

Alfred Nischwitz
Max Fischer
Peter Haberäcker

Computergrafik und Bildverarbeitung

**Alles für Studium und Praxis -
Bildverarbeitungswerkzeuge,
Beispiel-Software und interaktive
Vorlesungen online verfügbar**

Mit 378 Abbildungen

2., verbesserte und erweiterte Auflage



Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Zusammenhang Computergrafik - Bildverarbeitung	6
2.1 Bildverarbeitung auf programmierbarer Grafikhardware	7
2.2 Simulation von kameragesteuerten Geräten.	10
2.3 Bilddatencodierung	14
2.4 Bildbasiertes Rendering	19
Computergrafik	25
Interaktive 3D-Computergrafik	27
3.1 Harte Echtzeit	28
3.2 Weiche Echtzeit	31
Anwendungen interaktiver 3D-Computergrafik	32
4.1 Ausbildungs-Simulation	32
4.2 Entwicklungs-Simulation	34
4.3 Unterhaltung	36
4.4 Telepräsenz	36
4.5 Daten-Visualisierung	37
4.6 Augmented Reality.	38
4.7 Datenübertragung	39
Einführung in die 3D-Computergrafik mit OpenGL	41
5.1 OpenGL Kurzbeschreibung	43
5.2 Die OpenGL Rendering Pipeline.	45
5.2.1 Display Listen	46
5.2.2 Vertex-Operationen	46
5.2.3 Pixel-Operationen.	46
5.2.4 Textur-Speicher.	47
5.2.5 Rasterisierung.	47
5.2.6 Fragment-Operationen.	47

5.2.7	Bildspeicher	48j
5.3	Die OpenGL Kommando Syntax	48=
5.4	Ergänzende Literaturhinweise	49
Geometrische Grundobjekte		51
6.1	3D-Modellierungsmethoden	51
6.1.1	Planare Polygone	51
6.1.2	Gekrümmte Polygone	52
6.1.3	Volumendarstellung	53
6.1.4	Konstruktive Körpergeometrie	54
6.2	Geometrische Grundobjekte in OpenGL	54
6.2.1	Vertex-Definition in OpenGL	56
6.2.2	Grafik-Primitive in OpenGL	57
6.2.3	Programmierbeispiele	59
6.3	Tipps zur Verwendung der Grafik-Primitive	74
6.3.1	Rendering-Geschwindigkeit	74
6.3.2	Vertex Arrays	75
6.3.3	Konsistente Polygon-Orientierung	76
6.3.4	Koordinaten-Berechnungen offline	76
6.3.5	Oberflächen-Tessellierung	77
6.3.6	Lücken	77
6.3.7	Hinweise zum glBegin/glEnd-Paradigma	78
6.4	Modellierung komplexer 3D-Szenarien	79
Koordinatensysteme und Transformationen		80
7.1	Definition des Koordinatensystems	80
7.2	Transformationen im Überblick	81
7.3	Mathematische Grundlagen	83
7.3.1	Homogene Koordinaten	83
7.3.2	Transformations-Matrizen	84
7.4	Modell-Transformationen	86
7.4.1	Translation	86
7.4.2	Rotation	87
7.4.3	Skalierung	89
7.4.4	Reihenfolge der Transformationen	91
7.5	Augenpunkt-Transformationen	93
7.6	Projektions-Transformationen	94
7.6.1	Orthografische Projektion (Parallel-Projektion)	94
7.6.2	Perspektivische Projektion	95
7.6.3	Normierung	100
7.7	Viewport-Transformation	101
7.8	Matrizen-Stapel	103

	Verdeckung	108
	8.1 Der z-Buffer Algorithmus	109
	8.2 Die Implementierung des z-Buffer Algorithmus	112
	8.3 Einsatzmöglichkeiten des z-Buffer Algorithmus	113
	8.3.1 Entfernen aller Vorderteile	114
	8.3.2 Höhenkarten generieren	114
	8.3.3 Volumenmessung	116
	8.3.4 Oberflächenmessung	117
	8.3.5 Entfernungsmessung	118
	Farbe, Transparenz und Farbmischung	119
	9.1 Das Farbmodell in OpenGL	119
	9.2 Modelle der Farbdarstellung	122
	9.2.1 Der RGBA-Modus	122
	9.2.2 Der Farb-Index-Modus	122
	9.2.3 Wahl zwischen RGBA- und Farb-Index-Modus	123
	9.2.4 Farbspezifikation im RGBA-Modus	123
	9.2.5 Farbspezifikation im Farb-Index-Modus	126
	9.3 Transparenz und Farbmischung	127
	9.3.1 Farbmischung in OpenGL	127
	9.3.2 Beispiele für Farbmischungen	130
	9.3.3 Transparente Texturen	136
	9.3.4 3D-Probleme bei der Farbmischung	137
	Anti-Aliasing	140
	10.1 Aliasing-Effekte	140
	10.2 Gegenmaßnahmen - Anti-Aliasing	144
	10.2.1 Pre-Filterungs-Methode: Flächenabtastung	144
	10.2.2 Post-Filterungs-Methoden	146
m	Nebel und atmosphärische Effekte	151
	11.1 Anwendungen	151
	11.2 Nebel in OpenGL	153
	Beleuchtung und Schattierung	159
	12.1 Beleuchtungsmodelle	160
	12.1.1 Physikalische Optik und Näherungen der Computergrafik	160
	12.1.2 Lokale und globale Beleuchtungsmodelle	169
	12.1.3 Das Standard-Beleuchtungsmodell in OpenGL	171
	12.2 Schattierungsverfahren	191
it	12.2.1 Flat-Shading	192
1 i	12.2.2 Smooth-/Gouraud-Shading	193
	12.2.3 Phong-Shading	199

12.3	Programmierbare Shader.	2Ü
12.3.1	Shading Programmiersprachen	
12.3.2	Realisierung eines Phong-Shaders in Cg	
13	Texturen	2Ü
13.1	Foto-Texturen (Image Texturing).	21
13.1.1	Spezifikation der Textur.	21
13.1.2	Textur-Filter.	
13.1.3	Gauß-Pyramiden-Texturen (MipMaps).	231^a
13.1.4	Textur-Fortsetzungsmodus (Texture Wraps).	236
13.1.5	Mischung von Textur- und Beleuchtungsfarbe (Texture Environment)	239
13.1.6	Zuordnung von Texturkoordinaten.	242
13.1.7	Einschalten des Texture Mappings.	253
13.1.8	Textur-Objekte.	254
13.2	Mehrfach-Texturierung (Multitexturing).	256
13.3	Projektive Texturen (Projective Texture).	260
13.4	Umgebungs-Texturen (Environment Maps).	262
13.4.1	Sphärische Texturierung (Sphere Mapping).	263
13.4.2	Kubische Texturierung (Cube Mapping).	266
13.5	Relief-Texturierung (Bump Mapping).	270
13.6	Schatten-Texturierung (Shadow Mapping).	277
14	Animationen	279
14.1	Animation und Double Buffering.	279
14.2	Animationstechniken	283
14.2.1	Bewegung eines starren Objektes - Pfadanimation.	284
14.2.2	Bewegung von Gelenken eines Objektes - Artikulation.	286
14.2.3	Verformung von Oberflächen - Morphing	288
14.2.4	Bewegung von Objektgruppen: Schwärme und Partikelsysteme.	290
15	Beschleunigungsverfahren	293
15.1	Szenen Graphen.	296
15.2	Cull Algorithmen.	299
15.2.1	Viewing Frustum Culling	301
15.2.2	Occlusion Culling	303
15.2.3	Backface Culling	307
15.2.4	Portal Culling	308
15.2.5	Detail Culling	309
15.3	Level Of Detail (LOD).	310
15.3.1	Switch LOD.	312
15.3.2	Fade LOD.	313
15.3.3	MorphLOD.	314

15.4	Billboards	315
15.5	Multiprozessorsysteme	319
15.6	Geschwindigkeits-Optimierung	324
15.6.1	Leistungsmessung	324
15.6.2	Optimierungsmaßnahmen	329
	Literatur zu Teil I	334
I II	Bildverarbeitung	339
16	Digitale Bilddaten	341
16.1	Prinzipielle Vorgehensweise	341
16.1.1	Sensoren	341
16.1.2	Digitalisierung	342
16.1.3	Vorverarbeitung der Rohdaten	342
16.1.4	Berechnung von Merkmalen	342
16.1.5	Segmentierung des Bildes	343
16.1.6	Kompakte Speicherung der Segmente	343
16.1.7	Beschreibung der Segmente	343
16.1.8	Synthese von Objekten	343
16.1.9	Ableitung einer Reaktion	344
16.1.10	Schlussbemerkung zu Abschnitt 16.1	344
16.2	Unterabtastung und Quantisierung	344
16.3	Digitalisierung von Schwarz/Weiß-Bilddaten	348
16.4	Digitalisierung von Grautonbildern	352
16.5	Farbbilder	357
16.5.1	Farbe: Physikalische Aspekte	358
16.5.2	Farbe: Physiologische Aspekte	358
16.5.3	Das CIE-Farbdreieck	360
16.5.4	Das RGB-Farbmodell	363
16.5.5	Das CMY-Farbmodell	365
16.5.6	Das YIQ-Farbmodell	366
16.5.7	Das HSI-Farbmodell	366
16.5.8	Mathematisches Modell für Farbbilder	368
16.6	Multispektral- und mehrkanalige Bilder	370
16.7	Bildfolgen	373
16.8	Weitere mathematische Modelle für Bilder	375
16.8.1	Bilder als reelle Funktionen zweier reeller Variablen	375
16.8.2	Bilder als (diskrete) Funktionen zweier diskreter Variablen	376
16.8.3	Bilder als Zufallsprozesse	376

16.9	Bildliche Reproduktion	
	von digitalisierten Bildern	380
16.9.1	Geräte zur Bilddarstellung	380
16.9.2	Ausdrucken der Grauwerte.	381
16.9.3	Ausgabe von logischen Bildern	383
16.9.4	Zeilendruckerausgabe von Grauwertbildern.	384
16.9.5	Halbtonverfahren	385
16.10	Datenreduktion und Datenkompression.	388
16.11	Charakterisierung digitalisierter Bilder.	389
16.11.1	Mittelwert und mittlere quadratische Abweichung	389
16.11.2	Histogramme.	392
16.11.3	Entropie.	394
16.11.4	Grauwertematrix (co-occurrence-Matrix).	396
17	Modifikation der Grauwerte	399
17.1	Anwendungen.	399
17.2	Grundlagen der Grauwerttransformation.	400
17.3	Lineare Skalierung	401
17.4	Äquidensiten (<i>gray level slicing</i>).	406
17.5	Erzeugen von Binärbildern.	412
17.6	Logarithmische und exponentielle Skalierung.	419
17.7	Ebenen der Grauwerte.	421
17.8	Grauwertskalierung mit Hochpassfilterung.	426
17.9	Kalibrierung der Grauwerte.	428
17.10	Berechnung einer neuen Grauwertmenge.	432
17.11	Rekonstruktion des höchstwertigen Bit	434
17.12	Differenzbildung.	434
18	Operationen im Ortsbereich	438
18.1	Anwendungen.	440
18.2	Grundlagen: Filteroperationen im Ortsbereich.	440
18.3	Glätten der Grauwerte eines Bildes.	443
18.4	Differenzenoperatoren.	448
18.5	Elimination isolierter Bildpunkte.	453
18.6	Elimination gestörter Bildzeilen.	454
18.7	Bildakkumulation bei Bildfolgen.	456
19	Mathematische Morphologie	457
19.1	Anwendungen.	457
19.2	Grundlagen: Mathematische Morphologie.	457
19.3	Mediän Filter.	461
19.4	Dilatation und Erosion im Binärbild.	463
19.5	Morphologie im Grauwertbild.	465

20 Kanten und Linien	469
20.1 Anwendungen	469
20.2 Grundlegendes über Kanten und Linien	469
20.3 Einfache Verfahren zur Kantenextraktion	474
20.4 Parallele Kantenextraktion	475
20.5 Gradientenbetrag und Gradientenrichtung	480
20.6 Der Canny-Kantendetektor	486
20.7 Kanten und Linien mit morphologischen Operationen	490
20.7.1 Extraktion des Randes von Segmenten	490
20.7.2 Verarbeitung von Linien	492
20.8 Skelettierung mit morphologischen Operationen	492
20.9 Skelettierung mit der Euler'schen Charakteristik	499
20.10 Relaxation	502
20.11 Houghtransformation	506
20.12 Verallgemeinerte Houghtransformation	512
20.12.1 Parametrisierung der Referenzstruktur	512
20.12.2 Akkumulierende Abbildung der Merkmalspunkte	513
20.12.3 Auswertung des Akkumulators	513
20.13 Erweiterte Houghtransformation	514
20.13.1 Erweiterte Houghtransformation der Randpunkte	514
20.13.2 Erweiterung auf flächenhaft gegebene Segmente	519
20.14 Sequentielle Kantenextraktion, Linienverfolgung	521
20.15 Abschließende Bemerkungen zu Kanten und Linien	526
21 Operationen im Frequenzbereich	527
21.1 Anwendungen	527
21.2 Lineare Approximation	527
21.3 Trigonometrische Approximationsfunktionen	530
21.4 Diskrete zweidimensionale Fouriertransformation	532
21.5 Digitale Filterung im Ortsfrequenzbereich	534
21.6 Zusammenhang mit dem Ortsbereich	536
21.7 Logarithmische Filterung	542
21.8 Inverse und Wiener Filterung	542
21.9 Diskrete, zweidimensionale Cosinustransformation	543
22 Modifikation der Ortskoordinaten	547
22.1 Anwendungen	547
22.2 Grundlegende Problemstellung	547
22.3 Vergrößerung, Verkleinerung	548
22.4 Affine Abbildungen	551

22.5	Interpolation mit Polynomen	552
22.5.1	Polynome	552
22.5.2	Ausgleichsrechnung	555
22.5.3	Beurteilung der Qualität	556
22.5.4	Vermessung der Passpunkte	559
22.6	Abschließende Bemerkungen	560
23	Szenenanalyse	561
23.1	Einleitung, Beispiele, Merkmale	561
24	Merkmale: Grauwert und Farbe	567
24.1	Anwendungen	567
24.2	Merkmal: Grauwert	568
24.3	Merkmal: Farbe	570
24.4	Reduktion der Farben in einem Farbbild durch Vorquantisierung	573
24.5	Indexbilder	574
24.5.1	Die Farbhäufigkeitsverteilung eines Farbbildes	576
24.5.2	Erstellen einer Farb-Look-Up-Tabelle	578
24.5.3	Abbildung der Farben des Originalbildes in die Farbtabelle	580
24.5.4	Segmentierung des Originalbildes	581
24.5.5	Segmentierung des Originalbildes mit Dithering	582
24.5.6	Unüberwachte Klassifikatoren zur Reduktion der Farben	583
25	Merkmale aus mehrkanaligen Bildern	585
25.1	Anwendungen	585
25.2	Summe, Differenz, Ratio	585
25.3	Verknüpfung von Kanälen bei logischen Bildern	589
25.4	Die Hauptkomponententransformation	589
26	Merkmale aus Bildfolgen	597
26.1	Anwendungen	597
26.2	Akkumulation und Differenz	598
26.3	Merkmal: Bewegung	600
26.4	Differentielle Ermittlung von Verschiebungsvektoren	603
26.5	Blockmatching	605
27	Merkmale aus Umgebungen: Texturen	611
27.1	Anwendungen	611
27.2	Grundlagen zu Texturmerkmalen	611
27.3	Streuung (Varianz)	613

27.4	Gradient	613
27.5	Kantendichte.	615
27.6	Autokorrelation.	618
27.7	Abschlussbemerkung zu den einfachen Texturmaßen.	618
28	Gauß- und Laplace-Pyramiden	621
28.1	Anwendungen	621
28.2	Begriffe aus der Signaltheorie.	622
28.3	Motivation für Gauß- und Laplace-Pyramiden.	623
28.4	Der REDUCE-Operator.	624
28.5	Der EXPAND-Operator.	625
28.6	Rekonstruktion des Originalbildes.	629
28.7	Implementierung des REDUCE-Operators.	632
28.8	Implementierung des EXPAND-Operators.	635
28.9	Frequenzverhalten und Wahl des freien Parameters a	638
28.10	Anwendungsbeispiele zu den Laplace-Pyramiden	642
28.10.1	Verwendung einzelner Schichten.	642
28.10.2	Mosaicing.	642
28.10.3	Multifokus.	645
28.10.4	Glättungsoperationen in Laplace-Pyramiden	648
28.10.5	Texturen und Segmentierung	648
29	Scale Space Filtering	663
29.1	Anwendungen	663
29.2	Grundlagen: Fraktale Geometrie.	663
29.3	Implementierung des Scale Space Filtering.	669
29.3.1	Ermittlung der Größe der Grundtextur.	672
29.3.2	Ermittlung der Gauß-Filterkerne.	673
29.3.3	Berechnung der Oberflächen der Grauwertfunktion.	675
29.3.4	Berechnung des Skalenparameters.	675
29.3.5	Beispiele und Ergebnisse.	676
30	Baumstrukturen	681
30.1	Anwendungen.	681
30.2	Aufbau von Baumstrukturen	681
30.3	Regionenorientierte Bildsegmentierung mit quad trees.	687
31	Segmentierung und numerische Klassifikation	696
31.1	Grundlegende Problemstellung	696
31.2	Klassifizierungsstrategien überwacht	700
31.3	Klassifizierungsstrategien unüberwacht	702
31.4	Überwachtes und unüberwachtes Lernen.	706

31.5	<i>Der Minimum-Distance-Klassifikator.</i>	706
31.6	<i>Maximum-Likelihood-Klassifikator.</i>	714
31.7	Der Quader-Klassifikator.	719
31.8	Beurteilung der Ergebnisse.	722
31.9	Ergänzungen.	723
32	Klassifizierung mit neuronalen Netzen	724
32.1	Grundlagen: Künstliche neuronale Netze.	724
32.1.1	Prinzipieller Aufbau.	724
32.1.2	Adaline und Madaline.	725
32.1.3	Das Perceptron.	730
32.1.4	Backpropagation.	732
32.2	Neuronale Netze als Klassifikatoren.	735
32.2.1	Verarbeitung von Binärbildern.	736
32.2.2	Verarbeitung von mehrkanaligen Bildern.	742
33	Segmentierung mit Fuzzy Logic	749
33.1	Anwendungen.	749
33.2	Grundlagen: Fuzzy Logic.	749
33.2.1	Einführende Beispiele.	749
33.2.2	Definitionen und Erläuterungen.	751
33.3	Fuzzy Klassifikator.	758
34	Run-Length-Coding	764
34.1	Anwendungen.	764
34.2	Run-Length-Codierung.	766
34.2.1	Prinzipielle Problemstellung und Implementierung.	766
34.2.2	Vereinzelung von Segmenten.	769
34.2.3	Effiziente Vereinzelung mit Union-Find-Algorithmen.	773
35	Einfache segmentbeschreibende Parameter	776
35.1	Anwendungen.	776
35.2	Flächeninhalt.	777
35.3	Flächenschwerpunkt.	777
35.4	Umfang.	779
35.5	Kompaktheit.	779
35.6	Orientierung.	779
35.7	Fourier-Transformation der Randpunkte.	781
35.8	Chain-Codierung.	782
35.9	Momente.	784
35.10	Euler'sche Charakteristik.	790
35.11	Auswahl mit morphologischen Operationen.	791
35.12	Segmentbeschreibung mit Fuzzy Logic.	792

36 Das Strahlenverfahren	793
36.1 Anwendungen	793
36.2 Prinzipieller Ablauf des Strahlenverfahrens	794
36.3 Aufbau des Merkmalsvektors für ein Segment	795
36.4 Klassifizierungs- / Produktionsphase	800
36.5 Strahlenverfahren: Ein Beispiel	800
37 Neuronale Netze und Segmentbeschreibung	804
37.1 Anwendungen	804
37.2 Prinzipieller Ablauf	804
37.3 Trainingsdaten und Training	806
37.4 Die Produktions- (Recall-) Phase	807
37.5 Ein Beispiel: Unterscheidung von Schrauben	807
38 Kaiman-Filter	811
38.1 Grundidee	811
38.2 Anwendungen	812
38.2.1 Tracking	812
38.2.2 3D-Rekonstruktion aus Bildfolgen	817
38.2.3 Bilddatencodierung	818
38.3 Theorie des diskreten Kaiman-Filters	820
38.3.1 Das System	820
38.3.2 Die Messung	820
38.3.3 Die Schätzfehler-Gleichungen	820
38.3.4 Optimales Schätzfilter von Kaiman	821
38.3.5 Gleichungen des Kaiman-Filters	822
38.3.6 Das erweiterte Kaiman-Filter (EKF)	824
38.4 Konkrete Beispiele	825
38.4.1 Schätzung einer verrauschten Konstante	826
38.4.2 Schätzung einer Wurfparabel	829
38.4.3 Bildbasierte Navigation	832
39 Zusammenfassen von Segmenten zu Objekten	840
39.1 Bestandsaufnahme und Anwendungen	840
39.2 Einfache, heuristische Vorgehensweise	843
39.3 Strukturelle Verfahren	845
39.3.1 Die Mustererkennungskomponente	847
39.3.2 Die statische und dynamische Wissensbasis	848
39.3.3 Die Reaktionskomponente	849
39.3.4 Die Verwaltungskomponente	849
39.3.5 Die Interaktionskomponente	849
39.3.6 Die Dokumentationskomponente	850
39.3.7 Ein Beispiel	850