



Marius
Apetri

3D-Grafik mit **OpenGL**

Das umfassende Praxis-Handbuch



inklusive CD-ROM

Marius Apetri

OpenGL

Das umfassende Praxis-Handbuch



mitp

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bei der Herstellung des Werkes haben wir uns zukunftsbewusst für umweltverträgliche und wiederverwertbare Materialien entschieden. Der Inhalt ist auf elementar chlorfreiem Papier gedruckt.

ISBN 978-3-8266-5512-8

1. Auflage 2010

E-Mail: kundenbetreuung@hjr-verlag.de

Telefon: +49 89/2183-7928

Telefax: +49 89/2183-7620

www.mitp.de

© 2010 mitp, eine Marke der Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH
Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg

Dieses Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Lektorat: Sabine Schulz

Sprachkorrektur: Petra Heubach-Erdmann

Satz: III-satz, Husby, www.drei-satz.de

Druck: Beltz Druckpartner GmbH und Co. KG, Hemsbach

Coverbild: © gl0ck – Fotolia.com

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	15
Teil I Grundlagen der OpenGL-Programmierung	25
1 Programmsoftware und Grafikhardware	27
1.1 Parallele Durchführung von Berechnungen	27
1.1.1 Der nicht programmierbare Grafikprozessor	28
1.2 Der OpenGL-Standard	29
1.2.1 Das Grundprinzip des OpenGL-Standards	30
1.2.2 Richtlinien für die Benennung von Funktionen	30
1.2.3 OpenGL-Datentypen	31
1.2.4 Weiterentwicklung des OpenGL-Standards	33
1.3 Grundarchitektur der Grafikkarte	35
1.3.1 Der Videospeicher	35
1.3.2 Die Position eines Pixels	36
2 Darstellung von Punkten	39
2.1 Angabe räumlicher Positionen	40
2.2 Auswahl geeigneter OpenGL-Funktionen	42
2.3 Zusammenwirken von Programmsoftware und Grafikhardware	45
2.4 Die gepufferte Ausgabe von OpenGL	46
2.4.1 Synchronisation von Darstellungsvorgängen	49
2.5 Löschen des Bildschirms	51
2.6 Die Arrayform von OpenGL-Funktionen	52
2.6.1 Initialisierung des Zufallszahlengenerators	56
2.7 Benutzerdefinierte Form und Größe von Punkten	57
2.7.1 Glättung von Punkten unter Verwendung des Alphawerts	58
2.7.2 Fehlerbehandlung	60
2.7.3 Benutzerdefinierte Steuerung der Darstellungsgenauigkeit	60
2.8 Besprechung der Übungsaufgaben	63
3 Globale Zustände	71
3.1 Abfrage globaler Zustände	71
3.2 Effiziente Sicherung globaler Zustände	73
3.2.1 Der Begriff des Stapels	73
3.2.2 Der Attributstapel von OpenGL	73
3.3 Abfrage von Fehlermeldungen	75
3.3.1 Zusätzliche Informationen zu den OpenGL-Fehlermeldungen	79

4	Darstellung von Linien	81
4.1	Praktische Darstellung von Linien	83
4.2	Benutzerdefinierte Festlegung der Linienbreite	85
	4.2.1 Einschränkungen bei der Auswahl der Linienbreite	87
	4.2.2 Veränderung der Linienbreite	88
	4.2.3 Festlegung der Darstellungsgenauigkeit geglätteter Linien	89
4.3	Festlegung des Sichtfeldes im zweidimensionalen Raum	90
	4.3.1 Das Verhältnis zwischen Breite und Höhe des Sichtfeldes	93
4.4	Funktionen von \mathbb{R} nach \mathbb{R}	94
	4.4.1 Praktische Darstellung von Funktionsgraphen	96
4.5	Funktionen von \mathbb{R} nach \mathbb{R}^2	100
	4.5.1 Praktische Darstellung von Funktionen von \mathbb{R} nach \mathbb{R}^2	102
	4.5.2 Die Eindeutigkeitsbedingung von Funktionen von \mathbb{R} nach \mathbb{R}^2	103
4.6	Besprechung der Übungsaufgaben	104
5	Der Auswertungsmechanismus von OpenGL	111
5.1	Grundeigenschaften von Bézierkurven	111
5.2	Bézierkurven mit vier Kontrollpunkten	112
5.3	Bézierkurven mit beliebig vielen Kontrollpunkten	114
5.4	Praktische Darstellung von Bézierkurven	115
	5.4.1 Abfrage der globalen Zustände des internen Auswertungsmechanismus	121
5.5	Effiziente Visualisierung von Bézierkurven	122
5.6	Besprechung der Übungsaufgaben	127
Teil II Einführung in die 3D-Grafikprogrammierung		129
6	Die Zentralprojektion	131
6.1	Der dreidimensionale Sichtbereich	132
6.2	Grundlegende Konzepte der Zentralprojektion	133
6.3	Der Öffnungswinkel virtueller Kameras	135
6.4	Festlegung der Form des dreidimensionalen Sichtbereiches	137
6.5	Praktische Darstellung dreidimensionaler Gegenstände	139
6.6	Nicht-symmetrische dreidimensionale Sichtbereiche	142
6.7	Die Länge einer Einheit im dreidimensionalen Weltkoordinatensystem	144
6.8	Besprechung der Übungsaufgaben	145
7	Matrizen	147
7.1	Bewegung von Gegenständen mit Hilfe von Matrizen	147
7.2	Lineare Funktionen von \mathbb{R}^n nach \mathbb{R}	148
7.3	Aufbau von Matrizen	150
7.4	Elementare Bewegungen im dreidimensionalen Raum	154
	7.4.1 Die Verschiebungsmatrix	154
	7.4.2 Die Rotation im Dreidimensionalen	156
	7.4.3 Skalierung	158

7.5	Multiplikation von Matrizen	161
7.5.1	Zeitersparnis beim Einsatz von Matrizen	165
7.5.2	Anschauliche Darstellung der Verwendung von Matrizen	166
7.6	Verwaltung von Matrizen	168
7.7	Praktischer Einsatz von Matrizen	173
7.8	Besprechung der Übungsaufgaben	175
8	Bewegungen	179
8.1	Der Doppelspeicher-Algorithmus	179
8.1.1	Besonderheiten des Doppelspeicher-Algorithmus	183
8.2	Die räumliche Position eines Gegenstandes	183
8.3	Rotation von Gegenständen um die Weltachsen	185
8.4	Rotation von Gegenständen um die eigenen Achsen	187
8.4.1	Praktische Durchführung der Rotation um die eigenen Achsen	190
8.5	Drehbewegungen auf der Grundlage eines variablen Rotationszentrums	193
8.6	Projekt: Darstellung eines komplexen Gegenstandes	195
8.7	Die skalierungsbedingte Verschiebung	198
8.8	Besprechung der Übungsaufgaben	201
8.9	Besprechung der Projekte	205
9	Polygone	211
9.1	Grundidee der Darstellung gefüllter Polygone	214
9.2	Praktische Darstellung gefüllter konvexer Polygone	217
9.3	Die Vorder- und Rückseite von Polygonen	219
9.4	Umrisse beliebiger Polygone	225
9.5	Automatische Darstellung gefüllter konkaver Polygone	230
9.5.1	Initialisierung benutzerdefinierter Darstellungsvorschriften	231
9.5.2	Zeiger auf Funktionen	234
9.5.3	Praktischer Einsatz benutzerdefinierter Darstellungsvorschriften	235
9.6	Das Fehlererkennungssystem der OpenGL Utility Library	240
9.7	Besprechung der Übungsaufgaben	241
10	Polyeder	245
10.1	Verwaltung von Polyedern	247
10.2	Erkennung abgewandter Polygone	252
10.3	Projekt: Platonische Körper	255
10.4	Der Z-Speicher-Algorithmus	257
10.4.1	Mathematische Grundlagen des Z-Speicher-Algorithmus	259
10.5	Praktischer Einsatz des Z-Speicher-Algorithmus	261
10.5.1	Optimierte Durchführung der perspektivischen Korrektur	263
10.6	Benutzerdefinierte Einstellungen des Z-Speicher-Algorithmus	265
10.7	Besprechung der Übungsaufgaben	268
10.8	Besprechung der Projekte	269
11	Der geometrische Verarbeitungsprozess von OPENGL	271
11.1	Zentralprojektion unter Verwendung einer Matrix	272
11.1.1	Definition der Funktion project()	273
11.1.2	Definition der Funktion shift()	273
11.1.3	Definition der Projektionsmatrix	275

11.2	Übermittlung dreidimensionaler Punkte mit homogenen Koordinaten an die Grafikhardware	277
11.3	Anpassung von Polygonen an den sichtbaren Bereich	278
11.3.1	Anpassung von Polygonen unter Verwendung homogener Koordinaten	280
12	Die Parallelprojektion	283
12.1	Praktische Durchführung der Parallelprojektion	285
12.2	Die Militärperspektive	289
12.2.1	Praktischer Einsatz der Militärperspektive	291
12.3	Die Kavalierverspektive	293
12.4	Besprechung der Übungsaufgaben	295
Teil III Lokale Ausrichtungen		297
13	Navigation im dreidimensionalen Raum	299
13.1	Verarbeitung von Tastatureingaben	299
13.1.1	Praktische Abfrage der Tastatur	300
13.2	Navigation im dreidimensionalen Raum, geometrischer Ansatz	303
13.2.1	Praktische Simulation der Bewegung in einer dreidimensionalen Welt	303
13.2.2	Darstellung von Polygonzügen	305
13.3	Der Begriff der lokalen Ausrichtung	308
13.3.1	Rotation eines Punktes um eine beliebig verlaufende Gerade	310
13.3.2	Praktische Steuerung einer lokalen Ausrichtung durch eine virtuelle Welt	315
13.3.3	Die Zeilen- und Spaltenmatrizen lokaler Ausrichtungen	322
13.4	Navigation im dreidimensionalen Raum, algebraischer Ansatz	323
13.5	Besprechung der Übungsaufgaben	327
14	Die Sicht- und Ausrichtungsmatrix	329
14.1	Die Ausrichtungsmatrix eines Polyeders	329
14.2	Die Sichtmatrix einer lokalen Ausrichtung	333
14.2.1	Praktischer Einsatz mehrerer Darstellungskameras	335
14.3	Hardwarebeschleunigte Multiplikation von Punkten mit der Sicht- und Ausrichtungsmatrix	337
14.4	Besprechung der Übungsaufgaben	341
15	Das Matrizenverarbeitungssystem von OpenGL	345
15.1	Hardwarebeschleunigte Rotation eines Gegenstandes	346
15.2	Die Bewegungsfunktionen von OpenGL	348
15.3	Stapelverarbeitung von Matrizen	349
15.3.1	Praktischer Einsatz des internen Stapels der Sicht- und Ausrichtungsmatrix	353
15.4	Implizite Verwaltung lokaler Ausrichtungen	357

15.5	Alternative Vorgehensweise bei der Definition von Bewegungen mit den entsprechenden OpenGL-Funktionen	361
15.6	Hardwareunterstützter Einsatz beliebig ausgerichteter Darstellungskameras	361
15.6.1	Optimierte Aufstellung der Sichtmatrix einer beliebigen Darstellungskamera	364
15.6.2	Darstellung von Objekten mit implizit verwalteten lokalen Ausrichtungen aus der Sicht beliebiger Kameras.	366
15.7	Hauptvorteil des Matrizenverarbeitungssystems von OpenGL	369
15.7.1	Verwaltung von Gegenständen mit hierarchisch angeordneten Komponenten.	371
15.7.2	Darstellung von Gegenständen mit hierarchisch angeordneten Komponenten.	375
15.7.3	Optimierte Darstellung des Rotationsgegenstandes	376
15.7.4	Hardwareunterstützte Visualisierung des Rotationsgegenstandes	378
15.8	Besprechung der Übungsaufgaben	382
16	Benutzerdefinierte Darstellungsfenster.	383
16.1	Praktischer Einsatz benutzerdefinierter Darstellungsfenster	385
16.1.1	Hintergrundfarbe benutzerdefinierter Darstellungsfenster.	387
16.2	Der dreidimensionale Sichtbereich und die Form des dazugehörigen Darstellungsfensters	391
16.2.1	Einschränkung des dreidimensionalen Sichtbereiches.	393
16.2.2	Herleitung der algebraischen Methode der Einschränkung des Sichtbereiches	395
16.2.3	Praktische Implementierung der Einschränkung des Sichtbereiches auf algebraischem Weg	397
16.2.4	Einschränkung des Sichtbereiches unter Verwendung der geometrischen Methode	399
16.3	Projekt: Anschauliche Einschränkung des dreidimensionalen Sichtbereiches	402
16.4	Besprechung der Übungsaufgaben	405
16.5	Besprechung der Projekte	405
17	Auswahl von Gegenständen	417
17.1	Praktische Demonstration der Mehrfachauswahl	418
17.1.1	Der Auswahlmodus der Grafikkarte	419
17.1.2	Auswertung des Auswahlarrays	424
17.2	Projekt: Alternative Definition auswählbarer Gegenstände	426
17.3	Auswahl beliebiger hierarchisch angeordneter Gegenstände	428
17.4	Einzelauswahl von Gegenständen.	432
17.5	Darstellungslisten	435
17.5.1	Praktischer Einsatz von Darstellungslisten	437
17.6	Benutzerdefinierte dreidimensionale Weltkoordinatensysteme	441
17.7	Projekt: Modellierung einer animierten Wasseroberfläche	444
17.8	Besprechung der Übungsaufgaben	452
17.9	Besprechung der Projekte	454

Teil IV	Beleuchtung von Gegenständen	467
18	Grundtechniken der Polygonschattierung	469
18.1	Der Normalenvektor eines Polygons	470
18.2	Flache Polygonschattierung	471
18.2.1	Paralleles Licht	472
18.2.2	Der Normalenvektor eines Polygons	472
18.2.3	Softwareimplementierung der flachen Polygonschattierung	475
18.3	Projekt: Flache Polygonschattierung mit benutzerdefinierter Farbgebung	476
18.4	Besprechung der Projekte	477
19	Erweiterte Techniken der Polygonschattierung	481
19.1	Vertexschattierung mit dem nicht programmierbaren Grafikprozessor	481
19.1.1	Der Normalenvektor eines Punktes	481
19.1.2	Perspektivisch korrekte Interpolation von Farben entlang der Oberfläche von Polygonen	484
19.1.3	Praktische Implementierung der Vertexschattierung	486
19.1.4	Sichtanpassung von Polygonen bei der Vertexschattierung	488
19.1.5	Benutzerdefinierte Festlegung der Darstellungsart	489
19.2	Aufspaltung von Polygonen in Dreiecken	492
19.3	Vertexschattierung mit GLSL	498
19.3.1	Der Begriff des Fragments	500
19.3.2	Grundlagen der Programmiersprache GLSL	501
19.3.3	GLSL-Implementierung einer einfachen Technik der Vertexschattierung	503
19.3.4	Erstellung eines GLSL-Unterprogramms	505
19.3.5	Statusberichte und Fehlermeldungen des GLSL-Compilers und -Linkers	511
19.3.6	Praktischer Einsatz von GLSL-Unterprogrammen	518
19.3.7	Übermittlung benutzerdefinierter Werte an ein GLSL-Unterprogramm	522
19.3.8	Fehlerfassung von uniform-Variablen	527
19.4	Fragmentschattierung	528
19.4.1	Projekt: Fragmentschattierung mit einer benutzerdefinierten Farbpalette	533
19.5	Besprechung der Übungsaufgaben	535
19.6	Besprechung der Projekte	537
20	Das Standardmodell der Polygonschattierung	539
20.1	Polygonschattierung mit dem nicht programmierbaren Grafikprozessor	542
20.1.1	Festlegung von Materialeigenschaften	546
20.1.2	Definition von Lichtquellen	547
20.1.3	Globale Eigenschaften des Beleuchtungsmodells	549

Teil V	Bilder	551
21	Grundlagen des Umgangs mit Bildern	553
21.1	Verwaltung und Ausgabe von Farbbildern	553
21.2	Alternative Festlegung der zweidimensionalen Rasterposition	559
21.3	Das Problem der flachen Objektkopien	562
21.4	Das Koordinatensystem eines Bildes	565
21.4.1	Verwaltung von Zeichensätzen	566
21.4.2	Praktische Ausgabe von Texten	570
21.5	Projekt: Erstellung einer Programmkonsole	571
21.6	Besprechung der Übungsaufgaben	580
21.7	Besprechung der Projekte	584
22	Hardwareunterstützte Bildbearbeitung	591
22.1	Skalierung von Bildern	591
22.2	Farbpaletten	593
22.2.1	Praktischer Einsatz von Farbpaletten	594
22.2.2	Farbpaletten mit benutzerdefinierten Längen	597
22.3	Filterung von Bildern	599
22.4	Abfrage bildspezifischer Informationen	604
22.4.1	Erstellung und Ausgabe von Histogrammen	606
22.5	Projekt: Bildbearbeitung auf der Grundlage des Histogramms	610
22.6	Die Farbmatrix des OpenGL-Standards	613
22.6.1	Intervallabbildungen mit der Farbmatrix	620
22.7	Besprechung der Übungsaufgaben	622
22.8	Besprechung der Projekte	624
23	Farbmischung	629
23.1	Grundidee der Farbmischung	629
23.2	Praktischer Einsatz der Farbmischung	630
23.3	Projekt: Darstellung semitransparenter Bilder	636
23.4	Erweiterte Methoden der Farbmischung	637
23.5	Generierung globaler Nebeneffekte	640
23.5.1	Lineare Nebeneffekte	640
23.5.2	Exponentielle Nebeneffekte	643
23.5.3	Praktischer Einsatz globaler Nebeneffekte	644
23.6	Sphärenförmig begrenzte Nebelfelder	650
23.6.1	Die Länge einer Linie in einer Sphäre	650
23.6.2	Praktische Generierung sphärenförmig begrenzter Nebeneffekte	657
23.7	Projekt: Generierung quaderförmig begrenzter Nebelfelder	660
23.8	Besprechung der Übungsaufgaben	663
23.9	Besprechung der Projekte	664

Teil VI	Texturprojektion	667
24	Grundlagen der Texturprojektion	669
24.1	Bild- und Texturkoordinaten	670
24.1.1	Direkte und perspektivisch korrekte Wertinterpolation	673
24.2	Zweidimensionale Texturprojektion mit dem nicht programmierbaren Grafikprozessor	674
24.2.1	Projekt: Texturierung eines Würfels	682
24.3	Texturparkettierung	684
24.3.1	Der Grenzbereich von Texturen	688
24.3.2	Einschränkungen früherer Versionen des OpenGL-Standards	690
24.4	Die Texturmatrix des OpenGL-Standards	690
24.5	Besprechung der Übungsaufgaben	694
24.6	Besprechung der Projekte	696
25	Texturfärbung	699
25.1	Praktischer Einsatz der Texturfärbung	700
25.2	Projekt: Konstruktion eines Partikelsystems	706
25.3	Der Alphatest	712
25.4	Besprechung der Übungsaufgaben	714
25.5	Besprechung der Projekte	717
26	Zweidimensionale Texturprojektion unter Verwendung von GLSL	725
26.1	Multitextureffekte	729
26.2	Besprechung der Übungsaufgaben	736
A	Mathematische Grundlagen	741
A.1	Der Mengenbegriff nach Cantor	741
A.2	Punkte in der Ebene und im Raum	744
A.3	Vektoren	746
A.3.1	Die Länge eines Vektors	747
A.3.2	Operationen mit Vektoren	748
A.4	Geraden	751
A.5	Ebenen	753
A.5.1	Das Skalarprodukt	755
A.5.2	Die Normalenform der Ebene	757
A.5.3	Der dreidimensionale Raum als Menge von Vektoren	759
A.5.4	Die Parameterform der Ebene	761
A.6	Projekt: Die Abstände von Punkten, Geraden und Ebenen	762
A.7	Der Funktionsbegriff	764
A.8	Die zweidimensionale Geradengleichung $f(x) = m \cdot x + n$	768
A.9	Trigonometrische Funktionen	771
A.9.1	Sinus- und Kosinuswerte am beliebigen rechtwinkligen Dreieck	773
A.9.2	Projekt: Die Koordinaten der Punkte regelmäßiger Polygone	775
A.9.3	Rotation im dreidimensionalen Raum	775
A.9.4	Die Einteilung in Bogenmaß	778
A.9.5	Projekt: Der Winkel zwischen zwei Vektoren	780
A.9.6	Inverse trigonometrische Funktionen	783

A.10	Die erweiterte binomische Formel	783
A.11	Besprechung der Übungsaufgaben	786
A.12	Besprechung der Projekte	791
B	Kompilierung der Quelltexte	795
B.1	Deklaration der OpenGL-Funktionen	795
B.2	Grundlegende Schritte bei der Erstellung lauffähiger Dateien	795
B.3	Microsoft Visual C++ 6.0	798
B.4	Microsoft Visual Studio NET/2005/2008	799
B.5	JCreator LE	800
C	Grundarchitektur der Beispielprogramme	803
C.1	Die Windows-Beispielprogramme	803
C.1.1	Erstellung des Programmfensters	804
C.1.2	Verbindung des Programms mit der Grafikhardware	806
C.1.3	Kommunikation zwischen Programm und Betriebssystem	807
C.1.4	Abfrage von Benutzereingaben	808
C.1.5	Ausgabe von Fehlermeldungen	810
C.2	Die Java-Beispielprogramme	811
C.2.1	Initialisierung der Beispielprogramme	812
C.2.2	Programmspezifische Komponenten	814
C.2.3	Abfrage von Benutzereingaben	816
C.2.4	Ausgabe von Fehlermeldungen	819
C.3	Die GLUT-Beispielprogramme	821
C.3.1	Ausgabe von Fehlermeldungen	824
C.4	Besprechung der Übungsaufgaben	827
D	Literaturempfehlungen	829
D.1	Weiterführende Literatur, OpenGL	829
D.2	Weiterführende Literatur, Computergrafik	829
D.3	Weiterführende Literatur, Mathematik	830
	Stichwortverzeichnis	831