

GLUT / OpenGL-Grundlagen für die Vorlesung „Einführung in die Bildverarbeitung“

Prof. Dr. Aris Christidis
WS 2018 / 19

OpenGL

„Open Graphics Library“ (OpenGL: ® Silicon Graphics Inc.)
www.opengl.org – Aktuelle Version: 4.6 (2017)

1982-92: IRIS GL (für SGI-Rechner) Seit 1992 frei verfügbar

Definitionsgremium: OpenGL ARB (Architecture Review Board
– seit 2006 als Teil der „Khronos Group“)



The Red Book – Version 1.1 (1997):
www.glprogramming.com/red (On-Line, HTML)

Release 1 (1994):
<http://fly.cc.fer.hr/~unreal/theredbook/theredbook.zip> (HTML)

Code-Beispiele aus dem „Red Book“: www.opengl-redbook.com

The OpenGL Wiki: www.opengl.org/wiki

Deutschsprachige „OpenGL-Community“: www.delphigl.com

„Öffentlich“ ist bei OpenGL nur die Spezifikation!

Open-Source Implementierung der OpenGL-Spezifikation:

The Mesa 3D Graphics Library
www.mesa3d.org – Aktuelle Version: 18 (2018)

OpenGL ist unabhängig von Fenstersystemen; dies erfordert für Grafik-Sw die Adoption

- entweder eines ‚nativen‘ Fenstersystems oder
- einer Programmierschnittstelle (Application Programming Interface, API) zur Anbindung an Fenstersysteme.

Eine solche Programmierschnittstelle ist GLUT (*OpenGL Utility Toolkit* - Aussprache „wie *glutttony*“).

Letzte Version: 3.7 (3.7.6)

Literatur:

- M.J.Kilgard: „OpenGL Programming for the X Window System“, Addison-Wesley 1996
- E.Angel: „Interactive Computer Graphics: A Top-Down Approach Using OpenGL“, Addison-Wesley 2006

HTML-Online-Dokumentation zu GLUT:

- Links zu Quellen und Dokumentation:

www.opengl.org/resources/libraries/glut

- Benutzungshandbuch:

www.opengl.org/documentation/specs/glut/spec3/spec3.html

www.opengl.org/resources/libraries/glut/spec3/spec3.html

www.opengl.org/resources/libraries/glut/glut-3.spec.pdf – bzw.:

<http://homepages.thm.de/christ/>Computergrafik>aktuell>

- Quellen u. Dokumentation für MS-Windows zu GLUT:

www.xmission.com/~nate/glut.html

Funktionalität durch GLUT:

- Einrichtung und Handhabung mehrerer Grafik-Fenster
- Ereignisverarbeitung durch Callbacks (*event processing*)
- Unterstützung vielfältiger Eingabegeräte
- Routinen zur Einhaltung von Zeitvorgaben (*timer*)
- Nutzung “ereignisloser” (*“idle”*) Zeitintervalle
- Erzeugung von Pop-Up-Menü-Kaskaden
- Unterprogramme zur Generierung geometrischer Körper
- Mehrere Bitmap-/ Vektor-Schriftarten (*raster/ stroke fonts*)
- Diverse Funktionen zur Fenster- und Overlayverwaltung

- Definition: Als **Ereignis** (*engl. event*) bezeichnen wir jedes Vorkommnis (*occurrence*), das eine nicht-sequentielle Bearbeitung eines Programms bewirkt.

Ein solches Vorkommnis kann eine Zustandsänderung oder die Erfüllung einer Bedingung ($x == y$) sein, was die Abarbeitung einer **if**-Abfrage im Programm bewirkt.

- **Synchrone** Ereignisse treten zu vorhersagbaren Zeitpunkten, **asynchrone** zu nicht-vorhersagbaren ein.

Synchrone Ereignisse sind z.B. **if**-Abfragen im prozedurorientierten Programm: sie treten vorhersagbar ein (z.B.: ... Zeilen ab Programmbeginn).

Asynchrone Ereignisse sind z.B. Tasten- o. Maus-Aktionen (Zeit/Situation nicht-vorhersagbar: „Abbrechen“ vs. „OK“).

- Ereignisgesteuerte Arbeitsweise bedient sich asynchroner Ereignisse.

d.h.:
Programm-
stelle!

- Zentraler Begriff bei Sw-Plattformen (ebenso: Sw-Umgebungen)
Callback [-Funktion]: **Funktion** des **Anwendungs**programms, die in vorgegebenen Situationen **von der Plattform aufgerufen** wird.

Hintergrund:

- Multitasking \Leftrightarrow Teilen von Ressourcen (I/O, Rechenzeit etc.)
 - Koordination nur durch Plattform möglich (dort Information über laufende Prozesse und Ressourcen-Bedarf)
 - \Rightarrow Maßnahmen nach Wiederzuweisung von Ressourcen sind nur durch die Plattform einzuleiten – aber:
 - Code nur als Bestandteil der Applikation sinnvoll (nur dort ist Wissen über Umgang mit Ressourcen vorhanden)
 - \Rightarrow Einrichtung einer Plattform-Routine zur Aufnahme eines Zeigers auf eine (Callback-) Funktion, mit der die Applikation der Plattform mitteilt, welche Funktion aufzurufen ist.
- („Callback“ = Rückruf – eigentlich: Aufruf der Callback-Funktion)

Design-Philosophie:

- Fenster-Einrichtung u. -Verwaltung mit wenigen Aufrufen (für Ein-Fenster-Applikationen genügt Callback +Start) :
 - ↳ Schnelle Erlernbarkeit, Augenmerk auf Fenster-Inhalt
- Aufrufe mit möglichst knappen Parameterlisten, Zeiger nur für (Eingabe von) Zeichenketten, keine Zeiger-Rückgabe durch GLUT:
 - ↳ Leichte Handhabung, Fehlerrobustheit
- Keine Verwendung v. Daten des nativen Fenstersystems (Fenster-Handler, Schriftarten):
 - ↳ Unabhängigkeit vom nativen Fenstersystem

Design-Philosophie: (Forts.)

- Übernahme der Ereignisverarbeitung, Überlassung von OpenGL-Displaylisten der Applikation:
 - ↳ Einschränkung gleichzeitiger Verwendung weiterer Ereignisverarbeitung, keine Einschränkung des OpenGL-Einsatzes

Zustandshafte (*stateful*) API:

Zustand: Datensatz mit d. Beschreibung des Systems für die Bedürfnisse der Anwendung

- ↳ Einfache Applikationen durch Voreinstellungen (*default/current window/menu*); wiederholter Datentransfer (interessant z.B. bei unsicheren Verbindungen) wird vermieden

Mehrere, differenziert aufgerufene Callbacks

- ↳ Vermeidung unnötigen Codes je nach Art der Applikation

- Logische Organisation in 10 ‚Sub-APIs‘:



Echtzeit !
(*real time*)

1. Initialisierung:

- Initialisierung des Fenstersystems,
- Überprüfung der `main()`-Parameter,
- Setzen der Voreinstellungen für Fenster-Position, Größe, Darstellungsmodus (Single/ Double Buffer)
- 4 Routinen:



```
void glutInit(int *argc, char **argv);
```

```
/*Parameter aus main()*/
```

```
void glutInitWindowSize(int width, int height);
```

```
/*def.: (300,300)*/
```

```
void glutInitWindowPosition(int x, int y);
```

```
/*def.: (-1,-1): dem nativen Fenstersystem ueberlassen*/
```

```
void glutInitDisplayMode(unsigned int mode);
```

```
/*def.: (GLUT_RGB | GLUT_SINGLE)*/
```

notwendig

2. Start der Ereignisverarbeitung:


- Letzte Anweisung (meist in `main()`) vor Überlassung der Programmsteuerung an GLUT und den dort registrierten Callbacks der Anwendung – **keine Rückkehr!**
- 1 Routine:



```
void glutMainLoop(void);
```

3. Fenster-Verwaltung:

- Fenster-Generierung und -Steuerung
- 18 Routinen:



```
int glutCreateWindow(char *name); /*intVar<=Fenster.einrichten*/  
int glutCreateSubWindow(int win,int x,int y,int wid,int hig);  
void glutSetWindow(int win); /*Setzen:win=>aktuelles Fenster*/  
int glutGetWindow(void); /*Abfragen:int<=aktuelles Fenster*/
```

3. Fenster-Verwaltung (Forts.):

```
/*meist: "execution upon return to GLUT"*/  
void glutDestroyWindow(int win);  
void glutPostRedisplay(void); /*Kennzeichnung: aktualisieren!*/  
void glutSwapBuffers(void);  
void glutPositionWindow(int x, int y);  
void glutReshapeWindow(int width, int height);  
void glutFullScreen(void); /*may vary by window system*/  
void glutPopWindow(void); /*Aendert Fenster-Reihenfolge*/  
void glutPushWindow(void); /* " " " */  
void glutShowWindow(void); /*macht Fenster sichtbar*/  
void glutHideWindow(void); /*macht Fenster unsichtbar*/  
void glutIconifyWindow(void);  
void glutSetWindowTitle(char *name);  
void glutSetIconTitle(char *name);  
void glutSetCursor(int cursor); /*23 cursor images GLUT_CURSOR..*/
```

4. Overlay-Verwaltung:

- Einrichtung u. Nutzung von Overlay-Hw (falls vorhanden)
- 6 Routinen:

```
void glutEstablishOverlay(void);  
void glutUseLayer(GLenum layer);  
void glutRemoveOverlay(void);  
void glutPostOverlayRedisplay(void);  
void glutShowOverlay(void);  
void glutHideOverlay(void);
```

5. Menü-Verwaltung:

- Menü-Generierung und -Steuerung
- 11 Routinen:

```
int  glutCreateMenu(void (*func)(int value)); /*Callback-Reg.*/
void glutSetMenu(int menu);
int  glutGetMenu(void);
void glutDestroyMenu(int menu);
void glutAddMenuEntry(char *name, int value);
    /*Eintrag und an glutCreateMenu-Callback uebergabener Wert*/
void glutAddSubMenu(char *name, int menu);
void glutChangeToMenuEntry(int entry, char *name, int value);
void glutChangeToSubMenu(int entry, char *name, int menu);
void glutRemoveMenuItem(int entry);
void glutAttachMenu(int button);           /*Maustaste~Menue*/
void glutDetachMenu(int button);
```

(Glutmech.exe)

6. Callback-Registrierung:

- Anmeldung von Applikationsfunktionen (Callbacks).
- Callback-Aufruf durch die Verarbeitungsschleife der GLUT- Ereignisse (*GLUT event processing loop*).
- Drei Callback-Typen:
 - **Fenster-Callbacks** – zur Änderung von Größe, Form, Sichtbarkeit von Fenstern bzw. zur Anzeige des fertiggestellten Fensterinhalts
 - **Menü-Callbacks** – zur Menü-Darstellung
 - **Globale Callbacks** – für die Einbeziehung von Zeitabläufen und Menü-Nutzung.
- insg. 20 Routinen:

6. Callback-Registrierung (Forts.):

● Fenster-Callbacks:

```
void glutDisplayFunc(void (*func)(void)); /*CB f.aktuelles Fenster*/  
  
void glutOverlayDisplayFunc(void (*func)(void));  
  
void glutReshapeFunc(void (*func)(int width, int height));  
  
void glutKeyboardFunc(void (*func)(unsigned char key,int x,int y));  
  
void glutMouseFunc(void (*func)(int button,int state,int x, int y));  
  
void glutMotionFunc(void (*func)(int x,int y)); /*button pressed*/  
  
void glutPassiveMotionFunc(void (*func)(int x,int y)); /*no press*/  
  
void glutVisibilityFunc(void (*func)(int state));  
/* state == GLUT_NOT_VISIBLE oder GLUT_VISIBLE */  
  
void glutEntryFunc(void (*func)(int state)); /*Maus im Fenster?*/  
/* state == GLUT_LEFT oder GLUT_ENTERED */
```


6. Callback-Registrierung (Forts.):

- Fenster-Callbacks (Forts.):

```
void glutSpecialFunc(void (*func)(int key, int x, int y));  
    /* key == Funktions-, Cursor- (Pfeil-) und Spezialtasten */  
void glutSpaceballMotionFunc(void (*func)(int x, int y, int z));  
void glutSpaceballRotateFunc(void (*func)(int x, int y, int z));  
void glutSpaceballButtonFunc(void (*func)(int button, int state));  
void glutButtonBoxFunc(void (*func)(int button, int state));  
void glutDialsFunc(void (*func)(int dial, int value));  
void glutTabletMotionFunc(void (*func)(int x, int y));  
void glutTabletButtonFunc(void (*func)(int button, int state,  
    int x, int y));
```

6. Callback-Registrierung (Forts.):

● Menü-Callbacks:

```
void glutMenuStatusFunc(void(*func)(int status,int x,int y));  
[auch: void glutMenuStateFunc(void (*func)(int status));]  
/* status == GLUT_MENU_IN_USE oder GLUT_MENU_NOT_IN_USE */
```

● Globale Callbacks:

```
void glutIdleFunc(void (*func)(void)); /*wenn kein Ereignis*/  
void glutTimerFunc(unsigned int msec,(*func)(int val),val);  
/*msecs Millisekunden spaeter: Aufruf func(val)*/
```

7. Verwaltung von Farbtabeln mit Farbindex

(Color Index Colormap Management) – 3 Routinen:

```
void glutSetColor(int cell, GLfloat red, GLfloat green,  
                  GLfloat blue);          /*LUT-Eintrag*/  
GLfloat glutGetColor(int cell, int component);  
void glutCopyColormap(int win);
```

8. Zustands-Abfrage (*State Retrieval*) – 5 Routinen:

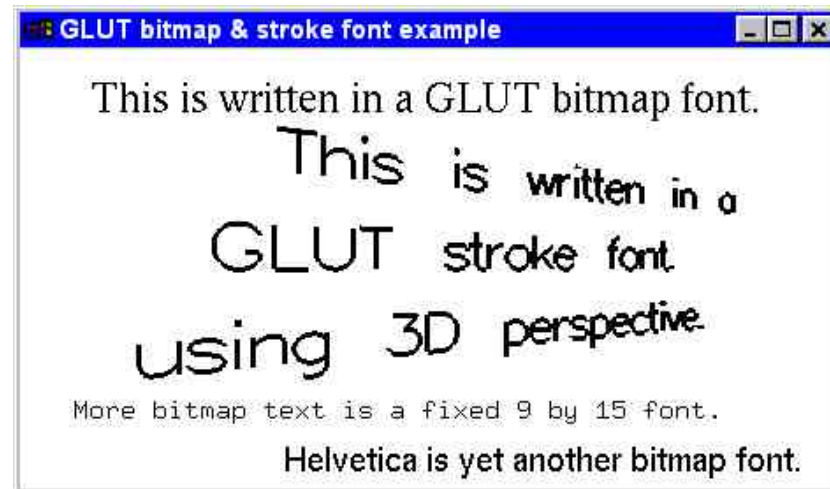
```
int glutGet(GLenum state);  
    /* state: 1 v.35 Zustandskennungen, z.B.GLUT_WINDOW_X */  
int glutLayerGet(GLenum info);          /* Overlay-Nutzung */  
int glutDeviceGet(GLenum info);  
    /* info: 1 von 10 GLUT_HAS_... (Maus etc.) */  
int glutGetModifiers(void);  
    /* GLUT_ACTIVE_SHIFT, ..._CTRL, ..._ALT */  
int glutExtensionSupported(char *extension); /*OpenGL-Extens.* /
```

9. Wiedergabe von Bitmap- und Vektor-Schriftarten

(Font Rendering) – 9 Routinen:

```
void glutBitmapCharacter(void *font, int character);
```

```
font aus: GLUT_BITMAP_8_BY_13  
          GLUT_BITMAP_9_BY_15  
          GLUT_BITMAP_TIMES_ROMAN_10  
          GLUT_BITMAP_TIMES_ROMAN_24  
          GLUT_BITMAP_HELVETICA_10  
          GLUT_BITMAP_HELVETICA_12  
          GLUT_BITMAP_HELVETICA_18
```



```
int glutBitmapWidth(GLUTbitmapFont font, int character)  
    /*gibt Breite der Bitmap-Schrift in Pixel*/
```

```
void glutStrokeCharacter(void *font, int character);
```

```
font aus: GLUT_STROKE_ROMAN  
          GLUT_STROKE_MONO_ROMAN
```

```
int glutStrokeWidth(GLUTstrokeFont font, int character);
```

10. Wiedergabe Geometrischer Figuren (*Geometric Shape Rendering*)—18 Routinen:

`glutSolidSphere,`

`glutWireSphere`

`glutSolidCube,`

`glutWireCube`

`glutSolidCone,`

`glutWireCone`

`glutSolidTorus,`

`glutWireTorus`

`glutSolidDodecahedron,` `glutWireDodecahedron`

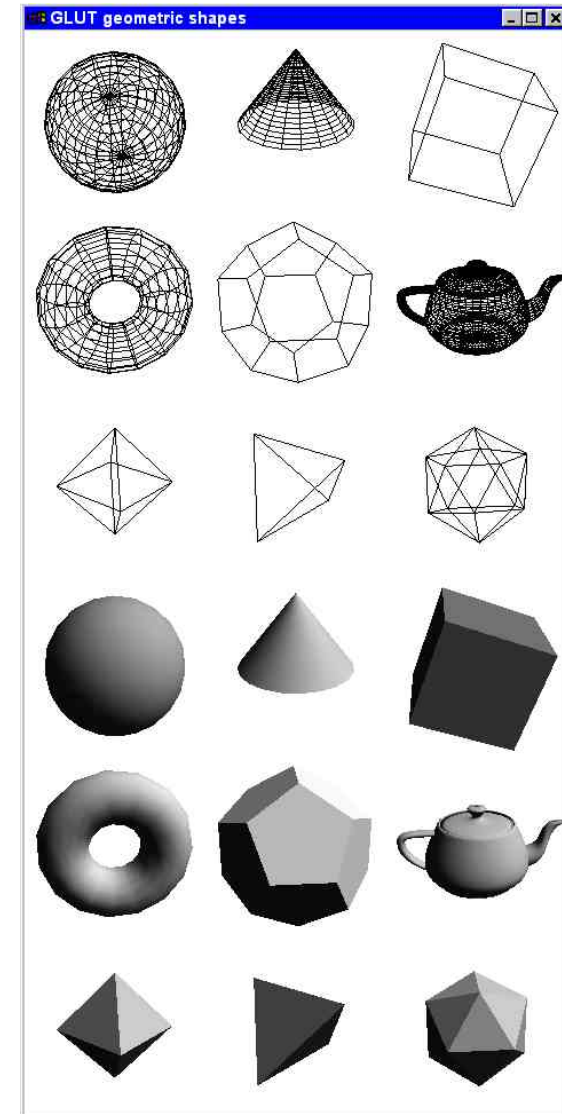
`glutSolidOctahedron,` `glutWireOctahedron`

`glutSolidTetrahedron,` `glutWireTetrahedron`

`glutSolidIcosahedron,` `glutWireIcosahedron`

`glutSolidTeapot,`

`glutWireTeapot`



Anmerkungen zu GLUT:

- GLUT-Koordinaten (Bildschirm, Fenster) in Pixel; **Ursprung oben links** (wie d. meisten Fenstersysteme \Leftrightarrow OpenGL: math. Koord.).
- Fenster-, Menü- u. Menüpunkt-**Kennungen beginnen mit 1**.
- GLUT-**Header** enthält OpenGL- u. GLU-Header:
`#include <GL/glut.h>`
- **glutInit** soll zur Hauptinitialisierung genau einmal, möglichst am Programm-Anfang aufgerufen werden. Nur Aufrufe mit **glutInit**-Präfix dürfen davor stehen (Setzen v. Voreinstellgn)
- OpenGL-Einstellgn (**gl*-Aufrufe**) nach **glutInit*()**!
- GLUT übernimmt u.a.:
 - die Festlegung des **Zeitpunktes** für **Fenster-Aktionen** (Darstellung, Aktualisierung etc. immer erst nach Rückgabe der Kontrolle an die Ereignisverarbeitung von GLUT)
 - die Behandlung mehrerer **verwandter Aufrufe** (z.B. nach mehrmaligem **glutPostRedisplay** oder sich gegenseitig aufhebenden Fenster-Aktivierungen).

Neben GLUT-Unterschnittstellen: OpenGL-Aufrufe, z.B.:

- Aktuelle Rasterposition an (x, y) setzen (def.: $-1. \leq x, y \leq +1.$):

```
void glRasterPos2{sifd}(TYPE x, TYPE y);
```

Untere linke Fenster-Ecke bei (-1.;-1.)

- Erzwingung der Ausführung bisheriger Anweisungen

(„Weiter mit nächstem Bild!“ – vgl. `fflush()`):

```
void glFlush(void); /*erzwingt AusfuehrungsStart*/
```

Erzwingung der Fertigstellung („Warte auf Pixelbild!“):

```
void glFinish(void); /*wartetAusfuehrungsEnde ab*/
```

(Hintergrund: Manche Spezial-Hw -z.B. Netzwerk- sammelt mehrere Anweisungen, bevor sie sie verarbeitet.)

- Fenster (Bildspeicher) löschen – eine teure (langsame) Operation:

```
void glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
```

- Lösch-/Hintergrundfarbe wählen (Def.: (0.,0.,0.,1.)):

```
void glClearColor(GLclampf red, GLclampf green,  
                 GLclampf blue, GLclampf alpha);
```

Farbwerte werden intern auf d. Bereich [0,1] begrenzt („clamped“).

- OpenGL in ISO C implementiert: unterschiedliche Namen je nach Parameterliste. Typische Schreibweise:

```
glFunktionsNameTyp (GL_KONST_NAME, param);
```

z.B. Setzen der Zeichenfarbe:

```
glColor3f(1.,1.,1.); //R,G,B:weiss(def.)  
glColor3ub(255,255,255);
```

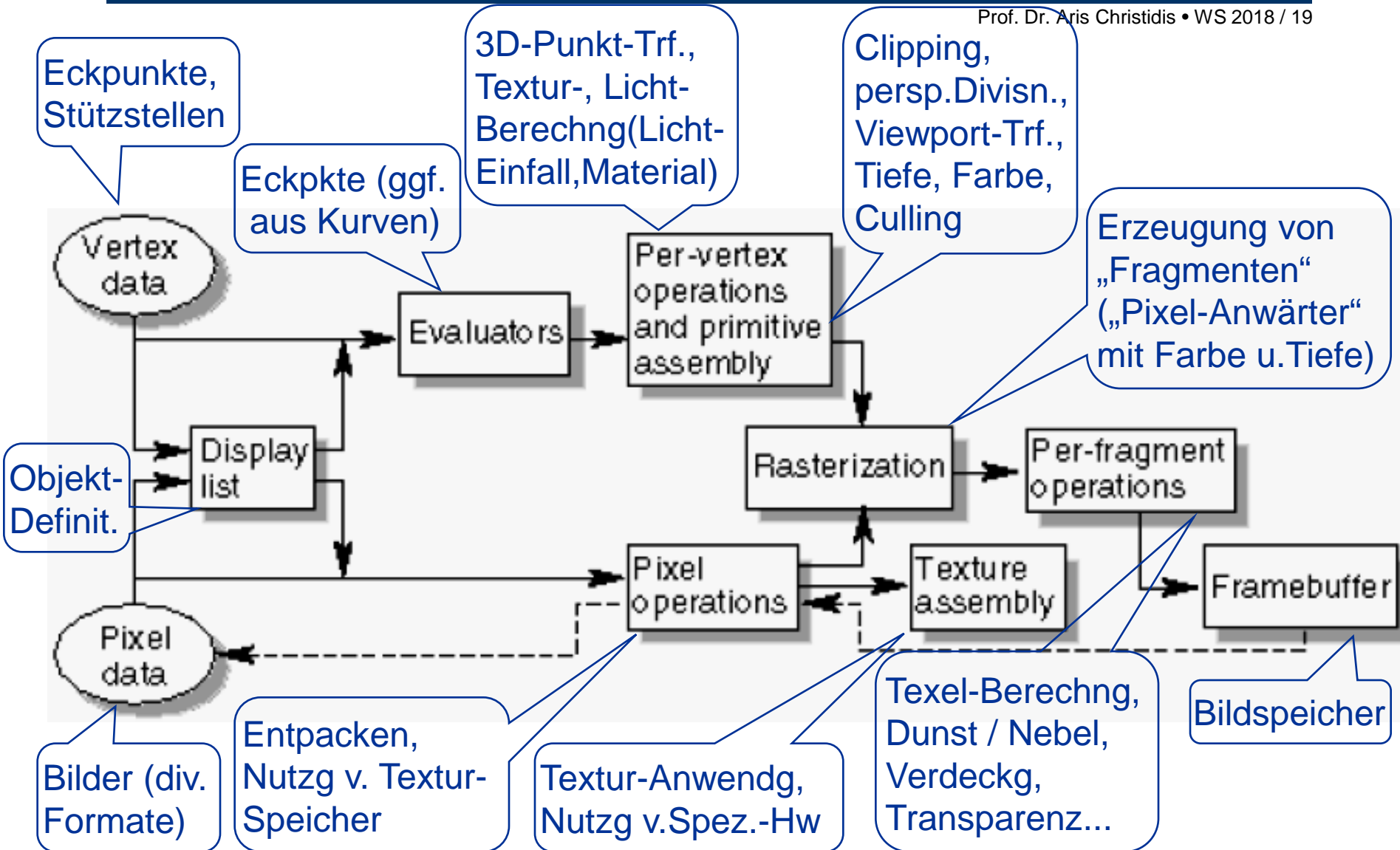
Vektor-Version des Befehls (weniger Datentransfer):

```
GLfloat ffarbe[]={1.,0.,0.}; //RGB:rot  
GLubyte bfarbe[]={255,0,0};  
glColor3fv(ffarbe); //Einstellg  
glColor3ubv(bfarbe);  
glGetFloatv(GL_CURRENT_COLOR, ffarbe);//Abfrage
```

- ➔ OpenGL als Zustandsautomat (engl. *state machine*) implementiert: letzte (bzw.: Vor-) Einstellung (Default) gültig.
⇒ Weniger Datentransfer, günstig für Echtzeit- und C/S-Apps

- Grafik-Bibliothek mit einigen hundert Befehlen `gl...()` (div. Ausführungen) – angeschlossener „Aufsatz“: OpenGL Utility Library (GLU), ca. 50 Befehle `glu...()`
- Plattform-unabhängig (Hardware, Fenster-/ Betriebssystem.), netzwerkfähig (Client: Programm / Server: Darstellung)
 - Konstruktion bel. **Modelle** aus Grafik-Primitiven: Punkten, Linien, Polygonen, Bildern, Bitmaps (=Bitmustern)
 - Zusammenfassung mehrerer Modelle (Objekte) zu **Szenen**; Sicht-Berechnung bei gegebenem Augenpunkt
 - Farbgebung durch Berechnung von **Lichtintensitäten** bei gegebener **Farbe** oder **Textur** (=aufgesetztem Bild)
 - Erzeugung eines **Pixel-Bildes** aus der geometrisch-farblichen Beschreibung („Rasterisierung“)
- **Rendering**: (Wiedergabe, Darstellung): Erzeugg. digitaler (Pixel-)Bilder aus log.-mathem. Modell-Beschreibungen.

OpenGL: Rendering-Pipeline



Suffix	Data Type	Typical Corresponding C-Language Type	OpenGL Type Definition
b	8-bit integer	signed char	GLbyte
s	16-bit integer	short	GLshort
i	32-bit integer	int or long	GLint, GLsizei
f	32-bit floating-point	float	GLfloat, GLclampf
d	64-bit floating-point	double	GLdouble, GLclampd
ub	8-bit unsigned integer	unsigned char	GLubyte, GLboolean
us	16-bit unsigned integer	unsigned short	GLushort
ui	32-bit unsigned integer	unsigned int or unsigned long	GLuint, GLenum, GLbitfield

Farben unter OpenGL (additive Farbmischung):

`glColor3ub(255,255,0);`

`glColor3ub(255,0,0);`

`glColor3ub(0,255,0);`

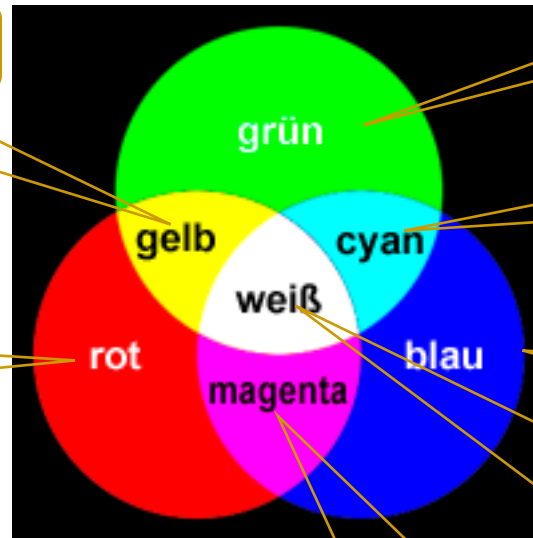
`glColor3ub(0,255,255);`

`glColor3ub(0,0,255);`

`glColor3ub(255,255,255);`

`glColor3ub(255,0,255);`

```
glColor3ub(255,0,0);/*red */
glColor3ub(0,255,0);/*green */
glColor3ub(255,255,0);/*yellow */
glColor3ub(0,0,255);/*blue */
glColor3ub(255,0,255);/*magenta*/
glColor3ub(0,255,255);/*cyan */
glColor3ub(255,255,255);/*white */
```



OpenGL: A Drawing Survival Kit

Farben unter OpenGL (additive Farbmischung):

`glColor3f(1.,1.,0.);`

`glColor3f(1.,0.,0.);`

`glColor3f(0.,1.,0.);`

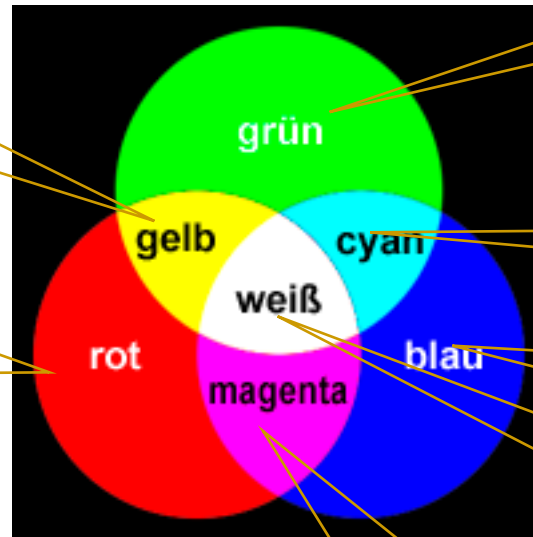
`glColor3f(0.,1.,1.);`

`glColor3f(0.,0.,1.);`

`glColor3f(1.,1.,1.);`

`glColor3f(1.,0.,1.);`

```
glColor3f(1.0, 0.0, 0.0); /*red */
glColor3f(0.0, 1.0, 0.0); /*green */
glColor3f(1.0, 1.0, 0.0); /*yellow */
glColor3f(0.0, 0.0, 1.0); /*blue */
glColor3f(1.0, 0.0, 1.0); /*magenta*/
glColor3f(0.0, 1.0, 1.0); /*cyan */
glColor3f(1.0, 1.0, 1.0); /*white */
```



- Variable Größe in der Darstellung der Pixel mit:
`void glPixelZoom(GLfloat zoomx, GLfloat zoomy);`
- Einstellbare Punkt- und Strichstärken (in Pixel):
`void glPointSize(GLfloat size); /*(def.: 1.0)*/`
`void glLineWidth(GLfloat width); /*(def.: 1.0)*/`
Nachkomma-Stellen wegen Anti-Aliasing („anti-éiliæsing“)
- OpenGL-intern schließlich alle Grafik-Objekte (Punkte, Linien u. Polygone) als geordnete Menge von Eckpunkten beschrieben; immer in (4D-)homogenen Koordinaten, ggf. mit $z=0$, $w=1$.

Polygone müssen eben, geschlossen und konvex sein (sonst Ergebnis unbestimmt).

Code-Struktur zur Konstruktion geometrischer Figuren: {...}: eins daraus

```
void glBegin(GLenum mode);
```

```
    void glVertex{234}{sifd}[v](TYPE [*]coords);
```

```
void glEnd(void);
```

[...]:kann fehlen

OpenGL TYPE Definition (s.o.)

Ohne Anti-Aliasing (*)

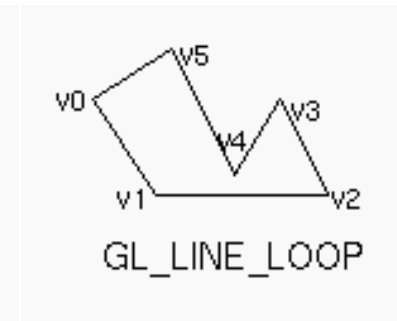
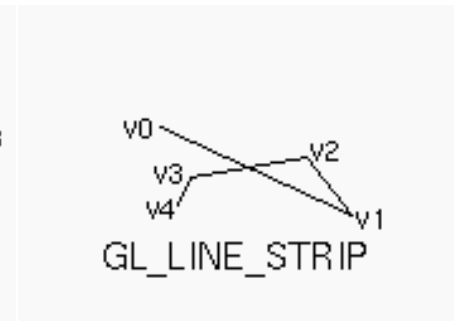
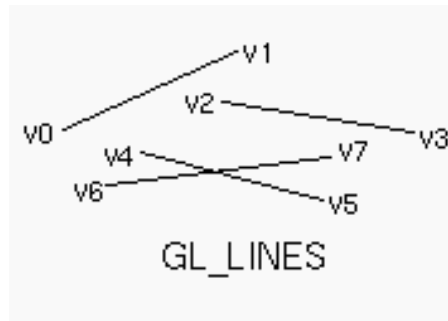
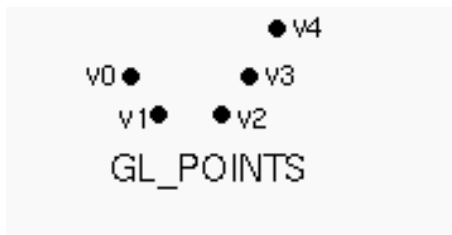


Mit Anti-Aliasing



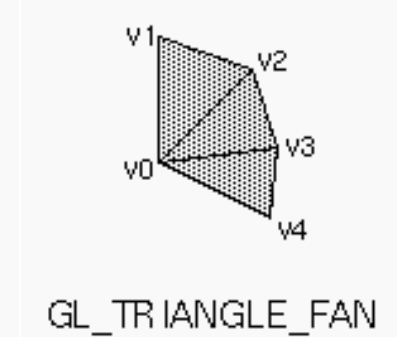
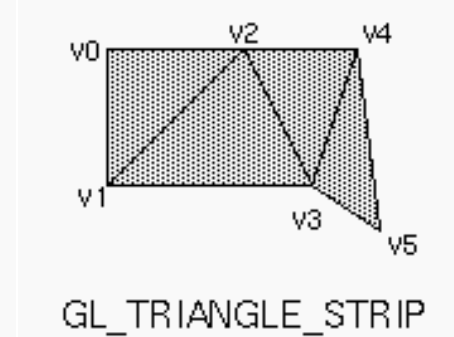
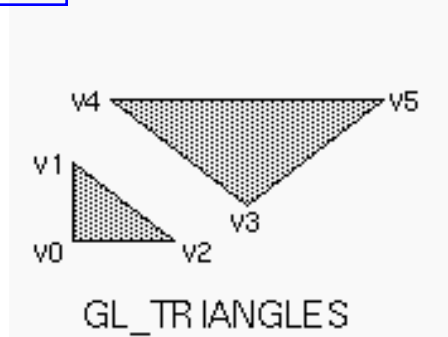
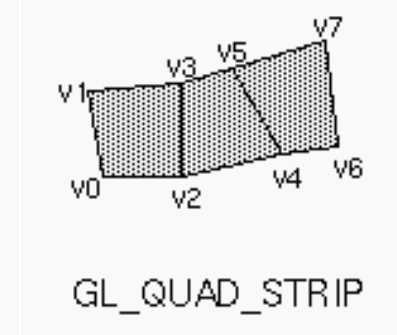
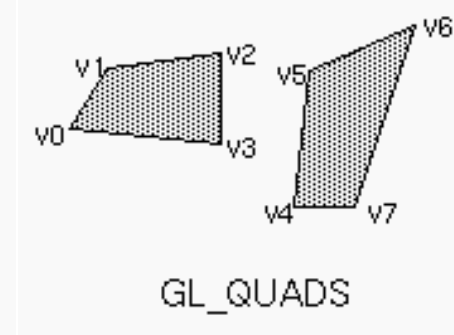
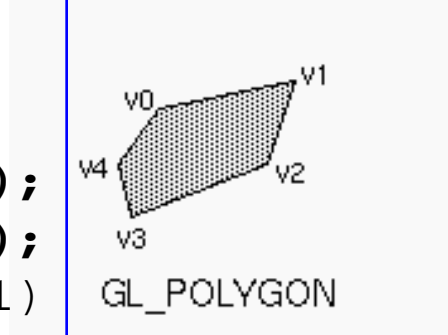
(*) „éiliæsing“ (< alias < áλλωζ = anders): Veränderung, Entstellung

Werte für `mode` in `glBegin(GLenum mode);`



Beispiel:

```
glBegin(GL_LINES);  
glVertex2i(300,0);  
glVertex2i(0,300);  
glEnd();//(z=0; w=1)
```



Nur wenige Befehle zwischen `glBegin()` u. `glEnd()` wirksam, `glVertex*()` nur dort!

Bei der Behandlung v. Bildern mit OpenGL zu unterscheiden:

- **Format** : Bedeutung der gespeicherten Pixeldaten
(S/W-Intensität, Look-Up-Table, RGB, RGBA etc.), z.B.:
`GL_LUMINANCE, GL_COLOR_INDEX, GL_RGB, GL_RGBA`
- **Typ** : Datentyp der gespeicherten Pixel-Elemente
(`float`, `signed` oder `unsigned char` oder `int` etc.), z.B.:
`GL_FLOAT, GL_BYTE, GL_UNSIGNED_BYTE, GL_UNSIGNED_INT`
Für den C-Datentyp (z.B. `char` / `unsigned int`) nicht bindend!

OpenGL verwendet oft Zeiger auf Variablen ohne Wert (`GLvoid *`).
[`void` ist C-Datentyp ohne Wert, von dem es keine Variablen geben darf.
Zeiger-Variablen dieses Typs (`void *`) sind zulässig und können beliebig umgewandelt werden, ohne daß Information (Alignment o.ä.) verlorengeht.]

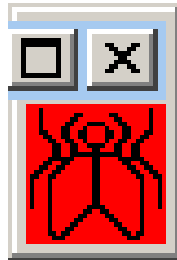
Zwei wichtige Aufrufe für die Arbeit mit Bildern in OpenGL:

vgl. Übung

```
void glDrawPixels
```

```
(GLsizei width, GLsizei height, GLenum format,  
  GLenum type, const GLvoid *pixels);
```

Zeichnet rechts oberhalb der aktuellen Rasterposition (vgl. `glRasterPos2*()`) ein Rechteck mit Kantenlängen `width` und `height` (in Pixel), mit Pixeldaten ab Adresse `pixels`.



```
void glReadPixels
```

```
(GLint x, GLint y, GLsizei width, GLsizei height,  
  GLenum format, GLenum type, GLvoid *pixels);
```

Liest aus dem Bildspeicher (Framebuffer) ein Rechteck mit Pixeldaten, mit Kantenlängen `width` und `height`, dessen untere linke Ecke bei `(x, y)` liegt, und speichert sie ab Adresse `pixels`.

Weitere benötigte OpenGL-Anweisungen zur Bildausgabe:

- Festlegung des rechteckigen Ausschnitts („Viewport“) der Geräte-Ausgabefläche (Bildschirm, Fenster, Plotter) mit unterer linker Ecke bei (x, y) und Kantenlängen `width` und `height` (in Pixel) als Zeichenfläche:

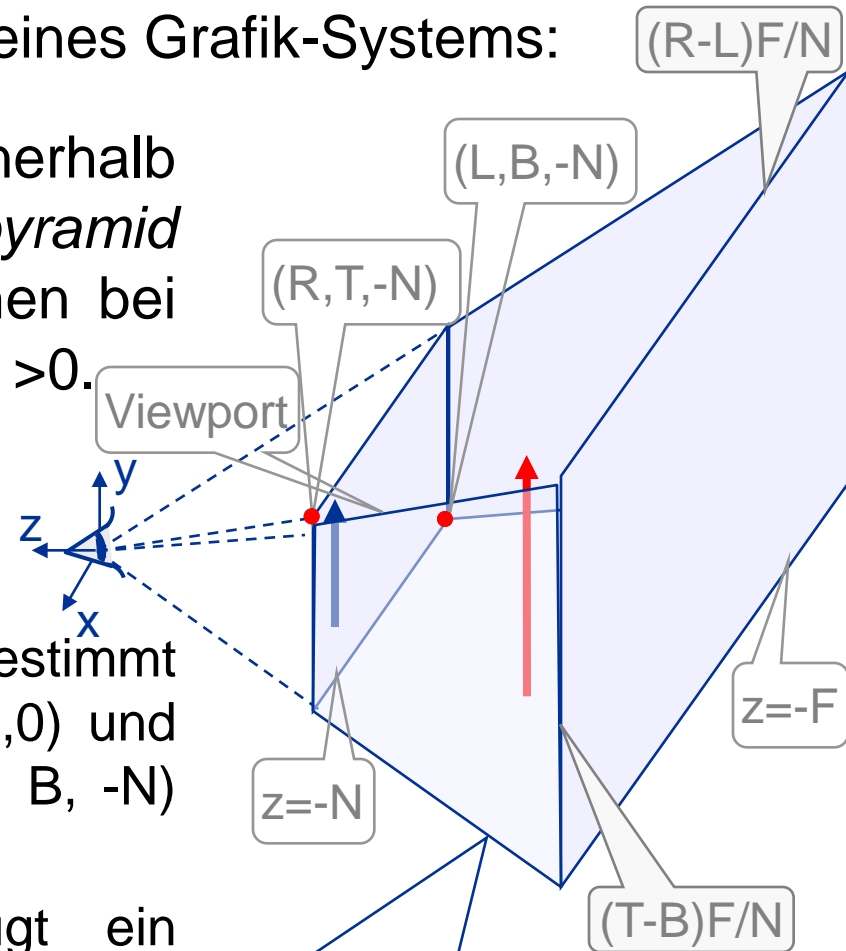
```
void glViewport (GLint x, GLint y,  
                GLsizei width, GLsizei height);
```

- Einstellung, ob die nächsten geometr. Transformationen (Translationen, Rotationen etc.) auf die dargestellten Objekte oder auf den Augenpunkt (= Projektionszentrum) anzuwenden sind:

```
glMatrixMode (GL_MODELVIEW); //Objekt-Trf.  
glMatrixMode (GL_PROJECTION); //Augenpunkt-Trf.
```

Sichtvolumen (engl. *view volume*) eines Grafik-Systems:

Darstellung nur für Objektpunkte innerhalb eines Pyramidenstumpfs (engl. *pyramid frustum*) mit Deck- und Grundflächen bei $z=-N$ (*near*) und $z=-F$ (*far*); $N, F \in \mathbf{R}, >0$.



Trapezförmige Seitenflächen werden bestimmt durch das Projektionszentrum bei $(0,0,0)$ und durch das Rechteck mit Ecken bei $(L, B, -N)$ und $(R, T, -N) \Rightarrow$ Viewport.

Augenpunkt im Unendlichen erzeugt ein quaderförmiges Sichtvolumen „ohne Tiefe“:
Parallelprojektion (auch: orthographische P.)

viewing volume (@ $z=-N$):
(L)eft, (R)ight, (B)ottom, (T)op

- Parallelprojektion der bislang positionierten grafischen Objekte im quaderförmigen Raumabschnitt mit den (x-, y-) Eckpunkt-Koordinaten (**left**, **bottom**) und (**right**, **top**), jeweils bei **z=-near** und **z=-far**:

```
void glOrtho (GLdouble left,    GLdouble right,
              GLdouble bottom,  GLdouble top,
              GLdouble near,    GLdouble far);
```

- Verschiebung (eines Objektes oder des Augenpunktes) parallel zu den Hauptachsen um **x**, **y**, **z**:

```
void glTranslate{fd}(TYPE x, TYPE y, TYPE z);
```

- Neutrales Element / Aufhebung aller bisherigen (Objekt- / Augenpunkt-) Transformationen:

```
glLoadIdentity();
```

Funktion zur Systemvorbereitung für OpenGL-Arbeit in 2D:

```
void DrawIn2D (int width, int height)
{ glViewport(0,0,width,height); //Zeichenflaeche
  glMatrixMode(GL_PROJECTION); //Augenpkt-Trf.
  glLoadIdentity(); //Tabula rasa
  glOrtho(0,width,0,height,-1,1); //Parallel-Proj.
  glMatrixMode(GL_MODELVIEW); //Grafiken-Trf.
  glLoadIdentity(); //Tabula rasa
  glTranslatef(0.375,0.375,.0); //optm.Rasterisrg
  return;
}
```