

OpenGL + Qt Tutorial

Andreas Nicolai

andreas.nicolai@tu-dresden.de

Version 0.1.0, März 2020

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
Kernthemen	1
Plattformunterstützung und OpenGL-Version	1
Grundlagen	2
1. Tutorial 01: OpenGL innerhalb eines QWindow	2
1.1. QWidget näher betrachtet	3
1.2. Allgemeingültige Basisklasse für OpenGL-Render-Fenster	4
1.2.1. Initialisierung des OpenGL-Fensters	5
1.3. Implementierung eines konkreten Renderfensters	7
1.3.1. Shaderprogramme	8
1.3.2. Vertex-Buffer-Objekte (VBO) und Vertex-Array-Objekte (VBA)	10
1.3.3. Rendern	13
1.3.4. Ressourcenfreigabe	14
1.4. Das Hauptprogramm	14
2. Tutorial 02: Alternative: die Klasse QOpenGLWindow	15
2.1. Verwendung der Klasse	16
2.2. Die Implementierung der Klasse QOpenGLWindow	16
2.2.1. Constructor	17
2.2.2. Ereignisbehandlungsroutinen	17
2.2.3. Initialisierung	18
2.3. Zeichnen mit Index-/Elementpuffern	19
2.3.1. Shaderprogramm	19
2.3.2. Initialisierung von gemischten Vertex-Puffern	20
2.3.3. Element-/Indexpuffer	22
2.3.4. Attribute im gemischten Vertexarray	22
2.3.5. Freigabe der Puffer	23
2.3.6. Rendern	23
2.4. Zusammenfassung	24
3. Tutorial 03: Renderfenster in einem QDialog eingebettet	25
3.1. Window Container Widgets	25
3.2. Interaktion und Synchronisation mit dem Zeichnen	26
3.2.1. Einmalige Änderungen: Farbwechsel auf Knopfdruck	26
3.2.2. Animierte Farbänderung	29
3.2.3. Zusammenfassung	30
4. Tutorial 04: Verwendung des QOpenGLWidget	31
4.1. Was bietet das QOpenGLWidget	31
4.1.1. Anpassung der Vererbungshierarchie	32
4.1.2. Initialisierung	33
4.1.3. Einbettung in ein anderes QWidget	34

4.2. Performance-Vergleich	34
4.3. Transparenz	35
4.3.1. Mit QOpenGLWidget	35
4.3.2. Mit QWindow-basierten OpenGL Renderfenstern	36
5. Tutorial 05: Maus- und Tastatureingaben	36
5.1. Überblick	37
5.2. Fenster-Basisklasse OpenGLWindow	37
5.3. Klasse SceneView - die konkrete Implementierung	38
5.3.1. Klassendeklaration	39
5.3.2. Das Aktualisierungskonzept	40
5.3.3. Implementierung der Klasse SceneView	41
5.4. Antialiasing	41

Einführung

Dieses Tutorial ist **kein** OpenGL Tutorial. Man sollte also OpenGL selbst schon ganz gut kennen. Natürlich kann man die hier vorgestellten Beispiele als Vorlage nehmen, aber es geht hier wirklich darum, die Qt-Klassen und vorbereitete Funktionalität zu verstehen und sinnvoll zu nutzen.

Diese Anleitung soll auch **nicht** zeigen, wie man mit Qt ein Spiel- oder eine Spieleengine schreibt. Es geht eher um technische Anwendungen, in denen *Animationen keine Rolle spielen*. Fokus liegt eher darauf, ressourcenschonend (und damit Laptop-Akku-schonend) 3D Grafik zu verwenden.

Es gibt eine PDF-Version des Tutorials:

<https://github.com/ghorwin/OpenGLWithQt-Tutorial/raw/master/docs/OpenGLQtTutorial.pdf>

Die Quelltexte (und Inhalte dieses Tutorials) liegen auf github:

<https://github.com/ghorwin/OpenGLWithQt-Tutorial>

Fragen und Anregungen kann man in der Issues-Seite auf Github eintragen, die kann man ja wie ein Diskussionsforum verwenden, nur dass die nie geschlossen werden :-)

<https://github.com/ghorwin/OpenGLWithQt-Tutorial/issues>

Kernthemen

In diesem Tutorial geht es primär um folgende Themen:

- Integration von OpenGL in eine Qt Widget Anwendung (es werden verschiedene Ansätze diskutiert), einschließlich Fehlerbehandlung
- Verwendung der Qt-Wrapper-Klassen als Ersatz für native OpenGL Aufrufe (die Dokumentation vieler OpenGL-Qt-Klassen ist bisweilen etwas dürftig)
- Implementierung von Keyboard- und Maussteuerung
- Rendering-on-Demand mit Fokus auf CAD/Virtual Design Anwendungen, d.h. batterieschonendes Rendern nur, wenn sich Camera oder Scene ändern

Es wird eine hinreichend aktuelle Qt-Version vorausgesetzt, mindestens **Qt 5.4**. Bei meinem Ubuntu 18.04 System ist Qt 5.9 dabei, das dürfte also eine gute Basisversion für dieses Tutorial sein. Funktionen neuerer Qt Versionen betrachte ich nicht.



Qt enthält aus Kompatibilitätsgründen noch eine Reihe von OpenGL-Implementierungsklassen (im OpenGL Modul), welche alle mit **QGL...** beginnen. Diese sind veraltet und sollten in neuen Programmen nicht mehr verwendet werden. In aktuellen Qt Programmen sind die Hilfsklassen für OpenGL-Fenster im GUI-Modul enthalten.

Plattformunterstützung und OpenGL-Version

Das Tutorial adressiert Desktopanwendungen, d.h. *Linux*, *Windows* und *MacOS* Widgets-Anwendungen. Daher ist OpenGL ES (ES für Embedded Systems) kein Thema für dieses Tutorial. Das Wesentliche sollte aber übertragbar sein.

Hinsichtlich der OpenGL-Version wird Mac-bedingt Version 3.3 angepeilt. Hinsichtlich der Einbettung von OpenGL in Qt Widgets-Anwendungen spielt die OpenGL-Version eigentlich keine Rolle.

Im Rahmen dieses Tutorials wird für die Beispiele das Qt bzw. qmake Buildsystem verwendet. Das Thema *Compilieren mit CMake und Deployment von OpenGL-basierten Anwendungen* wird in einem speziellen Tutorial erklärt.

Grundlagen

Als Einstieg in OpenGL empfehle ich folgende (englischsprachige) Webseiten:

- <https://learnopengl.com> : ein gutes und aktuelles Tutorial mit guten Abbildungen und guter Mischung aus C++ und C, mein Tutorial orientiert sich inhaltlich an den hier dargestellten Themen
- <http://antongerdelan.net/opengl> : englisch, gute Illustrationen und Erklärungen zu einzelnen Themen
- <http://www.opengl-tutorial.org> : eher grundlegendes Tutorialset, C und GLUT werden verwendet

Mein Tutorial selbst basiert zum Teil auf folgenden Webtutorials:

- <https://www.trentreed.net/blog/qt5-opengl-part-0-creating-a-window> : in diesem Tutorial und den Forumkommentaren gibt es einige Anregungen, allerdings ist dies eher eine Dokumentation eigener Versuche grafisch optimale Effekte zu erzielen. Es gibt aber interessante Anregungen. Manche Quelltextumsetzung sind nicht ganz optimal, daher mit Vorsicht als Vorlage für eigene Programme verwenden. (Diese Kleinigkeiten, über die ich selber auch gestolpert bin, sind u.A. der Grund für dieses Tutorial.)

1. Tutorial 01: OpenGL innerhalb eines QWindow

Das Ziel ist erstmal einfach: ein einfarbiges Dreieck mit OpenGL in einem **QWindow** zu zeichnen.

Das sieht dann so (noch ziemlich langweilig) aus, reicht aber aus, um mehrere Seiten Tutorialtext zu füllen :-)

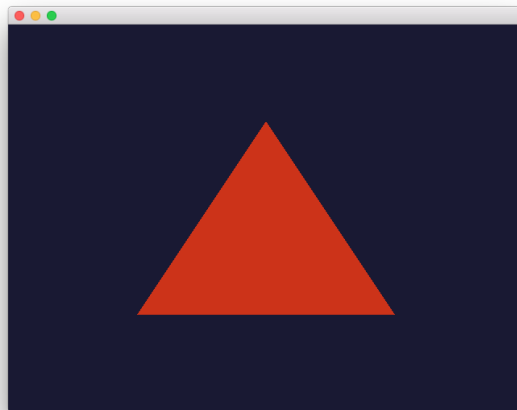


Figure 1. Ausgabe: Tutorial_01 (Mac OS Screenshot)



Quelltext für dieses Tutorial liegt im github repo: [Tutorial_01](#)

.pro-Datei in Qt Creator öffnen und compilieren.

Das Tutorial selbst basiert zum einen auf dem Qt Beispiel "OpenGLWindow" und auf dem Tutorial <https://learnopengl.com/Getting-started/Hello-Triangle>.

Beim Rendern von OpenGL Inhalten mit Qt gibt es verschiedene Möglichkeiten. Hier soll zunächst ein `QWindow` verwendet werden, welches ein natives Fenster des jeweiligen Betriebssystems kapselt. Damit kann man also ziemlich direkt und plattformnah zeichnen.

1.1. QWidget näher betrachtet

Um ein QWidget zu verwenden, muss man die Klasse ableiten und sollte dann einige Funktionen implementieren. Eine minimalistische Klassendeklaration sähe z.B. so aus:

```
class OpenGLWindow : public QWindow {
    Q_OBJECT
public:
    explicit OpenGLWindow(QWindow *parent = 0);

    // ... other public members ...

protected:
    bool event(QEvent *event) Q_DECL_OVERRIDE;
    void exposeEvent(QExposeEvent *event) Q_DECL_OVERRIDE;

private:
    // ... private members ...
};
```



Das Makro `Q_DECL_OVERRIDE` wird zum Schlüsselwort `override`, wenn der Compiler dies unterstützt (C++11 erlaubt). Da das eigentlich bei Qt 5 vorausgesetzt werden kann, könnte man eigentlich immer gleich `override` schreiben.

Man kann entweder mit einem rasterbasierten QPainter zeichnen, oder eben mit OpenGL. Dies legt man am besten im Constructor der Klasse fest, wie beispielsweise:

```
OpenGLWindow::OpenGLWindow(QWindow *parent) :
    QWindow(parent)
{
    setSurfaceType(QWindow::OpenGLSurface);
}
```

Durch Aufruf der Funktion `setSurfaceType(QWindow::OpenGLSurface)` legt man fest, dass man ein natives OpenGL-Window erstellen möchte.

Das Qt Framework sendet nun zwei für uns interessante Events:

- `QEvent::UpdateRequest` - wir sollten das Widget neu zeichnen
- `QEvent::Expose` - das Fenster (oder ein Teil davon) ist nun sichtbar und sollte aktualisiert werden

Für letzteres Event existiert eine überladene Funktion `void exposeEvent(QExposeEvent *event)`, welche wir implementieren:

```
void OpenGLWindow::exposeEvent(QExposeEvent * /*event*/) {
    renderNow(); // simply redirect call to renderNow()
}
```

Wir leiten einfach die Anfrage an das Zeichnen des Bildes an eine Funktion weiter, die das macht (dazu kommen wir gleich).

In der Implementierung der generischen Ereignisbehandlungsfunktion `event()` picken wir uns nur das `UpdateRequest`-Ereignis heraus:

```
bool OpenGLWindow::event(QEvent *event) {
    switch (event->type()) {
        case QEvent::UpdateRequest:
            renderNow(); // now render the image
            return true;
        default:
            return QWindow::event(event);
    }
}
```

Damit wäre dann unsere Aufgabe klar - eine Funktion `renderNow()` zu implementieren, die mit OpenGL zeichnet.

1.2. Allgemeingültige Basisklasse für OpenGL-Render-Fenster

Die nachfolgend beschriebene Funktionalität kann man für beliebige OpenGL-Anwendungen nachnutzen, daher wird das ganze in Form einer abstrakten Basisklasse `OpenGLWindow` implementiert.

Wir erweitern die Klassendeklaration geringfügig:

```
class OpenGLWindow : public QWindow, protected QOpenGLFunctions {
    Q_OBJECT
public:
    explicit OpenGLWindow(QWindow *parent = 0);

    virtual void initialize() = 0;
    virtual void render() = 0;

public slots:
    void renderLater();
    void renderNow();

protected:
    bool event(QEvent *event) Q_DECL_OVERRIDE;
    void exposeEvent(QExposeEvent *event) Q_DECL_OVERRIDE;

    QOpenGLContext *m_context; // wraps the OpenGL context
};
```

Der Zugriff auf die nativen OpenGL Funktionen ist in Qt in der Klasse `QOpenGLFunctions` gekapselt. Diese kann entweder als Datenmember gehalten werden, oder eben wie oben gezeigt als Implementierung vererbt werden. Da es sich ja um ein `OpenGLWindow` handelt, fühlt sich das mit der Vererbung schon richtig an.

Es gibt zwei pur virtuelle Funktionen, `initialize()` und `render()`, ohne die kein OpenGL-Programm auskommt. Daher verlangen wir von Nutzern dieser Basisklasse, dass sie diese Funktionen bereitstellen (Inhalt wird später

erläutert).

Neben der Funktion `renderNow()`, welche ja oben bereits aufgerufen wurde, und deren Aufgabe das *sofortige* OpenGL-Zeichnen ist, gibt es noch eine weitere Funktion `renderLater()`. Deren Aufgabe ist es letztlich, einen Neu-Zeichen-Aufruf passend zum Vertical-Sync anzufordern, was letztlich dem Absenden eines `UpdateRequest`-Ereignisses in die Anwendungs-Ereignis-Schleife entspricht. Das macht die Funktion `requestUpdate()`:

```
void OpenGLWindow::renderLater() {  
    // Schedule an UpdateRequest event in the event loop  
    // that will be send with the next VSync.  
    requestUpdate(); // call public slot requestUpdate()  
}
```

Man kann sich strenggenommen die Funktion auch sparen, und direkt den Slot `requestUpdate()` aufrufen, aber die Benennung zeigt letztlich an, dass erst beim nächsten VSync gezeichnet wird.

Zur Synchronisation mit Bildwiederholraten kann man an dieser Stelle schon einmal zwei Dinge vorwegnehmen:

- es wird doppelgepuffert gezeichnet
- Qt ist standardmäßig zu konfiguriert, dass das `QEvent::UpdateRequest` immer zu einem VSync gesendet wird. Es wird natürlich bei einer Bildwiederholfrequenz von 60Hz vorausgesetzt, dass die Zeit bis zum Umschalten des Zeichenpuffers nicht mehr als ~16 ms ist.

Die Variante mit dem Absenden des `UpdateRequest` in die Ereignisschleife hat den Vorteil, dass mehrere Aufrufe dieser Funktion (z.B. via Signal-Slot-Verbindung) innerhalb eines Sync-Zyklus (d.h. innerhalb von 16ms) letztlich zu einem Ereignis zusammengefasst werden, und so nur *einmal* je VSync gezeichnet wird. Wäre sonst ja auch eine Verschwendung von Rechenzeit.

Zuletzt sei noch auf die neuen private Membervariable `m_context` hingewiesen. Dieser Kontext kapselt letztlich den nativen OpenGL Kontext, d.h. den Zustandsautomaten, der bei OpenGL verwendet wird. Obwohl dieser dynamisch erzeugt wird, brauchen wir keinen Destruktor, da wir über die QObject-Eltern-Beziehung auch automatisch `m_context` mit aufräumen.

Im Konstruktor initialisieren wir die Zeigervariable mit einem nullptr.

```
OpenGLWindow::OpenGLWindow(QWindow *parent) :  
    QWindow(parent),  
    m_context(nullptr)  
{  
    setSurfaceType(QWindow::OpenGLSurface);  
}
```

1.2.1. Initialisierung des OpenGL-Fensters

Es gibt nun verschiedenen Möglichkeiten, das OpenGL-Zeichenfenster zu initialisieren. Man könnte das gleich im Konstruktor tun, wobei dann allerdings alle dafür benötigten Ressourcen (auch eventuell Meshes/Texturen, ...) bereits initialisiert sein sollten. Für ein schnellen Anwendungsstart wäre das hinderlich. Besser ist es, dies später zu machen.

Man könnten nun eine eigene Initialisierungsfunktion implementieren, die der Nutzer der Klasse anfänglich aufruft. Oder man regelt dies beim allerersten Anzeigen des Fensters. Hier gibt es einiges an Spielraum und je nach

Komplexität und Fehleranfälligkeit der Initialisierung ist die Variante mit einer expliziten Initialisierungsfunktion sicher gut.

Hier wird die Variante der Initialisierung-bei-erster-Verwendung genutzt (was nebenbei ja ein übliches Pattern bei Verwendung von Dialogen in Qt ist). Damit ist die Funktion `renderNow()` gefordert, die Initialisierung anzustoßen:

```
void OpenGLWindow::renderNow() {
    // only render if exposed
    if (!isExposed())
        return;

    bool needsInitialize = false;

    // initialize on first call
    if (m_context == nullptr) {
        m_context = new QOpenGLContext(this);
        m_context->setFormat(requestedFormat());
        m_context->create();

        needsInitialize = true;
    }

    m_context->makeCurrent(this);

    if (needsInitialize) {
        initializeOpenGLFunctions();
        initialize(); // call user code
    }

    render(); // call user code

    m_context->swapBuffers(this);
}
```

Die Funktion wird einmal von `exposeEvent()` und von `event()` aufgerufen. In beiden Fällen sollte nur gezeichnet werden, wenn das Fenster tatsächlich sichtbar ist. Daher wird über die Funktion `isExposed()` zunächst geprüft, ob es überhaupt zu sehen ist. Wenn nicht, dann raus.

Jetzt kommt die oben angesprochene Initialisierung-bei-erster-Benutzung. Zuerst wird das `QOpenGLContext` Objekt erstellt. Als nächstes werden verschiedene OpenGL-spezifische Anforderungen gesetzt, wobei die im `QWindow`-gesetzten Formate an den `QOpenGLContext` übergeben werden.



Die Funktion `requestedFormat()` liefert das für das `QWindow` eingestellte Format der Oberfläche (`QSurfaceFormat` zurück. Dieses enthält Einstellungen zu den Farb- und Tiefenpuffern, und auch zum Antialiasing des OpenGL-Renders.

Zum Zeitpunkt der Initialisierung des OpenGL-Context muss also dieses Format bereits für das `QWindow` festgelegt worden sein, d.h. *bevor* das erste Mal `show()` für das `OpenGLWindow` aufgerufen wird.

Wenn man diese Fehlerquelle vermeiden will, muss man die Initialisierung unter Anforderung des gewünschten `QSurfaceFormat` tatsächlich in eine spezielle Funktion verschieben.

Mit dem Aufruf von `m_context->create()` wird der OpenGL Kontext (also Zustand) erstellt, wobei die vorab gesetzten Formatparameter verwendet werden.



Falls man später die Formatparameter ändern möchte (z.B. Antialiasing), so muss zunächst wieder das Format im Kontextobjekt neu gesetzt werden und danach `create()` neu aufgerufen werden. Dies löscht und ersetzt dann den vorherigen Kontext.

Nachdem der Kontext erzeugt wurde, stehen die wohl wichtigsten Funktionen `makeCurrent()` und `swapBuffers()` zur Verfügung.

Der Aufruf `m_context->makeCurrent(this)` überträgt den Inhalt des Kontext-Objekts in den OpenGL-Zustand.

Der zweite Schritt der Initialisierung besteht im Aufruf der Funktion `QOpenGLFunctions::initializeOpenGLFunctions()`. Hierbei werden letztlich die plattformspezifischen OpenGL-Bibliotheken dynamisch eingebunden und die Funktionszeiger auf die nativen OpenGL-Funktionen (`glXXX...`) geholt.

Zuletzt wird noch die Funktion `initialize()` mit nutzerspezifischen Initialisierungen aufgerufen.

Das eigentliche Rendern der 3D Szene muss der Anwender dann in der Funktion `render()` erledigen (dazu kommen wir gleich).

Am Ende tauschen wir noch mittels `m_context->swapBuffers(this)` den Fensterpuffer mit dem Renderpuffer aus.

Nachdem der Fensterpuffer aktualisiert wurde, kann das Fenster beliebig auf dem Bildschirm verschoben oder sogar minimiert werden, *ohne* dass wir neu rendern müssen. Dies gilt zumindest solange, bis wir anfangen, in der Szene mit Animationen zu arbeiten. Bei Anwendungen ohne Animationen ist es deshalb sinnvoll, nicht automatisch jeden Frame neu zu rendern, wie das bei Spieleengines wie Unity/Unreal/Irrlicht etc. gemacht wird.



Falls wir dennoch animieren wollen (und wenn es nur eine weiche Kamerafahrt wird), dann sollten wir am Ende der Funktion `renderNow()` die Funktion `renderLater()` aufrufen, und so beim nächsten VSync einen neuen Aufruf erhalten. Ach ja: wenn das Fenster versteckt ist (nicht *exposed*), dann würde natürlich die Funktion schnell verlassen werden, und die Funktion `renderLater()` wird nicht aufgerufen. Damit wäre dann die Animation gestoppt. Damit sie wieder losläuft, gibt es die implementierte Ereignisfunktion `exposeEvent()`, die das Rendering wieder anstößt.

Damit wäre die zentrale Basisklasse für OpenGL-Renderfenster fertig. Wir testen das jetzt mit dem ganz am Anfang erwähnten primitiven Dreiecksbeispiel.

1.3. Implementierung eines konkreten Renderfensters



Vor der Lektüre dieses Abschnitts sollte man den Tutorialteil <https://learnopengl.com/Getting-started/Hello-Triangle> überflogen haben (oder sich zumindest soweit mit OpenGL auskennen).

Das konkrete Renderfenster heißt in diesem Beispiel `TriangleWindow` mit der Headerdatei `TriangleWindow.h`. Die Klassendeklaration ist recht kurz:

```

/* This is the window that shows the triangle.
   We derive from our OpenGLWindow base class and implement the
   virtual initialize() and render() functions.
*/
class TriangleWindow : public OpenGLWindow {
public:
    TriangleWindow();
    ~TriangleWindow() Q_DECL_OVERRIDE;

    void initialize() Q_DECL_OVERRIDE;
    void render() Q_DECL_OVERRIDE;

private:
    // Wraps an OpenGL VertexArrayObject (VAO)
    QOpenGLVertexArrayObject    m_vao;
    // Vertex buffer (only positions now).
    QOpenGLBuffer                m_vertexBufferObject;

    // Holds the compiled shader programs.
    QOpenGLShaderProgram         *m_program;
};

```

Interessant sind die privaten Membervariablen, die nachfolgend in der Implementierung der Klasse näher erläutert werden.

1.3.1. Shaderprogramme

Die Klasse `QOpenGLShaderProgram` kapselt ein Shaderprogramm und bietet verschiedene Bequemlichkeitsfunktionen, die in nativen OpenGL-Aufrufe umgesetzt werden.

Zuerst wird das Objekt erstellt:

Funktion: `TriangleWindow::initialize()`

```

void TriangleWindow::initialize() {
    // this function is called once, when the window is first shown, i.e. when
    // the the window content is first rendered

    // build and compile our shader program
    // -----

    m_program = new QOpenGLShaderProgram();

    ...
}

```

Dies entspricht in etwa den folgenden OpenGL-Befehlen:

```

unsigned int shaderProgram;
shaderProgram = glCreateProgram();

```

Es gibt nun eine ganze Reihe von Möglichkeiten, Shaderprogramme hinzuzufügen. Für das einfache Dreieck brauchen wir nur ein Vertex-Shader und ein Fragment-Shaderprogramme. Die Implementierungen dieser Shader sind in zwei Dateien abgelegt:

Vertex-Shader: *shader/pass_through.vert*

```
#version 330 core

// vertex shader

// input: attribute named 'position' with 3 floats per vertex
layout (location = 0) in vec3 position;

void main() {
    gl_Position = vec4(position, 1.0);
}
```

Fragment-Shader: *shaders/uniform_color.frag*

```
#version 330 core

// fragment shader

out vec4 FragColor; // output: fertiger Farbwert als rgb-Wert

void main() {
    FragColor = vec4(0.8, 0.2, 0.1, 1);
}
```

Der Vertexshader schiebt die Vertexkoordinaten (als vec3) einfach als vec4 ohne jede Transformation raus. Und der Fragmentationsshader gibt einfach nur die gleiche Farbe (dunkles Rot) aus.

Compilieren und Linken von Shaderprogrammen

Die nächsten Zeilen in der `initialize()` Funktion übersetzen die Shaderprogramme und linken die Programme:

Funktion: *TriangleWindow::initialize()*, fortgesetzt

```
if (!m_program->addShaderFromSourceFile(
    QOpenGLShader::Vertex, ":shaders/pass_through.vert"))
{
    qDebug() << "Vertex shader errors :\n" << m_program->log();
}

if (!m_program->addShaderFromSourceFile(
    QOpenGLShader::Fragment, ":shaders/uniform_color.frag"))
{
    qDebug() << "Fragment shader errors :\n" << m_program->log();
}

if (!m_program->link())
    qDebug() << "Shader linker errors :\n" << m_program->log();
```

Es gibt mehrere überladene Funktionen `addShaderFromSourceFile()` in der Klasse `QOpenGLShaderProgram`, hier wird die Variante mit Übernahme eines Dateinamens verwendet. Die Dateien sind in einer `.qrc` Ressourcendatei referenziert und daher über die Ressourcenpfade `:/shaders/...` angeben. Wichtig ist die Angabe des Typs des Shaderprogramms, hier `QOpenGLShader::Vertex` und `QOpenGLShader::Fragment`.

Erfolg oder Fehler wird über den Rückgabecode signalisiert. Das Thema Fehlerbehandlung wird aber in einem späteren Tutorial noch einmal aufgegriffen.

Letzter Schritt ist das Linken der Shaderprogramme, d.h. das Verknüpfen selbstdefinierter Variablen (Kommunikation zwischen Shaderprogrammen).

Die Funktionen der Klasse `QOpenGLShaderProgram` kapseln letztlich OpenGL-Befehle der Art:

Native OpenGL Shaderprogramm-Initialisierung

```
// create the shader
unsigned int vertexShader;
vertexShader = glCreateShader(GL_VERTEX_SHADER);

// pass shader program in C string
glShaderSource(vertexShader, 1, &vertexShaderSource, NULL);

// compile the shader
glCompileShader(vertexShader);

// check success of compilation
int success;
char infoLog[512];
glGetShaderiv(vertexShader, GL_COMPILE_STATUS, &success);

// print out an error if any
if (!success) {
    glGetShaderInfoLog(vertexShader, 512, NULL, infoLog);
    std::cout << "Vertex shader error:\n" << infoLog << std::endl;
}

// ... same for fragment shader

// attach shaders to shader program
glAttachShader(shaderProgram, vertexShader);
glAttachShader(shaderProgram, fragmentShader);

// and link
glLinkProgram(shaderProgram);
```

Verglichen damit ist die Qt Variante mit "etwas" weniger Tippaufwand verbunden.

1.3.2. Vertex-Buffer-Objekte (VBO) und Vertex-Array-Objekte (VBA)

Nachdem das Shaderprogramm fertig ist, erstellen wir zunächst ein Vertexpufferobjekt mit den Koordinaten des Dreiecks. Danach werden dann die Zuordnungen der Vertexdaten zu Attributen festgelegt. Und damit man diese Zuordnungen nicht immer wieder neu machen muss, merkt man sich diese in einem VertexArrayObject (VBA). Auf den ersten Blick ist das alles ganz schön kompliziert, daher machen wir das am Besten am Beispiel.



Vertexpufferobjekte (engl. *Vertex Buffer Objects (VBO)*) beinhalten letztlich die Daten, die an den Vertex-Shader gesendet werden. Aus Sicht von OpenGL müssen diese Objekte erst erstellt werden, dann gebunden werden (d.h. nachfolgende OpenGL-Befehle beziehen sich auf den Puffer), und dann wieder freigegeben werden.

Funktion: `TriangleWindow::initialize()`, fortgesetzt

```
float vertices[] = {
    -0.5f, -0.5f, 0.0f,
     0.5f, -0.5f, 0.0f,
     0.0f,  0.5f, 0.0f
};

// create a new buffer for the vertices
m_vertexBufferObject = QOpenGLBuffer(QOpenGLBuffer::VertexBuffer); // VBO
m_vertexBufferObject.create(); // create underlying OpenGL object
m_vertexBufferObject.setUsagePattern(QOpenGLBuffer::StaticDraw); // must be called before allocate

m_vertexBufferObject.bind(); // set it active in the context, so that we can write to it
// int bufSize = sizeof(vertices) = 9 * sizeof(float) = 9*4 = 36 bytes
m_vertexBufferObject.allocate(vertices, sizeof(vertices)); // copy data into buffer
```

Im obigen Quelltext wird zunächst ein statisches Array mit 9 floats (3 x 3 Vektoren) definiert. Z-Koordinate ist jeweils 0. Nun erstellen wir ein neues `VertexBufferObject` vom Typ `QOpenGLBuffer::VertexBuffer`. Der Aufruf von `create()` erstellt das Objekt selbst und entspricht in etwa dem OpenGL-Aufruf:

```
unsigned int VBO;
glGenBuffers(1, &VBO);
```

Dann wird dem `QOpenGLBuffer`-Pufferobjekt noch die geplante Zugriffsart via `setUsagePattern()` mitgeteilt. Dies führt keinen OpenGL Aufruf aus, sondern es wird sich dieses Attribut für später gemerkt.

Mit dem Aufruf von `bind()` wird dieses VBO als Aktiv im OpenGL-Kontext gesetzt, d.h. nachfolgende Funktionsaufrufe mit Bezug auf VBOs beziehen sich auf unser erstelltes VBO. Dies entspricht dem OpenGL-Aufruf:

```
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, VBO);
```

Zuletzt werden die Daten im Aufruf von `allocate()` in den Puffer kopiert. Dies entspricht in etwa einem `memcpy`-Befehl, d.h. Quelladresse des Puffers wird übergeben und Länge in Bytes als zweites Argument. In diesem Fall sind es 9 floats, d.h. $9 \cdot 4 = 36$ Bytes. Dies entspricht dem OpenGL-Befehl:

```
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(vertices), vertices, GL_STATIC_DRAW);
```

Hier wird der vorab gesetzte Verwendungstyp (`usagePattern`) verwendet. Deshalb ist es wichtig, `setUsagePattern()` immer vor `allocate()` aufzurufen.

Der Puffer ist nun gebunden und man könnte nun die Vertex-Daten mit den Eingangsparametern im Shaderprogramm verknüpfen. Da wir dies nicht jedesmal vorm Zeichnen erneut machen wollen, verwenden wir ein `VertexArrayObject` (VBA), welches letztlich so etwas wie ein Container für derartige Verknüpfungen darstellt. Man kann sich so ein VBA wie eine Aufzeichnung der nachfolgenden Verknüpfungsbefehle vorstellen, wobei der jeweils aktive Vertexpuffer und die verknüpften Variablen kollektiv gespeichert werden. Später beim eigentlichen Zeichnen muss man nur noch das VBA einbinden, welches unter der Haube dann alle aufgezeichneten Verknüpfungen abspielt und so den OpenGL-Zustand entsprechend wiederherstellt.

Konkret sieht das so aus:

Funktion: *TriangleWindow::initialize()*, fortgesetzt

```
// Initialize the Vertex Array Object (VAO) to record and remember subsequent attribute associations with
// generated vertex buffer(s)
m_vao.create(); // create underlying OpenGL object
m_vao.bind(); // sets the Vertex Array Object current to the OpenGL context so it monitors attribute assignments

// now all following enableVertexAttribArray(), disableVertexAttribArray() and setAttributeBuffer() calls are
// "recorded" in the currently bound VBA.

// Enable attribute array at layout location 0
m_program->enableVertexAttribArray(0);
m_program->setAttributeBuffer(0, GL_FLOAT, 0, 3);
// This maps the data we have set in the VBO to the "position" attribute.
// 0 - offset - means the "position" data starts at the begin of the memory array
// 3 - size of each vertex (=vec3) - means that each position-tuple has the size of 3 floats (those are the 3
coordinates,
// mind: this is the size of GL_FLOAT, not the size in bytes!
```

Zunächst wird das Vertex-Array-Objekt erstellt und eingebunden. Danach werden alle folgenden Aufrufe von `enableVertexAttribArray()` und `setAttributeBuffer()` vermerkt.

Der Befehl `enableVertexAttribArray(0)` aktiviert ein Attribut (bzw. Variable) im Vertex-Puffer, welches im Shaderprogramm dann mit dem layout-Index 0 angesprochen werden kann. Im Vertex-Shader dieses Beispiels (siehe oben) ist das der *position* Vektor.

Mit `setAttributeBuffer()` wird nun definiert, wo im Vertex-Buffer die Daten zu finden sind, d.h. Datentyp, Anzahl (hier 3 floats entsprechend den 3 Koordinaten) und dem Startoffset (hier 0).

Diese beiden Aufrufe entsprechen den OpenGL-Aufrufen:

```
glEnableVertexAttribArray(0);
glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 3 * sizeof(float), (void*)0);
```

Damit sind alle Daten initialisiert, und die Pufferobjekte können freigegeben werden:

Funktion: *TriangleWindow::initialize()*, fortgesetzt

```
// Release (unbind) all
m_vertexBufferObject.release();
m_vao.release(); // not really necessary, but done for completeness
}
```

Dies entspricht den OpenGL-Aufrufen:

```
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, 0);
glBindVertexArray(0);
```

Man sieht also, dass die Qt-Klassen letztlich die nativen OpenGL-Funktionsaufrufe (mitunter ziemlich direkt) kapseln.



Die Qt API fühlt sich hier nicht ganz glücklich gewählt an. Aufrufe wie `m_program->enableVertexAttribArray(0)` suggerieren, dass hier tatsächlich Objekteigenschaften geändert werden, dabei wird tatsächlich mit dem OpenGL-Zustandsautomaten gearbeitet. Entsprechend ist bei etlichen Befehlen die Reihenfolge der Aufrufe wichtig, obgleich es bei individuell setzbaren Attributen eines Objekts eigentlich egal sein sollte, welches Attribut man zuerst setzt. Daher habe ich oben im Tutorial auch noch einmal explizit die dahinterliegenden OpenGL-Befehle angegeben.

Es ist daher empfehlenswert, dass man die Qt API nochmal in eigene Klassen einpackt, und dann eine entsprechend schlanke und fehlerunanfällige API entwirft.

1.3.3. Rendern

Das eigentliche Render erfolgt in der Funktion `render()`, die als rein virtuelle Funktion von der Basisklasse `OpenGLWindow` aufgerufen wird. Die Basisklasse prüft ja auch, ob Rendern überhaupt notwendig ist, und setzt den aktuellen OpenGL Context. Dadurch kann man in dieser Funktion direkt losrendern.

Die Implementierung ist (noch) recht selbsterklärend:

Funktion: `TriangleWindow::render()`

```
void TriangleWindow::render() {
    // this function is called for every frame to be rendered on screen
    const qreal retinaScale = devicePixelRatio(); // needed for Macs with retina display
    glViewport(0, 0, width() * retinaScale, height() * retinaScale);

    // set the background color = clear color
    glClearColor(0.1f, 0.1f, 0.2f, 1.0f);
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);

    // use our shader program
    m_program->bind();
    // bind the vertex array object, which in turn binds the vertex buffer object and
    // sets the attribute buffer in the OpenGL context
    m_vao.bind();
    // now draw the triangles:
    // - GL_TRIANGLES - draw individual triangles
    // - 0 index of first triangle to draw
    // - 3 number of vertices to process
    glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 3);
    // finally release VAO again (not really necessary, just for completeness)
    m_vao.release();
}
```

Die ersten drei `glXXX` Befehle sind native OpenGL-Aufrufe, und sollten eigentlich in dieser Art mehr oder weniger immer auftauchen. Die Anpassung des ViewPort (`glViewport(...)`) ist für resize-Operationen notwendig, das Löschen des Color Buffers (`glClear(...)`) auch (später werden in diesem Aufruf noch andere Puffer gelöscht werden). Die Funktion `devicePixelRatio()` ist für Bildschirme mit angepasster Skalierung interessant (vornehmlich für Macs mit Retina-Display).

Solange sich die Hintergrundfarbe (clear-color) nicht ändert, könnte man diesen Aufruf auch in die Initialisierung verschieben.

Danach kommt der interessante Teil. Es wird das Shader-Programm gebunden (`m_program->bind()`) und danach das Vertex Array Objekt (VAO) (`m_vao.bind()`). Letzteres sorgt dafür, dass im OpenGL-Kontext auch das Vertex-Buffer-

Objekt und die Attributzuordnung gesetzt werden. Damit kann dann einfach gezeichnet werden, wofür mit `glDrawArrays(...)` wieder ein nativer OpenGL-Befehl zum Einsatz kommt.

Dieser Teil des Programms sähe in nativem OpenGL-Code so aus:

```
glUseProgram(shaderProgram);
glBindVertexArray(VAO);
glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 3);
glBindVertexArray(0);
```

Ist also ziemlich ähnlich.

1.3.4. Ressourcenfreigabe

Bleibt noch das Aufräumen der reservierten Ressourcen im Destructor.

```
TriangleWindow::~TriangleWindow() {
    // resource cleanup

    // since we release resources related to an OpenGL context,
    // we make this context current before cleaning up our resources
    m_context->makeCurrent(this);

    m_vao.destroy();
    m_vertexBufferObject.destroy();
    delete m_program;
}
```

Da einige Ressourcen dem OpenGL-Kontext des aktuellen Fenster gehören, sollte man vorher den OpenGL-Kontext "aktuell" setzen (`m_context->makeCurrent(this);`), damit diese Ressourcen sicher freigegeben werden können.

Damit wäre dann die Implementierung des `TriangleWindow` komplett.

1.4. Das Hauptprogramm

Das `TriangleWindow` kann jetzt eigentlich direkt als Top-Level-Fenster verwendet werden. Allerdings ist zu beachten, dass vor dem ersten Anzeigen (und damit vor der OpenGL-Initialisierung und Erstellung des OpenGL-Kontext) die Oberflächeneigenschaften (`QSurfaceFormat`) zu setzen sind:

```

int main(int argc, char **argv) {
    QGuiApplication app(argc, argv);

    // Set OpenGL Version information
    QSurfaceFormat format;
    format.setRenderableType(QSurfaceFormat::OpenGL);
    format.setProfile(QSurfaceFormat::CoreProfile);
    format.setVersion(3,3);

    TriangleWindow window;
    // Note: The format must be set before show() is called.
    window.setFormat(format);
    window.resize(640, 480);
    window.show();

    return app.exec();
}

```

Das wäre dann erstmal eine Grundlage, auf der man aufbauen kann. Interessanterweise bietet Qt selbst eine Klasse an, die unserer OpenGLWindow-Klasse nicht unähnlich ist. Diese schauen wir uns in *Tutorial 02* an.

2. Tutorial 02: Alternative: die Klasse QOpenGLWindow



Wer mit der Funktionalität des OpenGLWindows aus *Tutorial 01* zufrieden ist, kann gleich mit *Tutorial 03* weitermachen.

In diesem Teil schauen wir uns die Klasse [QOpenGLWindow](#) an. Mit Hilfe dieser Klasse (die letztlich die Klasse [OpenGLWindow](#) aus dem *Tutorial 01* ersetzt) erstellen wir ein leicht modifiziertes Zeichenprogramm (2 Dreiecke, welche ein buntes Rechteck ergeben und via Element-Index-Puffer gezeichnet werden).

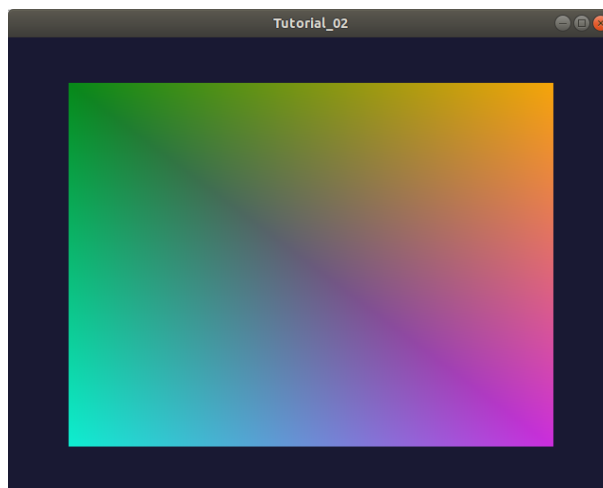


Figure 2. Ausgabe: Tutorial_02 (Linux/Ubuntu Screenshot)



Quelltext für dieses Tutorial liegt im github repo: [Tutorial_02](#)

Zuerst schauen wir an, was die Klasse [OpenGLWindow](#) unter der Haube macht.

2.1. Verwendung der Klasse

Eine interessante Eigenschaft des `QOpenGLWindow` ist die Möglichkeit, nur einen Teil des Fensters neu zu zeichnen. Das wird über die `UpdateBehavior`-Eigenschaft gesteuert. Interessant ist das eigentlich nur, wenn man mittels rasterbasiertem `QPainter` Teile des Bildes aktualisieren möchte. Es gibt 3 Varianten:

- `QOpenGLWindow::NoPartialUpdate` - das gesamte Bild wird jedes Mal neu gezeichnet (es wird kein zusätzlicher Framebuffer erzeugt und verwendet)
- `QOpenGLWindow::PartialUpdateBlit` - man zeichnet nur einen Teil des Bildes neu, und das in einem zusätzlichen, automatisch erstellten Framebuffer. Nach Ende des Zeichnens wird einfach der neu gezeichnete Teil in den eigentlichen Framebuffer kopiert.
- `QOpenGLWindow::PartialUpdateBlend` - im Prinzip wie die 2. Varianten, nur dass diesmal der Inhalt nicht kopiert, sondern überblendet wird.

Ob man die 2. oder 3. Funktion braucht, hängt sicher von der Anwendung ab. Für viele OpenGL-Anwendungen wird das vielleicht nicht notwendig sein, daher schauen wir uns hier mal Variante mit `QOpenGLWindow::NoPartialUpdate` an.

Die Klasse `QOpenGLWindow` bietet 5 interessante virtuelle Funktionen an:

```
virtual void initializeGL();           // initialization stuff
virtual void paintGL();               // actual painting
virtual void paintOverGL();           // not needed for NoPartialUpdate
virtual void paintUnderGL();          // not needed for NoPartialUpdate
virtual void resizeGL(int w, int h);  // to update anything related to view port
                                       // size (projection matrix etc.)
```

Die Funktion `initializeGL()` macht eigentlich das Gleiche, wie in Tutorial 01 die Funktion `initialize()`.

Die Funktion `paintGL()` macht das Gleiche, wie in Tutorial 01 die Funktion `render()`, d.h. hier wird das Bild mit OpenGL gezeichnet.

Die Funktionen `paintOverGL()` und `paintUnderGL()` werden im Modus `QOpenGLWindow::NoPartialUpdate` nicht benötigt.

Letztlich ist die Funktion `resizeGL(int w, int h)` nur eine Bequemlichkeitsfunktion, aufgerufen aus der `event()` Funktion für das `QEvent::ResizeEvent`. Hier kann man z.B. die Projektionsmatrix an den neuen Viewport anpassen oder sonstige Größenanpassungen vornehmen.

2.2. Die Implementierung der Klasse QOpenGLWindow

Um die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zur `OpenGLWindow`-Klasse aus Tutorial 01 zu verstehen, schauen wir uns mal die Klassenimplementierung an. Die Quelltextsnipsel stammen aus der Qt Version 5.14, sollten aber im Vergleich zu vorherigen Versionen nicht groß verändert sein.

Wichtigster Unterschied ist schon die Vererbungshierarchie. `QOpenGLWindow` leitet von `QOpenGLPaintDevice` ab, welches hardwarebeschleunigtes Zeichnen mit dem rasterbasierten `QPainter` erlaubt. Allerdings gibt es einen kleinen Haken. Zitat aus dem Handbuch:

Antialiasing in the OpenGL paint engine is done using multisampling. Most hardware require significantly more memory to do multisampling and the resulting quality is not on par with the quality of the software paint engine. The OpenGL paint engine's strength lies in its performance, not its visual rendering quality.

— Qt Documentation 5.9 zu QOpenGLPaintDevice

Das hat insofern Auswirkung auf das Gesamterscheinungsbild der Anwendung, wenn im OpenGL Fenster verwaschene Widgets oder Kontrollen gezeichnet werden, daneben aber klassische Widgets mit scharfen Kanten. Man kennt das Problem vielleicht von den verwaschenen Fenstern in Windows 10, wenn dort die Anwendungen letztlich in einen Pixelpuffer zeichnen, welcher dann als Textur in einer 3D Oberfläche interpoliert gerendert wird. Sieht meiner Meinung nach doof aus :-)

Hilfreich kann das dennoch sein, wenn man existierende Zeichenfunktionalität (basierend auf QPainter) in einem OpenGL-Widget verwenden möchte. Falls man die Funktionalität nicht braucht, bringt das PaintDevice und die dafür benötigte Funktionalität *etwas unnützen Overhead* (vor allem Speicherverbrauch) mit sich.

Schauen wir uns nun die Gemeinsamkeiten an.

2.2.1. Constructor

Der Konstruktor sieht erstmal fast genauso aus, wie der unserer `OpenGLWindow`-Klasse. abgesehen davon, dass die Argumente in die private `Pimpl`-Klasse weitergeleitet werden.

```
QOpenGLWindow::QOpenGLWindow(QOpenGLWindow::UpdateBehavior updateBehavior, QWindow *parent)
    : QPaintDeviceWindow(*(new QOpenGLWindowPrivate(nullptr, updateBehavior)), parent)
{
    setSurfaceType(QSurface::OpenGLSurface);
}
```

2.2.2. Ereignisbehandlungsroutinen

Interessanter sind schon die Ereignisbehandlungsroutinen:

```
void QOpenGLWindow::paintEvent(QPaintEvent * /*event*/ ) {
    paintGL();
}

void QOpenGLWindow::resizeEvent(QResizeEvent * /*event*/ ) {
    Q_D(QOpenGLWindow);
    d->initialize();
    resizeGL(width(), height());
}
```

Das `paintEvent()` wird einfach an die vom Nutzer zu implementierende Funktion `paintGL()` weitergereicht. Insofern analog zu der Ereignisbehandlung im `OpenGLWidget`, welches auf `QEvent::UpdateRequest` wartet. Allerdings sind auf dem Weg bis zum Aufruf der `paintEvent()` Funktion etliche Zwischenschritte implementiert, bis zum Erzeugen des `QPaintEvent`-Objekts, welches gar nicht benötigt wird. Der Aufwand wird deutlich, wenn man sich die Aufrufkette anschaut:

```

QPaintDeviceWindow::event(QEvent *event) // waits for QEvent::UpdateRequest
QPaintDeviceWindowPrivate::handleUpdateEvent()
QPaintDeviceWindowPrivate::doFlush() // calls QPaintDeviceWindowPrivate::paint()

bool paint(const QRegion &region)
{
    Q_Q(QPaintDeviceWindow);
    QRegion toPaint = region & dirtyRegion;
    if (toPaint.isEmpty())
        return false;

    // Clear the region now. The overridden functions may call update().
    dirtyRegion -= toPaint;

    beginPaint(toPaint); // here we call QOpenGLWindowPrivate::beginPaint()

    QPaintEvent paintEvent(toPaint);
    q->paintEvent(&paintEvent); // here we call QOpenGLWindowPrivate::paintEvent()

    endPaint(); // here we call QOpenGLWindowPrivate::endPaint()

    return true;
}

```

Alternativ wird `paintGL()` noch aus der Ereignisbehandlungsroutine `QPaintDeviceWindow::exposeEvent()` aufgerufen, wobei dort direkt `QPaintDeviceWindowPrivate::doFlush()` gerufen wird. Die Funktionen `beginPaint()` und `endPaint()` kümmern sich um den temporären Framebuffer, in dem beim UpdateBehavior `QOpenGLWindow::PartialUpdateBlit` und `QOpenGLWindow::PartialUpdateBlend` gerendert wird. Ohne diese Modi passiert in der Funktion sehr wenig.

2.2.3. Initialisierung

Interessant ist noch der Initialisierungsaufwurf, der in der `resizeEvent()` Ereignisbehandlungsroutine steckt.

```

void QOpenGLWindowPrivate::initialize()
{
    Q_Q(QOpenGLWindow);

    if (context)
        return;

    if (!q->handle())
        qWarning("Attempted to initialize QOpenGLWindow without a platform window");

    context.reset(new QOpenGLContext);
    context->setShareContext(shareContext);
    context->setFormat(q->requestedFormat());
    if (!context->create())
        qWarning("QOpenGLWindow::beginPaint: Failed to create context");
    if (!context->makeCurrent(q))
        qWarning("QOpenGLWindow::beginPaint: Failed to make context current");

    paintDevice.reset(new QOpenGLWindowPaintDevice(q));
    if (updateBehavior == QOpenGLWindow::PartialUpdateBlit)
        hasFboBlit = QOpenGLFramebufferObject::hasOpenGLFramebufferBlit();

    q->initializeGL();
}

```

Eigentlich sieht die Funktion fast genauso wie der Initialisierungsteil der Funktion `OpenGLWindow::renderNow()` aus *Tutorial 01* aus. Abgesehen natürlich davon, dass noch ein `QOpenGLWindowPaintDevice` erzeugt wird.

2.3. Zeichnen mit Index-/Elementpuffern

Als Erweiterung zum *Tutorial 01* soll im Anwendungsbeispiel für `QOpenGLWindow` ein Indexpuffer verwendet werden. Zwei Erweiterungen werden vorgestellt:

- interleaved Vertex-Puffer (d.h. Koordinaten und Farben zusammen in einem Puffer)
- indexbasiertes Elementzeichnen (und den dafür benötigten Elementpuffer)

Die Implementierung des `RectangleWindow` ist zunächst mal fast identisch zum `TriangleWindow` aus *Tutorial 01*:

RectangleWindow.h

```
/* This is the window that shows the two triangles to form a rectangle.
   We derive from our QOpenGLWindow base class and implement the
   virtual initializeGL() and paintGL() functions.
*/
class RectangleWindow : public QOpenGLWindow {
public:
    RectangleWindow();
    virtual ~RectangleWindow() Q_DECL_OVERRIDE;

    void initializeGL() Q_DECL_OVERRIDE;
    void paintGL() Q_DECL_OVERRIDE;

private:
    // Wraps an OpenGL VertexArrayObject (VAO)
    QOpenGLVertexArrayObject m_vao;
    // Vertex buffer (positions and colors, interleaved storage mode).
    QOpenGLBuffer m_vertexBufferObject;
    // Index buffer to draw two rectangles
    QOpenGLBuffer m_indexBufferObject;

    // Holds the compiled shader programs.
    QOpenGLShaderProgram *m_program;
};
```

Die wesentlichsten Erweiterungen sind:

- die Klasse erbt von `QOpenGLWindow`
- die Initialisierung erfolgt in der Funktion `initializeGL()` (vormals `TriangleWindow::initialize()`)
- das Rendern erfolgt in der Funktion `paintGL()` (vormals `TriangleWindow::render()`)
- es gibt eine neue Variable vom Typ `QOpenGLBuffer`, welche wir für den Indexpuffer verwenden.

2.3.1. Shaderprogramm

Die Initialisierung beginnt wie in *Tutorial 01* unverändert mit dem Erstellen und Compilieren des Shaderprogramms. Da diesmal Farben verwendet werden, müssen beide Shaderprogramme angepasst werden:

Vertexshader "shaders/pass_through.vert"

```
#version 330 core

// vertex shader

// input: attribute named 'position' with 3 floats per vertex
layout (location = 0) in vec3 position;
layout (location = 1) in vec3 color;

out vec4 fragColor;

void main() {
    gl_Position = vec4(position, 1.0);
    fragColor = vec4(color, 1.0);
}
```

Es gibt nun zwei Vertex-Attribute:

- layout location 0 = Position (als vec3 Koordinate)
- layout location 1 = Farbe (auch als vec3, rgb Farbwerte je im Bereich 0..1)

Der Farbwert eines Vertex wird als Ausgabeveriable *fragColor* einfach als vec4 weitergereicht und kommt dann, bereits fertig interpoliert, als *fragColor* im Fragmentshader an. Dort wird er unverändert ausgegeben.

Fragmentshader "shaders/simple.frag"

```
#version 330 core

// fragment shader

in vec4 fragColor; // input: interpolated color as rgba-value
out vec4 finalColor; // output: final color value as rgba-value

void main() {
    finalColor = fragColor;
}
```

Das Laden, Compilieren und Linken der Shader im Shaderprogramm wird genauso wie in *Tutorial 01* gemacht.

2.3.2. Initialisierung von gemischten Vertex-Puffern

Als nächstes der Vertex-Buffer erstellt. Diesmal werden nicht nur Koordinaten in den Buffer geschrieben, sondern auch Farben, und zwar abwechselnd (=interleaved) (siehe <https://learnopengl.com/Getting-started/Hello-Triangle> für eine Erläuterung).

Es wird ein Rechteck gezeichnet, und zwar durch zwei Dreiecke. Dafür brauchen wir 4 Punkte. Der Vertexpuffer-Speicherblock soll am Ende so aussehen: **p0c0|p1c1|p2c2|p3c3**, wobei p für eine Position (vec3) und c für eine Farbe (vec3) steht. Die Daten werden zunächst in statischen Arrays separat definiert.

```
// set up vertex data (and buffer(s)) and configure vertex attributes
// -----

float vertices[] = {
    0.8f,  0.8f,  0.0f, // top right
    0.8f, -0.8f,  0.0f, // bottom right
   -0.8f, -0.8f,  0.0f, // bottom left
   -0.8f,  0.8f,  0.0f  // top left
};

QColor vertexColors [] = {
    QColor("#f6a509"),
    QColor("#cb2dde"),
    QColor("#0eeed1"),
    QColor("#068918"),
};
```

Die noch getrennten Daten werden jetzt in einen gemeinsamen Speicherbereich kopiert.

```
// create buffer for 2 interleaved attributes: position and color, 4 vertices, 3 floats each
std::vector<float> vertexBufferData(2*4*3);
// create new data buffer - the following memory copy stuff should
// be placed in some convenience class in later tutorials
// copy data in interleaved mode with pattern p0c0|p1c1|p2c2|p3c3
float * buf = vertexBufferData.data();
for (int v=0; v<4; ++v, buf += 6) {
    // coordinates
    buf[0] = vertices[3*v];
    buf[1] = vertices[3*v+1];
    buf[2] = vertices[3*v+2];
    // colors
    buf[3] = vertexColors[v].redF();
    buf[4] = vertexColors[v].greenF();
    buf[5] = vertexColors[v].blueF();
}
```

Es gibt sicher viele andere Varianten, die Daten in der gewünschten Reihenfolge in den Speicherblock zu kopieren.

Es fällt vielleicht auf, dass der gemeinsame Pufferspeicher in einem lokal erstellen `std::vector` liegt. Das wirft die Frage nach der (benötigten) Lebensdauer für diese Pufferspeicher auf.

```
// create a new buffer for the vertices and colors, interleaved storage
m_vertexBufferObject = QOpenGLBuffer(QOpenGLBuffer::VertexBuffer);
m_vertexBufferObject.create();
m_vertexBufferObject.setUsagePattern(QOpenGLBuffer::StaticDraw);
m_vertexBufferObject.bind();

// now copy buffer data over: first argument pointer to data, second argument: size in bytes
m_vertexBufferObject.allocate(vertexBufferData.data(), vertexBufferData.size()*sizeof(float) );
```

Im letzten Aufruf wird der Pufferspeicher tatsächlich *kopiert*. Der Aufruf zu `allocate()` ist sowohl Speicherreservierung im OpenGL-Puffer, als auch Kopieren der Daten (wie mit `memcpy`).

Danach wird der Vector `vertexBufferData` nicht mehr benötigt, oder könnte sogar für weitere Puffer verwendet und verändert werden.

2.3.3. Element-/Indexpuffer

In ähnlicher Weise wird nun der Elementpuffer erstellt, allerdings gibt es eine OpenGL-Besonderheit zu beachten:



Das *Vertex Array Object* verwaltet nicht nur die Attribute, sondern auch gebundene Puffer. Daher muss das VAO *vor* dem Elementpuffer gebunden werden, um dann den Zustand korrekt zu speichern.

Deshalb wird nun zuerst das VAO erstellt und gebunden (kann man auch ganz am Anfang machen)

```
// create and bind Vertex Array Object - must be bound *before* the element buffer is bound,
// because the VAO remembers and manages element buffers as well
m_vao.create();
m_vao.bind();
```

und dann erst der Elementpuffer erzeugt:

```
unsigned int indices[] = { // note that we start from 0!
    0, 1, 3, // first triangle
    1, 2, 3 // second triangle
};

// create a new buffer for the indexes
m_indexBufferObject = QOpenGLBuffer(QOpenGLBuffer::IndexBuffer); // Mind: use 'IndexBuffer' here
m_indexBufferObject.create();
m_indexBufferObject.setUsagePattern(QOpenGLBuffer::StaticDraw);
m_indexBufferObject.bind();
m_indexBufferObject.allocate(indices, sizeof(indices) );
```

Qt (und auch OpenGL) unterscheidet nicht zwischen Pufferobjekten für verschiedene Aufgaben. Erst beim Binden des Puffers an den OpenGL Kontext (beispielsweise durch den Aufruf `glBindBuffer(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, EBO)`) wird die Verwendung des Puffers festgelegt.

In Qt muss man die Art des Puffers als Konstruktor-Argument übergeben, wobei `QOpenGLBuffer::VertexBuffer` der Standard ist. Für den Index-/Elementpuffer muss man `QOpenGLBuffer::IndexBuffer` übergeben. Der eigentliche Pufferinhalt wird wieder beim Aufruf von `allocate()` kopiert.

2.3.4. Attribute im gemischten Vertexarray

Bei der Verwendung gemischter Vertexarrays (mehrer Attribute je Vertex) muss man dem Shaderprogramm die Speicherstruktur und die Abbildung der Attribute angeben (zur Erläuterung siehe wiederum [Hello-Triangle Tutorial](#)).

Die Syntax von `QOpenGLShaderProgram::setAttributeBuffer` entspricht im wesentlichen dem nativen OpenGL-Aufruf `glVertexAttribPointer`:

```
// stride = number of bytes for one vertex (with all its attributes) = 3+3 floats = 6*4 = 24 Bytes
int stride = 6*sizeof(float);

// layout location 0 - vec3 with coordinates
m_program->enableVertexAttribArray(0);
m_program->setAttribPointer(0, GL_FLOAT, 0, 3, stride);

// layout location 1 - vec3 with colors
m_program->enableVertexAttribArray(1);
int colorOffset = 3*sizeof(float);
m_program->setAttribPointer(1, GL_FLOAT, colorOffset, 3, stride);
```

Wie gesagt, für die korrekte Komposition des VAO es ist lediglich die Reihenfolge des Bindens und der `setAttribPointer()`-Aufrufe wichtig. Man könnte also auch die Puffer erst erstellen und befüllen und zum Schluss die folgenden Aufrufe in der geforderten Reihenfolge schreiben:



```
m_vao.bind(); // VAO binden
// Puffer binden und Daten kopieren
m_vertexBufferObject.bind();
m_vertexBufferObject.allocate(vertexBufferData.data(), vertexBufferData.size()*sizeof(float) );
m_indexBufferObject.bind();
m_indexBufferObject.allocate(indices, sizeof(indices) );
// Attribute setzen
m_program->setAttribPointer(...)
```

In ähnlicher Art und Weise werden Bufferdaten auch aktualisiert (wird noch in einem späteren Tutorial besprochen).

2.3.5. Freigabe der Puffer

Bei der Freigabe der Puffer ist die Reihenfolge wichtig. Damit sich das VAO den Zustand des eingebundenen Elementpuffers merkt, darf man diesen *nicht vor* Freigabe des VAO freigeben. Am Besten man gibt nur Vertexbuffer und VAO frei, und auch das nur, wenn es notwendig ist. Es wird im Beispiel auch nur der Vollständigkeit halber gemacht.

```
// Release (unbind) all
m_vertexBufferObject.release();
m_vao.release();
```



Explizites Freigeben von VBO oder VAO ist eigentlich nur notwendig, wenn man mit verschiedenen VAOs arbeitet und/oder verschiedenen Shadern. Dann sollte man auf Zustand im aktuellen OpenGL-Kontext achten und bewusst OpenGL-Objekte einbinden und freigeben.

2.3.6. Rendern

Das eigentliche Zeichnen erfolgt in der `paintGL()` Funktion, welche fast genauso aussieht wie die `TriangleWindow::render()` Funktion aus *Tutorial 01*.

```

void RectangleWindow::paintGL() {
    // set the background color = clear color
    glClearColor(0.1f, 0.1f, 0.2f, 1.0f);
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);

    // use our shader program
    m_program->bind();
    // bind the vertex array object, which in turn binds the vertex buffer object and
    // sets the attribute buffer in the OpenGL context
    m_vao.bind();
    // For old Intel drivers you may need to explicitly re-bind the index buffer, because
    // these drivers do not remember the binding-state of the index/element-buffer in the VAO
    // m_indexBufferObject.bind();

    // now draw the two triangles via index drawing
    // - GL_TRIANGLES - draw individual triangles via elements
    glDrawElements(GL_TRIANGLES, 6, GL_UNSIGNED_INT, nullptr);
    // finally release VAO again (not really necessary, just for completeness)
    m_vao.release();
}

```

Das Anpassen des Viewports (OpenGL-Aufruf `glViewport()`) kann entfallen, da das bereits in der Basisklasse gemacht wurde.

Dann folgen eigentlich die üblichen 4 Schritte:

1. Shaderprogramm binden
2. Vertex Array Objekt binden (und damit Binden des Vertex- und Elementpuffers, und setzen der Attribut-Zeiger)
3. Rendern, diesmal mit `glDrawElements` statt `glDrawArrays`, und
4. freigeben des VAO (damit danach weitere Objekte gezeichnet werden können).



Bei einigen älteren Intel-Treibern wurde der Zustand des eingebundenen Elementpuffers noch nicht korrekt im VAO gespeichert und wiederhergestellt. Daher musste man den Index-/Elementpuffer vor dem Zeichnen immer nochmal explizit einbinden (siehe auskommentierter Quelltext).

Bei aktuellen Treibern scheint das aber kein Problem mehr zu sein (zumindest nicht unter Ubuntu).

2.4. Zusammenfassung

Das `QOpenGLWindow` ist im Modus `QOpenGLWindow::NoPartialUpdate` eigentlich vergleichbar mit unserem minimalistischen `OpenGLWindow` aus *Tutorial 01*. Etwas Overhead ist vorhanden, allerdings sollte der in realen Anwendungen keine Rolle spielen. Es spricht also eigentlich nichts dagegen, direkt mit dem `QOpenGLWindow` anzufangen.

Für spätere Erweiterungen (Maus- und Tastatureingabebehandlung) ist dennoch eine von `QOpenGLWindow` abgeleitete Klasse nötig. Wenn man also die zusätzlichen Funktionen (QPainter-Zeichnen, Buffer-Blenden etc.) von `QOpenGLWindow` nicht braucht, kann man auch mit dem schlanken `OpenGLWindow` aus *Tutorial 01* weitermachen.

Wie man nun ein solches QWindow-basiertes (natives) OpenGL-Fenster in eine Widgets-Anwendung integriert bekommt, beschreibt *Tutorial 03*.

3. Tutorial 03: Renderfenster in einem QDialog eingebettet

In diesem Teil des Tutorials geht es darum, ein QWindow-basiertes OpenGL-Renderfenster (siehe *Tutorial 01* und *02*), in eine QWidget-Anwendung einzubetten.

Der erste Teil des Tutorials beschäftigt sich allein mit der Einbettung (und ist recht kurz). Damit das Tutorial aber noch etwas interessanter wird, gibt es im 2. Abschnitt noch zwei Interaktionsvarianten mit und ohne Animation.



Man könnte auch die Bequemlichkeitsklasse `QOpenGLWidget` verwenden. In *Tutorial 04* schauen wir uns an, wie diese Klasse intern funktioniert und ob es ggfs. Performancenachteile geben könnte, wenn man diese Klasse verwendet.

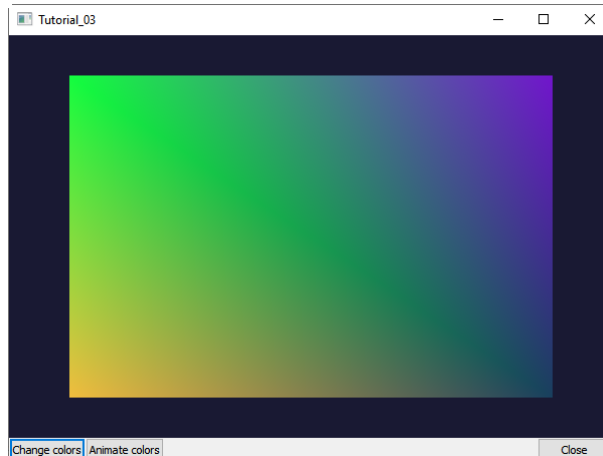


Figure 3. Tutorial_03 (Windows 10 Screenshot)



Quelltext für dieses Tutorial liegt im github repo: [Tutorial_03](#)

3.1. Window Container Widgets

Die Funktion `QWidget::createWindowContainer` erstellt ein `QWidget`, welches das als Argument übergebene `QWindow` einbettet. So einfach kann's sein:

TestDialog.cpp:Konstruktor

```
// *** create OpenGL window

QSurfaceFormat format;
format.setRenderableType(QSurfaceFormat::OpenGL);
format.setProfile(QSurfaceFormat::CoreProfile);
format.setVersion(3,3);

m_rectangleWindow = new RectangleWindow;
m_rectangleWindow->setFormat(format);

// *** create window container widget

QWidget *container = QWidget::createWindowContainer(m_rectangleWindow);
container->setMinimumSize(QSize(600,400));
```

`m_rectangleWindow` ist ein Zeiger auf die aus Tutorial 02 bekannte `RectangleWindow` Klasse. Das so erstellte Container-

Widget muss natürlich noch in ein Layout gesteckt werden. Aber mehr ist eigentlich nicht zu tun.

3.2. Interaktion und Synchronisation mit dem Zeichnen

Grundsätzlich ist folgende Aktualisierungslogik anzustreben:

OpenGL zeichnet Bild

<Anwendung wartet in Ereignis-Schleife>

Ein Event wird abgearbeitet, ändert für die Darstellung relevante Daten. Registriert ein "UpdateRequest" in der Ereignisschleife.

<Anwendung wartet in Ereignis-Schleife>

Ein Event wird abgearbeitet, ändert für die Darstellung relevante Daten. Registriert ein "UpdateRequest" in der Ereignisschleife. Dieses wird mit dem bereits existierenden "UpdateRequest" verschmolzen.

Passend zum VSync wird das UpdateRequest-Event verschickt, was zum OpenGL Rendern führt. Und wieder von vorne...

D.h., das potenziell zeitaufwändige Aktualisieren der Puffer und Zeichendaten erfolgt stets dann, wenn noch auf den nächsten VSync gewartet wird. So hat man ca. 16 ms Zeit (by üblichen 60 FPS), alles Notwendige zu erledigen.

3.2.1. Einmalige Änderungen: Farbwechsel auf Knopfdruck

Eine typische Anwendung, vor allem in technischen Anwendungen (d.h. nicht in Spielen), ist die diskrete Änderung der 3D Szene, sei es durch eine Kamerabewegung, Auswahl und Hervorhebung einzelner Elemente, oder Transformation der dargestellten Geometrie. Innerhalb des Qt Frameworks wird also zunächst ein Ereignis (OnClick, Maus- oder Tastatureingabe, ...) in die Ereignisschleife gelangen und dort abgearbeitet werden.

Ein Beispiel ist der "Change Color" Button im Dialog im Tutorial 03. Es gibt eine OnClick-Ereignisbehandlungsroutine:

TestDialog.cpp:TestDialog::onChangeColors()

```
// randomize the colors and change them in the OpenGL window
for (unsigned int i=0; i<4; ++i)
    m_rectangleWindow->m_vertexColors[i].setRgbF(
        rand()*1.0/RAND_MAX, rand()*1.0/RAND_MAX, rand()*1.0/RAND_MAX );

// now update the scene -> this will also request an update
m_rectangleWindow->updateScene();
```

Die Membervariable `m_vertexColors` wird mit zufälligen Farbwerten befüllt. Dann wird die Funktion `updateScene()` aufgerufen.

Zum Verständnis kann man noch einmal die geänderte Klassendeklaration von `RectangleWindow` anschauen:

RectangleWindow.h

```
class RectangleWindow : public QOpenGLWindow {
public:
    ....

    // updates the scene and requests a paint update
    void updateScene();

    // holds the vertex colors set on next call to updateScene()
    std::vector<QColor>      m_vertexColors;

private:
    // ....

    std::vector<float>      m_vertexBufferData;

};
```

Der im *Tutorial 02* noch als temporärer lokaler Speicherbereich verwendete Vector `m_vertexBufferData` ist jetzt eine Membervariable. Die zu verwendenden Farben sind in dem öffentlichen Vector `m_vertexColors` abgelegt.



Der Quelltext in diesem Tutorial-Beispiel ist natürlich sehr fehleranfällig und unsicher. Darauf kommt es aber nicht an und die notwendigen Fehlerprüfungen wurden der Übersichtlichkeit wegen weggelassen.

Die Vertexfarben werden im Konstruktor mittels C++11 Initialisierungsliste initialisiert:

RectangleWindow.cpp: Konstruktor

```
RectangleWindow::RectangleWindow() :
    m_vertexColors{
        QColor("#f6a509"),
        QColor("#cb2dde"),
        QColor("#0eeed1"),
        QColor("#068918") },
    m_program(nullptr),
    m_frameCount(5000)
{
}
```

Die OpenGL-Initialisierung ist minimal verändert:

RectangleWindow.cpp:initializeGL()

```
....

// resize buffer for 2 interleaved attributes: position and color, 4 vertices, 3 floats each
m_vertexBufferData.resize(2*4*3);
// create new data buffer - the following memory copy stuff should
// be placed in some convenience class in later tutorials
// copy data in interleaved mode with pattern p0c0|p1c1|p2c2|p3c3
float * buf = m_vertexBufferData.data();
for (int v=0; v<4; ++v, buf += 6) {
    // coordinates
    buf[0] = vertices[3*v];
    buf[1] = vertices[3*v+1];
    buf[2] = vertices[3*v+2];
    // colors
    buf[3] = m_vertexColors[v].redF();
    buf[4] = m_vertexColors[v].greenF();
    buf[5] = m_vertexColors[v].blueF();
}

....
```

Der Vertex-Puffer wird auf die richtige Größe gebracht (und bleibt so), und wird dann wie bisher belegt, wobei diesmal die Farben aus der Membervariable `m_vertexColors` kommen. Sonst ändert sich nichts.

Wenn jetzt in der Ereignisbehandlungsroutine der "Change Color" Schaltfläche die Farben in `m_vertexColors` geändert werden, hat das keinerlei Einfluss auf das OpenGL-Zeichnen. Die neuen Werte müssen erst in den OpenGL-Vertexpuffer kopiert werden.

Das passiert in der Funktion `updateScene()` (hätte auch `updateColors()` heißen können):

RectangleWindow.cpp:updateScene()

```
void RectangleWindow::updateScene() {
    // for now we only update colors

    // first update our vertex buffer memory, but only those locations that are actually changed
    float * buf = m_vertexBufferData.data();
    for (int v=0; v<4; ++v, buf += 6) {
        // colors
        buf[3] = m_vertexColors[v].redF();
        buf[4] = m_vertexColors[v].greenF();
        buf[5] = m_vertexColors[v].blueF();
    }

    // make this OpenGL context current
    makeCurrent();

    // bind the vertex buffer
    m_vertexBufferObject.bind();
    // now copy buffer data over: first argument pointer to data, second argument: size in bytes
    m_vertexBufferObject.allocate(m_vertexBufferData.data(), m_vertexBufferData.size()*sizeof(float) );

    // and request an update
    update();
}
```

Erst wird der Puffer aktualisiert. Aber anstelle diesen komplett neu aufzubauen (und eventuell noch

Speicherbereiche neu zu reservieren), verändern wir einfach nur die Farbwerte.

Danach muss der OpenGL-Vertexpuffer die Daten bekommen. Damit der OpenGL-Context stimmt, wird `QOpenGLWindow::makeCurrent()` aufgerufen. Dann wird der Vertexpuffer eingebunden und schließlich die Daten kopiert.

Ganz zuletzt wird `QPaintDeviceWindow::update()` aufgerufen (`QOpenGLWindow` ist durch Vererbung auch ein `QPaintDeviceWindow`). Dies hängt letztlich ein `QEvent::UpdateRequest` an die Ereignisliste an, wodurch beim nächsten VSync neu gezeichnet wird.



Man kann mal eine Test-Debug-Ausgabe in die Zeichenroutine einfügen. Wenn man nun in der `OnClick`-Ereignisbehandlungsroutine die Funktion `updateScene()` mehrfach aufruft, wird dennoch stets nur einmal je VSync gezeichnet.

3.2.2. Animierte Farbänderung

Anstelle neue Farben sofort zu setzen, kann man diese auch animiert verändern, d.h. in jedem Frame nur ein Stück von der Ursprungsfarbe zur Zielfarbe gehen.

Man benötigt zusätzliche Membervariablen und zwei neue Funktionen:

RectangleWindow.h

```
class RectangleWindow : public QOpenGLWindow {
public:
    ....

    void animateColorsTo(const std::vector<QColor> & toColors);

private:
    // modifies the scene a bit and call updateScene() afterwards
    // when already in the final state, doesn't do anything
    void animate();

    ....

    // Stores the target colors that we animate towards
    std::vector<QColor>      m_toColors;
    // Stores the target colors that we animate from
    std::vector<QColor>      m_fromColors;
    // number of frames used for the animation
    unsigned int             m_frameCount;
};
```

Die Funktion `animateColorsTo()` wird wieder durch eine Schaltfläche angestoßen. Die Implementierung überträgt nur die Daten in die Membervariablen und ruft `animate()` auf:

RectangleWindow.cpp:animateColorsTo()

```
void RectangleWindow::animateColorsTo(const std::vector<QColor> & toColors) {
    // current colors are set to "fromColors", toColors are store in m_toColors and
    // animation counter is reset

    m_fromColors = m_vertexColors;
    m_toColors = toColors;
    m_frameCount = 0;

    animate();
}
```

Die Variable `m_frameCount` zählt die animierten Frames seit Beginn der Animation. In der Funktion `animate()` wird dann zwischen den Anfangsfarbwerten `m_fromColors` und Zielfarbwerten `m_toColors` linear (im HSV Farbraum) interpoliert:

RectangleWindow.cpp:animate()

```
void RectangleWindow::animate() {
    const unsigned int FRAMECOUNT = 120;
    // if already at framecount end, stop
    if (++m_frameCount > FRAMECOUNT)
        return; // this will also stop the frame rendering

    // update the colors
    double alpha = double(m_frameCount)/FRAMECOUNT;

    // linear blending in HSV space will probably look "interesting", but it's simple
    for (unsigned int i=0; i<m_vertexColors.size(); ++i) {
        double fromH, fromS, fromV;
        m_fromColors[i].getHsvF(&fromH, &fromS, &fromV);
        double toH, toS, toV;
        m_toColors[i].getHsvF(&toH, &toS, &toV);

        m_vertexColors[i] = QColor::fromHsvF( toH*alpha + fromH*(1-alpha),
                                              toS*alpha + fromS*(1-alpha),
                                              toV*alpha + fromV*(1-alpha));
    }

    updateScene();
}
```

Wichtig ist die Abfrage nach dem Überschreiten der Animationslänge (Anzahl von Frames). Sobald das Animationsende erreicht ist, wird die Funktion sofort verlassen und es finden keine weiteren Farbanpassungen und, was vielleicht wichtiger ist, keine weiteren UpdateRequest-Events statt. Dann wartet die Anwendung wieder einfach auf Nutzerinteraktion und verbraucht keine Ressourcen.



Diese Art der Animation ist gekoppelt an *tatsächlich gezeichnete Frames*. Wenn das Fenster im Hintergrund ist (d.h. nicht *exposed*) wird die Ausführung des UpdateRequest-Events ausgesetzt, bis das Fenster wieder sichtbar ist. Damit wartet auch die Animation.

3.2.3. Zusammenfassung

Die Einbettung eines `QWindow` in eine Widgets-Anwendung ist dank Widget-Container denkbar einfach. Und was das Zusammenspiel zwischen normalen `QWidget`-basierten Eingabeereignissen und der Aktualisierung der OpenGL-

Ausgabe (synchron zur Bildwiederholfrequenz) betrifft, so sind die beiden Farbanpassungsvarianten in diesem Tutorial Beispiele, wie man das machen kann.

4. Tutorial 04: Verwendung des QOpenGLWidget

In Tutorialteil wird das `QOpenGLWidget` anstelle des `QOpenGLWindow` verwendet. Das Programm macht das Gleiche wie in *Tutorial 03* (nur etwas langsamer :-), aber dazu kommen wir gleich).

Damit der Screenshot nicht ganz genauso wie im letzten Tutorial aussieht, habe ich mal einen halbdurchsichtigen Hintergrund eingeschaltet - das geht aber mit dem bisherigen Implementierungsvarianten auch (siehe letzter Teil des Tutorials).

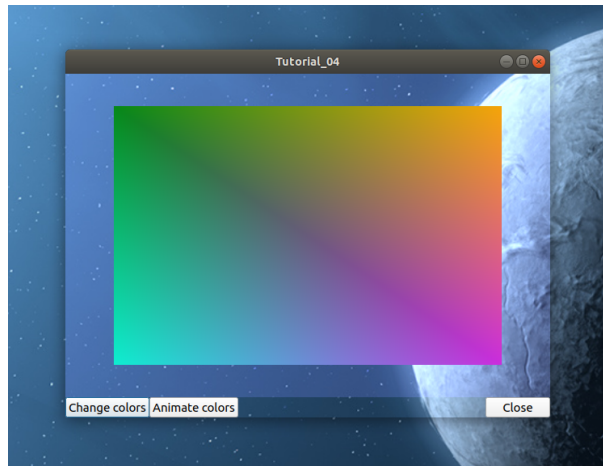


Figure 4. Tutorial_04 (Linux Screenshot, mit Transparenz)



Quelltext für dieses Tutorial liegt im github repo: [Tutorial_04](#)

4.1. Was bietet das QOpenGLWidget

Von den ganzen Qt OpenGL-Klassen ist das `QOpenGLWidget` die mit Abstand am besten dokumentierte Klasse. Es gibt ein paar interessante Details in der Dokumentation, hier ein paar Zitate:

All rendering happens into an OpenGL framebuffer object.

...

Due to being backed by a framebuffer object, the behavior of `QOpenGLWidget` is very similar to `QOpenGLWindow` with the update behavior set to `PartialUpdateBlit` or `PartialUpdateBlend`. This means that the contents are preserved between `paintGL()` calls so that incremental rendering is possible.

...

Note: Most applications do not need incremental rendering because they will render everything in the view on every paint call.

Und vielleicht am Interessantesten:

Adding a `QOpenGLWidget` into a window turns on OpenGL-based compositing for the entire window. In some special cases this may not be ideal, and the old `QGLWidget`-style behavior with a separate, native child window is desired. Desktop applications that understand the limitations of this approach (for example when it comes to overlaps, transparency, scroll views and MDI areas), can use `QOpenGLWindow` with `QWidget::createWindowContainer()`. This is a modern alternative to `QGLWidget` and is faster than `QOpenGLWidget` due to the lack of the additional composition step. It is strongly recommended to limit the usage of this approach to cases where there is no other choice. Note that this option is not suitable for most embedded and mobile platforms, and it is known to have issues on certain desktop platforms (e.g. macOS) too. The stable, cross-platform solution is always `QOpenGLWidget`.

— Qt Documentation (5.9)

Grundlegend: Ein OpenGL bild wird beim `QOpenGLWidget` immer erst in einen Buffer gerendert, und dann entsprechend der Zusammensetzungsregeln (Compositing) auf den Bildschirm gezeichnet. Das dauert natürlich entsprechend länger als direktes Zeichnen (siehe Performance-Test unten).

Der wesentliche Vorteil des gepufferten Zeichnens ist die Möglichkeit des inkrementellen Renderns. Ob man das braucht, hängt wesentlich von der eigentlichen Anwendung ab. Eigentlich ist dies nur von Belang, wenn das zu rendernde Fenster aus mehreren individuellen Teilbereichen besteht. In diesem Fall könnte man aber auch die Anwendung aus mehreren OpenGL-Fenstern zusammensetzen, in in jedem Fenster individuell zeichnen.

Die letzte Anmerkung über die Portabilität und Stabilität ist vielleicht nicht ganz unwichtig. Man kann das Ganze also von 2 Seiten betrachten:

- mit `QOpenGLWidget` beginnen, und beim Auftreten von Performanceproblemen wechseln,
- mit `QOpenGLWindow` oder einer selbstgeschriebenen leichtgewichtigen Klasse wie in *Tutorial 01*, beginnen, und im Falle von Kompatibilitätsproblemen auf `QOpenGLWidget` wechseln

Hinsichtlich der Programmierschnittstelle sind die verschiedenen Klassen sich sehr ähnlich. Nachfolgend sind die einzelnen Anpassungen von *Tutorial 03* zur Verwendung von `QOpenGLWidget` aufgeführt.

4.1.1. Anpassung der Vererbungshierarchie

Der erste Schritt ist das Austauschen der Basisklasse.

RectangleWidget.h

```
class RectangleWindow : public QOpenGLWidget, protected QOpenGLFunctions {
public:
    RectangleWindow(QWidget * parent = nullptr);

    ....

protected:
    void initializeGL() Q_DECL_OVERRIDE;
    void paintGL() Q_DECL_OVERRIDE;

    ....
};
```

Die Klasse `QOpenGLWidget` erbt selbst nicht von `QOpenGLFunctions`, weswegen man diese Klasse als weitere Basisklasse angeben muss (geht auch noch anders, aber so muss im Quelltext sonst nicht viel angepasst werden). Der Konstruktor nimmt, wie andere Widgets auch, ein parent-Zeiger als Argument.

Die Funktionen `initializeGL()` und `paintGL()` sind bei `QOpenGLWidget` protected. Das war's auch schon.

4.1.2. Initialisierung

Der Konstruktor ist entsprechend zu erweitern, sodass der `parent` Zeiger an die Basisklasse weitergereicht wird:

RectangleWidget.cpp:Konstruktor

```
RectangleWindow::RectangleWindow(QWidget * parent) :
    QOpenGLWidget(parent),
    m_vertexColors{
        QColor("#f6a509"),
        QColor("#cb2dde"),
        QColor("#0eeed1"),
        QColor("#068918") },
    m_program(nullptr),
    m_frameCount(5000)
{
    setMinimumSize(600,400);
}
```

Da die Klasse nun ein Widget ist, kann man die minimale Größe auch gleich hier setzen.



Das Setzen der Größe muss vor dem ersten Anzeigen gemacht werden, da sonst das Widget nicht sichtbar ist (und auch nicht vergrößert werden kann).

Die Verwendung der vererbten `QOpenGLFunctions` Funktionen verlangt auch eine Initialisierung, die muss aber durch Aufruf der Funktion in `initializeOpenGLFunctions()` in `initializeGL()` erfolgen.

RectangleWidget.cpp:initializeGL()

```
void RectangleWindow::initializeGL() {
    initializeOpenGLFunctions();

    ....
}
```

Mehr ist nicht zu machen, und schon ist das `RectangleWindow` ein vollständiges Widget.



Das `UpdateBehavior` ist beim `QOpenGLWidget` standardmäßig auf `QOpenGLWidget::NoPartialUpdate` gesetzt, muss also nicht extra angepasst werden.

4.1.3. Einbettung in ein anderes QWidget

Der Widget-Container (siehe *Tutorial 03*) kann entfallen, und die Einbettung des Widgets wird wie mit jedem anderen Widget gemacht.

TestDialog.cpp:Konstruktor

```
....

m_rectangleWindow = new RectangleWindow(this);
m_rectangleWindow->setFormat(format);

// *** create the layout and insert widget container

QVBoxLayout * vlay = new QVBoxLayout;
vlay->setMargin(0);
vlay->setSpacing(0);
vlay->addWidget(m_rectangleWindow);

....
```

4.2. Performance-Vergleich

Die spannende Frage ist, wieviel langsamer ist das `QOpenGLWidget` im Vergleich zum direkten Zeichnen via `OpenGLWindow` oder der eigenen `OpenGLWindow` Klasse aus *Tutorial 01*?

Im direkter Vergleich zwischen *Tutorial 03* und *Tutorial 04* fällt sofort auffällt auf, dass das Resize-Verhalten unterschiedlich ist. Es gibt eine merkliche Verzögerung bei der Größenänderung eines Widgets (sowohl unter Windows, als auch auf anderen Plattformen) und auch, wenn die Programme im Releasemodus kompiliert sind.

Da in diesen Testfällen nicht gerendert wird, liegt der Unterschied nur allein in der Widget-Compositing-Funktionalität im `QOpenGLWidget`.

Bei einem kleinen Benchmarktest (ca. 30 Sekunden lang mit dem Mauszeiger die Fenstergröße verändern, dabei die Anzahl der `paintEvents()` aufzeichnen und dann durch die Laufzeit teilen) kommt man auf:

- 25 Fensteraktualisierungen/Sekunde bei der Variante mit `QOpenGLWindow`, und
- 15 Fensteraktualisierungen/Sekunde bei der Variante mit `QOpenGLWidget`.

Das wohlgemerkt ohne OpenGL Zeichenaufrufe.

Interessant wird es, wenn man OpenGL-Animationen dazuschaltet. Dies kann man bei den Beispielen ganz einfach machen, wenn man die Frames für die Farbanimation von 120 auf, ca. 800 ändert. Dann läuft die Animation nach Klick auf "Animate Colors" ein paar Sekunden länger und man kann den CPU Overhead testen.

Bei beiden Varianten dauert die Animation exakt gleich lang, da jeweils mit nahezu 60 Frames pro Sekunde gerendert wird (bei mir zumindest).

Allerdings zeigen beide Varianten unterschiedliche CPU Auslastungen:

- 2.4% (single-core) CPU Load bei der Variante mit `QOpenGLWindow`, und
- 7.9% (single-core) CPU Load bei der Variante mit `QOpenGLWidget`.

Ein Unterschied ist da, aber sicher nicht der Rede wert. Da dürfte der optimistische Verzögerungseffekt beim Vergrößern/Verkleinern eines Fensters während der Animation eher noch stören.

4.3. Transparenz

Wie schon im Screenshot zu sehen, kann man auch halb-transparente Widgetanwendungen bauen, oder auch Anwendungen mit recht unregelmäßigen Formen.

4.3.1. Mit `QOpenGLWidget`

Bei Verwendung des `QOpenGLWidget` ist das recht einfach. Zunächst gibt man dem obersten Widget das Attribut `Qt::WA_TranslucentBackground`. Wer keine Titelleiste und keine Rahmen um das Fenster haben möchte, muss dem obersten Widget auch noch die Eigenschaft `Qt::FramelessWindowHint` geben, also z.B.:

main.cpp

```
int main(int argc, char **argv) {
    QApplication app(argc, argv);

    TestDialog dlg;
    // transparent window
    dlg.setAttribute(Qt::WA_TranslucentBackground, true);
    // no frame and flags.
    dlg.setWindowFlag(Qt::FramelessWindowHint, true);
    dlg.show();

    return app.exec();
}
```

In der eigentlichen Zeichenfunktion muss man nur noch die Hintergrundfarbe auf Transparent umstellen (zumindest einen Alpha-Wert < 1):

RectangleWindow.cpp:paintGL()

```
void RectangleWindow::paintGL() {
    // set the background color = clear color
    glClearColor(0.0f, 0.0f, 0.0f, 0.0f); // fully transparent
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);

    ....
}
```



Normalerweise würde man bei einem Alpha-Wert von 0 erwarten, dass der Hintergrund unverändert durchscheint, auch wenn die RGB Farbanteile der Hintergrundfarbe (clear color) irgendwelche Werte haben. Das ist aber nicht so - die Farben des Hintergrundes erscheinen etwas verblasst. Daher sollte man, wenn man wirklich den Hintergrund unverändert durchscheinen lassen möchte, die clear Color stets auf 0,0,0,0 setzen.

4.3.2. Mit QWindow-basierten OpenGL Renderfenstern

Bei den Varianten aus *Tutorial 01 .. 03* geht Transparenz auch, allerdings mit minimal mehr Aufwand. Bei der Konfiguration des `QSurfaceFormat` muss man einen AlphaBuffer festlegen (hier gezeigt beim Beispiel aus *Tutorial 01*).

main.cpp

```
int main(int argc, char **argv) {
    QApplication app(argc, argv);

    // Set OpenGL Version information
    QSurfaceFormat format;
    format.setRenderableType(QSurfaceFormat::OpenGL);
    format.setProfile(QSurfaceFormat::CoreProfile);
    format.setVersion(3,3);
    format.setAlphaBufferSize(8);

    TriangleWindow window;
    // Note: The format must be set before show() is called.
    window.setFormat(format);
    window.resize(640, 480);
    window.show();
    window.setFlag(Qt::FramelessWindowHint);

    return app.exec();
}
```

In der Render-Funktion muss man noch Alphablending einschalten, hier gezeigt am Beispiel aus *Tutorial 01*.

TriangleWindow.cpp:render()

```
void TriangleWindow::render() {
    ....

    // Set the transparency to the scene to use the transparency of the fragment shader
    glEnable(GL_BLEND);
    glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);

    // set the background color = clear color
    glClearColor(0.0f, 0.0f, 0.0f, .0f);
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);

    ....
}
```

5. Tutorial 05: Maus- und Tastatureingaben

In diesem Tutorial geht es primär um Maus- und Tastatureingaben. Und damit das irgendwie Sinn macht, brauchen wir ein 3D Modell, und deshalb ist dieses Tutorial auch *sehr sehr lang*.

[Tutorial_05] | *Tutorial_05_mac.png*

Figure 5. *Tutorial_05 (Mac Screenshot)*



Quelltext für dieses Tutorial liegt im github repo: [Tutorial_05](#)

In diesem Tutorial gibt es viele neue Dinge verwendet:

- zwei Modelle (eins für die Häuser und eins für das Gitter), nebst dazugehörigen, unterschiedlichen Shaderprogrammen (das vom Gitter verwendet in die Tiefe abgeblendete Farben)
- Tiefenpuffer, sodass Gitterlinien/Häuser korrekt vor/hintereinander gezeichnet werden
- Model2World und World2View-Matrizen (mit perspektivischer Projektion)
- Shaderprogramme und Renderobjekte (bzw. Objektgruppen) sind in Klassen zusammengefasst, wodurch der Quelltext deutlich übersichtlicher wird
- eine Maus+Tastatursteuerung (WASDQE + Mauslook) ist integriert (mit einem nicht ganz einfachen Event-Timing)
- und das ganze wieder mit dem Schwerpunkt: Rendern nur wenn notwendig!

5.1. Überblick

Das Tutorial ist sehr lang, und der Quelltext entsprechend auch. Daher gehen wir in diesem Tutorial schrittweise vor. Die gezeigten Quelltextausschnitte stimmen daher nicht immer 100% mit dem finalen Quelltext überein (ich hab da aus didaktischen Gründen immer mal was weggelassen).

Folgende Implementierungsschritte werden besprochen:

- Anpassung der Klasse `OpenGLWindow` an die in `QOpenGLWidget` bzw. `QOpenGLWindow` verwendeten Funktionsnamen
- Vorstellung der Klasse `SceneView`, die das bisherige `TriangleWindow` oder `RectangleWindow` ersetzt
- Transformationsmatrizen: Model → World → Kamera → Projektion (Klassen `Transform3D` und `Camera`)
- Kapselung der Shaderprogramme und Initialisierung und Verwendung derselben
- Kapselung der Zeichenroutinen für das Gitterraster, Abblendeffekt am Horizont im Shader
- Kapselung der Zeichenroutinen für die Boxen

5.2. Fenster-Basisklasse OpenGLWindow

Als Grundlage für die Implementierung wird die Klasse `OpenGLWindow` aus *Tutorial 01* verwendet, allerdings etwas abgewandelt. Letztlich wird die Schnittstelle angepasst, um ungefähr der des `QOpenGLWidget` zu entsprechen:


```

class OpenGLWindow : public QWindow, protected QOpenGLFunctions {
    Q_OBJECT
public:
    explicit OpenGLWindow(QWindow *parent = nullptr);

    void initOpenGL();

public slots:
    void renderLater();
    void renderNow();

protected:
    bool event(QEvent *event) override;
    void exposeEvent(QExposeEvent *event) override;
    void resizeEvent(QResizeEvent *) override;

    virtual void initializeGL() = 0;
    virtual void resizeGL(int width, int height) { Q_UNUSED(width) Q_UNUSED(height) }
    virtual void paintGL() = 0;

    QOpenGLContext *m_context;
};

```

Die Funktionen `initializeGL()` und `paintGL()` sind aus den vorangegangenen Tutorials bekannt. Die Funktion `resizeGL()` ist eigentlich nur eine Bequemlichkeitsfunktion, welche aus dem Eventhandler `resizeEvent()` aufgerufen wird.

Neu ist jedoch die Funktion `initOpenGL()`, mit der die OpenGL-Initialisierung gezielt angestoßen werden kann. Normalerweise wird die Initialisierung beim ersten Anzeigen des Fensters (genaugenommen beim ersten `ResizeEvent`) aufgerufen. Dies kann aber für eine sinnvolle Fehlerbehandlung zu spät sein, weil dann das Fenster wahrscheinlich leer angezeigt wird. Daher ist es sinnvoll, die Funktion nach dem Erstellen des Renderfensters, aber vor Aufruf von `show()` auszuführen.

Macht man das nicht, so wird diese Funktion wie bisher automatisch beim ersten Anzeigen aufgerufen, konkret im `ResizeEvent`-Handler:

OpenGLWindow.cpp: Funktion `resizeEvent()`

```

void OpenGLWindow::resizeEvent(QResizeEvent * event) {
    QWindow::resizeEvent(event);

    // initialize on first call
    if (m_context == nullptr)
        initOpenGL();

    resizeGL(width(), height());
}

```

Unabhängig von dieser Initialisierungsfunktion muss man natürlich die Funktion `initializeGL()` implementieren. Alles andere in der Klasse ist altbekannt.

5.3. Klasse `SceneView` - die konkrete Implementierung

5.3.1. Klassendeklaration

Zwecks Überblick, die Klassendeklaration in Teilen. Zunächst die üblichen Verdächtigen:

SceneView.h

```
class SceneView : public OpenGLWindow {
public:
    SceneView();
    virtual ~SceneView() override;

protected:
    void initializeGL() override;
    void resizeGL(int width, int height) override;
    void paintGL() override;
```

Dann kommen die Ereignisbehandlungsroutinen für die Tastatur- und Mauseingaben. Dazu gehören auch die Hilfsfunktionen `checkInput()` und `processInput()`, die im Abschnitt zur Tastatur- und Mauseingabe erklärt sind. Die Member-Variablen `m_keyboardMouseHandler` und `m_inputEventReceived` gehören auch dazu.

SceneView.h, Deklaration der Klasse SceneView

```
void keyPressEvent(QKeyEvent *event) override;
void keyReleaseEvent(QKeyEvent *event) override;
void mousePressEvent(QMouseEvent *event) override;
void mouseReleaseEvent(QMouseEvent *event) override;
void mouseMoveEvent(QMouseEvent *event) override;
void wheelEvent(QWheelEvent *event) override;

private:
    void checkInput();
    void processInput();

    KeyboardMouseHandler    m_keyboardMouseHandler;
    bool                    m_inputEventReceived;
```

Dann kommt die Funktion `updateWorld2ViewMatrix()` zur Koordinatentransformation und die dazugehörigen Member-Variablen.

SceneView.h, Deklaration der Klasse SceneView, fortgesetzt

```
void updateWorld2ViewMatrix();

QMatrix4x4    m_projection;
Transform3D   m_transform;
Camera        m_camera;
QMatrix4x4    m_worldToView;
```

Zuletzt kommen Member-Variablen, die die Shader-Programme und Zeichenobjekte kapseln (beinhalten Shader, VAO, VBO, EBO, etc.)

```
    QList<ShaderProgram>    m_shaderPrograms;  
  
    BoxObject                m_boxObject;  
    GridObject              m_gridObject;  
};
```

Und das war's auch schon - recht kompakt, oder?

5.3.2. Das Aktualisierungskonzept

Die zuletzt gezeigten Member-Variablen gehören zum Aktualisierungskonzept der Klasse. Erklärtes Ziel ist es, nur dann zu renddern, wenn es wirklich notwendig ist, also:

- wenn die Fenstergröße (Viewport) verändert wurde,
- wenn das Fenster angezeigt/sichtbar wird (exposed),
- wenn durch Nutzerinteraktion die Kameraposition verändert wird
- wenn die Szene selbst transformiert wird (z.B. programmgesteuerte Animation...)

Wenn man jetzt bei jedem Eintreffen eines solchen Ereignisses jedesmal neu zeichnen würde, wäre das mit ziemlichem Overhead verbunden. Besser ist es, beim Eintreffen eines solchen Ereignisses einfach nur ein neuzeichnen anzufordern. Da die `UpdateRequest`-Ereignisse normalerweise mit der Bildschirmfrequenz synchronisiert sind, kann es natürlich sein, dass mehrfach hintereinander `UpdateRequest`-Events an die Eventloop angehängt werden. Dabei werden diese aber zusammengefasst und nur ein Event ausgeschickt. Es muss ja auch nur einmal je angezeigtem Frame gezeichnet werden.

Grundsätzlich muss man also nur die Funktion `QWindow::requestUpdate()` (oder unsere Bequemlichkeitsfunktion `renderLater()`) aufrufen, damit beim nächsten VSync wieder neu gezeichnet wird.

Leider funktioniert das Verfahren im Fall des `ExposeEvent` nicht perfekt. Gerade unter Windows führt das beim Vergrößern des Fensters zu unschönen Artefakten am rechten und unteren Bildschirmrand. Daher muss man in diesem Fall tatsächlich gleich in der Ereignisbehandlungsroutine neu zeichnen und dabei den OpenGL Viewport bereits an die neue Fenstergröße anpassen (das geschieht aber bereits in `OpenGLWindow::exposeEvent()`).

Beim `ResizeEvent` ist zu beachten, dass beim Vergrößern des Fensters allerdings *nur*, wenn der Aufruf nicht zusammen mit einem `ExposeEvent` stattfindet. Daher sollte man in der Funktion `SceneView::resizeEvent()` *nicht* `renderLater()` aufrufen!

Ohne einen Aufruf von `renderLater()` im `ResizeEvent`-Handler, erhält man folgende Aufrufreihenfolge bei der Fenstervergrößerung:

```
OpenGLWindow::resizeEvent()  
OpenGLWindow::exposeEvent()  
SceneView::paintGL(): Rendering to: 1222 x 891  
OpenGLWindow::resizeEvent()  
OpenGLWindow::exposeEvent()  
SceneView::paintGL(): Rendering to: 1224 x 892
```

Ruft man stattdessen `renderLater()` auf, erhält man:

```
OpenGLWindow::resizeEvent()
OpenGLWindow::exposeEvent()
SceneView::paintGL(): Rendering to: 1283 x 910
SceneView::paintGL(): Rendering to: 1283 x 910
OpenGLWindow::resizeEvent()
OpenGLWindow::exposeEvent()
SceneView::paintGL(): Rendering to: 1288 x 912
SceneView::paintGL(): Rendering to: 1288 x 912
```

Wie man sieht, wird jedes Mal doppelt gezeichnet, was eine deutlich spürbare Verzögerung bedeutet. Grundsätzlich hilft es zu wissen, dass:

- beim ersten Anzeigen eines Fensters immer erst ein `ResizeEvent`, gefolgt von einem `ExposeEvent` geschickt wird
- beim Größenändern eines Fensters ebenfalls immer ein `ResizeEvent`, gefolgt von einem `ExposeEvent` geschickt wird
- beim Minimieren und Maximieren eines Fensters nur je ein (oder auf dem Mac mehrere) `ExposeEvent` geschickt werden. Dies kann man nutzen, um eine Animation zu stoppen und beim erneuten Anzeigen (`isExposed() == true`) wieder zu starten. Dies ist aber nicht der Fokus in diesem Tutorial. Daher könnte man auch das `ExposeEvent` komplett ignorieren und `renderNow()` direkt am Ende von `OpenGLWindow::resizeEvent()` aufrufen. So wie es aktuell implementiert ist, wird beim Minimieren und Maximieren mehrfach `ExposeEvent` mit `isExposed() == true` aufgerufen und damit wird mehrfach trotz unverändertem Viewport und unveränderte Szene gezeichnet. Das ist aber nicht weiter bemerkbar.

5.3.3. Implementierung der Klasse `SceneView`

Die Klasse `SceneView` wird als QWindow-basierte Klasse selbst via Widget-Container in den Testdialog eingebettet (siehe *Tutorial 03*).

5.4. Antialiasing

Es gibt hier verschiedene Möglichkeiten, die wohl einfachste aus Sicht der Programmierung ist das Einschalten von Multisampling (MSAA) (siehe Erläuterung auf <https://www.khronos.org/opengl/wiki/Multisampling>).

Dazu muss man beim Konfigurieren des `QSurfaceFormat`-Objekts nur folgende Zeile hinzufügen:

```
format.setSamples(4); // enable multisampling (antialiasing)
```

Multisampling braucht mehr Grafikkartenspeicher und ist durch das mehrfache Samplen von Pixeln/Fragmenten natürlich langsamer. Daher gibt es auch die Möglichkeit, Antialiasing in das Shaderprogramm einzubauen.

TODO : Antialiased-Shader