenlage und steht somit im Vordergrund (s. Kap. 2.4.1).

Für die Ausgestaltung mit Kartenzeichen im 3D-Raum bedarf es der Festlegung von Minimaldimensionen und der damit verbundenen maximalen Betrachtungsdistanz sowie der Ausführung ihrer Form. Diese verändert aufgrund unterschiedlicher Betrachtungsrichtungen ihre Sicht- und Differenzierbarkeit.

Nicht nur die Betrachtung der Kartenzeichen sondern auch die Wahl des entsprechenden Kartentyps für die eingangs definierten Kartennutzer ist Beachtung zu schenken, um thermale Informationen anschaulich zu vermitteln und Gestaltungsmöglichkeiten abzuschätzen. So benötigt der Experte, wie auch der Fachmann, für seinen Erwartungshorizont detaillierte und ausführliche Informationen über den thermalen Fassadenzustand. Deren Verwirklichung voraussichtlich nur durch ebene oder reduzierte körperhafte Kartentypen mit entsprechend hoher Symboldichte bewerkstelligen ließe. Kartentypen mit hoher körperhafter Ausgangsdichte in der Temperaturdarstellung schränken dagegen die Freiräume für die ausstehende Symbolisierung nach entsprechenden Nutzergruppen zu sehr ein. Dabei könnten gerade diese mit ihren plastischen Eigenschaften für Laien von größerem Interesse sein, da deren Vorteil in der höheren Anschaulichkeit und im einfacheren Verständnis liegt. Das heißt, dass sich der Laie mehr für einzelne explizite Informationen, als für den gesamten thermalen Zusammenhang, interessiert. Für die Kartengestaltung spiegelt sich dies in der Möglichkeit einer reduzierten Darstellung von Thermalstrukturen und somit einer geringen Symboldichte im 3D-Ausgangsmodell wider. Wie sich das Verständnis auf die *Sekundärmodelle* der vorgestellten Kartenentwürfe bei den unterschiedlichen Nutzergruppen auswirkt müssen weitere Studien zeigen.

Der folgende Abschnitt geht auf die Minimaldimension der Kartenzeichen, deren Formgebung für die räumliche Kartengestaltung, ihre Raumrelation und Tiefenangabe wie der Einfluss der Kartentypen auf die Verdeckung von fassadenorientierten Signaturen näher ein und schließt mit der konzeptionellen Betrachtung von unterschiedlichen Raumhelfern für die weitere Ausgestaltung des *Sekundärmodells* in der räumlichen perspektivischen Szene zur Dimensions- und Distanzbestimmung ab.



## Minimaldimensionen

Die aus der planaren Kartenerstellung bekannten Minimaldimensionen für die Signaturierung können durch den Einfluss der räumlichen Perspektive für die dreidimensionalen Kartenterwürfe nicht herangezogen werden. Ihre Kalkulation verlangt die Berücksichtigung weiterer Faktoren wie Objektgröße, Betrachtungsabstand, Kamerakonstante und Objektlage im Sichtfeld. Sie finden sich in den Formel zur Berechnung der Minimaldimension von Terribilini wieder und berechnen die Minimalgröße eines räumlichen Körpers zur Darstellung auf eine planare Abbildungsfläche mit einer prozentualen Sichtbarkeitswahrscheinlichkeit (Terribilini 2001, S. 84ff).

Dabei ergeben sich in dieser Arbeit für die Kalkulation durch den kleinräumigen Stadtbereich weitaus geringe Betrachtungsabstände, wie in den Geländevisualisierungen von Terribilini. So ermöglicht eine Symbolgröße von 20 Zentimetern nach der Formel von Terribilini bei einer 80%igen Sichtbarkeitswahrscheinlichkeit einen maximalen Betrachtungsabstand von 54 Metern (s.Tab. 25). Das erlaubt im städtischen Bereich zum einen die Betrachtung der Fassade mit seinen Signaturen und zum anderen aber auch einen Überblick über die angrenzenden Nachbargebäude im städtischen Verbund.

Mindestgröße für Papier	$S'_{\min}$	[mm]
Entfernung zwischen Projektionsebene und Objekt	$D$	[m]
Kamerakonstante	$c$	[cm]
Sichtbarkeitswahrscheinlichkeit im Bildzentrum	$P_{S,\beta}$	[%]
Winkel zwischen Sehstrahl und Blickrichtung	$\beta$	[°]
Vergrößerungsfaktor	$K$	
Mittlerer Abbildungsmaßstabszahl	$M$	
Mindestgröße im Raum	$S_{\min}$	[m]

$$K = \sqrt{\frac{1}{1 - P_{S,\beta}^2}} \quad M = \frac{S_{\min}}{S'_{\min} K} \quad D = Mc$$

$S'_{\min}$	$S_{\min}$	$c$	$P_{S,\beta}(\beta = 0^\circ)$	$K$	$M$	$D$
0,2 mm	0,2 m	9 cm	80%	~1,7 (1,666)	600	54 m

Tab. 25: Mindestdimension der räumlichen Körper

Die festgelegte Minimaldimension von 0,2 Metern findet sich nicht nur in den Elementen der Kartenzeichen, wie in der Verbindungslinie zwischen der punkthaften versetzten Signatur und der Fassadenebene wieder, sondern auch in der Konturbreite der Isothermendarstellung.

### **Darstellung thermal-räumlicher Gebäudeattribute (3D-Symbole)**

Für die Gestaltung von flächenhaften bzw. volumenhaften Signaturen sind bezüglich ihres Dimensionsunterschiedes bestimmte Aspekte zu beachten. Stehende flächenhafte Signaturen auf einer Grundkarte verlieren in der Draufsicht infolge ihrer nichtvorhandenen Volumenhaftigkeit ihr komplettes Erscheinungsbild. Abhilfe verspricht hierbei die *Billboard*-Technik, die durch Rotation entlang der Flächennormalen der Grundkarte eine kontinuierliche Neuausrichtung der Signaturfläche zur Betrachtungsachse bewirkt und die Sichtbarkeit der Fläche weitgehend gewährleistet. Dabei versagt bei einer Draufsicht wiederum das Verfahren, da eine Rotation nur um die Grundkartennormale erfolgen kann. Eine Kompensation dieses Schwachpunktes kann nur durch eine liegende Stirnfläche auf der Signaturfläche erzielt werden, die das flächenhafte Symbol in seiner Draufsicht wiedergibt (s. Abb. 115). Ihre eigentliche Bedeutung übermittelt die Signatur über die aufgebrachte Textur, deren größter Vorteil in der geringen Knotenanzahl gegenüber volumenhaften Signaturen liegt, was ihren vermehrten Einsatz in der Prozessierung früher echtzeitfähiger virtueller Umgebungen zeigte.

Volumenhafte Signaturen haben dagegen durch ihre Körperhaftigkeit eine geschlossene Oberfläche und stellen ihre Bedeutung über ihre Form dar. Dabei ist auf gute Sichtbarkeit aus unterschiedlichen Blickrichtungen, ihre Flächenverdeckung auf der Aufstandsfläche und auf die Verdeckung des Kartenbildes durch ihre Gestalt zu achten. Vorteilig wirkt sich hierbei die Formerkennung, die Plastizität über die Schattierung und die *Farbkonstanz* aus, nachteilig dagegen die weitaus höhere Knotenanzahl gegenüber der *Billboard*-Technik.

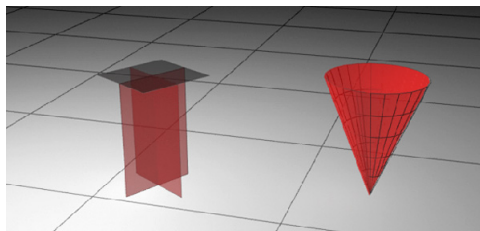


Abb. 115: Billboard [links] und Volumenkörper [rechts]

In der weiteren Arbeit wird ausschließlich auf volumenhafte Signaturen eingegangen da eine Betrachtung bestimmter Formen eine Knotenoptimierung in der Signaturdarstellung erlaubt. Die Verwendung der entwickelten Signaturen aus dem zweidimensionalen Bereich mit ihrer hohen Ikonizität sind für den Einsatzbereich im 3D-Raum nicht geeignet. Grund hierfür liegt in der Orientierungsabhängigkeit zum Betrachter, im Detailreichtum und dem Betrachtungsabstand mit einhergehender Unterschreitung der Minimaldimension. So erfordert der 3D-Raum einfachere geometrische Signaturen mit einem geringeren Detaillierungsgrad und somit einer geringeren Ikonizität.

### **Punkthafte Signaturen**

Bei der Gestaltung von punkthaften Signaturen wurde nicht nur der Fokus auf ihre Einfachheit, sondern auch auf die Symmetrie und Verdeckung gelegt. Ein hoher Grad an Symmetrie gewährleistet aus beliebigen Betrachtungsrichtungen die nötige Differenzierung

zwischen den Signaturen. Beim Kriterium der Verdeckung nimmt durch die Wahl der Signaturform und ihrer Platzierung auf der Karte einen Einfluss auf die spätere Sichtbarkeit. Das Ergebnis der Gestaltung stellen simplifizierte Signaturen geringer Ikonizität dar, die in ihrem Erscheinungsbild, ihrer geometrischen Symmetrie und in ihrer Größe konstant gehalten wurden.

Der von allen Betrachtungsrichtungen aus als eine eindeutige Form wahrgenommen wird und für den Betrachter mindestens eine zugewandte Facette mit der korrekten Ausleuchtung des verwendeten graphischen Attributs aufweist stellen die vollkommenden regelmäßigen Formen der fünf *platonischen Körper*<sup>53</sup> und die Kugel bereit (s. Abb. 116).



Abb. 116: Die fünf Platonischen Körper [links von 1 – 5] und die Kugel [rechts]

Zur Beschreibung der platonischen Oberflächenstruktur ergeben sich, abhängig ihres Typs, eine unterschiedliche Anzahl an Polygonen. So besitzen Körper deren Facetten durch Dreiecksflächen repräsentiert werden eine identische Flächen- und Polygonanzahl (s. Tab. 26).

	<b>Tetraeder</b>	<b>Hexaeder (Würfel)</b>	<b>Oktaeder</b>	<b>Dodekaeder</b>	<b>Ikosaeder</b>
<b>Anzahl der Flächen</b>	4	6	8	12	20
<b>Facetten</b>	Dreieck	Viereck	Dreieck	Fünfeck	Dreieck
<b>Anzahl der Polygone</b>	4	12	8	36	20

Tab. 26: Platonische Körper

Diese sechs Grundkörper dienen somit als Ausgangsformen für die spätere Symbolisierung der Thermalkartenentwürfe. Um ihre Verdeckung auf der Fassadenfläche durch die körperhaften Thermalinformationen zu verhindern, wurde ein Versatz eingeführt. Dabei bildet ein dünner länglicher Zylinder bzw. Quader die fehlende Verbindung zwischen Signatur und Fassadenoberfläche.

Der Einsatz der sechs Volumenkörper für die qualitative Datenrepräsentation ist durch ihre Differenzierbarkeit der *Form* vorab gegeben und kann für ordinale Daten über die Variable *Farbe* weiter untergliedert werden. Die Variable *Muster* unterschreitet dagegen nicht nur die festgelegte Minimaldimension, sondern wird zusätzlich durch die geringe Facettengröße der

<sup>53</sup> *Platonische Körper*: Ihr Name gibt die Anzahl der Einzelflächen an, die notwendig sind, um ihre vollkommenden regelmäßigen Körper zu beschreiben. Ihre Namen sind Tetraeder, Hexaeder, Oktaeder, Dodekaeder und Ikosaeder.

Signaturen eingeschränkt. Eine Differenzierung ist gerade bei größeren Betrachtungsabständen als eher fraglich anzusehen.

Ähnlich verhält es sich mit der Variable *Helligkeit*. Eine Farbhelligkeitsreihe für die Gestaltung ordinaler Daten (z.B. Heizungskörper) ist durch den erwähnten computergraphischen Einfluss nicht zu empfehlen (s. Abb. 118). Das bedeutet für die Wahrung der Differenzierbarkeit nominaler und ordinaler Daten in der Szene kann dies nur durch die Wahl klar voneinander getrennter Farbtöne erfolgen.

Der Informationstransport über die Variable *Größe* unterliegt den Maßstabseinflüssen der perspektivischen Projektion. Dabei kann ein in derselben räumlichen Tiefe platzierter Referenzkörper einen Größenvergleich zwischen Signaturen unterschiedlicher Tiefe ermöglichen (s. Abb. 117).

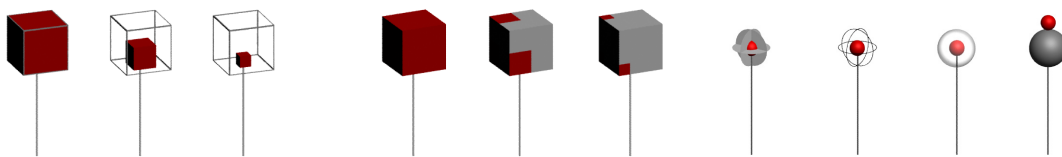


Abb. 117: Referenzkörper (Grau) mit Wertigkeit (Rot)

Eine weitere Möglichkeit der Differenzierung bzw. Unterbringung mehrerer numerischer Informationen oder nominaler Klassen bestünde in der Aufreihung entlang einer Achse mit entsprechender Dechiffrierung über die Legende. Shepard stellte dies anhand von „divided symbol stacks“ für punktbasierte kommerzielle Merkmale in seiner Darstellung über *Nord London* mittels gestapelter Zylindersymbole in unterschiedlichen Durchmessern dar (Shepherd 2008, S. 207). Abb. 118 präzisiert ihre adaptierte Abwandlung mit *platonischen Körpern*, Kugeln und kombinierten Referenzkörpern durch zwei Bildbeispiele.

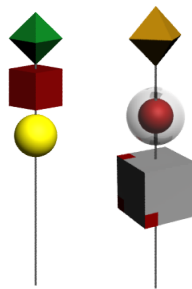


Abb. 118: Staffelung nominaler [links] und nominalen mit ratioskalierten Symbolen [rechts]

Eine Alternative zu vollsymmetrischen Symbolen sind *Formen* mit weitgehend symmetrischen Eigenschaften. Diese könnten beispielsweise durch die *Formen* eines Zylinders oder eines Kegels erreicht werden. Dabei kommt es bei zylindrischen Symbolen zu Verdeckungen auf der Fassadenebene im Aufstandsbereich. Der Kegel hingegen läuft durch seine konvergierende Form im Aufstandsbereich spitz zu, was sich für eine unmittelbare Platzierung bei minimaler Verdeckung besser eignet. Darüber hinaus erfolgt durch die Kegelspitze die genaue Lokalisierung des Austrittsortes auf der Fassade und symbolisiert durch seine sich öffnende Kegelform zusätzlich für nominale bzw. ordinale thermale Informationen ein zu allen Seiten gleichmäßig ausbreitendes thermale Verhalten. Beim Einbringen von ratioskalierten Daten kann das Ablesen der Wertigkeit durch Farbstufen bzw. durch Größenvergleich zwischen den Wert- und Referenzkegel aus allen Lagen bestimmt

werden. Ein zusätzlich angebrachter äußerer Farbring ermöglicht zusätzlich für die Gestaltung eine weitere Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Thermaltypen. Dabei ist der Vorteil des Kegels infolge seiner kontinuierlich gekrümmten Form im Erhalt der ursprünglichen Farbgebung während eines Standortwechsels des Betrachters. Folgende Abbildungen zeigen Kombinationen in der farblichen Gestaltung der Wertstufen, der Referenzkegel und eines Klassifizierungsbands/-rings (Blau und Rot) am Ende der Kegelform jeweils in den ersten Beispielen einer jeden Zeile (s. Abb. 119).

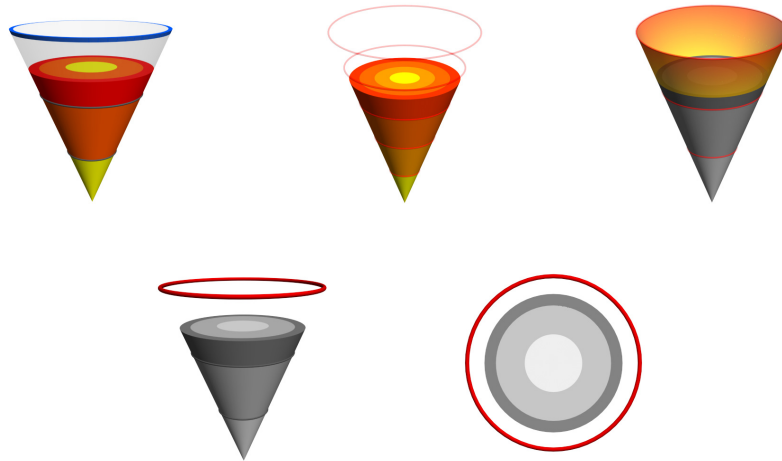


Abb. 119: Punktbasierte 3D-Symbole mit Referenzring und unterschiedlicher Abstufung

### Linienhafte Signaturen

Auf der zweidimensionalen Zeichenebene stellen die Gestaltungsmöglichkeiten für Linearsignaturen die Linienbreite, -form, -anzahl, -richtung der Linienelemente sowie ihre Farb- und Helligkeitsgebung dar (Koch 2002b, S. 116). Der Detailreichtum, wie sie in symbolischen und ikonischen Punktsignaturen zu finden ist, ist dabei nur eingeschränkt möglich. Mit der Überführung in den dreidimensionalen Konstruktionsraum können diese klassischen Gestaltungsmöglichkeiten mit den computergraphischen Gestaltungsvariablen variiert werden.

Um eine Darstellung in der Bildsynthese zu gewährleisten bedarf es der Ausführung als Oberflächenkörper. Hierbei können geschlossene komplexe planare Formen durch Triangulation der Konturlinien zu einer Fläche oder durch Umformung zu einem Körper überführt werden. Die Bildung eines Körpers kann dabei durch Extrusion der Konturlinien zu einem Oberflächenmodell (s. Abb. 120) oder durch Kombination von linienhaften Grundkörpern wie Quader, Prisma oder Zylinder erfolgen (CSG).



Abb. 120: Kaltfrontsymbol als 2D-Signatur und als extrudierter 3D-Körper [von links nach rechts]

Die Darstellung einer einfachen Linie als räumlicher Körper bieten im 3D-Raum weitaus größere Gestaltungsmöglichkeiten als im 2D-Raum. So entstehen durch die veränderte Seitenanzahl eines Zylinders neue Profilformen (z. B. Prisma, Quadrat, Pentagon), die in der

facettierten Darstellung (*Flat-shading*<sup>54</sup>) oder durch *NPR*-Verfahren ihre Kanten zum Vorschein treten lassen. Über die sichtbaren Helligkeitsunterschiede ihrer Segmente ist ihre Kantenzahl bzw. ihre Segmentbreite bei geringer Seitenanzahl deutlich zu erkennen, was wiederum eine Zuweisung ordinaler Werte ermöglicht (s. Abb. 121). Ihre Variationsvielfalt schränkt sich aber infolge der definierten Minimaldimension der linearen Signaturbreite von vornherein auf Grundformen mit geringer Seitenanzahl ein. Inwieweit sich die Kantenzahl als Gestaltungsmittel für lineare Signaturen nutzen lässt müssen zukünftige Evaluierungen zeigen und sind daher nicht Gegenstand dieser Arbeit.

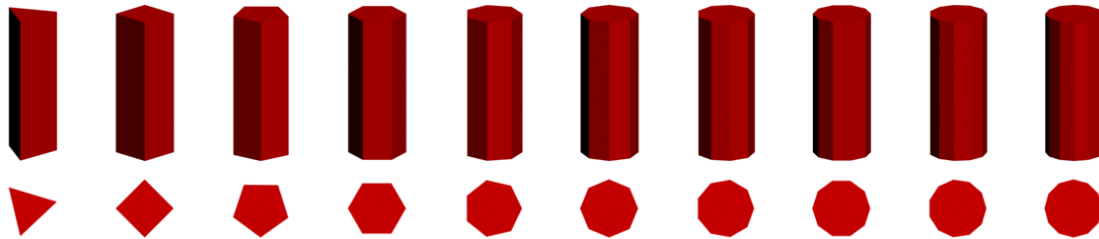


Abb. 121: 3- bis 12-seitige Liniensignaturen

Fließen körperhafte Oberflächen (*DFM*, *Quadderraster*, etc.) in das Kartenbild mit ein, ist eine räumliche Liniensignatur nur noch schwer zu arrangieren. Dies liegt in der Informationsdichte der statistischen Darstellung begründet, die wenig bis keinen Raum für zusätzliche Informationen anbietet. Abhilfe verspricht hierbei die Reduzierung der statistischen Informationsdichte auf der Bezugsfläche oder der Einsatz der graphischen Variable *Transparenz*. Die *Transparenz* reduziert hierbei den Oberflächenkörper in seinem Opakwert und lässt verdeckte Geometriestrukturen und tieferliegende Signaturen in Erscheinung treten. Dies führt gerade beim Einsatz von Quadern bzw. polygonalen extrudierten Gebietsgrenzen (z.B. Schichtstufen) zu einer hohen Anzahl sichtbarer parallel verlaufenden Linienscharungen (s. Abb. 122).

Durch die *Transparenz* hervorgerufene geringe Farb- und Formkonstanz wird eine reduzierte Prägnanz beim Betrachter hervorgerufen, was sich in einer verminderten monokularen Tiefenwirkung widerspiegelt. Darüber hinaus geht nicht nur die farbliche Temperaturdarstellung fast vollständig verloren, sondern beeinflusst mitunter die freigelegten Signaturen durch eine additive Farbmischung in ihren Farbwerten. So ist der Einsatz der *Transparenz* auf Kartentypen mit hoher körperhafter Informationsdichte eher kritisch einzustufen, was in Abb. 122 anhand einer *Quadderrasterkarte* verdeutlicht wird.

<sup>54</sup> Die Schattierungsverfahren *Blinn* und *Phong* können bei dieser Darstellung nicht genutzt werden, da sie die sichtbaren Kantenübergänge auf dem Zylinder retuschieren.

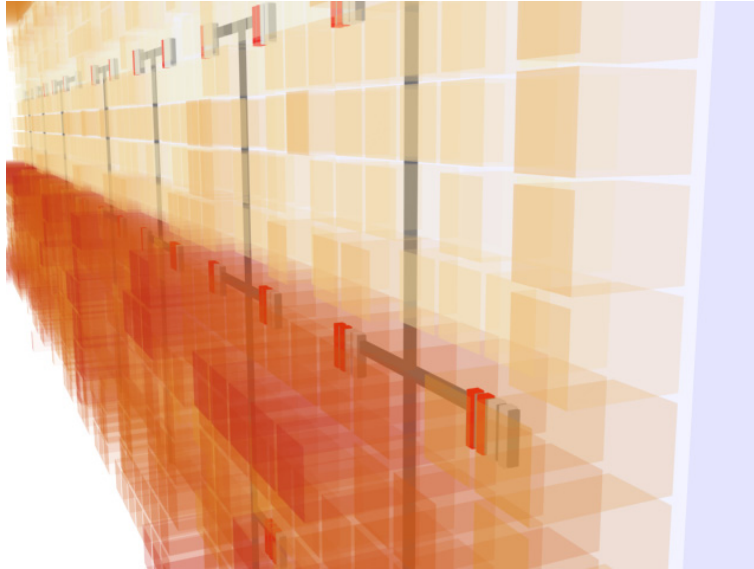


Abb. 122: Halbtransparente Quaderrasterkarte mit tiefer liegenden Linearsignaturen

### Flächenhafte Signaturen

Flächenhafte Signaturen können in der 3D-Computergraphik sehr unterschiedlich umgesetzt werden. So können Flächen mit einer Vollfarbe, einer Textur oder durch eine Ansammlung von Körpern, die eine Musterung erzeugen, versehen werden. Das kartographische Flächenmuster lässt sich folglich durch eine Bitmaptextur oder durch eine Gruppe identischer Einzelkörper in der Anordnung einer gerichteten oder ungerichteten symmetrischen Grundstruktur gestalten. Dabei beeinflusst die Anordnung des graphischen Grundelementes den Tonwert, die Rasterweiten und den Feinheitsgrad. Ihre Abhängigkeit zum perspektivischen Raum wurde im Abschnitt Signaturdetails behandelt und findet sich im Kapitel 5.2.1 wieder. Bei der Verwendung von Texturen ist die Wahl des Mappingtyps für die verzerrungsfreie Darstellung der Signatur auf der Oberfläche entscheidend (s. Kap. 3.3 – Mapping-Techniken). Für beide Verfahren bedeutet dies eine Ausgestaltung entweder auf der Fassadenoberfläche oder auf der Oberfläche des entsprechenden Kartentyps.

Eine Symbolisierung über Bitmaptexturen erleichtert zwar die Platzierung auf gekrümmte Oberflächen, verhindert aber eine Verzerrung in der Textur nur, wenn bei der Erstellung dieser Flächen Mapping-Koordinaten generiert wurden.

Wird dagegen die Signatur als Körper ausgezogen, muss diese der Oberfläche folgen. Das bedeutet, dass bei Kombination mit einer gekrümmten Oberfläche die Signatur in ihrer Knotenanzahl und folglich in ihrer Höhe entsprechend der Oberfläche angepasst werden muss. Das garantiert einen fehlerfreien Verschnitt mit der Oberfläche und lässt die Signaturhöhe parallel zur Oberfläche verlaufen. Kommt noch eine Stufung wie in der Schichtstufenkarte hinzu, wird die Signatur im ungünstigsten Fall auf mehrere Ebenen „zerrissen“. Folglich muss bei gestuften statistischen Oberflächen durch die Verfahren der Texturierung und der Mustergestaltung über Einzelkörper gerade in den senkrechten Flankenbereichen mit starken Signaturverzerrungen gerechnet werden.

Eine weitere grundlegende Einschränkung der Signaturierung für bei Verfahren besteht bei Kartentypen mit schlanker Silhouette. So bieten Isothermen- oder Profilrasterkarten

infolge ihrer Gestalt nur wenig Platz für den Einsatz von gemusterten Flächensignaturen im Stirnflächenbereich an.

### Räumliche Relationen

Für die räumliche Verbindung zwischen Thermalinformationen und real sichtbaren Fassadenelementen diente die Umrisslinie der Fenster als entsprechendes Bindeglied. In den ebenen Ausgangskarten kamen abstrahierte flächenhafte Fenstersignaturen, bei den volumenhaften Ausgangsmodellen körperhafte Fenstersignaturen zum Einsatz. Deren Schnittlinie zwischen Fenstersignatur und Oberfläche die räumliche Lage der Fenstersignatur erkennen lassen (s. Abb. 123). Um die Fenstersignatur in ihrer Prägnanz weitgehend zu erhalten, bedurfte es entsprechend der statistischen Oberfläche der Anpassung in der Höhe. Dabei kommt es durch das volumenhafte Erscheinen und ihrer großen Signaturanzahl zu großen Verdeckungen thermographisch interessanter Strukturen, welche durch die graphische Variable *Transparenz* mit einem 80%igen Transparenzwert wieder zum Vorschein gebracht wurde. Durch den hohen Transparenzwert entspricht der Fensterkörper einem noch sichtbaren Erscheinungsbild bei minimaler Verdeckung mit der Folge des einhergehenden Verlustes an Formkonstanz und einer reduzierten hervorrufenden monokularen Tiefenwirkung. Um dem entgegen zu wirken, wurden die Außenkanten als schwarze dünne Konturlinie ausgestaltet mit dem Resultat einer wieder wahrnehmbaren Form der Fenstersignatur. Ihre Gestaltung gewährleistet so eine Form- und Größenkonstanz innerhalb einer perspektivischen Ansicht. Dabei wurde in manchen Entwürfen auf die Stirnfläche der Fenstersignaturen zur Reduzierung der Verdeckung und der farblichen Verfälschung in den Überlappungsbereichen, verzichtet (s. Abb. 123 – rechts).

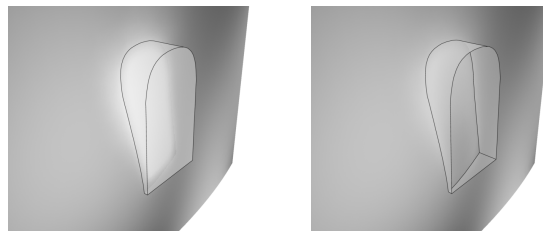


Abb. 123: Fenstersignatur als Bindeglied zwischen sichtbaren und nicht sichtbaren Informationen

### Tiefeninformationen

Erkennbare thermale Strukturen treten zum Teil in unterschiedlichen Tiefen der Fassade auf. Ihre Tiefenbestimmung kann dabei anhand ihres Vorkommens und ihrer Art näherungsweise korrekt bestimmt und zugeordnet werden. So bietet sich ihre Visualisierung gerade im virtuellen Raum mit seiner dritten Dimension an. Wird die Tiefeninformation logisch richtig in ihre Lage dargestellt, müssten die Platzierung der Signaturen unterhalb der Fassadenfläche erfolgen. Aufgrund der verdeckenden Karteninformationen auf der Oberfläche ist dies nicht möglich und könnte nur über den Transparenzwert oder durch den Verzicht von vollflächigen Kartensignaturen reguliert werden. Shepherd verdeutlicht dies anhand einer halbtransparenten Referenzfläche, wobei die *Farbsättigung* und der Farbgradient gedämpft wird und der Tiefeindruck deutlich unterhalb der Referenzfläche verloren geht (Shepherd 2008, S. 206ff).

Statt einer halbtransparenten Referenzfläche nach Shepherd könnte die opake Fassadenebene des Ausgangsmodells als Referenzfläche dienen, die durch einen der flächenhaften



Kartentypen (z.B. DFM, Profilreliefkarte) halbtransparent überlagert wird. Dabei bleibt ihre Signaturierung bei geringen geometrischen Schwankungen innerhalb homogener Flächen weitgehend sichtbar. Wohingegen bei unruhigen Oberflächen bzw. hoher Struktur- und Formdichte (z.B. Quaderrasterkarte) es zu einer halbtransparenten Mehrfachverdeckung kommt. Eine Erhöhung des Transparenzwerts nimmt die Struktur des überlagernden Kartentyps für die darunterliegenden Signaturen stärker zurück, verliert aber durch diese Maßnahme seine Plastizität und Tiefenwirkung (s. Abb. 122). Dagegen mildert ein geringerer Transparenzwert den Plastizitätsverlust, überlagert aber durch seine Intransparenz die Signatur stärker. In beiden Fällen ist der Einsatz der Signaturierung unterhalb von halbtransparenten Oberflächen als kritisch einzustufen.

Eine Alternative bietet sich für punktbasierte thermale Informationen in der Darstellung der Tiefeninformation oberhalb der statistischen Fläche an. Durch den Versatz der Signatur und ihrer Verbindung zur Fassadenoberfläche ergibt sich die Möglichkeit, Tiefeninformation entlang der Achse zu platzieren. Abb. 124 zeigt zwei Variationen der Tiefenangabe mit integrierten dreiteiligem Tiefensegment in der Verbindung mit einer Referenzfläche am Ende (links) und einem abgesetzten dreiteiligem Tiefensegment ohne Referenzfläche (rechts).

Im linken Beispiel dient das kleinere der beiden Ebenen<sup>55</sup> als symbolische Bezugsfläche und setzt die drei Tiefenstufen richtungslogisch fort. Die zweite Ebene liefert die dazugehörige Tiefenangabe des thermalen Merkmals (s. Abb. 124 – links). Das zweite Beispiel grenzt das Tiefensegment als selbstständige Form ab und verzichtet auf die Referenzfläche (s. Abb. 124 – rechts). Die Gestaltung des Tiefensegments in Grautönen belastet das farbliche Gesamtbild der Kartenentwürfe nicht weiter, bedarf jedoch einer Beschreibung über dessen Bedeutung, ob graphisch oder textbasiert, in einer Legende (s. Abb. 124 – rechts).

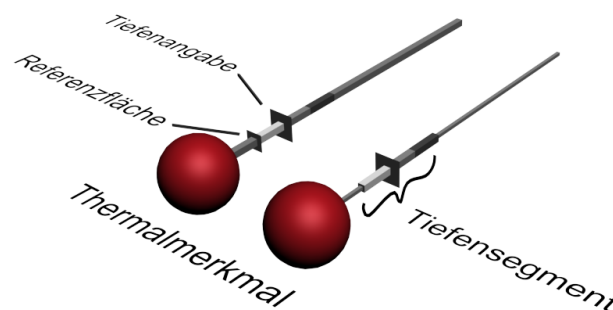


Abb. 124: Punktsignatur mit Verbindung und angebrachter Tiefenangabe

In Abb. 125 verdeutlichen zwei Visualisierungsbeispiele die Anwendung unterschiedlicher Punktsignaturen mit ihren Tiefenangaben über einem DFM und über einer Profilreliefkarte. Darüber hinaus zeigen sie nicht nur den Lagebezug der Signaturen durch ihre Verbindungen zum Kartentyp bzw. zur Fassade, sondern auch die Relation zwischen nicht sichtbaren und sichtbaren Informationen über die offenen Fenstersignaturen an.

<sup>55</sup> Die Ebenen entsprechen Quadern mit quadratischer Grundfläche und geringer Höhe.

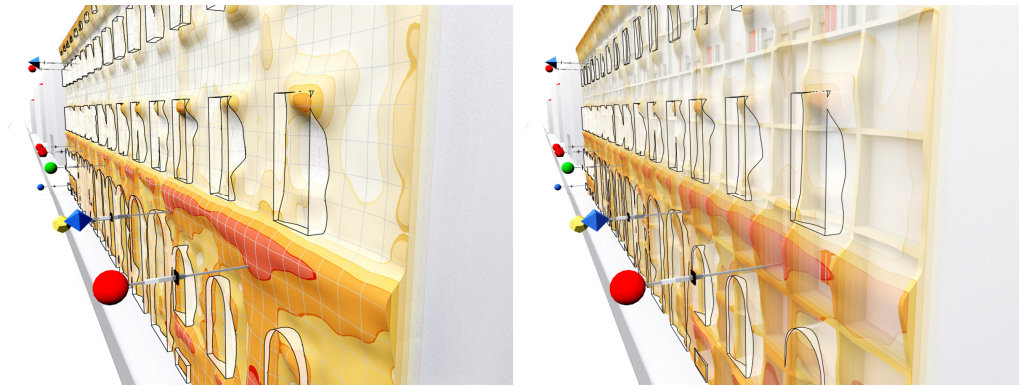


Abb. 125: Punktsignatur mit Tiefenangabe über einem DFM [links] und über einer Profilreliefkarte [rechts]

### Verdeckung durch den Kartentyp

Die vorgestellten Kartenentwürfe weisen untereinander einen deutlichen Unterschied in ihrer Gestaltung und Verdeckung auf. Durch ihren benötigten Raumbedarf zur Repräsentation ihrer Form beeinflussen sie die Platzierung linearer und flächenhafter Signaturen unmittelbar auf der Fassadenoberfläche. Abb. 126 verdeutlicht alle entworfenen räumlichen Kartentypen abhängig von ihrem Verdeckungsgrad in aufsteigender Reihenfolge. Wobei ihre Einstufung nicht nur vom Typ, sondern auch von der Höhe der dargestellten Thermalwerte abhängt. So würde bei diskreten Darstellungen, wie beispielsweise in Isothermen- oder Quaderrasterkarten, die Verdeckung im stetigen Werteverlauf weitaus höher ausfallen als im progressiven Verlauf. Im Folgendem wird auf die acht entworfenen Kartentypen mit ihren Verdeckungseigenschaften eingegangen, deren festgelegte Rangfolge eine Einschätzung aufgrund der Datengrundlage darstellt und nicht evaluiert worden ist.

Der ebene Kartentyp weist als einziger keine Verdeckung durch seine Basiskarte auf. Bei den körperhaften Kartentypen, der Isothermenkarte und Profilrasterkarte, verhindert der progressive Werteverlauf bzw. die Rasterweite der Profilrasterkarte von zwei Metern einen höheren Verdeckungsgrad. Die Quaderrasterkarte mit ihrer progressiven Wertevermittlung über die Breite kann deutlich mehr Raum für die fassadenorientierten Signaturen zur Verfügung stellen als bei der Wertevermittlung über die Höhe. So schränkt dieser durch seine Strukturdicke die Symbolisierung deutlich stärker ein und kann nur durch weite Abstände (Ausdünnungen) sinnvoll genutzt werden. Beim DFM, der Profilreliefkarte und der Schichtstufenkarte ist der Verdeckungsgrad infolge der geschlossenen Oberflächen weiteraus höher, die zum Teil nur durch die Variable *Transparenz* kompensiert werden kann. Eine halbtransparente Darstellung verbessert die Sichtbarkeit deutlich, beeinflusst aber Signaturfarbe und Tiefenwirkung der eigenen Form nachteilig. Dabei kann der reduzierten Plastizität des halbtransparenten Kontinuums eines DFM's wiederum durch überlagerte feine Gitterstrukturen oder durch hinterlegte Profile entgegen gewirkt werden, deren Grenzen aber der entsprechende Kartentyp aufzeigt. Das heißt, bei bestehender diskreter Form (z.B. Schichtstufenkarte) oder bei einer Strukturform konform zur Gitterstruktur (z.B. Quaderrasterkarte) kommt es zu unüberschaubaren parallelverlaufenden Linienscharungen der sichtbaren halbtransparenten Flankenanten.

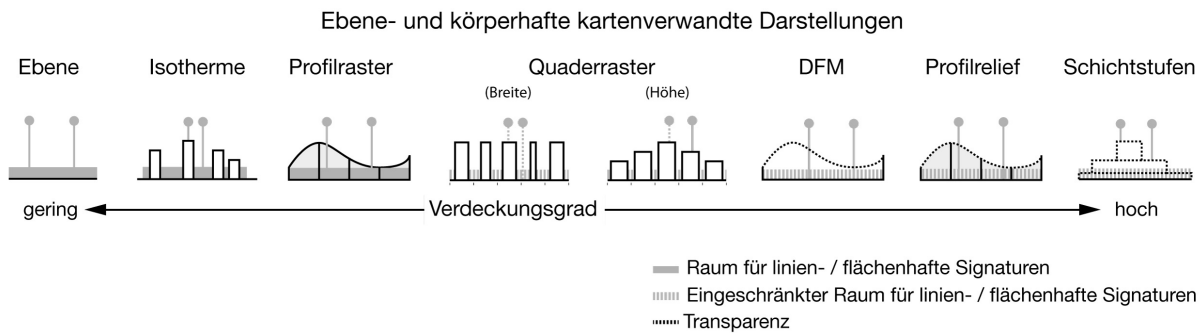


Abb. 126: Verdeckungsgrad abhängig des Kartentyps [s. Anhang]

Abb. 127 zeigt die graphische Umsetzung der vorgestellten Kartentypen nach ihrem Verdeckungsgrad in aufsteigender Reihenfolge, deren Rangfolge nicht nur vom Kartentyp, sondern auch vom gewählten Erhebungsverlauf (stetig/progressiv) beeinflusst wird.

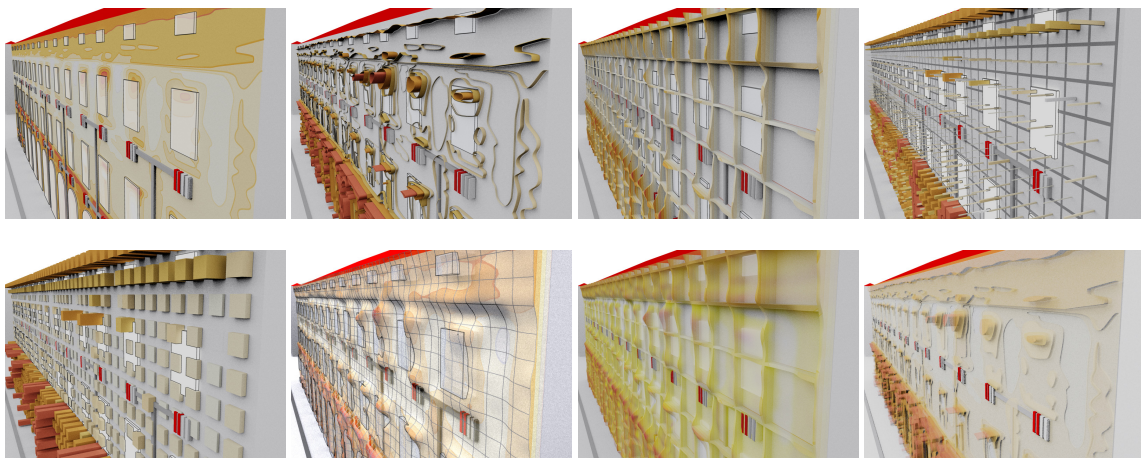


Abb. 127: Anstieg der körperhaften Dichte der unterschiedlichen Ausgangsmodelle [von oben links nach unten rechts]

Tab. 27 gruppiert die Kartenentwürfe nach ihren Darstellungsformen, ihren Kartentypen, ihren Verdeckungen zur Fassadenfläche und ihren Einschränkungen in der körperhaften Symbolisierung auf der Fassadenoberfläche.

Darstellung	Temperatur Grundkarte	Verdeckung der Fassadenfläche	Einschränkung in der Symbolisierung
<b>Ebene kartenverwandte Darstellung</b>			
<b>diskret (Vektor)</b>	<b>Isolinien</b>	gering	keine
	<b>Schichtstufen</b>	komplett	keine
<b>kontinuierlich (Raster)</b>	<b>Thermaltextur</b>	komplett	keine
<b>Körperhafte kartenverwandte Darstellung</b>			
<b>diskret</b>	<b>Isolinien</b>	gering	gering

<b>(Vektor)</b>	<b>Profilraster</b>	gering	gering
	<b>Quader (Höhe)</b>	komplett (ohne Quaderabstand)  hoch (mit Quaderabstand)	gering bis sehr hoch
	<b>Quader (Breite)</b>	gering bis hoch	
	<b>Schichtstufen</b>	komplett	sehr hoch
<b>kontinuierlich (Vektor)</b>	<b>Digitales Fassaden Modell (DFM)</b>	komplett	gering (mit Transparenz)  sehr hoch (ohne Transparenz)
	<b>Profilrelief</b>	komplett	

Tab. 27: Kartenverwandte Darstellungen mit ihrer Möglichkeit zur Symbolisierung

### Visuelle 3D-Raumhelfer

Das Kapitel der kartographischen Ausgestaltung behandelt die vorgestellten *Sekundärmodelle* in einer räumlich perspektivischen und virtuellen 3D-Umgebung. Ihre räumliche Ausgestaltung durch Kartenzusätze wie Maßstabsbalken, Koordinatenangaben oder Lagebeschreibungen, bekannt aus planaren Karten, kann sich auch im virtuellen Umfeld als sinnvoll erweisen. So fällt es in einer digitalen und virtuellen stark abstrahierten Umgebung mitunter schwer, die absolute räumliche Tiefe von Objekten, ihre räumliche Abmessungen oder die *exozentrische Entfernung* zwischen Objekten zu bestimmen (s. Kap. 2.1 – Tiefenwahrnehmung). Grund hierfür ist die menschliche Wahrnehmung, die in solch einer Umgebung nur über den visuellen Reiz, die eigene Position und Orientierung im Raum sowie ihre räumliche Entfernung zu Objekten zu bestimmen versucht. Wird der Betrachter in eine solche 3D-Szene hineinversetzt, d. h. er vollzieht einen Ortswechsel von seiner realen in die virtuelle Welt, so stellt sich für ihn die zentrale Frage: „Wo bin ich?“.

Für die Bestimmung der eigenen Lage filtert er nur die visuellen Informationen heraus, die er zur Orientierung braucht. Dies können bekannte Objektstrukturen oder -anordnungen (Gebäude, Vegetation) bzw. zusätzlich platzierte künstliche Formen (Nordpfeil, Gitter) und Angaben (Ortsbeschriftung, Koordinaten) sein. Ist der eigene Standort bestimmt, beginnt die Erkundung des eigentlichen Raums mit seinen Ausdehnungen. Das fällt umso schwerer, je weniger Reize für die Verarbeitung von Distanzen, Dimensionen (Größe) oder Lagerrelationen innerhalb der virtuellen Szene zur Verfügung stehen. Deren Abschätzung zusätzlich durch die Zentralprojektion verursachten Einflüsse, der fehlenden Maßstabs- und Formkonstanz zusätzlich für Unsicherheit sorgen. Eine häufig genutzte Information zur Abschätzung der absoluten Objektgröße und der Distanz ist die oftmals vorhandene Textur oder einzelne positionierte Stellvertreterobjekte bekannter Größe (s. Abb. 11 – Silhouette einer Personen), deren wiedererkennbare Form den Größenvergleich zwischen bekannten und unbekanntem Objekten erleichtern. Die durch diese Elemente ermöglichte *absolute* und *relative Distanzschätzung* resultiert aus den Erfahrungen des Betrachters, deren Resultate letztendlich in ihrer

Abschätzung variieren können. Um dies zu umgehen, wurden drei numerisch orientierte Raumhilfen für stark abstrahierte virtuelle Umgebungen entworfen, deren Funktion in der Ermittlung der *egozentrischen Entfernung*, der Ausdehnung der Gebäudedimensionen und der Distanz- bzw. Lagebestimmung innerhalb der Fassadenkarte liegt. Diese sind:

- Der *Distanzfächer*, der es ermöglicht, die virtuelle Raumstrecke und Richtung aus der Blickrichtung zwischen Kamerastandort und *Sujet* zu bestimmen.
- Der *Fassadenmaßstabsbalken* entlang der Gebäudekante ist ein perspektivisch graphischer Maßstabsbalken, angenähert an eine klassische graphische Maßstabsgestaltung aus der konventionellen Kartographie. Mit ihr sollen ebene Fassadenkartentwürfe ergänzt werden.
- Das *perspektivische Kantengitter* entlang der Fassadenaußenkanten, es ist bekannt aus räumlichen analytischen Darstellungen. Für die Lagebestimmung von Signaturen innerhalb des Kartentwurfs.

Der Distanzfächer breitet sich vom Kameraursprung entlang der Sichtachse als farblich gestufter Kreissektor aus. Dieser ist entlang der Sichtachse zu beiden Seiten symmetrisch durch konzentrisch gleichabständige Kreisbögen mit farblichen Kreissektoren in konstanter Kreisbogenlänge aufgebaut. Für den Aufbau der einzelnen Kreissektoren zu einem Distanzfächer reduziert sich durch den mathematischen Zusammenhang der Öffnungswinkel  $\alpha$  in Abhängigkeit zum wachsenden Kreisradius  $r$ . Das garantiert einerseits eine feste Bogenlänge  $L$  und wahrt andererseits ein stetig wachsendes Teilungsverhältnis für jede Fächerhälfte (s. Abb. 128).

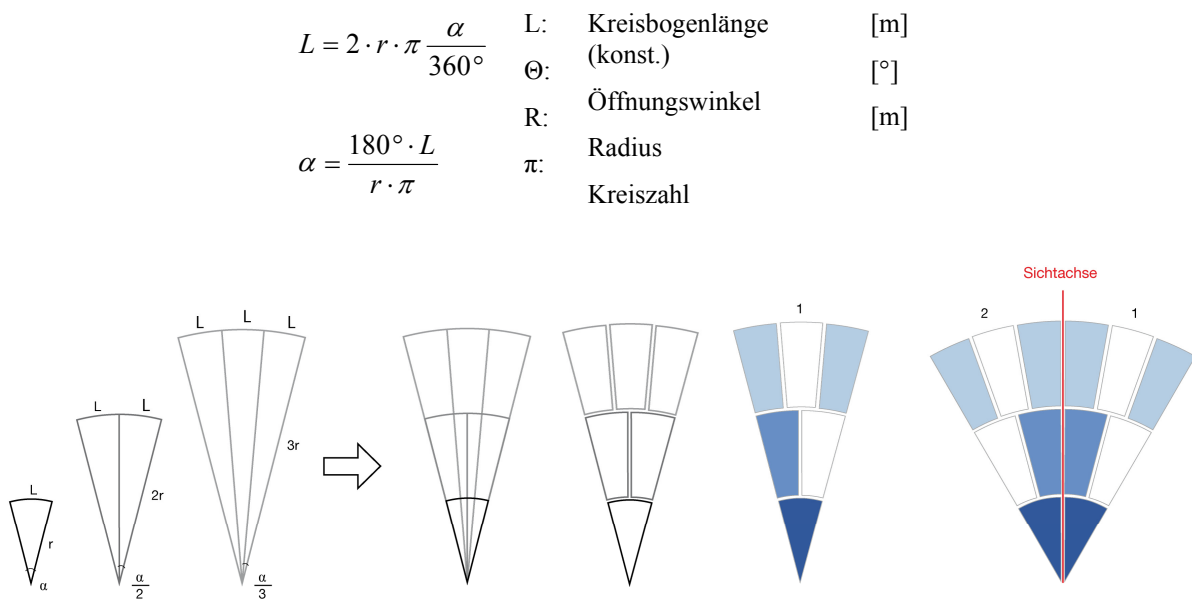


Abb. 128: Aufbau des symmetrischen Distanzfächers

Zur klaren Trennung der Sektorenstücke erhält jedes Kreissegment im Wechsel eine Vollfarbe, die sich entlang der Sichtachse wie die Farbverschiebung des statisch monokularen Tiefenkriteriums der Luftperspektive verhält (Graf 1995). Eine ergänzende Nummerierung soll sowohl entlang der Sichtachse als auch an den Kreisbögen die Abschätzung von der Distanz zu den Gebäuden und den Abständen zur Sichtachse erleichtern. Das Sichtfeld der Kamera (Betrachter) bildet mit dem Distanzfächer eine feste Einheit. Dabei fällt der

Betrachtungswinkel zum Distanzfächer sehr flach aus, was zur Folge hat, dass der reflektierende Farblichtanteil sehr gering ausfällt (s.Kap. Helligkeitsänderung, S. 89). Um dies zu umgehen, wurden die Fächerfarben als aktiv strahlende Farben ausgelegt. So stellt der Distanzfächer ein Hilfsmittel zur Einschätzung der räumlichen Distanz zu einem Gebäude, dessen Ausdehnung und seiner *exozentrischen Entfernung* zu benachbarten Gebäuden bereit (s.Abb. 129).

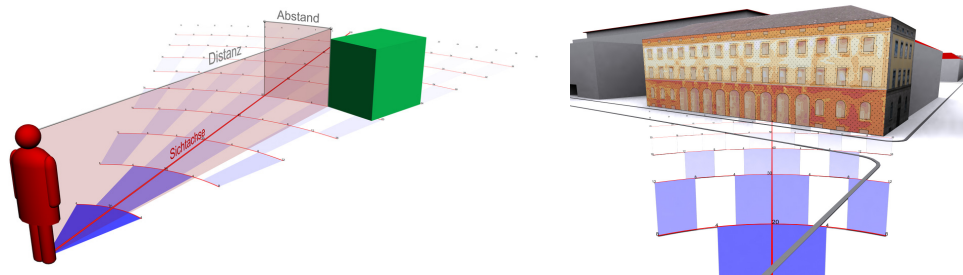


Abb. 129: Distanzfächer – Prinzip [links] und aus Kameraperspektive [rechts]

Beim Fassadenmaßstabsbalken handelt es sich um einen perspektivischen Maßstabsbalken, dessen Verlauf sich entlang der Gebäudekanten ausrichtet. Dadurch passt sich bei einem Wechsel der Betrachtungslage nicht nur das Gebäude, sondern auch der Maßstabsbalken den perspektivischen Verzerrungen an und ersetzt den für den perspektivischen Raum unbrauchbaren klassischen Maßstabsbalken aus der Kartenlegende. Um die Lesbarkeit aus beliebigen Betrachtungsrichtungen zu gewährleisten, baut sich jeweils ein Maßstabsbalken entlang der Kante in stehender und liegender Form auf. Zusätzlich erscheint bei jedem zehnten Maßstabssegment die doppelte Segmentgröße und eine vergrößerte Nummerierung. So ermöglicht der Fassadenmaßstabsbalken die Ermittlung von Gebäudedimensionen und Signaturlagen in den Kartenentwürfen. Ihre Verwendung beschränkt sich hierbei auf ebene Fassadenkarten, da es bei körperhaften Kartenentwürfen zur teilweisen bis vollständigen Verdeckung der anliegenden Maßstabsformen kommen kann (s.Abb. 130).

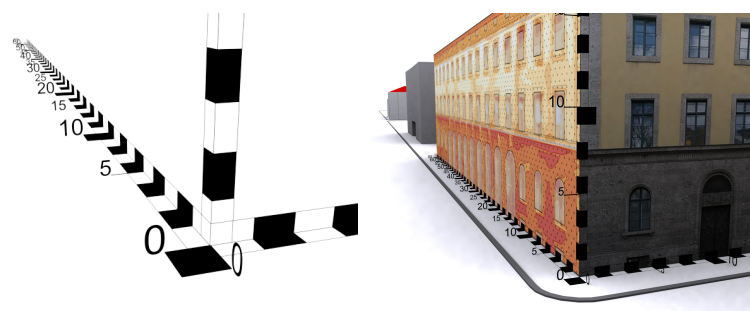


Abb. 130: Perspektivische Maßstabsbalken – Aufbau [links] und Platzierung [rechts]

Ein vergleichbares Element zum Maßstabsbalken bildet das perspektivische Kantengitter. Dieses wird wie der Maßstabsbalken an den Gebäudekanten ausgerichtet, mit dem Unterschied, dass die Gitterstruktur als Bodengitter auf- bzw. als stehendes Gitter am Gebäude anliegt. Aufgrund der bedingt kleinräumigen städtischen Darstellung in unmittelbarer Fassadennähe, den durch die Fassade begrenzten Raum und den eher großflächig in Erscheinung tretenden thermischen Strukturen ist die zu erwartende Anzahl der zu klassifizierenden Strukturen begrenzt und die Detaildichte in der späteren Fassadenkarte

überschaubar. Das heißt, es ließen sich die Silhouetten der platzierten körperhaften Signaturen durch rechtwinklige Parallelprojektionen ihrer Grund- und Seitenrisse auf das Bodengitter und das stehende Kantengitter projizieren (s. Abb. 131 – links). Mit einer entsprechenden Einfärbung der Symbolfarbe, deren selbstleuchtende Farben sich unabhängig zum Betrachtungswinkel konstant verhalten, ist eine erweiterte Informationsvermittlung denkbar. Durch die Projektion wird die Objekthöhenlage der Signatur zur Fassadenebene und ihre räumliche Tiefenposition verdeutlicht, was die Lagebestimmung vereinfacht, ohne durch zusätzliche Schlagschatten an der Signatur Fassadeninformationen verdecken zu müssen. Im Gegensatz zum vorgestellten perspektivischen Fassadenmaßstabsbalken ermöglicht das Kantengitter durch seine größere räumliche Ausdehnung einen Einsatz auch für körperhafte Temperaturdarstellungen. Einschränkungen dieses Raumhelfers sind dabei nur im Nahbereich zu erwarten, wenn das anliegende Kantengitter mit seinen Signatursilhouetten nicht mehr im Sichtfeld der virtuellen Kamera zu sehen ist.

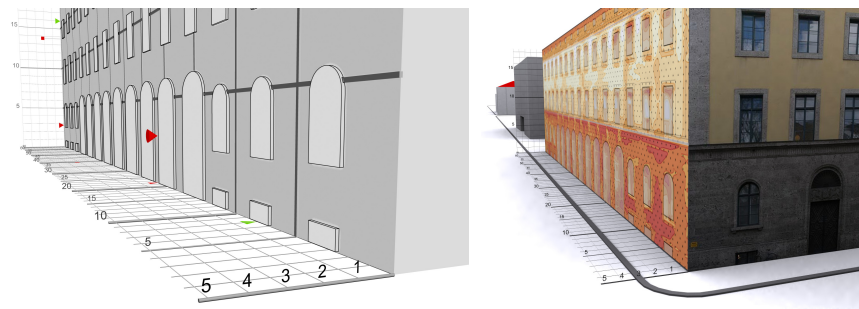


Abb. 131: Kantengitter – Mit Signatursilhouetten [links] und Platzierung in der Szene [rechts]

## Legende

Die Legende bildet das beschreibende Bindeglied zwischen den vorkommenden Kartenzeichen im Betrachtungsausschnitt (Kartenbild) und ihrer graphischen Bedeutung. Dabei unterliegen die im Kartenbild platzierten Kartenzeichen den ganzheitlichen Schattierungseigenschaften der computergraphischen Prozesse und den zentralperspektivischen Einflüssen. Für die bessere Wiedererkennbarkeit der körperhaften Signaturen zwischen Kartenbild und Legende liegt es nahe, ihre Gestalt nicht nur im Kartenbild, sondern auch in der Legende körperhaft wiederzugeben. Besonders das körperhafte Farbschema, das für die bessere Interpretierbarkeit als natürliches horizontales Farbschema mit volumenhafter Ausprägung gestaltet wurde, verdeutlicht die Austrittsrichtung der Temperatur aus der Fassade. Ihre gekrümmte kontinuierliche Form mit ihren Licht- und Schattenhängen lässt den Farbhelligkeitsverlauf der *Farbtöne* variieren und simuliert so unterschiedliche Beleuchtungssituationen in den Farben (s. Abb. 132 a). Das diskrete Farbschema in Abb. 132 b zeigt, bedingt durch die gleich ausgerichteten Schichtstufen zur definierten Lichtquelle, nur Intensitätsvariationen in den gekrümmten Flächen der Schichtflanken. In Abb. 132 c reduziert sich die Farbschattierung der Flächen aufgrund der rechtwinkligen Quaderform auf einen konstanten Intensitätswert auf allen Seiten. So transportieren Abb. 132 b und c weniger Informationen über schattierungsbedingte Farbhelligkeitsvariationen, verdeutlichen aber die zu erwartende Schattierungssituation von gestuften Darstellungen im Kartenbild.

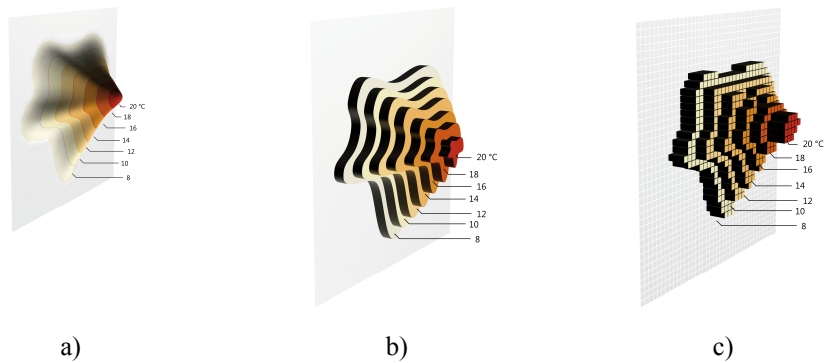


Abb. 132: Natürliches körperhaftes Farbschema – kontinuierliche Oberfläche [links], diskrete Schichten und Quader [mitte, rechts]

Für die eingebrachten körperhaften Signaturen im Kartenbild ist ihre Einbringung in den Legendenbereich ebenfalls als volumenhafte Signaturen in perspektivischer Darstellung als sinnvoll zu erachten. Deren plastisches Erscheinungsbild in der Legende erleichtert die Wiedererkennung durch die Form- und Farbkonstanz im Kartenbild.

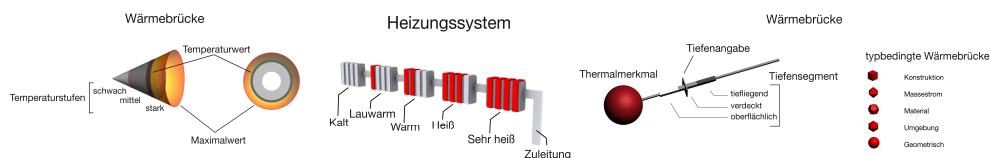


Abb. 133: Perspektivische körperhafte Signaturen mit ihren Beschreibungen [s. Anhang]

## 8.2.5 Bildsynthese

Digitale 3D-Karten durchlaufen am Ende des Graphikpipeline-Prozesses (s. Kap. 3.1 – 3D-Graphikpipeline) den Schritt der Bildsynthese (Rendering). Das Ergebnis aus diesem Prozessschritt liegt als statisches, gerastertes und schattiertes Einzelbild vor. Dieses bildet die Basis für Filmsequenzen, welche aus leicht differierenden Einzelbildern bestehen und vorab gerendert vorliegen müssen. Dabei ist keine Veränderung des Ablaufs, der Bewegungsrichtung oder der Interaktion zwischen Benutzer und Szenenelementen (Kameraposition, Objektanfrage) während der Wiedergabe möglich. Hingegen befähigt eine *Real-Time*-Umgebung Veränderungen während der Exploration der Szene aufgrund der Berechnung der benötigten Einzelbilder in Echtzeit. Dies kann sich beispielsweise durch eine individuelle Bewegung des Betrachters oder durch ein Auslösen eines *Events*<sup>56</sup> äußern. Ihre Umsetzung erfordert eine Reduzierung der renderspezifischen Prozesse in der Graphikpipeline auf ein Minimum mit der Bedingung, die Bildwiederholrate höher als die Wahrnehmung ihrer Einzelbilder zu halten. Das heißt, ab einem Wert von 15 Bildern pro Sekunde nimmt das menschliche Auge Einzelbilder als fließende Bildfolge wahr. Um starke Performanceeinbußen in der Bildwiederholrate zu umgehen, müssen beleuchtungs- und gestaltungsintensive Rechenprozesse, wie sie in den Kartenentwürfen mit ihren Schatten und Konturen vorkommen,

<sup>56</sup> Dazu zählt beispielsweise das Auslösen bestimmter Ereignisse durch die Position des Mauszeigers (Mouse Over/Mouse Out) oder entsprechender Eingabebefehle.



vorab durchgeführt werden. Dies gelingt durch Verfahren in der das Renderergebnis mit seinem Beleuchtungs- und Schattierungsergebnissen als modifizierte Textur für jede Fläche neu aufgebracht wird. Die *Real-Time*-Umgebung übernimmt die bestehende Objektgeometrie mitsamt ihren neuen Texturen ohne diese in Echtzeit berechnen zu müssen. Das entlastet den Rendereffort und beschleunigt die Rendergeschwindigkeit für die verlangte Bildwiederholrate und garantiert so die erforderliche Gestaltungsqualität der wiedergegebenen Szene.

Für die Gestaltung der unterschiedlichen *Sekundärmodelle* zur einem visuellen Produkt von generierten Einzelbildern wurde die Bildsynthese des Mental-Ray-Renderers angewendet. Es unterstützt die physikalisch approximierten, diffusen Schatten der acht unterschiedlichen Thermalkartenentwürfe mit ihren Symbolen im Aufstandsbereich der Fassadenebene, wie auch die Ausbildung der erwünschten Konturlinien für die halbtransparenten Fensterstrukturen der geforderten Raumrelationen. Eine Weiterverarbeitung der Einzelbilder zu Filmsequenzen oder die Überführung der Szene mit ihren modifizierten Texturen in echtzeitfähige Umgebungen konnten durch eine testweise Umsetzung bestätigt werden.

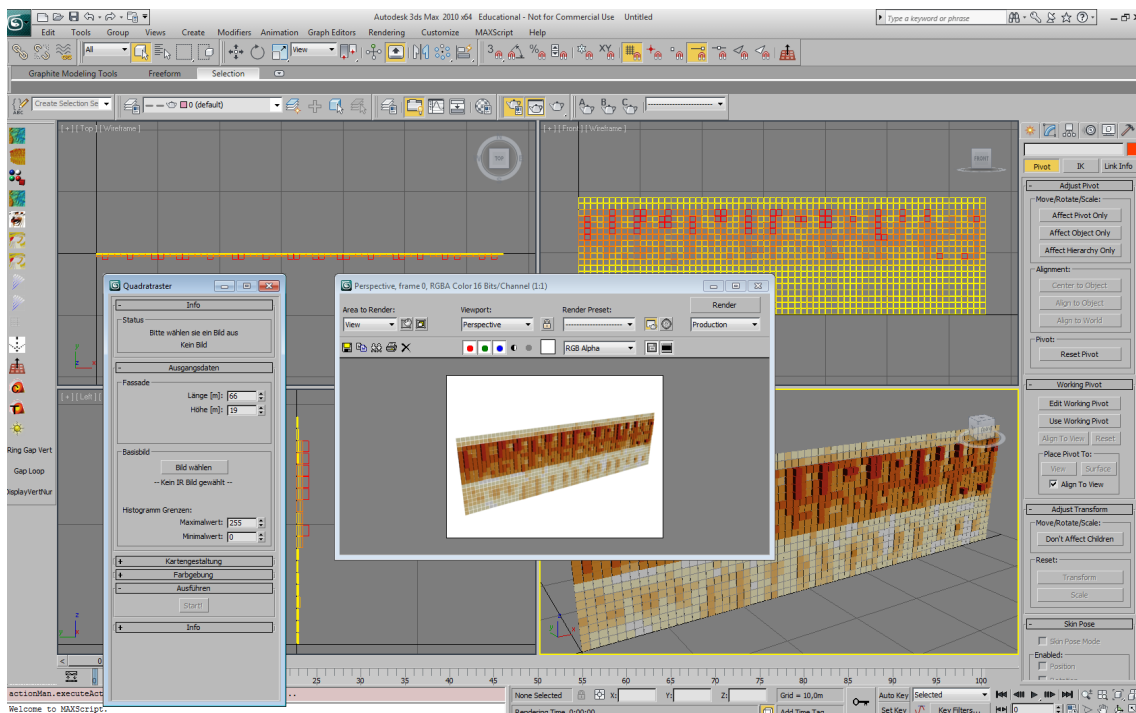


Abb. 134: Benutzerschnittstelle von 3ds Max mit Bildsynthese Ergebnis im Pop-Up-Fenster

## 8.3 Einsatz der Software Werkzeuge

### 8.3.1 2D-Kartenbearbeitung

Die zweidimensionalen Thermalkarten wurden über das vektorbasierte Graphikprogramm Illustrator CS5 von ADOBE umgesetzt. Es ermöglicht die Überführung in weitere Vektorformate wie EPS, DWG oder dem Open-Source-Format SVG. SVG basiert auf der Be-

beschreibungssprache des XML-Standards und wurde vom W3C<sup>57</sup> speziell für Graphiken verabschiedet. Der für das *World Wide Web* konzipierte Standard unterstützt alle gängigen graphischen Gestaltungsmöglichkeiten wie Filter- und Maskierungsfunktionen, die Einbettung von Farbprofilen oder die Interaktion und Animation aller graphischen Objekte.

### 8.3.2 3D-Kartenbearbeitung

Für die dreidimensionalen Thermalkarten kam das aus der Filmindustrie bekannte Graphikprogramm 3dsMax10 zum Einsatz. Sein Konstruktionsraum ermöglicht über drei Haupttrisse (s. Abb. 134) die Gestaltung virtueller 3D-Szenen mit der Möglichkeit über die softwareeigene Scriptsprache MaxScript auf die innere Programmfunktionalität zuzugreifen. Durch die Programmierung graphischer Benutzeroberflächen (*GUI*<sup>58</sup>) konnten die Kartentypen mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften, wie die Anordnung identischer Grundkörper, der Extrusion von Schicht- oder Konturlinien, der kontinuierlichen oder diskreten Erhebung von Flächen im stetigen und progressiven Werteverlauf sowie die Gestaltung in Farb- und Transparenzvariation auf der Fassadenfläche, semi-automatisch umgesetzt werden. Abb. 135 zeigt drei *GUIs* für die Erstellung der Schichtstufen, der Isothermen, der Quaderraster und der DFM Ausgangsmodelle.

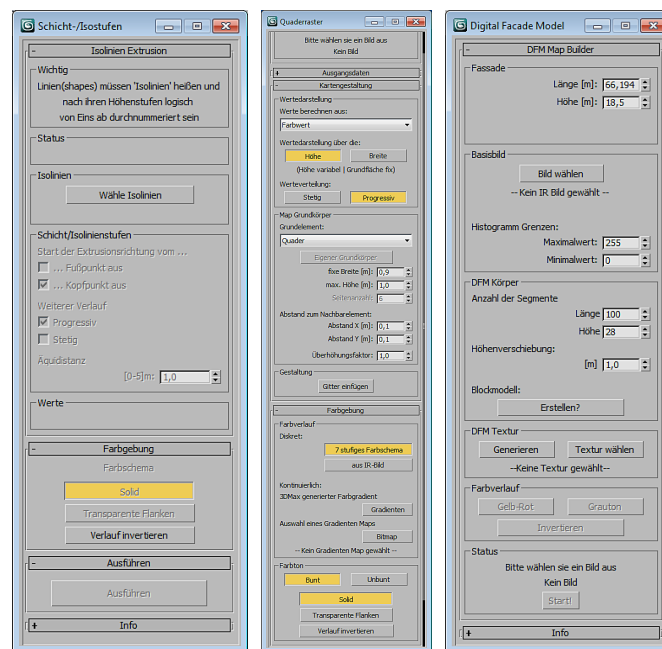


Abb. 135: Benutzeroberflächen zur Kartenerstellung – Schicht/Isolinien, Quaderraster und DFM [von links nach rechts]

3dsMax10 unterstützt darüber hinaus die Übertragung der Ergebnisse durch Exportfunktionalität in echtzeitfähige Umgebungen, wie Unity3D. Deren Implementierung und Aufbereitung in diesem echtzeitfähigen System nicht Gegenstand dieser Arbeit war.

<sup>57</sup> W3C: World Wide Web Consortium

<sup>58</sup> *GUI*: Graphical User Interface sind computerbasierte graphische Benutzeroberflächen für die Ausführung von Prozessen und Interaktionen.

### **8.3.3 Mathematisch basierte analytische Programme**

Die Verwendung eines mathematisch basierten Programms kam ausschließlich im Bereich des *Primärmodells* zum Einsatz. Dies wurde für die Bildanalyse und -aufbereitung eingesetzt, dessen Basis das korrigierte IR-Bild darstellte. Die Software MatLab von THE MATHWORKS (R2010b) ermöglichte die Umsetzung eines Tonwertbildes aus dem IR-Bild über das *Break-Point*-Verfahren, die Datengewinnung von vektorisierten Isolinien aus dem Tonwertbild und die Neugestaltung des kontinuierlichen Temperaturfarbverlaufs aus dem korrigierten IR-Bild in ein assoziativ angepasstes, kontinuierliches Farbschema durch die Konvertierung der indizierten Farbwerte.

## 9 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wird die Thematik der Anreicherung thermaler Informationen auf Gebäudefassaden im 2D- und 3D-Raum näher behandelt. Dabei greift man auf die Bereiche der menschlichen Wahrnehmung und Kognition, der Computergraphik, der Thermographie und der Kartographie zurück und kombiniert diese mit innovativen Kartenentwürfen. Ihre Visualisierung erfolgt anhand von konventionellen Karten der Temperaturdarstellung sowie der Adaption dieser zu neuen Entwurfsvarianten. Dabei gibt es eine klare gestalterische Trennung zwischen 2D- und 3D-Bereich. Die gemeinsame Datengrundlage besteht im Infrarotbild. So verändert sich durch die Computergraphik die Kartenerstellung nicht nur in ihrem gestalterischen Umfang, sondern auch durch die Dimensionserweiterung in ihren räumlichen Eigenschaften. Die dritte Dimension bietet darüber hinaus die Möglichkeit, der Informationsunterbringung in der Höhe, die so in der konventionellen Kartengestaltung nicht möglich wäre. Die eingangs aufgeführten Forschungsfragen, gültig für den 2D- und 3D-Bereich, werden wissenschaftlich aufbereitet und mit diversen Lösungsansätzen behandelt.

So kann die Frage nach der gestalterischen Anreicherung thermaler Informationen auf Fassadenbereiche durch die Entwürfe mittels Adaption bekannter Temperaturdarstellungen aus dem Bereich der konventionellen Kartographie beantwortet werden. Dies sind die Isolinien- und Schichtstufenkarten, deren Gestalt für Fassadenkarten herangezogen und mit unterschiedlichen Softwareprodukten für die freie kartographische Gestaltung im 2D- und 3D-Raum genutzt werden. Das *Primärmodell* basiert hierbei auf einem korrigierten IR-Bild bestehend aus kombinierten Thermogrammaufnahmen, welche für die vektorbasierten 2D- und 3D-Entwürfe und für den assoziativ kontinuierlichen Farbverlauf aufbereitet wurden.

Um einen aliasingfreie Darstellung zu erzielen, arbeitet man mit vektorisierten Datensätzen. Für die Erstellung des IR-Bildes anhand von unterschiedlichen Verfahren, gilt es vorab das IR-Rohbild mit seinen Grautonwerten in mehrstufige Tonwertbilder zu überführen. Deren Ergebnisse bildeten die Basis für die anschließende Vektorisierung. Mit unterschiedlichen Ansätzen zur Gewinnung von Vektorisolinien wurde die Grundlage für die anschließende kartographische Aufbereitung bezüglich der Isolinien- wie auch der Schichtstufenkarten im 2D- und 3D-Bereich gelegt. Dabei mussten die Isolinienanzahl, die zu differenzierenden Farbstufen und die späteren n-dimensionalen Darstellungen berücksichtigt werden. Ein neuer Ansatz erfolgt durch die Umwandlung des korrigierten IR-Bildes in eine thermale Höhenkarte, welcher die Grundlage für neue Darstellungsformen der räumlichen kartenverwandten Darstellung ist. Mit ihm können die Temperaturwerte in mehrere neuartige Kartenentwürfe umgesetzt werden. Dabei bildet die Bereitstellung der fehlerfrei aufbereiteten *Primärmodelle* eine wichtige Voraussetzung für die spätere Kartenerstellung. Besonders im 3D-Bereich ermöglichen die *Primärmodelle* einen hohen Grad an Automatisierung der kartenverwandten Kartentypen.

Die eingangs gestellte Frage nach den potenziellen Fehlerquellen in der thermalen Farbgebung wurde mittels der Sensibilisierung des Thermographen für die Farbgebung des Thermogrammes in Bezug auf den Benutzer eingegangen. Bei der Gestaltung der Temperaturfarben werden die Gestaltungsregeln und Konventionen aus dem Bereich der Kartographie sowie die Erkenntnisse aus der Kognitionsforschung genutzt, um die assoziative Farbwahrnehmung für die thermale Farbgebung in den Kartenentwürfen intuitiver und präattentiver zu gestalten. Um eine Fehlinterpretation in der Farbwahrnehmung zu vermeiden,

und die Farbdifferenzierung zu erleichtern, legte man eine 7-stufige assoziative Farbreihe in Rot und Blau an. Mit ihrem gewählten Farbabstand wird eine klare Trennung zwischen den Farbwerten ermöglicht, der den quantitativen Zusammenhang des Helligkeitsverlaufs der ratioskalierten Isothermen und Schichtstufen erkennen lässt. Um den Kontinuitätsanspruch der Temperatur zu erhalten, wird das diskrete Farbschema des assoziativen Farbverlaufs auch für ein kontinuierliches Farbschema herangezogen. Dies erfolgt mit Hilfe einer Umwandlung der indizierten Farbwerte aus dem Ausgangsbild des korrigierten IR-Bildes in eine assoziativ angepasste IR-Textur. Sie findet ihre Anwendung als Basisschicht in den zweidimensionalen Entwürfen der Isothermenkarten.

Auf die Frage wie sich verdeckte thermale Informationen mit sichtbaren Elementen kombinieren lassen, kann eine Visualisierung verdeckter thermaler Informationen und ihre Kombination mit sichtbaren Elementen durch farbliche Differenzierung und der daraus gebildeten Informationshierarchie erzielt werden. Sichtbare Informationen erhalten Grautöne und rücken durch ihre Unbuntöne in den Informationshintergrund. Die Buntöne definieren nichtsichtbare Thermalinformationen und stehen durch die Bildung einer Informationshierarchie im Informationsvordergrund. Würde der Informationshintergrund in Buntönen gehalten, käme es bei vollfarbigen Flächenkartenzeichen bei flächenhaft vorliegenden Temperaturfarben unweigerlich zu einer Farbmischung. In den Kartenentwürfen werden die Flächenkartenzeichen in Grautönen als Flächenmuster großer Rasterweite gestaltet. Das reduziert die Verdeckung der darunter liegenden flächigen Farbinformationen und erlaubt deren Kombination ohne miteinander zu konkurrieren.

Eine weitere wichtige Frage, nämlich die Möglichkeit der Abbildung thermaler Tiefenhinweise auf metaphorischen Darstellungsoberflächen, kann durch die Umsetzung einer dreistufigen Grautonstufung in der Konturlinie für 2D-Signatur und der entsprechenden Grautongebung der musterorientierten Flächenkartenzeichen erreicht werden. Im 3D-Bereich realisiert man den Tiefenhinweis durch die Einbringung zusätzlicher Skalenwerte mittels eines Tiefenzeigers zwischen der Verbindung von Fassade und den versetzten punkthaften 3D-Signaturen.

Eine weitere Forschungsfrage bezieht sich auf die Festlegung von notwendigen Raumrelationen bezüglich sichtbaren und thermal nichtsichtbaren Gebäudeinformationen. Dabei liegt der Fokus auf den äußeren sichtbaren Fassadenstrukturen, da diese den geforderten Bezug zu den georeferenzierten nichtsichtbaren Thermalinformationen geben. Dies bezieht sich für die untersuchte Fassade auf Simsvorsprünge und auf Fenster in unterschiedlicher Form und Größe. Die daraus stark abstrahierten Signaturen werden für die 2D- und 3D-Kartenentwürfe als Konturlinie oder als halbtransparente Körper mit Kantenlinie umgesetzt.

Die Frage, welche thermalen Informationen für den Kartennutzer der unterschiedlichen Nutzergruppen von Interesse sind, kann dahin gehend beantwortet werden, dass die Aufbereitung von bauthermographischen Daten zu einem kartographischen Produkt im ersten Durchlauf des Kommunikationsprozesses von jeweiligen Zielsetzungen abhängig und nicht als vollständig anzusehen sind. So richtet sich ihre jeweilige Einschätzung nach deren Fachkenntnissen, Motivationen oder Interessen und kann durch weitere Analysezyklen optimiert werden. Die Berücksichtigung findet sich in den zweidimensionalen Kartenentwürfen wieder. Bei den dreidimensionalen Kartenentwürfen zeichnet sich eine Tendenz

abhängig von den Interessen der betreffenden Nutzergruppe für die Wahl eines passenden körperhaften Kartentyps ab.

## 2D-Kartenentwürfe

Die aus den *Primärmodellen* gewonnenen Vektorisolines bilden die Grundlage für die Kartenentwürfe der Isolines-, Schichtstufen- und Isokarte. Sie dienen als Ausgangskarten (Basiskarten) für die anschließende Signaturierung weit gerasterter Flächenkartenzeichen und thematisch angepasster Kartenzeichen mit einem hohen Grad an Ikonizität (S. 117). Die Tiefeninformation wird über dreistufige Grautonwerte im Konturbereich der PunktSignatur oder durch Einfärbung der gesamten Flächenkartenzeichens erreicht und entspricht der Regel „Je höher desto dunkler“ (Imhof 1965, S. 333). Die Kartenentwürfe orientieren sich nach den festgelegten Nutzergruppen und optimieren durch Informationsart und Signaturdichte das Kartenergebnis entsprechend der Zielgruppe. Dabei wird die Isokarte als neuer kartographischer Kartenansatz vorgestellt, der aus Isolines- und Schichtstufenkarte durch ein angepasstes Farbschema miteinander kombiniert wurde. Durch geringe Farbabstände, der in den Schichtflächen liegenden dünnen Isolines, kann ein fließender Übergang beim *Software Zoom* zwischen hoher Informationsdichte einer Isolineskarte und einer geringen Informationsdichte einer Schichtstufenkarte erreicht werden (S. 120). Der Mehrwert der Isokarte liegt im Informationserhalt der Isolines innerhalb der Schichtstufen und durch die Farbwahl bedingte Verdeutlichung der Gefälle- richtung im großmaßstäbigen Bereich. Außerdem verdeutlichen die Flächenfarben der Schichtstufenkarte die Übersichtlichkeit bei kleinmaßstäbigen Ansichten. Der Aufbereitungsaufwand entspricht dem Umfang einer klassischen Kartenproduktion, deren entscheidendes Kriterium die Datengrundlage des *Primärmodelles* darstellt. Wird eine Kartengestaltung über das Internet angestrebt, muss zusätzlich der Farbraum auf einen webfähigen Farbraum reduziert und für die digitale Kartenexploration Navigationstools bereitgestellt werden.

## 3D-Kartenentwürfe

Die Ergebnisse der ebenen kartenverwandten Kartenentwürfe im 3D-Raum sind Isolines- und Schichtstufenkarten. Bei den körperhaften kartenverwandten Kartenentwürfen bildet das Extrusions-Verfahren die Grundlage für die Isolines- und Schichtstufenkarten. Das Displacement-Verfahren findet seinen Einsatz in den Quaderrasterkarten, in den Digitalen Fassaden Modellen (DFM) und in den Profilrelief- sowie Profilrasterkarten. Dabei werden für die städtische Umgebung in LOD2 die 3D-Karten mit Kartenzeichen in erhöhtem Abstraktionsgrad und einer reduzierteren Kartenzeichendichte als bei den 2D-Karten umgesetzt. Die Gestaltung der Isolineskarten und der Schichtstufenkarten erfolgt über das Vektorisierungsergebnis des Tonwertbildes. Dabei werden die Isolines als Konturlines behandelt und von der gemeinsamen Ausgangsebene auf ihre entsprechende stetige bzw. progressive Höhe extrudiert. Dagegen müssen durch die flächenhafte Ausprägung der Schichtstufenkarte die tiefer liegenden Temperaturstufen durch Aussparungen vor der Extrusion berücksichtigt werden, was ein Zusammenführen benachbarter Isolinespaare und ihrer innenliegenden Isolines zu einem multipolygonalen Shape zu Folge hat. Nach Abschluss der Vorbereitungen in Abhängigkeit des jeweiligen Kartentyps erfolgt durch entsprechende *GUI* in 3dsMax die Gestaltung der Konturbreite, Höhe, Farbe und

*Transparenz.* Für die Quaderrasterkarten, das DFM und den beiden Profilkarten liegen die Grundinformationen in der Höhenkarte und können ebenfalls durch semi-automatisierte Prozesse in der 3dsMax Umgebung generiert werden. Die aus den räumlichen kartenverwandten Darstellungen gewonnenen Ergebnisse, zeichnen sich durch einen hohen Grad an Prägnanz und Farbkonstanz durch ihre erkennbare Form und Größe innerhalb der perspektivischen Umgebung aus. Dabei ist der Einfluss der eingesetzten *Transparenz* als kritisch anzusehen, da, abhängig vom gewählten Kartentyp, es zu einem Verlust der Tiefenwirkung und der Formkonstanz kommen kann. Dies lässt sich teilweise durch eine überlagerte Gitterstruktur kompensieren, verhindert aber einerseits nicht einen Verlust der *Farbsättigung* der betroffenen Fläche, andererseits auch nicht die farbliche Veränderung der darunter liegenden Signatur.

Jede der körperhaften 3D-Kartenentwürfe besitzt einen eigenen Verdeckungsgrad zur Fassadenebene. Gegenübergestellt erlauben sie eine Einschätzung über ihre Verwendung mit räumlichen Kartenzeichen. Dabei können Flächensignaturen nur als weite Mustertextur hinter körperhaften kontinuierlichen halbtransparenten Kartentypen oder über ebene bzw. kontinuierliche opake Kartentypen positioniert werden. Das gleiche gilt auch für Linear-signaturen, deren Form und Verlauf auf der statistischen Thermaloberfläche negativ beeinflusst wird, und nur unter halbtransparenten Kartentypen auf der Fassadenebene verzerrungsfrei dargestellt werden können. Punktsignaturen lassen sich hingegen durch einen Versatz aus dem Darstellungsbereich der körperhaften Kartentypen bringen und sind so nicht in ihrer Form, Farbe oder Verdeckung beeinträchtigt. Das heißt, der Verdeckungsgrad der Kartentypen beeinflusst nicht nur die Lage der Signatur, sondern auch aufgrund der geometrischen Anordnung und Höhe der thermal abstrahierten Kartentypen, die Dichte der Signaturierung und somit die Möglichkeit der Signaturierung für bestimmte Kartennutzer. So liegt der Bedarf der Signaturierung beim Fachmann deutlich höher als beim Laien und die Wahl zu einer ebenen kartenverwandten Darstellung ermöglicht eine weitaus höhere Signaturierungsdichte als bei vergleichbaren körperhaften kartenverwandten Darstellungen. Dem Fachmann ist so ein größerer Signaturraum infolge der ausbleibenden Verdeckung gegeben. Wohingegen ein körperhafter Kartentyp dem Laien das Verständnis der thermalen Ausbreitung mit seinen Werten aus der Fassade plastischer vor Augen geführt wird.

Ein weiterer Aspekt in dieser Arbeit stellen die Betrachtungen der Tiefenschätzung in einer virtuellen Umgebung dar. Da die Visualisierung der Kartenentwürfe in einer zentralperspektivischen Projektion unter den kontinuierlichen Einflüssen der Maßstabs- und Formveränderungen abhängig des Standort stehen und dadurch die euklidischen *ego-* und *exozentrischen Distanzschätzungen* sowie die Schätzung der räumlichen Ausdehnung der Kartenentwürfe erschwert werden, werden Raumhelfer für diese virtuelle Umgebung konzipiert. Es resultieren für Tiefenschätzung im monokularen virtuellen Sichtfeld einer Standardbildschirmdarstellung der symmetrische Distanzfächer, der perspektivische Maßstabsbalken und das Kantengitter, wobei erster unabhängig vom Gebäude die Distanzschätzung zum Gebäude ermöglicht. Für die Dimensionsschätzung entlang perspektivisch verzerrter Objekte ist der perspektivische Maßstabsbalken konzipiert, der vorwiegend auf ebene kartenverwandte Darstellungen mit ihrer geringen Verdeckung angewendet wird. Das Kantengitter erlaubt durch seine Größe und Anordnung zum einen seine Anwendung auf körperhafte kartenverwandte Darstellungen, zum anderen die Lagedarstellung von Signaturen in deren Höhe und Tiefe über Parallelprojektion der Haupttrisse. Die erzielten Ergebnisse

sollen als Anregung für weitere Forschungsarbeiten im Bereich der perspektivischen Tiefenschätzung dienen. Dabei hat mitunter die freie Standortwahl Einfluss auf die Sichtbarkeit und Erkennbarkeit der vorgestellten Raumhelfer, deren Wirksamkeit und Akzeptanz beim Kartennutzer weiterer Untersuchungen bedürfen.

Aus dieser Arbeit ergeben sich somit Einblicke für die kartographische Aufbereitung thermaler Informationen auf Gebäudefassaden im 2D- und 3D-Computergraphikbereich. Durch nicht vorhandene Restriktionen von Software und Datenbanksystemen ergeben uneingeschränkte Möglichkeiten zur freien kartographischen Visualisierung. Ihre rechnergestützte Verarbeitung und Visualisierung sorgen für eine Verarbeitung echter räumlicher Daten zu digitalen 2D- und 3D-Karten. Dabei erhöht sich die Vielfalt der kartographischen Gestaltung, die flexible Anpassung an den Kartennutzer und die leichte Aktualisierung im Vergleich zu analogen Kartenprodukten. Ihr Nachteil ist die nicht vorhandene Möglichkeit der Informationsabfrage von Topologien und zusätzlichen Metadaten, wie sie aus Datenbanksystemen bekannt sind.

Für die Kartenentwürfe mit ihren unterschiedlichen Kartentypen heißt das, dass diese auf ihre Anschaulichkeit und ihr Verständnis in Abhängigkeit des Kartennutzer evaluiert werden müssen, um im nächsten Schritt diese Ergebnisse für weitere Forschungsarbeiten im Bereich der Gestaltung, Implementierung, Interaktion, Bedienung und Visualisierung zur Verfügung stellen zu können.

So verlangt dies weiterer Forschungsarbeit für die Festlegung klarer Gestaltungsregeln und Empfehlungen, die aus empirischen oder kognitiven Untersuchungen gewonnen werden und so zur Kartengestaltung wie auch zum 3D-Kartenverständnis für den Kartenleser beitragen können. Im Bereich der Implementierung sind ebenfalls weitere Bemühungen erstrebenswert, georäumliche Daten mit ihren kartographischen Gestaltungsmerkmalen adäquat sowohl in Datenbanken als auch in ihrem Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Programmen zu optimieren. Dies würde den Kommunikationsprozess in der Kartenerstellung deutlich beschleunigen und die datenbankgestützte kartographische Gestaltung verbessern. Auf dem Gebiet der Interaktion und Bedienung ergeben sich gerade durch den virtuellen 3D-Raum mit seinen Objektverdeckungen neue Untersuchungsfelder, wie der Einbringung von bekannten *Human Interface Devices (HID)* aus dem Computerspielebereich (Weber et al. 2010), von interaktiven perspektivisch angelegten Legendensymbolen, von optimierten Navigationsmenüs oder von weiterentwickelten virtuellen Raumhelfern. Deren Möglichkeit der Interaktion und Bedienung von der genutzten Visualisierungsplattform abhängt. Bei der Visualisierung eröffnet das vom FRAUNHOFER IGD<sup>59</sup> zur Testimplementierung entwickelte X3DOM Open-Source-System neue Wege zur direkten Implementierung von 3D-Graphiken in den neuen von W3C entwickelten HTML5 Entwurf<sup>60</sup>. Dies ermöglicht eine echtzeitfähige 3D-Visualisierung über Webbrowser, ohne auf zusätzlich installierte *PlugIns* zurückgreifen zu müssen. Inwieweit ihr Potenzial für städtische Gebiete mit ihrer hohen Anzahl an Polygonen

---

<sup>59</sup> IGD: Institut für Graphische Datenverarbeitung.

<sup>60</sup> Der HTML5 Standard wird voraussichtlich ab 2014 offiziell vom W3C verabschiedet werden.



ausreicht, muss sich erst noch zeigen. Die daraus resultierenden neuen und interessanten Forschungsthemen ermöglichen mit ihren zukünftigen Ergebnissen einen besseren Zugang und folglich ein leichteres Verständnis zu digitalen 2D- und 3D-Karten für den Kartennutzer.

## Literaturverzeichnis

- Akenine-Möller, T., E. Haines und N. Hoffman (2008): *Real-Time Rendering*, A. K. Peters Ltd.: 1027 S.
- Albertz, J. (2007): *Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft. **3**: 254 S.
- Arnberger, E. (1977): *Thematische Kartographie*. Braunschweig, Westermann: 245 S.
- Bahr, A. (1998): *Anaglyphs*. Stereoscopy, International Stereoscopic Union (ISU) Congress, Hamilton, Neuseeland, International Stereoscopic Union. **2**.
- Bender, M. und M. Brill (2006): *Computergrafik – Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch*. München/Wien, Carl Hanser Verlag. **2**: 516 S.
- Bertin, J. (1967): *Sémiologie graphique*. Paris, Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences: 431 S.
- Bertin, J. (1982): *Graphische Darstellungen – Graphische Verarbeitung von Informationen*. Berlin/New York, Walter de Gruyter&Co: 275 S.
- Bill, R. (1999): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme: Hardware, Software und Daten*. Karlsruhe, Wichmann Verlag GmbH. **1**: 454 S.
- Bleisch, S., J. Dykes und S. Nebiker (2008): *Evaluating the Effectiveness of Representing Numeric Information Through Abstract Graphics in 3D Desktop Virtual Environments*. The Cartographic Journal. **45**(3): S.216–226.
- Blinn, J. F. (1977): *Models of light reflection for computer synthesized pictures*. Proc. 4th annual conference on computer graphics and interactive techniques. **192**.
- Blinn, J. F. (1978): *Simulation of Wrinkled Surfaces*. Computer Graphics – Siggraph, Atlanta, Georgia **12**: S.286–292.
- Board, C. (1984): *High order Map-Using Tasks: Geographical lessons in danger of being forgotten*. Cartographica. **21**(1): S.85–97.
- Bollmann, J. und W. G. Koch (2001a): *Lexikon der Kartographie und Geomatik, Band I*. Heidelberg/Berlin, Spektrum Akademischer Verlag GmbH: 453 S.
- Bollmann, J. und W. G. Koch (2001b): *Lexikon der Kartographie und Geomatik, Band II*. Heidelberg/Berlin, Spektrum Akademischer Verlag GmbH: 455 S.
- Brassel, K. (1974): *Ein Modell zur automatischen Schräglichtschattierung*. In: Internationales Jahrbuch der Kartographie: S.66–77.
- Brewer, C. A. (2005): *Designing better Maps: A guide for GIS users*. Redlands, ESRI Press: 205 S.
- Brown, A. und W. Feringa (2003): *Colour Basics for GIS Users*. Harlow, Pearson Education Limited: 171 S.

- Brunner, K. (1995): *Digitale Kartographie an Arbeitsplatzrechnern*. In: Kartographische Nachrichten. **45**(2): S.63–68.
- Buchroithner, M. (2007): *Echtdreidimensionalität in der Kartographie: Gestern, heute und morgen*. Kartographische Nachrichten. **57**(5): S.239–248.
- Buchroithner, M. und R. Schenkel (2001): *3D-Visualisierung von Geodaten – perzeptionstheoretische und präsentationstechnische Grundlage*. In: Kartographische Bausteine. Dresden, TU Dresden. **19**: S.113–120.
- Buziek, G. (2003): *Eine Konzeption der kartographischen Visualisierung*. Habilitation, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Universität Hannover, Hannover: 190 S.
- Caivano, J. L. (1990): *Visual texture as a semiotic system*. Semiotica. **80**(3/4): S.239–252.
- Cuff, D. J. und K. Bieri (1979): *Ratios and absolute values conveyed by a stepped statistical surface*. The American Cartographer. **6**(2): S.157–168.
- Cuff, D. J. und M. T. Mattson (1982): *Thematic maps: Their design and production*. New York, Methuen young books: 176 S.
- DeLucia, A. A. und D. W. Hiller (1982): *Natural legend design for thematic maps*. Cartographic Journal. **19**: S.46–52.
- Dent, B. D. (1999): *Cartography: Thematic Map Design*. Boston, Mcgraw Hill Book Co. **5**: 417 S.
- Dent, B. D. (2008): *Cartography: Thematic Map Design*. Boston, Mcgraw Hill Book Co. **6**: 368 S.
- Dodge, M., M. Mc Derby und M. Turner (2008): *Geographic visualization: concepts, tools and applications*. Chichester, John Wiley&Sons Ltd.
- Dodgson, N. A. (2005): *Autostereoscopic 3D displays*. Computer. **38**(8): S.31–36.
- Döllner, J. (2007): *Techniken und Strategien der Visualisierung komplexer 3D-Geodaten*. 12. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, TU München, Runder Tisch GIS e.V.
- Döllner, J., K. Baumann und H. Buchholz (2006): *Virtual 3D City Models as Foundation of Complex Urban Information Spaces.*, Corp 2006&Geomultimedia 06, Vienna.
- Döllner, J., K. Baumann und O. Kersting (2003): *LandExplorer – Ein System für interaktive 3D-Karten*. Kartographische Schriften - Visualisierung und Erschließung von Geodaten. **7**: S.67–76.
- Döllner, J. und H. Buchholz (2005): *Expressive virtual 3D city models*. International Cartographic Conference. Coruna, Spain, International Cartographic Association (ICA - ACI).
- Döllner, J. und M. Walther (2003): *Real-time expressive rendering of city models*. Proceedings Seventh International Conference on Information Visualization, London, England, IEEE Computer Society: S.245-250.

Dransch, D. (1995): *Temporale und nontemporale Computer-Animation in der Kartographie*. Dissertation, Freie Universität Berlin, Berlin: 123 S.

Dransch, D. (2001): *User-centered human computer interaction in cartographic information processing*. 20th International Cartographic Conference, Beijing: S.1767-1774.

Eicher, C., M. Bede, D. Neuffer, S. Kappeler, M. Neun und R. Schoening (2010): *Smiling Cartography: Making GIS More Usable for Cartography*. The Cartographic Journal. **47**(2): S.173–179.

Eppenstein, O. (1924): *Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente*. Leipzig, Verlag von J.A. Barth.

Eyton, J. R. (1990): *Color stereoscopic effect cartography*. Cartographica. **2**(1): S.20–29.

Falk, D. S., D. R. Brill und D. G. Stork (1986): *Ein Blick ins Licht: ein Einblick in die Natur des Lichts und des Sehens, in Farbe und Fotografie*. Berlin Heidelberg, Springer Verlag: 470 S.

Fechner, G. T. (1860): *Elemente der Psychophysik*. Leipzig. **2**.

Firsching, A., C. Moldan und H. Rumpfinger (1999): *Großmaßstäbige Planerstellung sowie Konzeptentwicklung und Realisierung eines wirklichkeitsnahen dreidimensionalen Gebäudemodells*. Diplomarbeit, Department of Geodesy, Technische Universität München, München: 141 S.

Flohrer, M. (2002): *Wärmetechnische Schwachstellen: aufgedeckt, lokalisiert und bewertet mittels Infrarot-Thermografie-Messungen*. In: Bauphysik. **24**(5): S.308–312.

Foley, J. D., A. van Dam, S. K. Feiner und J. F. Hughes (1997): *Computer Graphics: principles and practice*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.: 1174 S.

Freitag, U. (1977): *Pragmatische Aspekte der Kartographie in Entwicklungsländern*. Kartographische Nachrichten. **2**: S.53–62.

Germanchis, T., W. Cartwright und C. Pettit (2007): *Virtual Queenscliff: A Computer Game Approach for Depicting Geography* In: Multimedia Cartography. W. Cartwright, M. P. Peterson und G. Gartner. Berlin/Heidelberg, Springer. **2**: S.359–368.

Geßner, A. und H.-J. Krickau (2005): *Luftgestützte Thermografie von Fernwärmeleitungen*. 10. Dresdner Fernwärmekolloquium, Dresden.

Gibson, J. J. (1973a): *Die Sinne und der Prozeß der Wahrnehmung*. Bern, Huber: 397 S.

Gibson, J. J. (1973b): *Die Wahrnehmung der visuellen Welt*. Weinheim, Beltz. **1973**: 256 S.

Gibson, J. J. (1982): *Wahrnehmung und Umwelt*. München, Urban&Schwarzenberg. **XV**: 356 S.

Glückert, U. (1992): *Erfassung und Messung von Wärmestrahlung – Eine praktische Einführung in die Pyrometrie und Thermographie*. München, Franzis-Verlag GmbH&Co. KG: 153 S.

- Goldstein, D. (1999): *Intentional non-photorealistic rendering*. Computer Graphics. **33**(1): S.62–63.
- Gooch, B. und A. Gooch (2001): *Non-Photorealistic Rendering*. Natick, Mass, A. K. Peters Ltd.: 254 S.
- Goral, C. M., K. E. Torrance, D. P. Greenberg und B. Battaile (1984): *Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces*. Computer Graphics. **18**(3): S.213–222.
- Gorki, H. F. und H. Pape (1987): *Stadtkartographie*, Franz Deuticke: 117 S.
- Gouraud, H. (1971): *Continuous Shading of Curved Surfaces*. IEEE Transactions on Computers. **C-20** (6): S.623–629.
- Graf, C. K. (1995): *Realistic landscape rendering using remote sensing images, digital terrain models and 3D objects*. Remote Sensing Series. Zürich, Remote Sensing Laboratories, Department of Geography University of Zurich. **25**.
- Graham, C. H. (1989): *Vision and Visual Perception*. New York, John Wiley&Sons Inc.: 637 S.
- Großer, K. (2001): *Farbassoziation*. In: Lexikon der Kartographie und Geomatik, Band I. J. Bollmann und W. G. Koch. Heidelberg/Berlin, Spektrum Akademischer Verlag GmbH: S.224.
- Großer, K. und J. Schoppmeyer (2001): *Farbanwendung in der Kartographie*. In: Lexikon der Kartographie und Geomatik, Band I. J. Bollmann und W. G. Koch. Heidelberg/Berlin, Spektrum Akademischer Verlag GmbH: S.220.
- Häberling, C. (2004): *Topografische 3D-Karten. Thesen für kartografische Gestaltungsgrundsätze*. Dissertation, Institut für Kartographie, ETH Zürich, Zürich: 167 S.
- Hake, G., D. Grünreich und L. Meng (2002): *Kartographie: Visualisierung raum-zeitlicher Informationen*. Berlin/New York, Walter de Gruyter&Co: 604 S.
- Hinsche, E. (1988): *Das Darstellungs- und Projektionssystem: Fiber Optic Helmet Mounted Display (FOHMD) – ein Novum in der computergenerierten Umfelddarstellung*. In: Simulationstechnik – Proceedings des 5. Symposiums Simulationstechnik: S.184–189.
- Honsel, G. (2010): *Der neuen Realismus*. Technology Review, from <http://heise.de/-954433>.
- Hubona, G. S., P. N. Wheeler, G. W. Shirah und M. Brandt (2000): *The Relative Contributions of Stereo, Lighting, and Background Scenes in Promoting 3D Depth Visualization*. ACM Computing Surveys (CSUR). **6**(3): S.214–242.
- Imhof, E. (1963): *Kartenverwandte Darstellungen der Erdoberfläche – eine systematische Übersicht*. In: Internationales Jahrbuch für Kartographie. **3**: S.54–99.
- Imhof, E. (1965): *Kartographische Geländedarstellung*. Berlin, Walter de Gruyter&Co: 425 S.
- Imhof, E. (1972): *Thematische Kartographie*. Berlin/New York, Walter de Gruyter&Co. **10**.

- Jahnke, M., J. M. Krisp und H. Kumke (2011): *How many 3D city models are there? – a typologic try*. 25th International Cartographic Conference ICC. Paris: S.11.
- Jenks, G. F. (1963): *Generalization in Statistical Mapping*. Annals of the Association of American Geographers. **53**(1): S.15–26.
- Johnson, B. R. und G. A. Jacobsen (2005): *Advances in lenticular lens arrays for visual display*. Proceedings of SPIE, San Diego. **5874**: S.1–11.
- Kelle, O. (1995): *Dynamische Tiefenwahrnehmungskriterien in computergenerierten interaktiven Szene und virtuellen Simulationsumgebungen*, VDI-Verlag GmbH. **10**: 174 S.
- Kersting, O. P. (2002): *Interaktive, dynamische 3D-Karten zur Kommunikation raumbezogener Information*. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Potsdam, Potsdam: 109 S.
- Kirschenbauer, S. (2005): *Applying "True 3D" Techniques to Geovisualisation: An Empirical Study* In: Exploring Geovisualisation. J. Dykes, A. M. MacEachren und M.-J. Kraak. Amsterdam, Elsevier: S.363–387.
- Koch, W. G. (2002a): *Kartenzeichen*. In: Lexikon der Kartographie und Geomatik, Band I. J. Bollmann und W. G. Koch. Heidelberg/Berlin, Spektrum Akademischer Verlag GmbH: S.451–452.
- Koch, W. G. (2002b): *Linearsignaturen*. In: Lexikon der Kartographie und Geomatik, Band I. J. Bollmann und W. G. Koch. Heidelberg/Berlin, Spektrum Akademischer Verlag GmbH: S.331.
- Koffka, K. (1922): *Perception: An introduction to the Gestalttheorie*. Psychological Bulletin. **19**: S.531–585.
- Kolbe, T., G. Gröger und L. Plümer (2005): *CityGML – Interoperable Access to 3D City Models*. Proc. of the 1st International Symposium on Geoinformation for Disaster Management, Delft, Springer.
- Korpi, J. und Ahonen–Rainio (2010): *Cultural Constrains in the Design of Pictographic Symbols*. The Cartographic Journal. **47**(44): S.351–359.
- Koussoulakou, A. (1999): *Geographical Reference in Multimedia Cartography*. In: Multimedia Cartography. W. Cartwright, M. P. Peterson und G. Gartner. Berlin/Heidelberg, Springer. **1**: S.281–290.
- Kraak, M. J. (1988): *Computer Assisted Cartographical Three–Dimensional Imaging Techniques*. Dissertation, Delft University Press, Delft: 175 S.
- Kraak, M. J. und F. J. Ormeling (1996): *Cartography, Visualization of spatial data*. Harlow, Addison Wesley Longman Limited. **1**: 222 S.
- Kriz, K. (2001): *Kartographische Ansichten im neuen Millennium*. In: Kartographie 2001 – multidisziplinär und multidimensional. Beiträge zum 50. Deutschen Kartographentag. Buzin/Wintges. Heidelberg, Wichmann Verlag.

- Kumler, M. P. und R. E. Groop (1990): *Continuous-Tone Mapping of Smooth Surfaces*. Cartography and Geographic Information Science. **17**(4): S.279–289.
- Lind, M., G. P. Bingham und C. Forsell (2003): *Metric 3D structure in visualizations*. Information Visualization. **2**(1): S.51–57.
- Lo, C. P. und D. A. Quattrochi (2003): *Land-Use and Land-Cover Change, Urban Heat Island Phenomenon, and Health Implications: A Remote Sensing Approach*. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. **69**: S.1053–1063.
- Lorenz, H., M. Trapp und J. Döllner (2009): *Interaktive, multiperspektivische Ansichten für geovirtuelle 3D-Umgebungen*. Kartographische Nachrichten. **4**(1): S.175.
- MacEachren, A. M. (1995): *How maps work - Representation, Visualization and Design*, The Guilford Press: 513 S.
- Mair, T. und S. Grieder (2005): *Das Landschaftrelief – Symbiose von Wissenschaft und Kunsthandwerk*, Hier und Jetzt: 178 S.
- Malic, B. (1998): *Physiologische und technische Aspekte kartographischer Bildschirmvisualisierung*. Bonn, Inst. für Kartographie u. Topographie. **25**: 192 S.
- Marr, D. (1982): *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*, W.H. Freeman & Co Ltd.: 397 S.
- McGranaghan, M. (1989): *Ordering choropleth map symbols: The effect of background*. American Cartographer. **16**(4): S.279–285.
- Metelli, F. (1985): *Stimulation and perception of transparency*. Psychological Research. **47**: S.185–202.
- Möller, T. und E. Haines (1999): *Real-Time Rendering*. Natick, A. K. Peters Ltd.
- Monmonier, M. (1996): *How to Lie with Maps*. Chicago, The University of Chicago Press. **2**: 207 S.
- Montello, D. R. (2002): *Cognitive map-design research in the twentieth century: Theoretical and Empirical Approaches*. In: Cartography and Geographic Information Science. **29**: S.283–304.
- Morrison, J. L. (1974): *A theoretical framework for cartographic generalization with the emphasis on the process of symbolization*. In: International Yearbook of Cartography. **14**: S.115–127.
- Neisser, U. (1967): *Cognitive Psychology*, Prentice Hall: 351 S.
- Neudeck, S. (2001): *Zur Gestaltung topografischer Karten für die Bildschirmvisualisierung*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Bundeswehr Universität München, München: 131 S.
- Olson, J. M. (1976): *A coordinated approach to map communication improvement*. The American Cartographer. **21**(1): S.85–97.

- Olson, J. M. (1984): *Cognitive issues in map use*. International Yearbook of Cartography: S.151-157.
- Olson, J. M. (2006): *Cognitive Cartographic Experimentation*. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization: S.34–44.
- Patterson, T. (1999): *Designing 3D landscapes*. In: Multimedia Cartography. M. P. Peterson, W. Cartwright und G. F. Gartner. New York, Springer: S.217–229.
- Phillips, R. J. (1984): *Experimental Method in Cartographic Communication: Research on Relief Maps*. Cartographica. **21**(4): S.120–128.
- Phong, B. T. (1975): *Illumination for Computer Generated Pictures*. Communications of the ACM. **18**(6): S.311–317.
- Poole, S. (2000): *Trigger Happy: The Inner Life of Videogames*. London, Fourth Estate: 256 S.
- Prosch, R. (2005): *"Computer-generated history": Zur paradoxen Dualität von Populärkultur und Zeitgeschichte in Jon Haddocks Screenshots*. COPAS: Current Objectives of Postgraduate American Studies University of Regensburg. **6**.
- Purdy, W. C. (1960): *The Hypothesis of Psychological Correspondence in Space Perception*. New York, General Electric Advanced Electronics Center.
- Rase, W.-D. (1998): *Visualisierung von Planungsinformationen – Modellierung und Darstellung immaterieller Oberflächen*. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Freien Universität Berlin, Berlin: 204 S.
- Robertson, P. K. (1990): *A methodology for scientific data visualization: choosing representations base on a natural scene paradigm*. 1. IEEE Conference on Visualization.
- Rock, I. (1983): *The Logic of Perception*. Massachusetts, M.I.T. Press.
- Rowles, R. A. (1978): *Perception of Perspective Block Diagrams*. In: The American Cartographer. **5**(1): S.31–44.
- Salomon, D. (2006): *Curves and surfaces for computer graphics*. New York, Springer: 451 S.
- Sánchez-Crespo Dalmau, D. (2004): *Core techniques and algorithms in game programming*, New Riders Games: 888 S.
- Scharlach, H. (2002): *Lärmkarten – Kartographische Grundlagen und audiovisuelle Realisierung*. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Ruhr-Universität Bochum, Bochum: 144 S.
- Schröder, P. (1985): *Diagrammdarstellung in Stichworten, Hirt's Stichwortbücher*. Unterägeri, Verlag Ferdinand Hirt AG: 144 S.
- Schuster, N. und V. G. Kolobrodov (2004): *Infrarotthermographie*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co KGaA: 354 S.



- Shepherd, I. D. H. (2008): *Travails in the Third Dimension: A Critical Evaluation of Three-dimensional Geographical Visualization*. In: Geographic Visualization: Concepts, Tools and Applications. M. Dodge, M. Mc Derby und M. Turner. Chichester, John Wiley&Sons: S.325.
- Sheppard, S. R. J. (2005): *Validity, Reliability and Ethics in Visualization*. In: Visualization in Landscape and Environmental Planning. Technology and Applications. I. D. Bishop und E. Lange. London, New York, Taylor&Francis: S.79-97.
- Shneiderman, B. (2003): *Visualization Viewpoints: Why Not Make Interfaces Better than 3D Reality?* In: IEEE Computer Graphics and Applications: S.15.
- Sieber, R. und S. Huber (2007): *Atlas of Switzerland 2 – A highly interactive thematic national atlas*. In: Multimedia Cartography. W. Cartwright, M. P. Peterson und G. Gartner. Berlin/Heidelberg, Springer. 2: S.161–182.
- Sieber, R., P. Jeller und L. Hurni (2009): *Statistische Oberflächen in einem interaktiven 3D-Atlas – Strategien und Techniken*. In: Kartographische Nachrichten. 59(4): S.190–196.
- Slocum, T. A., C. Blok, B. Jiang, A. Koussoulakou, R. Koussoulakou, D. R. Montello, S. Fuhrmann und N. R. Hedley (2001): *Cognitive And Usability Issues In Geovisualization*.
- Slocum, T. A., R. B. McMaster, F. C. Kessler und H. H. Howard (2005): *Thematic Cartography and Geographic Visualization*, Pearson Prentice Hall: 518 S.
- Strothotte, T. (1998): *Computational Visualization. Graphics, Abstraction, and Interactivity*. Berlin/Heidelberg, Springer: 459 S.
- Swienty, O., M. Zhang, T. Reichenbacher und L. Meng (2007): *Establishing a neurocognition-based taxonomy of graphical variables for attention-guiding geovisualisation*. Spie, Geoinformatics 2007 – Cartography, Spatial Analysis and Visualization for Harmonious Society, Nanjing. 6751.
- Tainz, P. (2001a): *Schichtstufenkarte*. In: Lexikon der Kartographie und Geomatik, Band II. J. Bollmann und W. G. Koch. Heidelberg/Berlin, Spektrum Akademischer Verlag GmbH: S.307.
- Tainz, P. (2001b): *Skalierungsniveau*. In: Lexikon der Kartographie und Geomatik, Band II. J. Bollmann und W. G. Koch. Heidelberg/Berlin, Spektrum Akademischer Verlag GmbH: S.330.
- Tanaka, K. (1950): *The Relief Contour Method of Representing Topography on Maps*. In: Geographical Review. New York, American Geographical Society. 40: S.444–456.
- Terribilini, A. (2001): *Entwicklung von Arbeitsabläufen zur automatischen Erstellung von interaktiven, vektorbasierten topographischen 3D-Karten*. Dissertation, Institut für Kartographie der ETH Zürich, ETH Zürich, Zürich: 220 S.
- Thierry, T. (1997): *Qualitative Aspects of Chromo-Stereoscopy for Depth Perception*. PE&RS. 63(2): S.193–203.
- Thorner, W. (1938): *Der stereoskopische Film*. In: Kinotechnik XX: S.158–160.

- Tobler, W. (1974): *A computer program to draw perspective views of geographical data*. The American Cartographer. **1**(2): S.124.
- U.S. Army, D. O. T. (1956): *Terrain models and relief map making – Technical manual TM 5-249*. Washington, Department of the Army: S.69.
- Van Dorn, D. (2002): *Evaluation of Desktop Relief Shading Software*. Proceedings of the workshop of the ICA Commission on Mountain Cartography, Mt. Hood, Oregon, ICA Commission.
- VATh (2010): *VATh-Richtlinie: „Bauthermografie“*. Tabarz, Bundesverband für Angewandte Thermografie e. V.: S.15.
- Vierling, O. (1965): *Die Stereoskopie in der Photographie und Kinematographie*. Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft MBH.
- Ware, C. (2004): *Information Visualization: Perception For Design*. San Francisco, Morgan Kaufman: 486 S.
- Watt, A. (2002): *3D-Computergrafik*. München, Addison Wesley – Pearson Seduction Deutschland GmbH 3: 610 S.
- Weber, A., B. Jenny, M. Wanner, J. Cron, P. Marty und L. Hurni (2010): *Cartography Meets Gaming: Navigation Globes, Block Diagrams and 2D Maps with Gamepads and Joystick*. The Cartographic Journal. **47**(1): S.92–100.
- Welsch, N. und C. C. Liebmann (2004): *Farben: Natur, Technik, Kunst*. Heidelberg, Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- Wertheimer, M. (1925): *Drei Abhandlungen zur Gestalttheorie*. Erlangen, Verlag der Philosophischen Akademie.
- Wild, H. (1998): *Lexikon des Feuchte- und Wärmeschutzes*. Augsburg, WEKA Baufachverlage GmbH. **1**.
- Wilkinson, L. (1999): *The Grammar Of Graphics*. Heidelberg, Springer. **1**: 408 S.
- Wissen, U. (2007): *Virtuelle Landschaften zur partizipativen Planung*. Dissertation, Institute for Spatial and Landscape Planning, ETH, Zürich: 257 S.
- Xiang, Z. und R. A. Plastock (2003): *Computergrafik*. Bonn, mitp-Verlag. **1**: 432 S.
- Xiong, Y. und K. Turkowski (1997): *Creating Image-Based VR Using a Self-Calibrating Fisheye Lens*. Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on: S.237–243.
- Yoëli, P. (1967): *Die Richtung des Lichts bei analytischen Schattierungen*. Kartographische Nachrichten. **17**(2): S.37–44.
- Zanini, M. (1998): *Dreidimensionale synthetische Landschaften*. Dissertation, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich: 181 S.

## **Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Promotionsprüfung vorgelegte Arbeit mit dem Titel:

### **Kartographische Anreicherung von Gebäudefassaden mit thermalen Bilddaten**

am Lehrstuhl für Kartographie unter der Anleitung und Betreuung durch Prof. Dr.-Ing. Liqiu Meng ohne sonstige Hilfe erstellt und bei der Abfassung nur die gemäß §6 Abs.5 angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe die Dissertation in dieser oder ähnlicher Form in keinem anderen Prüfungsverfahren als Prüfungsleistung vorgelegt.

Ich habe den angestrebten Doktorgrad noch nicht erworben und bin nicht in einem früheren Promotionsverfahren für den angestrebten Doktorgrad endgültig gescheitert.

Die Promotionsordnung der Technischen Universität München ist mir bekannt.

München, den \_\_\_\_\_

Unterschrift \_\_\_\_\_

# Lebenslauf

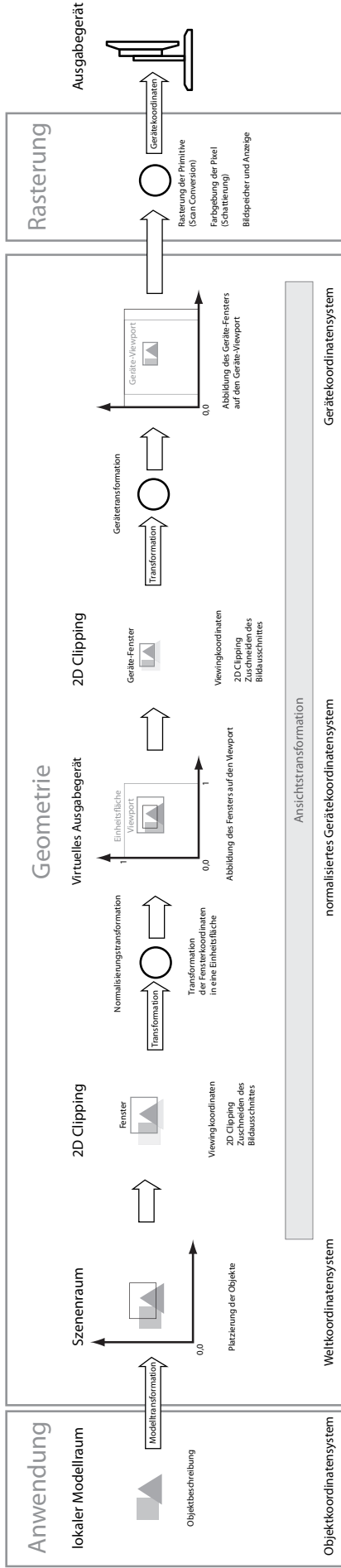
## Persönliche Daten

Name	Holger Kumke
Familienstand	verheiratet
Staatsangehörigkeit	deutsch
Geburtsdaten	24. Mai 1971 in Erlangen

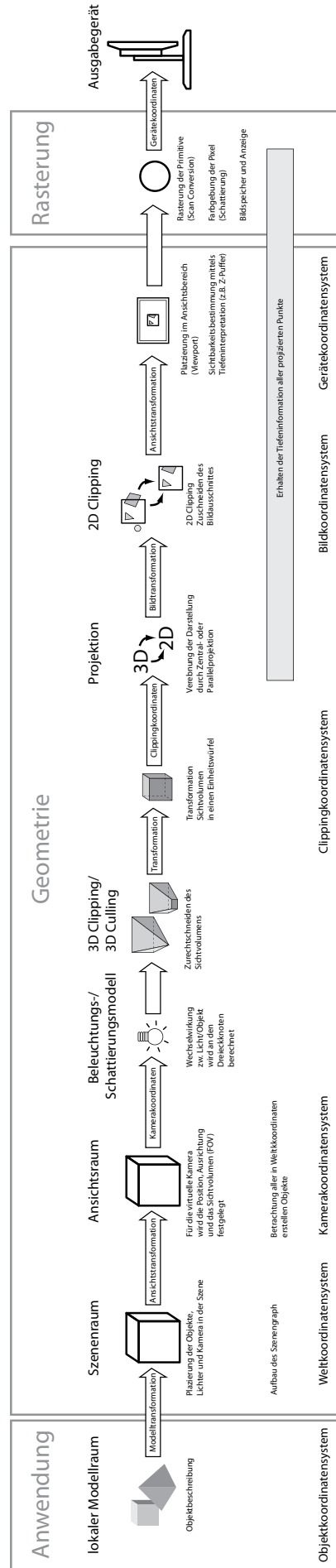
## Vita

1987 – 1991	Ausbildung zum Industrieelektroniker Fachrichtung Gerätetechnik (Siemens AG) Abschluss: Gesellenbrief
1991 – 1992	Beschäftigungsverhältnis bei der Siemens AG, Erlangen
1992 – 1993	Berufsaufbauschule (BAS), Erlangen Abschluss: Realschulabschluss
1993 – 1995	Berufsoberschule (BOS), Scheyern Abschluss: Fachgebundene Hochschulreife
1995 – 2001	Studium der Geodäsie an der Technischen Universität München Abschluss: Dipl.-Ing. Vermessungswesen
2001 – 2002	Wissenschaftliche Hilfskraft und Lehrassistent an der Technischen Universität München: Projektleitung und -durchführung der 3D-Visualisierung des Nationalparks Berchtesgaden
2002 – 2004	Beschäftigungsverhältnis am GISCluster, Salzburg: 3D- Stadtmodell Salzburg – Visualisierung und Programmierung städtischen Raums ( <i>Marie Curie Fellowship</i> )
seit 2005	Wissenschaftlicher Angestellter und Doktorand am Lehrstuhl für Kartographie der Technischen Universität München

## 2D - Graphikpipeline



## 3D - Graphikpipeline

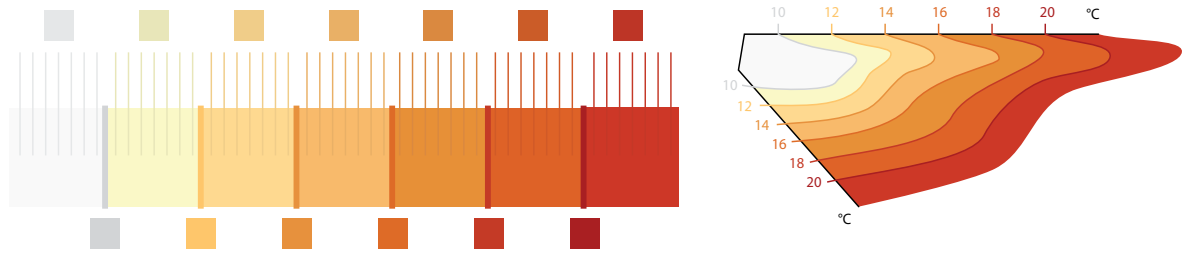


# Farbreihe Rot

Schichtisollinien

Schichtflächen

Schichtgrenzisollinien



## HSB / RGB - Farbreihe

	Hellgrau							Hellorange							Rot																		
Schichtflächenfarbe	H °	0	53	41	36	33	21	7	R	250	254	254	248	230	217	203	G	250	248	221	191	146	91	47	B	250	203	147	104	43	22	28	
	S %	0	20	43	58	81	90	86																									
	B %	98	99	99	97	90	85	80																									
Schichtisollinienfarbe	H °	0	53	41	36	31	20	7	R	237	240	243	235	219	203	198	G	237	234	211	181	139	85	47	B	237	191	139	97	53	24	28	
	S %	0	20	43	58	76	88	85																									
	B %	93	95	95	92	85	80	74																									
Schichtgrenzfärbefarbe	H °	0	39	31	24	7	356	R	220	252	230	218	195	171	G	220	202	147	101	51	20	B	220	103	51	20	28	29					
	S %	0	58	77	90	85	88																										
	B %	86	98	90	85	76	67																										

## Farbabstand

Schichtflächenfarbe

Nr.	L	a	b	Name	Delta E - Fläche	1 Fläche	2 Fläche	3 Fläche	4 Fläche	5 Fläche	6 Fläche	7 Fläche
1	98	0	0	Hellgrau	1 Fläche							
2	97	-3	22		2 Fläche	22,2						
3	90	5	41		3 Fläche		21,8					
4	81	14	51	Hellorange	4 Fläche			16,2				
5	68	27	64		5 Fläche				18,4			
6	55	48	60		6 Fläche					25,0		
7	46	60	50	Dunkelrot	7 Fläche						18,0	

Schichtisollinienfarbe

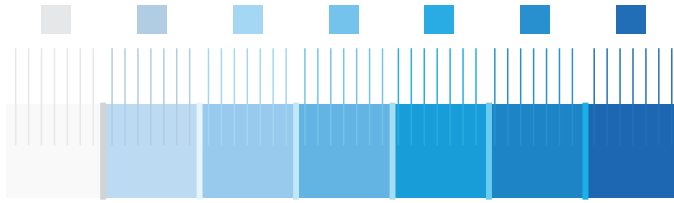
Nr.	L	a	b	Delta E - Fläche / Isolinie	1 Linie	2 Linie	3 Linie	4 Linie	5 Linie	6 Linie	7 Linie
1	95	0	0	1 Fläche	3,0						
2	93	-3	22	2 Fläche		4,0					
3	86	5	40	3 Fläche			4,1				
4	77	14	50	4 Fläche				4,1			
5	70	27	60	5 Fläche					4,5		
6	52	48	57	6 Fläche						4,2	
7	45	57	47	7 Fläche							4,4

Schichtgrenzfärbefarbe

Nr.	L	a	b	Delta E - Schichtlinie / Fläche	1 Fläche	2 Fläche	3 Fläche	4 Fläche	5 Fläche	6 Fläche	7 Fläche	
1	88	0	0	1 Linie	10,0	24,0						
2	84	10	55	2 Linie		37,8						
3	69	27	61	3 Linie			16,0					
4	57	44	62	4 Linie				20,3				
5	45	57	48	5 Linie					41,0			
6	37	58	39	6 Linie						18,0		
											29,4	14,4

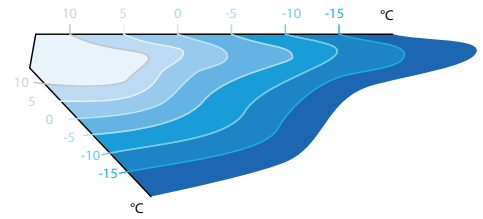
# Farbreihe Blau

Schichtisolien



Schichtflächen

Schichtgrenzisolien



## HSB / RGB - Farbreihe

	Hellgrau			Hellblau			Türkisblau			Hellgrau			Hellblau			Türkisblau																
Schichtflächenfarbe	H °	0	207	205	203	198	200	206	R	250	203	169	114	31	0	0	G	250	225	209	183	157	131	96	B	250	243	237	225	212	197	167
	S %	0	17	29	49	86	100	100	R	237	192	178	127	35	0	0	G	237	213	221	203	176	148	108	B	237	230	250	250	237	222	191
	B %	98	95	93	88	83	77	65	R	219	237	207	177	114	0	G	219	250	242	235	220	178	B	219	254	253	251	248	235			
Schichtisolienfarbe	H °	0	207	204	203	198	200	206	R	237	192	178	127	35	0	0	G	237	213	221	203	176	148	108	B	237	230	250	250	237	222	191
	S %	0	17	29	49	86	100	100	R	219	237	207	177	114	0	G	219	250	242	235	220	178	B	219	254	253	251	248	235			
	B %	93	90	98	98	93	87	78	R	219	237	207	177	114	0	G	219	250	242	235	220	178	B	219	254	253	251	248	235			
Schichtgrenzfärbefarbe	H °	7	194	197	193	193	195	R	219	237	207	177	114	0	G	219	250	242	235	220	178	B	219	254	253	251	248	235				
	S %	0	7	18	30	54	100	R	219	237	207	177	114	0	G	219	250	242	235	220	178	B	219	254	253	251	248	235				
	B %	86	100	99	98	97	92	R	219	237	207	177	114	0	G	219	250	242	235	220	178	B	219	254	253	251	248	235				

## Farbabstand

Schichtflächenfarbe

Nr.	L	a	b	Name
1	98	0	0	Grau
2	88	-5	-11	
3	82	-9	-18	
4	71	-14	-28	
5	60	-19	-38	
6	51	-12	-43	
7	39	-2	-46	Dunkles Blau

Delta E - Fläche	1 Fläche	2 Fläche	3 Fläche	4 Fläche	5 Fläche	6 Fläche	7 Fläche
1 Fläche							
2 Fläche	15,7						
3 Fläche		10,0					
4 Fläche			15,7				
5 Fläche				14,9			
6 Fläche					12,4		
7 Fläche						15,9	

Schichtisolienfarbe

Nr.	L	a	b
1	95	0	0
2	84	-5	-11
3	86	-10	-19
4	78	-15	-31
5	67	-21	-41
6	58	-13	-48
7	46	-1	-53

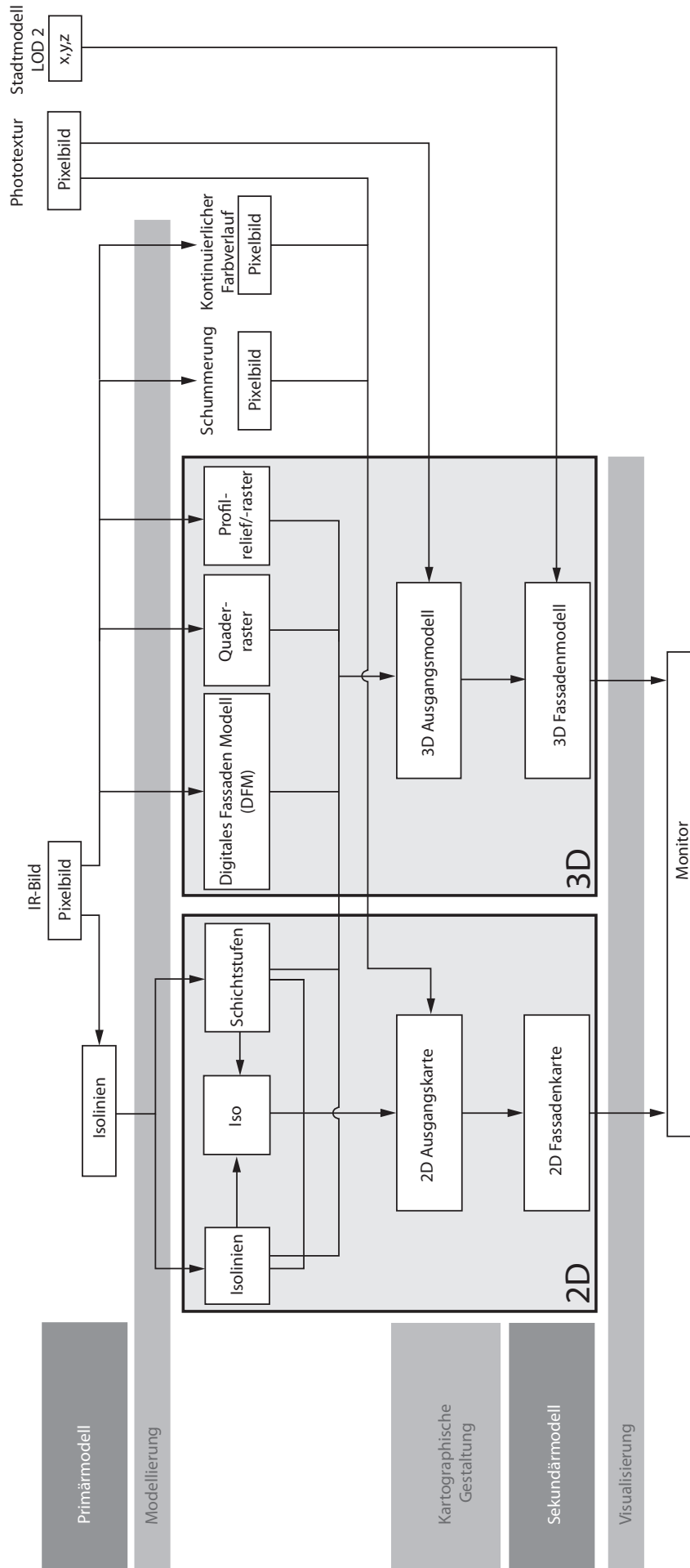
Delta E - Fläche / Isolnie	1 Linie	2 Linie	3 Linie	4 Linie	5 Linie	6 Linie	7 Linie
1 Fläche	3,0						
2 Fläche		4,0					
3 Fläche			4,2				
4 Fläche				7,7			
5 Fläche					7,9		
6 Fläche						8,7	
7 Fläche							9,9

Schichtgrenzfärbefarbe

Nr.	L	a	b
1	87	0	0
2	97	-4	-3
3	93	-10	-9
4	89	-16	-14
5	82	-26	-24
6	67	-24	-40

Delta E - Schichtlinie / Fläche	1 Fläche	2 Fläche	3 Fläche	4 Fläche	5 Fläche	6 Fläche	7 Fläche
1 Linie	11,0	12,1					
2 Linie		12,1	21,8				
3 Linie			14,2	29,3			
4 Linie				22,9	37,8		
5 Linie					27,0	39,0	
6 Linie						20,2	36,1

# 2D- und 3D-Kartenentwürfe





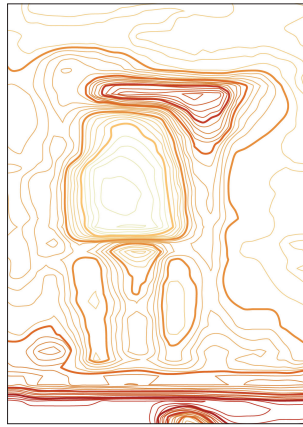
# 2D-Kartenentwürfe

## 2D-Ausgangskarten

### Isolinienkarte



7-stufige Isothermen

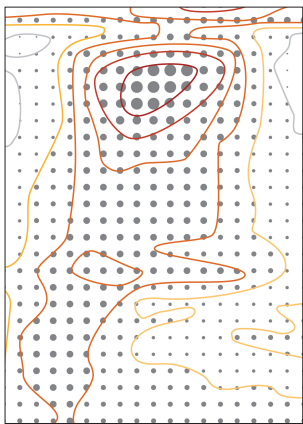


31-stufige Isothermen

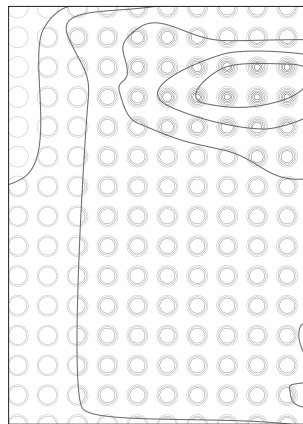


7-stufige Isothermen  
mit Variation über die Linienbreite

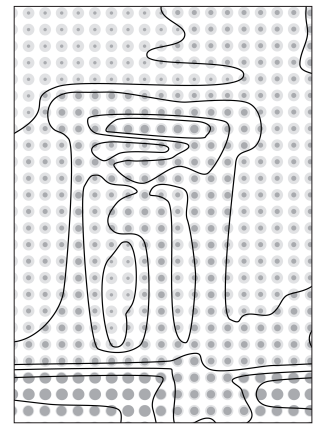
### Schichtstufenkarte



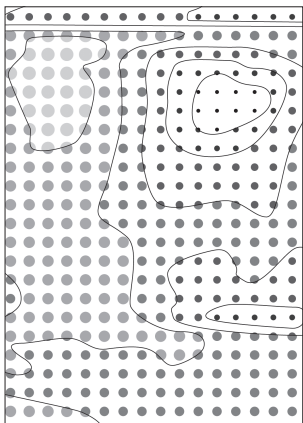
Farbisothermen und Flächenmuster  
über Punktgröße



Isothermen und Flächenmuster über  
Ringanzahl



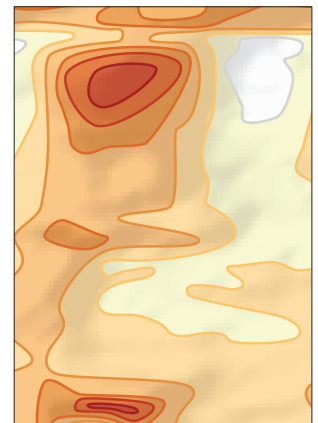
Isothermen und Flächenmuster über  
Referenzkreis und Punktgröße



Isothermen und Flächenmuster über  
Punktgröße und Grautonstufen



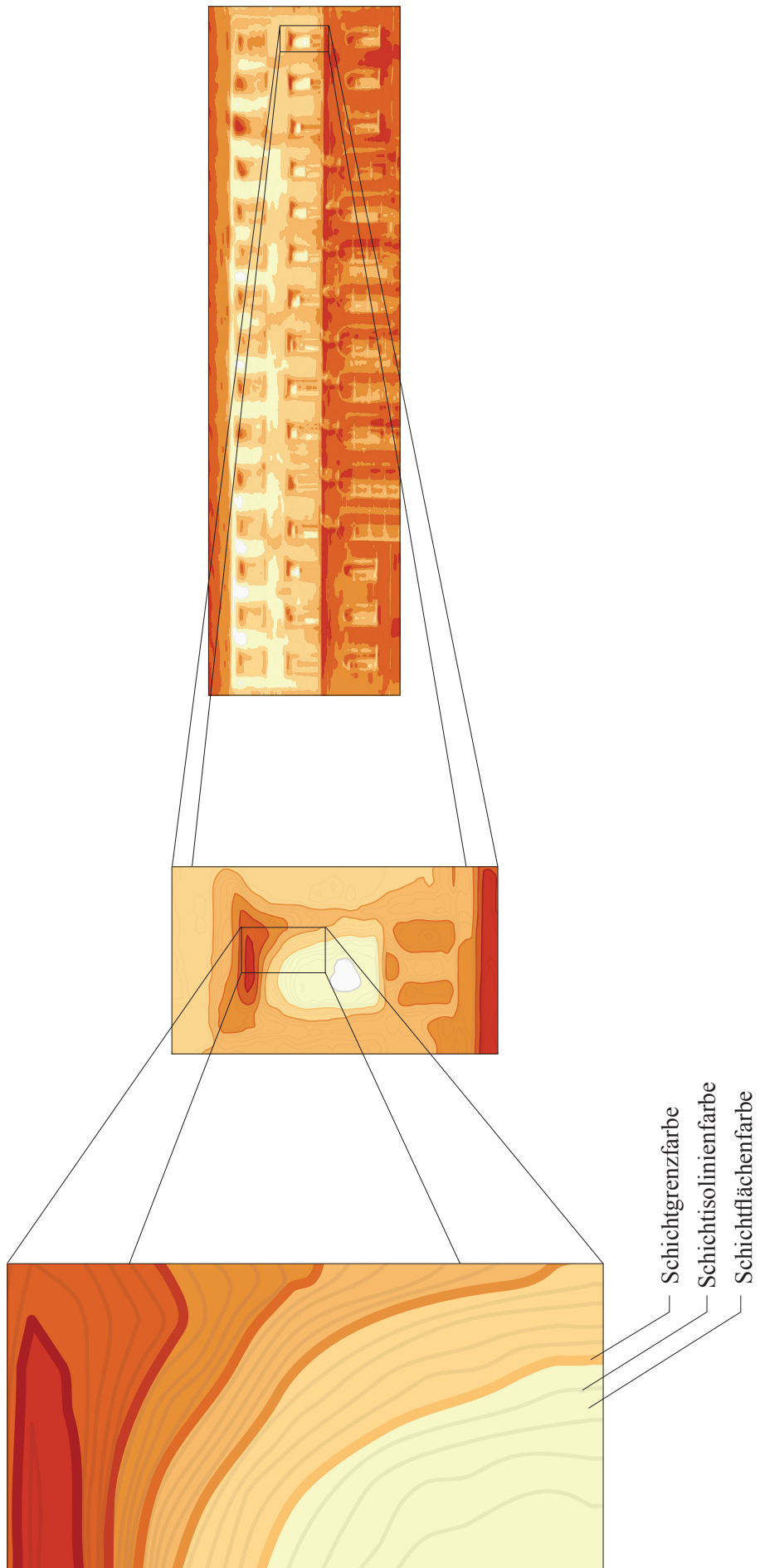
Isothermen und Vollfarbstufen



Isothermen und Vollfarbstufen mit  
hinterlegter Schummerung













































# 2D-Kartenentwürfe

## Isokarte



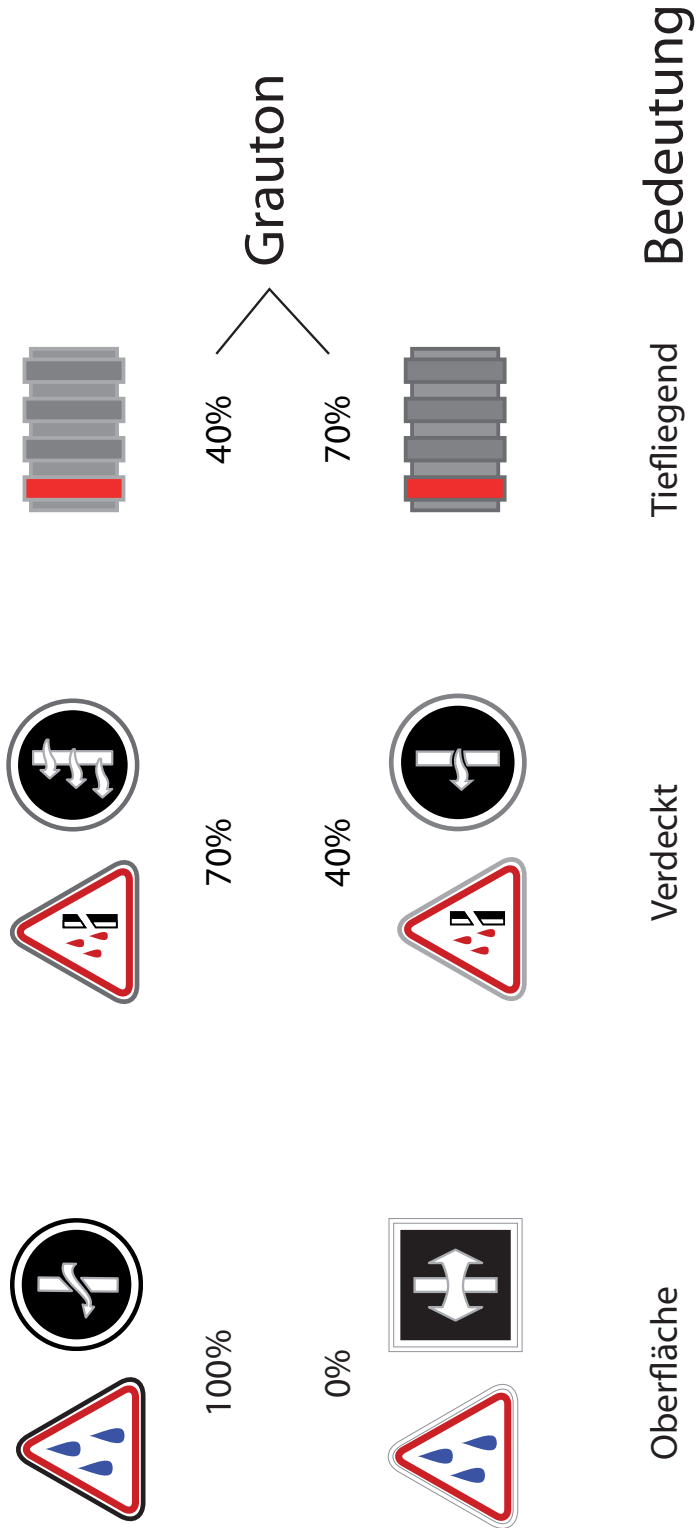
# 2D-Kartenentwürfe

## Kartenzeichen

Oberflächenrauheit	 Glatt	 Rau	 Grob		
Baustoff	 Beton	 Tonmineral	 Konglomerat	 Brekzie	 Glas
Fassadenelement	 Unterzug	 Blende	 Fenster	 Tür	
Aufheizverhalten (kJ/m <sup>2</sup> Kh <sup>1/2</sup> )	 Sehr stark >150	 Stark 51 - 150	 Mittel 21 - 50	 Gering < 20	
Äußere thermale Einstrahlung	 Reflexion gerichtet	 Reflexion diffus	 Absorbtion	 Transmission	
Wärmeleitfähigkeit	 Gering	 Mittel	 Groß		
Bauskonstruktion	 Einschaliges Putzmauerwerk	 Zweischaliges Sichtmauerwerk	 Hinterlüftetes Mauerwerk		
Wärmebrücke	 Konstruktion	 Material	 Massestrom	 Umgebung	 Geometrisch
Fassadenschaden	 Staunässe				
Rohrleitungsschaden	 Heizsystem	 Wassersystem			
Heizungssystem	 kalt	 lau warm	 warm	 heiss	 sehr heiss
					

# 2D-Kartenentwürfe

## Tiefeninformation über Grautonstufung in der Konturlinie

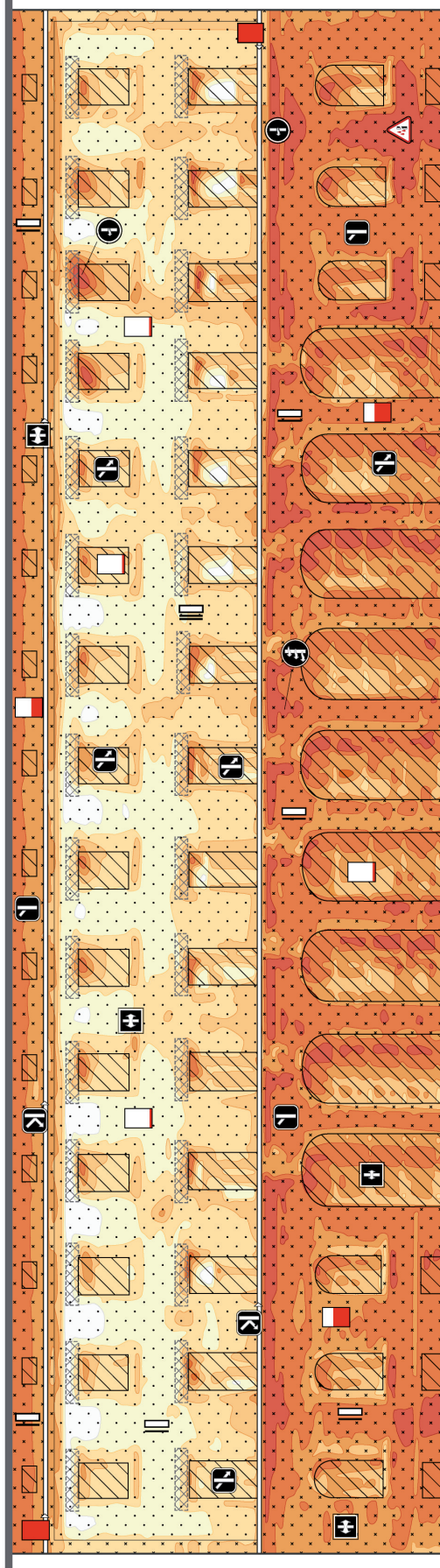


# 2D-Kartenentwürfe

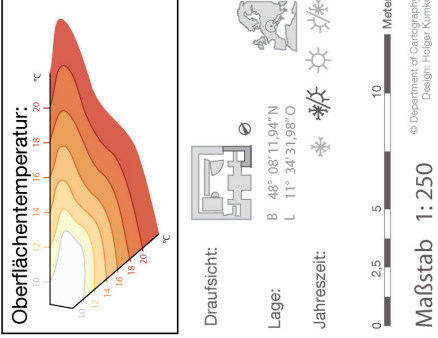
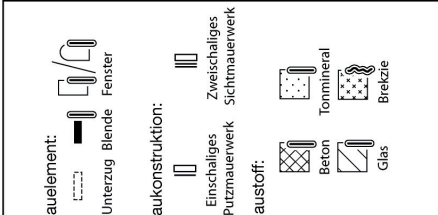
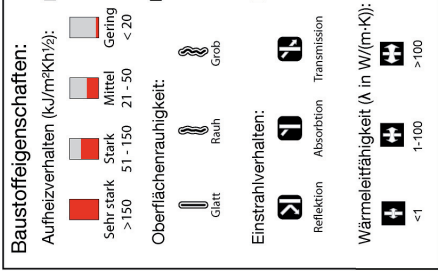
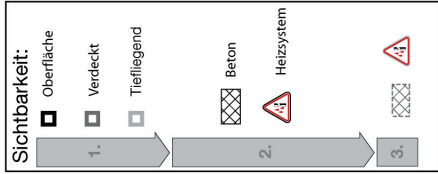
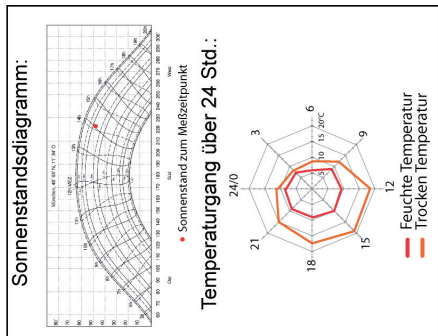
für Experten

## Thermalkarte – Emissionsverhalten

Meßdatum: 19.04.2006  
 Meßzeit: 14:00  
(MEZ)



Ostfassade - Bestellmeyer Gebäude - TU Stammgelände - München

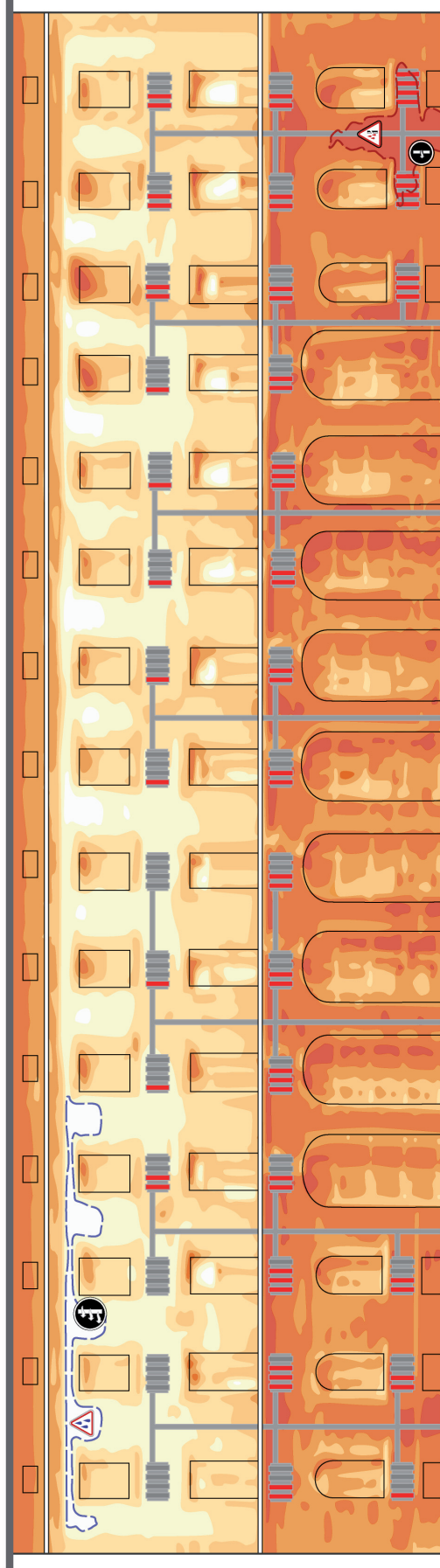


# 2D-Kartenentwürfe

für Laien

## Thermalkarte - Wärmequellen und Schäden

Meßdatum: 19.04.2006  
Meßzeit: 14:00  
(MEZ)



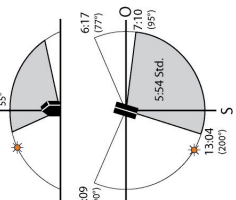
Ostfassade - Bestellmeyer Gebäude - TU Stammgelände - München

### Sonne:

Aufgang: 6:17 Uhr  
Untergang: 20:09 Uhr  
Bescheinigungsdauer: 5:54 Std.

Bescheinigungsrichtung: 135°

Meßpunkt: 14002201



### Sichtbarkeit:

1.  Oberfläche  
 Verdeckt  
 Tiefliegend

2.  Heizsystem  
 Heizkörper

### Baustoffeigenschaften:

Bauelement:  
Blende Fenster

Oberflächenrauhigkeit:  
Glatt

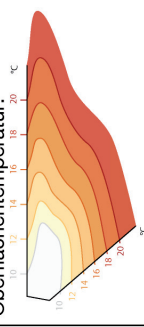
### Thermale Merkmale:

Wärmebrücke:  
Konstruktion Material

Rohrleitungs- / Schaden:  
Heizsystem Wassereintrag

Heizkörper / Heizleitung:  
kalt Lauwarm Warm Heiß Sehr Heiß Heizleitung

### Oberflächentemperatur:



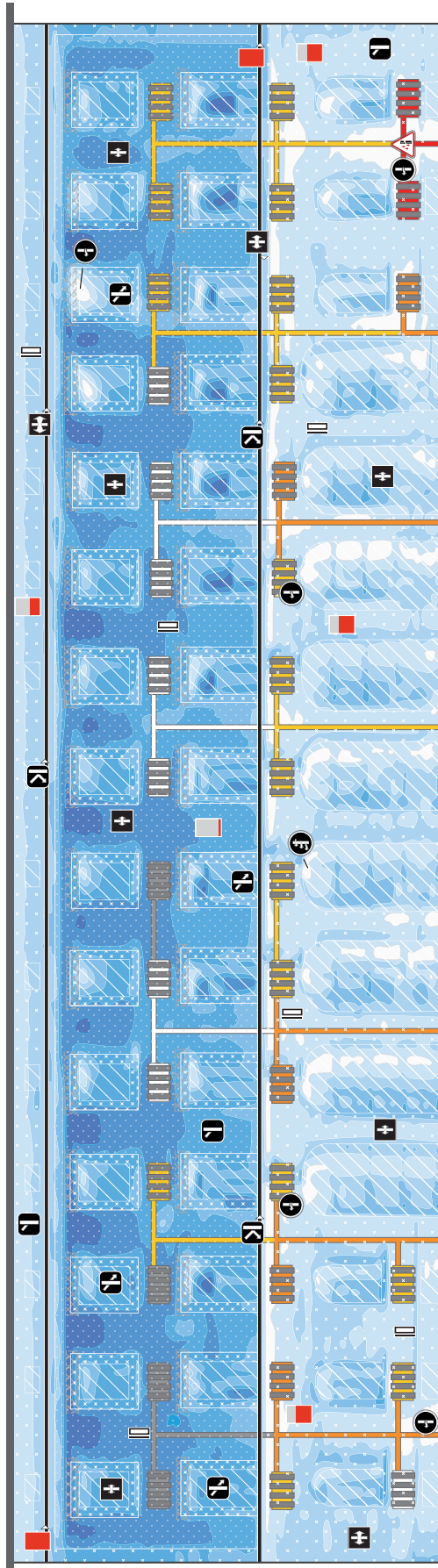
Draufsicht:  
Lage: B 48° 08' 11,94" N  
L 11° 34' 31,98" O

Jahreszeit:  
0 2.5 5 10 Meter  
Maßstab 1:250  
© Department of Cartography  
Design: Holger Kümke

# 2D-Kartenentwürfe für Experten

## Thermalkarte - Emissionsverhalten

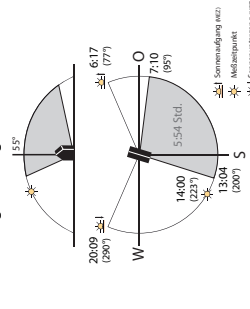
Meßdatum: 19.04.2006  
Meßzeit: 14:00  
(MEZ)



Ostfassade - Bestelmeyer Gebäude - TU Stammgelände - München

### Sonneneinstrahlung:

Bescheinigungsdauer: 5:54 Std.  
Bescheinigungsrichtung:



Wetter:  
Bewölkungsgrad: klar  
Trockentemperatur: 18°C  
Feuchtemperatur: 10°C

### Sichtbarkeit:

1. Oberfläche  
2. Verdeckt  
3. Tiefliegend



### Baustoffeigenschaften:

Aufheizverhalten (kJ/m²K½):  
Sehr stark >150  
Stark 51-150  
Mittel 21-50  
Gering <20

Oberflächenrauigkeit:  
glatt  
Rauh  
Grob

Einstrahlverhalten:  
Reflektion  
Absorption  
Transmission

Wärmeleitfähigkeit (λ in W/(m·K)):  
<1  
1-100  
>100

### Baukonstruktion:

Bauelement:  
Unterzug  
Blende  
Fenster

Baukonstruktion:  
Einschaliges Putzmauerwerk  
Zwischaliges Sichtmauerwerk

Baustoff:  
Einschaliges Putzmauerwerk  
Zwischaliges Sichtmauerwerk  
Beton  
Tonmineral  
Glas  
Brenzle

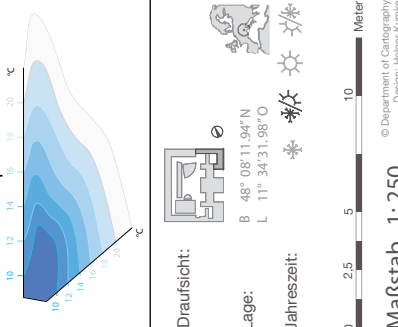
### Thermale Merkmale:

Wärmebrücke:  
Konstruktion  
Material

Rohrleitungsschaden:  
Heizsystem

Heizkörper / Heizleitung:  
kalt  
Lauwarm  
Warm  
Heiß  
Sehr heiß

### Oberflächentemperatur:



### 3D-Minimaldimension

Minimaldimensionen räumlicher Körper in einer virtuellen 3D-Umgebung mit einer Sichtbarkeitswahrscheinlichkeit von 80%.

Mindestgröße für Papier	$S'_{\min}$	[mm]
Entfernung zwischen Projektionsebene und Objekt	$D$	[m]
Kamerakonstante	$c$	[cm]
Sichtbarkeitswahrscheinlichkeit im Bildzentrum	$P_{S,\beta}$	[%]
Winkel zwischen Sehstrahl und Blickrichtung	$\beta$	[°]
Vergrößerungsfaktor	$K$	
Mittlerer Abbildungsmaßstabszahl	$M$	
Mindestgröße im Raum	$S_{\min}$	[m]

$S'_{\min}$ [mm]	$c$ [cm]	$P_{s,o}$	$K$
0,2	9	80%	1,66 (~ 1,7)

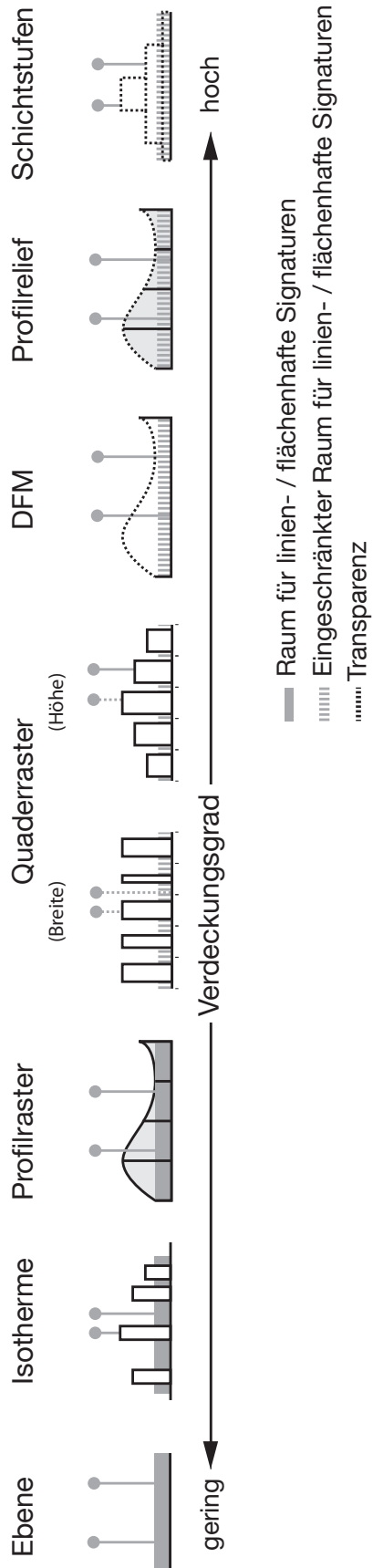
$S_{\min}$ [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,2	0,3	0,4
$M$	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	600	900	1200
$D$ [m]	3	5	8	11	14	16	19	22	24	27	54	81	108



# 3D-Kartenentwürfe

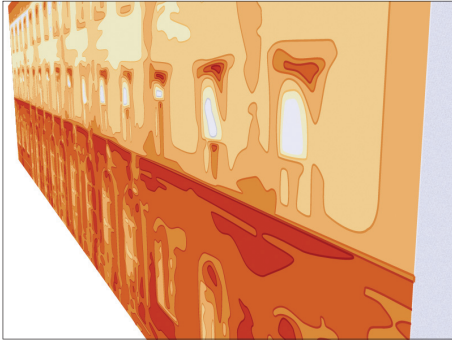
## Verdeckungsgrad der unterschiedlichen Kartentypen

### Ebene- und körperhafte kartenverwandte Darstellungen

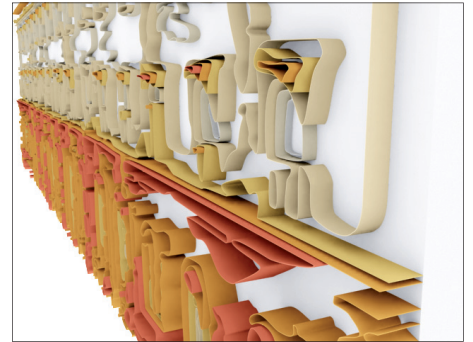


# 3D-Kartenentwürfe

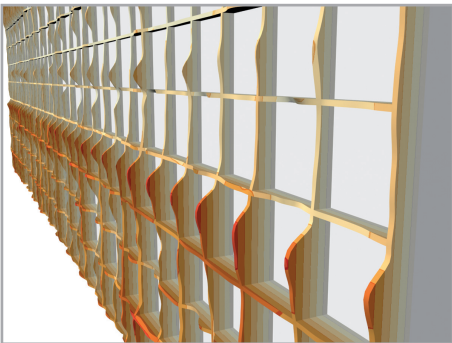
## 3D-Ausgangsmodelle



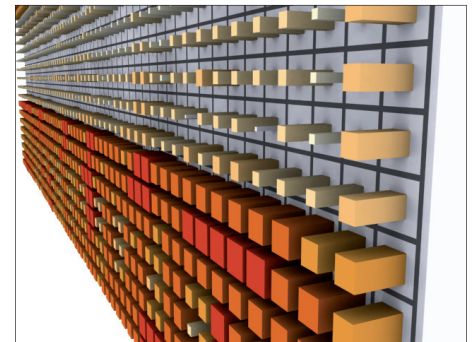
Ebene Schichtstufenkarte



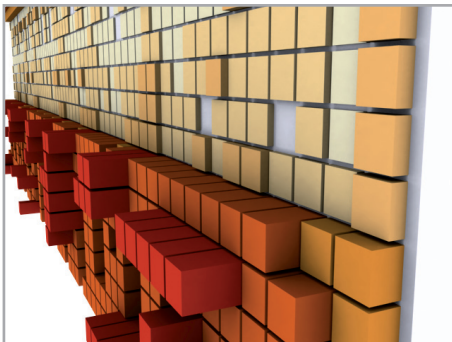
Isothermenkarte



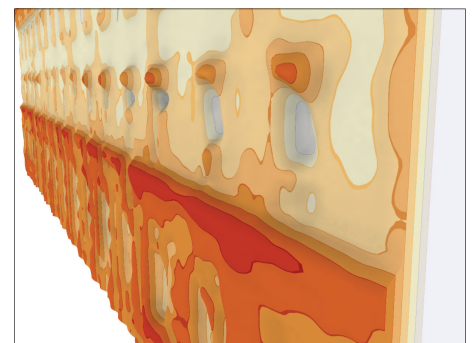
Profilrasterkarte



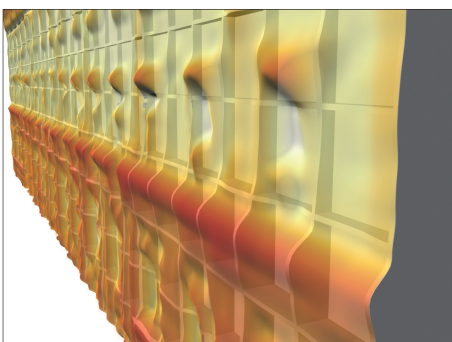
Quaderrasterkarte  
*mit Variation in der Breite*



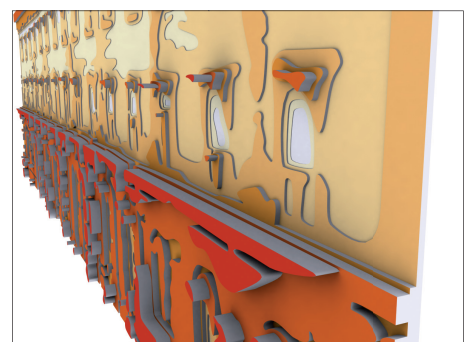
Quaderrasterkarte  
*mit Variation in der Höhe*



Digitales Fassaden Modell (DFM)



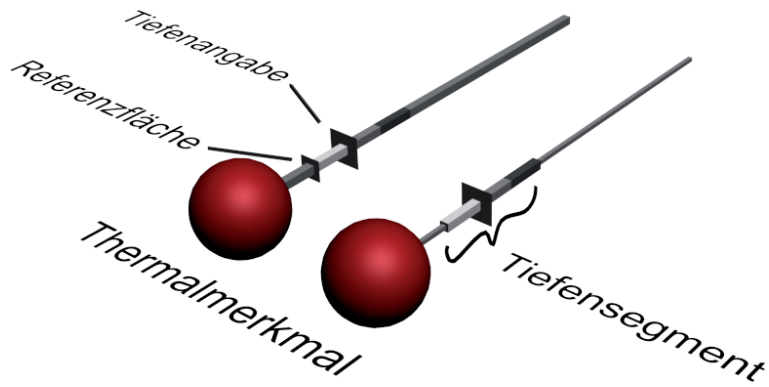
Profilreliefkarte



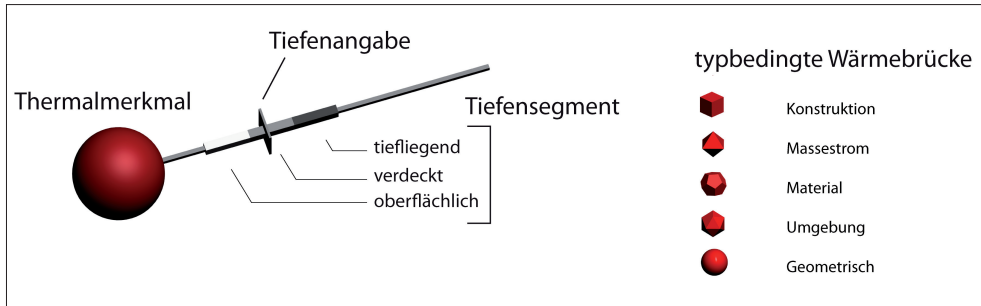
Schichtstufenkarte

# 3D-Kartenentwürfe

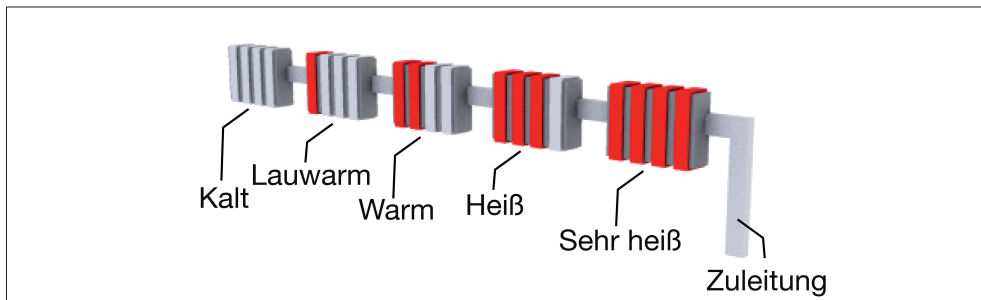
## Tiefenzeiger für punktuelle Signaturen



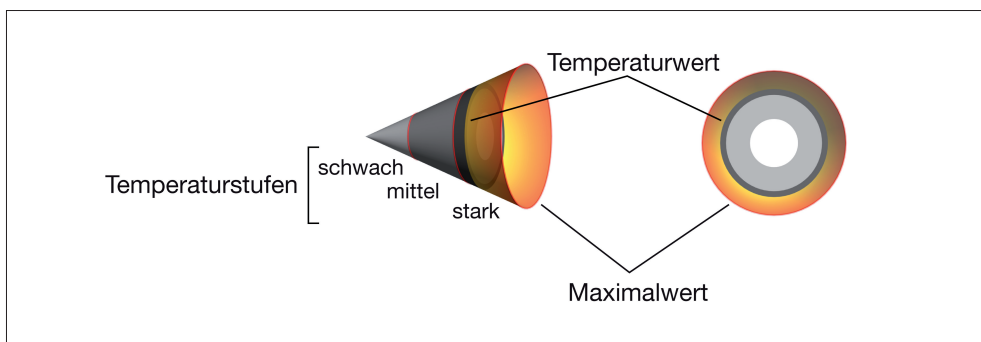
## Volumenhafte punktuelle Signaturen mit Wertebezug



Wärmebrücke für körperhafte Kartenentwürfe



Heizungssystem

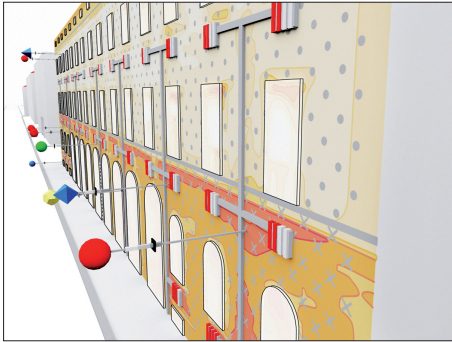


Wärmebrücke für ebene Kartenentwürfe

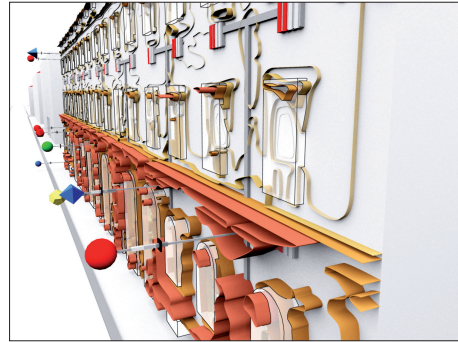
# 3D-Kartenentwürfe

mit volumenhaften Signaturen und Tiefenangaben

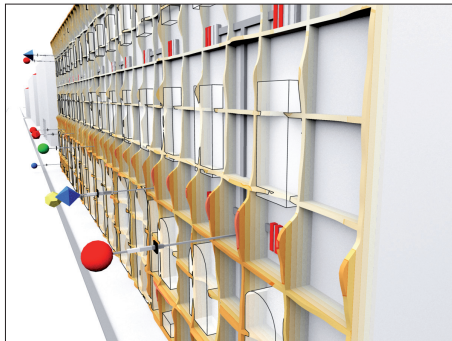
(halbtransparente Fenster mit Konturlinie als geschlossene oder offene Körper)



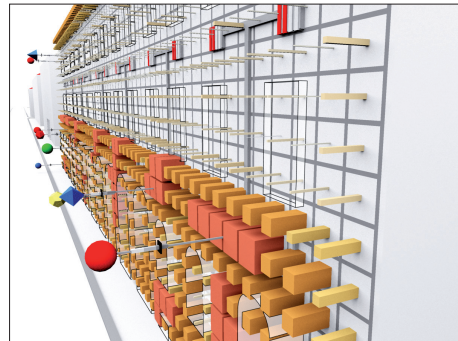
Ebene Schichtstufenkarte  
*mit Flächenmuster*



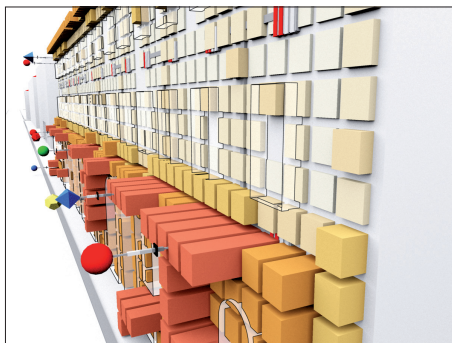
Isolinienkarte



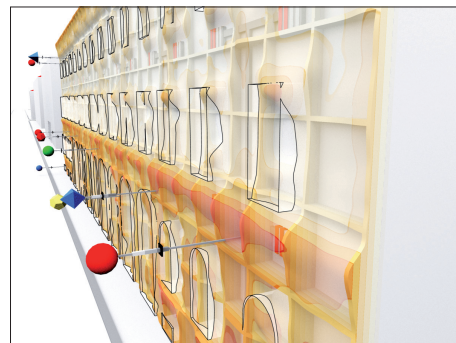
Profilrasterkarte



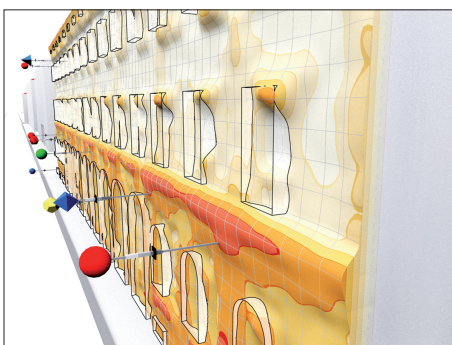
Quadrasterkarte  
*mit Variation in der Breite*



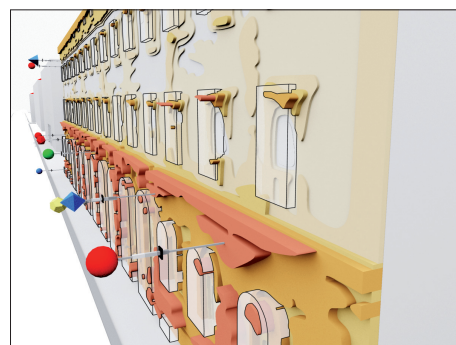
Quadrasterkarte  
*mit Variation in der Höhe*



Profilreliefkarte



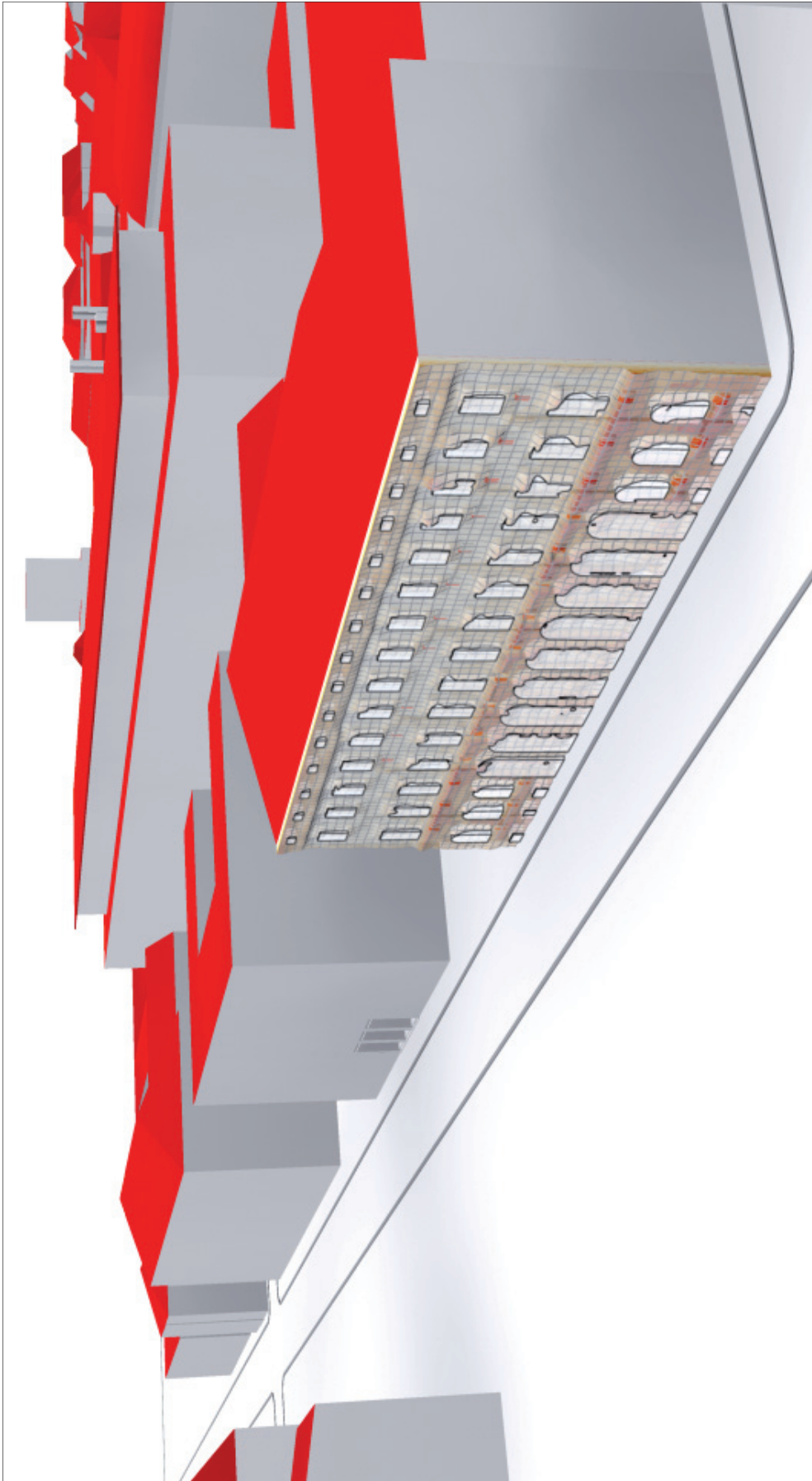
Digitales Fassaden Modell (DFM)  
*als Blockmodell mit Gitterlinien*



Schichtstufenkarte

## 3D-Kartenentwürfe

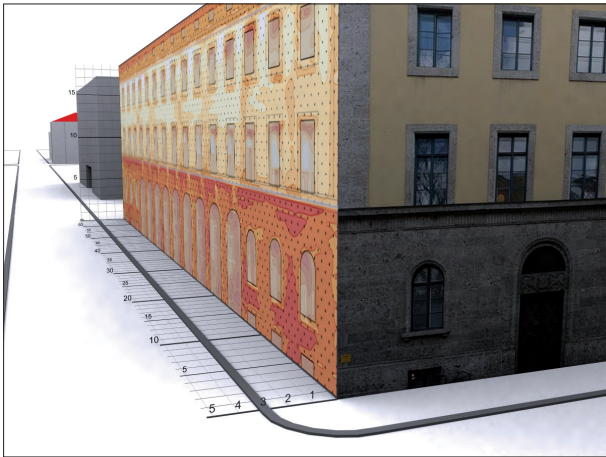
eingebettet in das 3D-Stadtmodell mit LOD 2



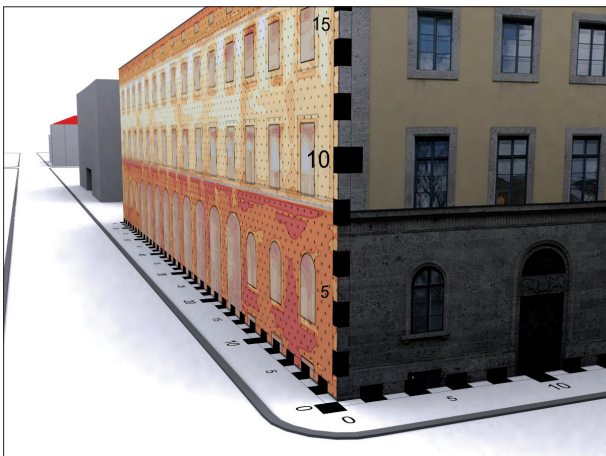
Profilverteikarte mit Heizkörper- und Fenstersignaturen

# 3D-Kartenentwürfe

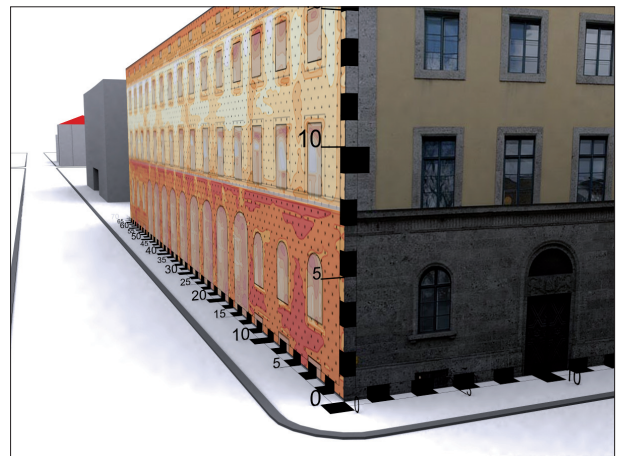
## Raumhelfer



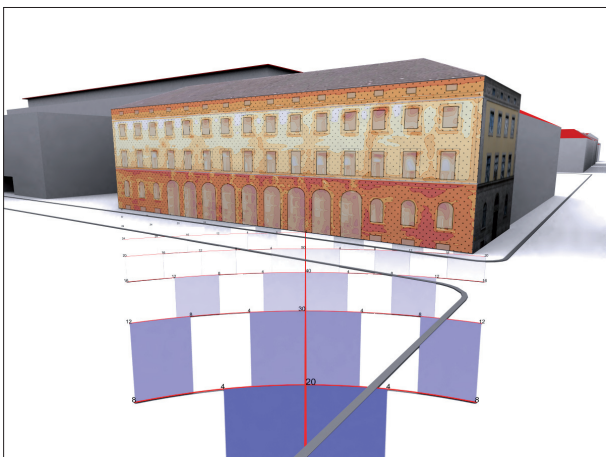
Perspektivisches Kantengitter



Perspektivischer Maßstabsbalken  
(liegende Nummerierung)



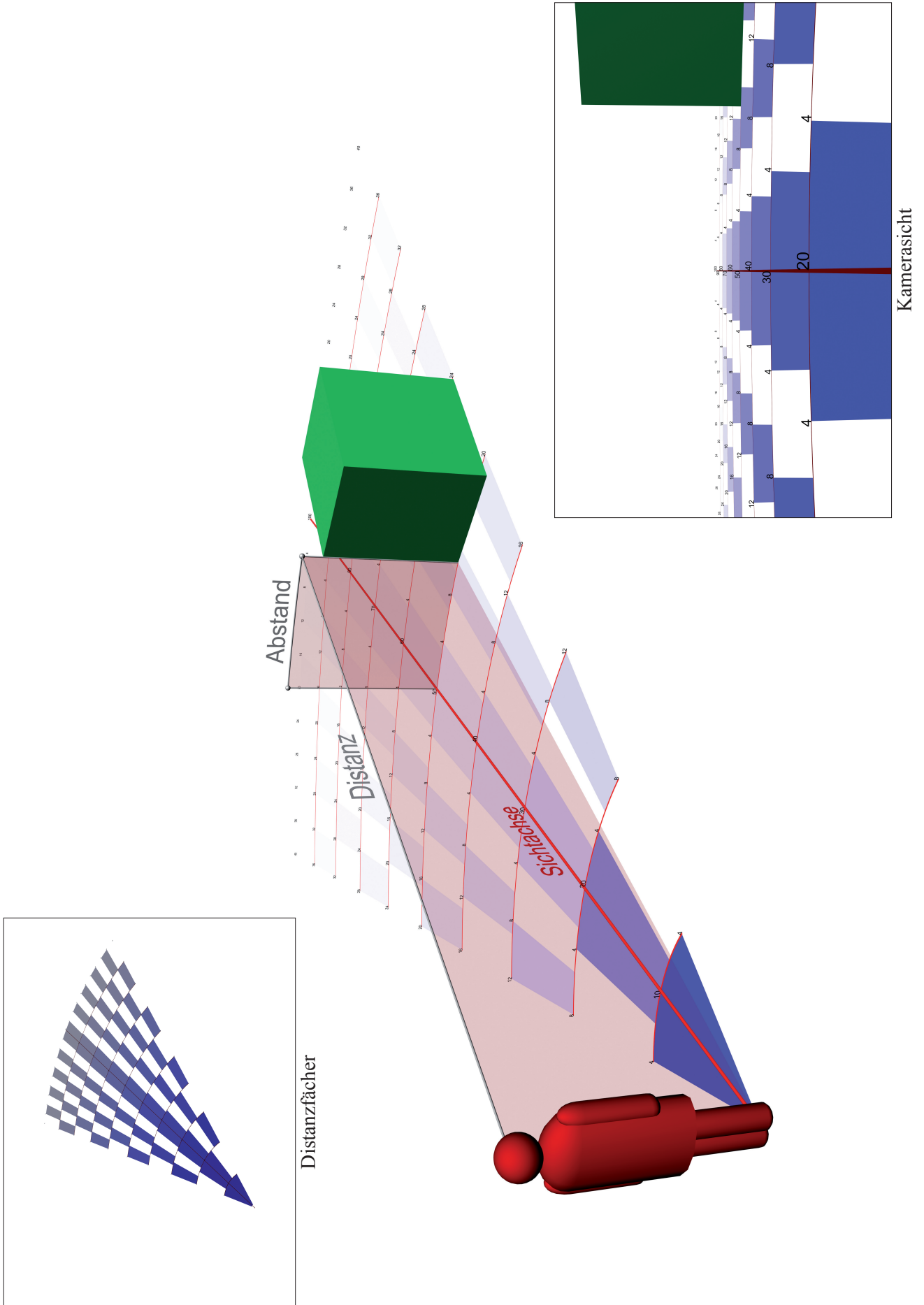
Perspektivischer Maßstabsbalken  
(stehende Nummerierung)



Symmetrischer Distanzfächer

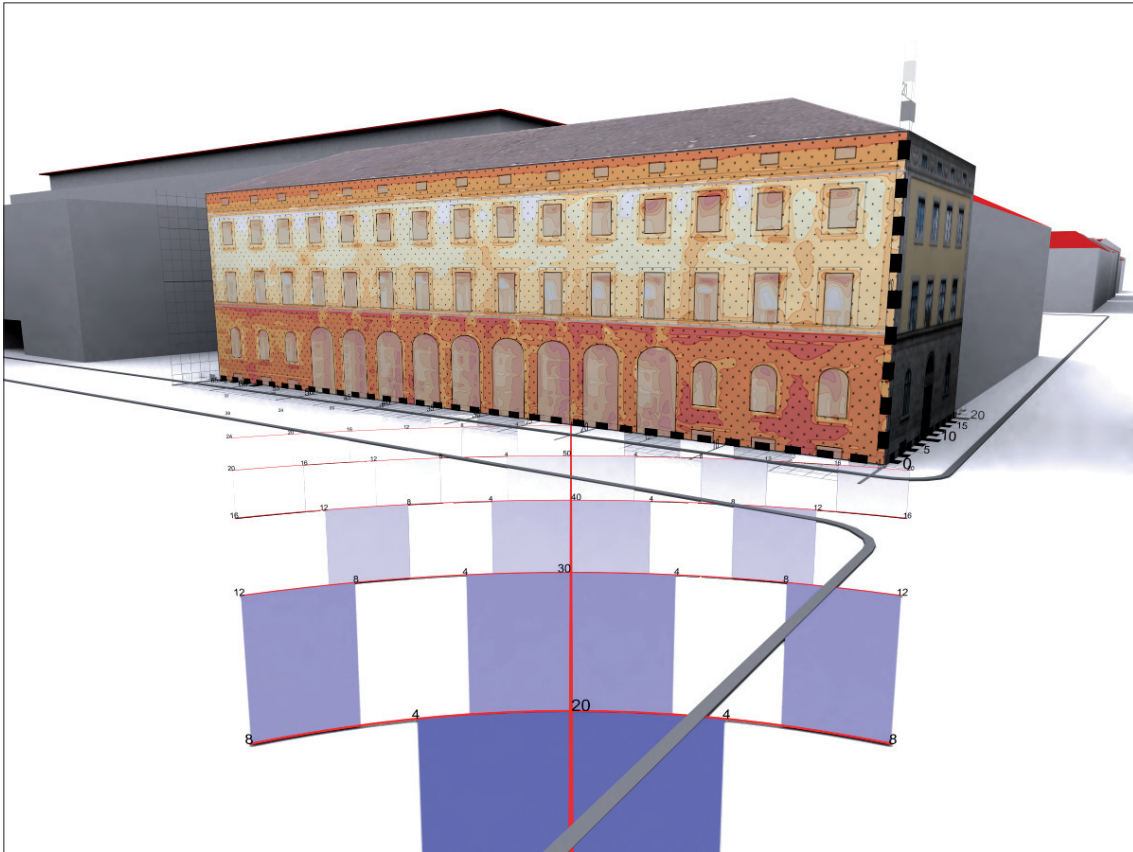
# 3D-Kartenentwürfe

## Zur Sichtachse symmetrischer Distanzfächer

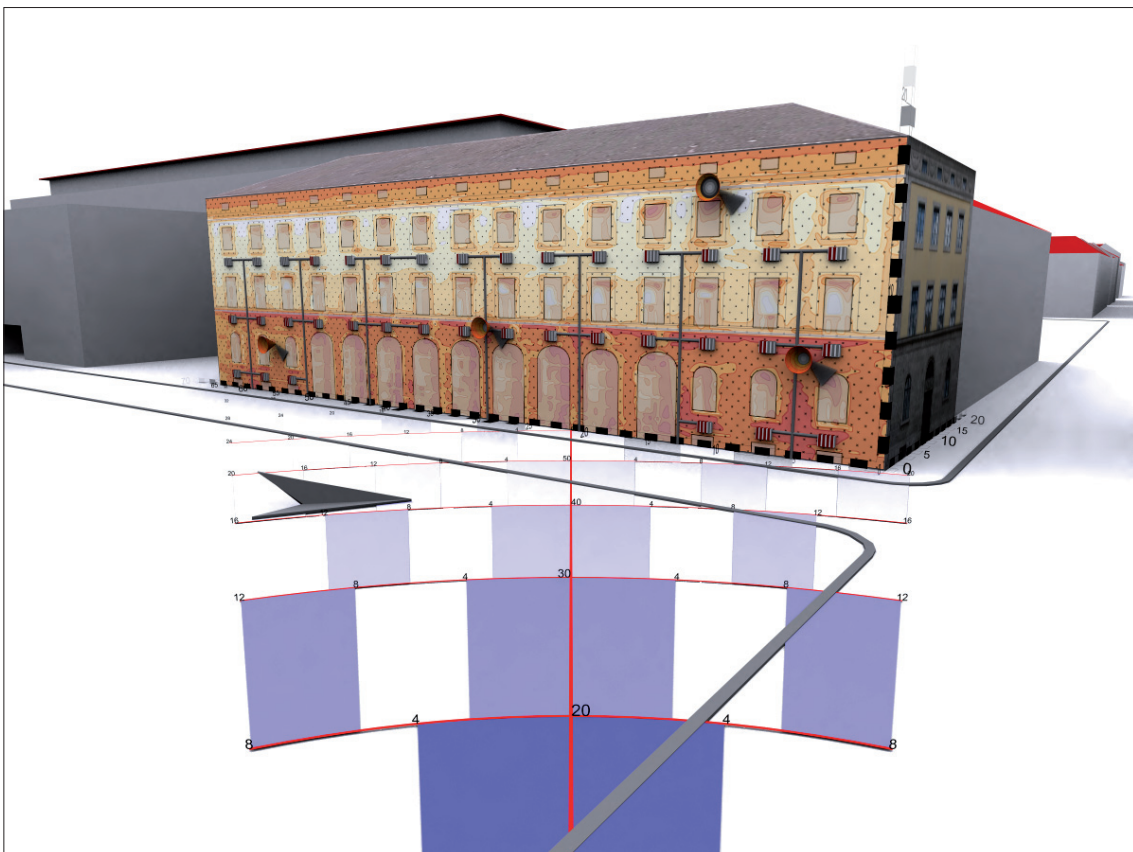


# 3D-Kartenentwürfe

## Raumhelfer in der Szene



Planarer Kartentyp mit Raumhelfern



Planarer Kartentyp mit Raumhelfern und volumenhaften Signaturen