

BERICHT OPTIMIERUNG

Von Rebecca Sigmund Matr.Nr. 64146



Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|---|
| Aufgabe 1: Schnittpunkttest optimieren | 2 |
| Quelltext | 2 |
| Assemblercode | 4 |
| Zeitmessung..... | 8 |
| Interpretation | 8 |
| Aufgabe 2: Quadratwurzel..... | 9 |
| Quelltext | 9 |
| Assemblercode | 10 |
| Zeitmessung..... | 12 |
| Interpretation | 12 |
| Aufgabe 3: k-d-Baum | 13 |
| Quelltext | 13 |
| Assemblercode | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| Zeitmessung..... | 15 |
| Interpretation | 15 |

Aufgabe 1: Schnittpunkttest optimieren

Quelltext

| Ausgangsversion | Optimierte Version |
|---|--|
| <pre> bool intersects(Vector<T,3> origin, Vector<T,3> direction, FLOAT &t, FLOAT &u, FLOAT &v, FLOAT minimum_t = INFINITY) { // Normale des Dreiecks bestimmen Vector<T, 3> normal = cross_product(p2 - p1, p3 - p1); T normalRayProduct = normal.scalar_product(direction); // used for u-v-parameter calculation T area = normal.length(); // Ist die Richtung parallel zum Dreieck? if (fabs(normalRayProduct) < EPSILON) { return false; } T d = normal.scalar_product(p1); // Wie oft wird direction benötigt, um von origin die // Ebene des Dreiecks zu schneiden t = (d - normal.scalar_product(origin)) / normalRayProduct; // Ist Dreieck in der falschen Richtung? if (t < 0.0) { return false; } // Der Schnittpunkt von origin + direction mit der Ebene des Dreiecks Vector<T, 3> intersection = origin + t * direction; // Ist der Schnittpunkt innerhalb des Dreiecks? Vector<T, 3> vector = cross_product(p2 - p1, intersection - p1); if (normal.scalar_product(vector) < 0.0) { return false; } vector = cross_product(p3 - p2, intersection - p2); if (normal.scalar_product(vector) < 0.0) { return false; } </pre> | <pre> bool intersects(Vector<T,3> origin, Vector<T,3> direction, FLOAT &t, FLOAT &u, FLOAT &v, FLOAT minimum_t) { // Normale des Dreiecks bestimmen Vector<T, 3> normal = cross_product(p2 - p1, p3 - p1); T normalRayProduct = normal.scalar_product(direction); // Ist die Richtung parallel zum Dreieck? if (fabs(normalRayProduct) < EPSILON) { return false; } T d = normal.scalar_product(p1); // Wie oft wird direction benötigt, um von origin die // Ebene des Dreiecks zu schneiden t = (d - normal.scalar_product(origin)) / normalRayProduct; // Ist das Dreieck in der falschen Richtung? Oder gibt es schon ein anderes // Dreieck, welches weiter vorne liegt? if (t < 0.0 t > minimum_t) { return false; } // Der Schnittpunkt von origin + direction mit der Ebene des Dreiecks Vector<T, 3> intersection = origin + t * direction; // Ist der Schnittpunkt innerhalb des Dreiecks? Vector<T, 3> vector1 = cross_product(p2 - p1, intersection - p1); if (normal.scalar_product(vector1) < 0.0) { return false; } vector1 = cross_product(p3 - p2, intersection - p2); if (normal.scalar_product(vector1) < 0.0) { return false; } </pre> |

| | |
|--|---|
| <pre> u = vector.length() / area; vector = cross_product(p1 - p3, intersection - p3); if (normal.scalar_product(vector) < 0.0) { return false; } v = vector.length() / area; return true; } </pre> | <pre> Vector<T, 3> vector2 = cross_product(p1 - p3, intersection - p3); if (normal.scalar_product(vector2) < 0.0) { return false; } // u und v berechnen. Wurzel jeweils erst am Ende ziehen T area = normal.square_of_length(); u = sqrt(vector1.square_of_length() / area); v = sqrt(vector2.square_of_length() / area); return true; } </pre> |
|--|---|

Mit

```

if ( t < 0.0 || t > minimum_t ) {
    return false;
}

```

wird überprüft, ob bereits ein Dreieck, das vor dem zu prüfenden Dreieck liegt, gefunden wurde. In diesem Fall muss nicht weiter gerechnet werden.

Die Berechnung der Parameter u und v wurde an das Ende der Methode verschoben, um die Parameter nicht unnötig zu berechnen, falls die Methode frühzeitig abgebrochen wird.

Auch die Berechnung des Parameters area wurde ans Ende der Methode geschoben. Außerdem wird nicht direkt die Länge bestimmt, sondern zunächst das Quadrat der Länge. Somit wird eine Quadratwurzel-Berechnung eingespart.

Assemblercode

```

Vector<T, 3> normal = cross_product(p2 - p1, p3 - p1);

T normalRayProduct = normal.scalar_product( direction );

// Ist die Richtung parallel zum Dreieck?
if ( fabs(normalRayProduct) < EPSILON ) {
    9ea:    c5 7b 10 35 70 03 00    vmovsd 0x370(%rip),%xmm14    # d62
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0x5e2>
    9f1:    00
    9f2:    49 8d 1c c1                lea    (%r9,%rax,8),%rbx
stats.no_ray_triangle_intersection_tests++;
    9f6:    48 83 07 01                addq   $0x1,(%rdi)
    difference.x[i] = this->x[i] - subtract.x[i];
    9fa:    c5 fa 10 6b 1c                vmovss 0x1c(%rbx),%xmm5
    9ff:    c5 fa 10 4b 04                vmovss 0x4(%rbx),%xmm1
    a04:    c5 d2 5c d9                vsubss %xmm1,%xmm5,%xmm3
    a08:    c5 7a 10 43 08                vmovss 0x8(%rbx),%xmm8
    a0d:    c5 fa 11 6c 24 40            vmovss %xmm5,0x40(%rsp)
    a13:    c5 fa 10 6b 14                vmovss 0x14(%rbx),%xmm5
    a18:    c4 c1 52 5c f0                vsubss %xmm8,%xmm5,%xmm6
    a1d:    c5 7a 10 6b 18                vmovss 0x18(%rbx),%xmm13
    a22:    c5 fa 10 53 0c                vmovss 0xc(%rbx),%xmm2
    a27:    c5 fa 10 3b                    vmovss (%rbx),%xmm7
    a2b:    c5 12 5c df                vsubss %xmm7,%xmm13,%xmm11
    a2f:    c5 7a 11 6c 24 28            vmovss %xmm13,0x28(%rsp)
    a35:    c5 6a 5c cf                vsubss %xmm7,%xmm2,%xmm9
    a39:    c5 7a 10 6b 20                vmovss 0x20(%rbx),%xmm13
    a3e:    c5 fa 11 54 24 4c            vmovss %xmm2,0x4c(%rsp)
    a44:    c4 c1 12 5c c0                vsubss %xmm8,%xmm13,%xmm0

template <class T>
Vector<T, 3> cross_product(Vector<T, 3> v1, Vector<T, 3> v2) {
    Vector<T, 3> cross;

    cross[0] = v1[1] * v2[2] - v1[2] * v2[1];
    a49:    c5 ca 59 e3                vmulss %xmm3,%xmm6,%xmm4
    difference.x[i] = this->x[i] - subtract.x[i];
    a4d:    c5 fa 10 53 10                vmovss 0x10(%rbx),%xmm2
    a52:    c5 6a 5c d1                vsubss %xmm1,%xmm2,%xmm10
    a56:    c5 7a 11 6c 24 30            vmovss %xmm13,0x30(%rsp)
    cross[0] = v1[1] * v2[2] - v1[2] * v2[1];
    a5c:    c4 e2 29 bb e0                vfmsub231ss %xmm0,%xmm10,%xmm4
    cross[1] = v1[2] * v2[0] - v1[0] * v2[2];
    a61:    c5 b2 59 c0                vmulss %xmm0,%xmm9,%xmm0
    a65:    c4 c2 49 bb c3                vfmsub231ss %xmm11,%xmm6,%xmm0
    cross[2] = v1[0] * v2[1] - v1[1] * v2[0];
    a6a:    c4 41 2a 59 db                vmulss %xmm11,%xmm10,%xmm11
    a6f:    c4 c2 21 9b d9                vfmsub132ss %xmm9,%xmm11,%xmm3
    product += this->x[i] * factor.x[i];
    a74:    c5 7a 10 5c 24 48            vmovss 0x48(%rsp),%xmm11
    a7a:    c4 62 19 99 dc                vfmaddd132ss %xmm4,%xmm12,%xmm11
    a7f:    c4 62 79 b9 5c 24 38          vfmaddd231ss 0x38(%rsp),%xmm0,%xmm11
    a86:    c4 42 61 b9 df                vfmaddd231ss %xmm15,%xmm3,%xmm11
    a8b:    c4 41 78 28 eb                vmovaps %xmm11,%xmm13
    a90:    c5 10 54 2d 60 03 00          vandps 0x360(%rip),%xmm13,%xmm13    # df8
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0x678>
    a97:    00
    a98:    c4 41 12 5a ed                vcvtsd2sd %xmm13,%xmm13,%xmm13
    a9d:    c4 41 79 2e f5                vucomisd %xmm13,%xmm14

```

```

aa2:  0f 87 5e 02 00 00      ja      d06
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0x586>
aa8:  c5 78 28 f4             vmovaps %xmm4,%xmm14
aac:  c4 62 19 99 f7         vfmadd132ss %xmm7,%xmm12,%xmm14
ab1:  c4 41 78 28 ee         vmovaps %xmm14,%xmm13
ab6:  c5 7a 10 74 24 60       vmovss 0x60(%rsp),%xmm14
abc:  c4 62 79 b9 e9         vfmadd231ss %xmm1,%xmm0,%xmm13
ac1:  c4 62 19 99 f4         vfmadd132ss %xmm4,%xmm12,%xmm14
ac6:  c4 42 61 b9 e8         vfmadd231ss %xmm8,%xmm3,%xmm13
acb:  c4 62 79 b9 74 24 5c    vfmadd231ss 0x5c(%rsp),%xmm0,%xmm14
ad2:  c4 62 61 b9 74 24 58    vfmadd231ss 0x58(%rsp),%xmm3,%xmm14
    return false;
}

T d = normal.scalar_product( p1 );
// Wie oft wird direction benötigt, um von origin die Ebene des Dreiecks zu schneiden
t = (d - normal.scalar_product( origin ) ) / normalRayProduct;
ad9:  c4 41 12 5c ee        vsubss %xmm14,%xmm13,%xmm13
ade:  c4 41 12 5e db        vdivss %xmm11,%xmm13,%xmm11

// Ist das Dreieck in der falschen Richtung? Oder gibt es schon ein anderes Dreieck,
welches weiter vorne liegt?
if ( t < 0.0 || t > minimum_t ) {
    ae3:  c4 41 78 2e e3      vucomiss %xmm11,%xmm12
    ae8:  0f 87 18 02 00 00   ja      d06
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0x586>
aee:  c5 78 2e 5c 24 50      vucomiss 0x50(%rsp),%xmm11
af4:  0f 87 0c 02 00 00     ja      d06
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0x586>
    sum.x[i] = this->x[i] + addend.x[i];
afa:  c5 7a 10 6c 24 48      vmovss 0x48(%rsp),%xmm13
b00:  c4 62 21 a9 6c 24 60    vfmadd213ss 0x60(%rsp),%xmm11,%xmm13
    difference.x[i] = this->x[i] - subtract.x[i];
b07:  c5 7a 11 6c 24 74      vmovss %xmm13,0x74(%rsp)
b0d:  c5 12 5c ef            vsubss %xmm7,%xmm13,%xmm13
    sum.x[i] = this->x[i] + addend.x[i];
b11:  c5 7a 10 74 24 38      vmovss 0x38(%rsp),%xmm14
b17:  c4 62 21 a9 74 24 5c    vfmadd213ss 0x5c(%rsp),%xmm11,%xmm14
b1e:  c5 7a 11 74 24 64      vmovss %xmm14,0x64(%rsp)
b24:  c4 41 78 28 f7         vmovaps %xmm15,%xmm14
    difference.x[i] = this->x[i] - subtract.x[i];
b29:  c5 7a 11 6c 24 68      vmovss %xmm13,0x68(%rsp)
    sum.x[i] = this->x[i] + addend.x[i];
b2f:  c4 62 21 a9 74 24 58    vfmadd213ss 0x58(%rsp),%xmm11,%xmm14
    difference.x[i] = this->x[i] - subtract.x[i];
b36:  c4 41 0a 5c f8         vsubss %xmm8,%xmm14,%xmm15
b3b:  c5 7a 10 6c 24 64      vmovss 0x64(%rsp),%xmm13
b41:  c5 12 5c e9            vsubss %xmm1,%xmm13,%xmm13
cross[0] = v1[1] * v2[2] - v1[2] * v2[1];
b45:  c5 7a 11 6c 24 78      vmovss %xmm13,0x78(%rsp)
b4b:  c4 41 4a 59 ed         vmulss %xmm13,%xmm6,%xmm13
b50:  c4 42 29 bb ef         vfmsub231ss %xmm15,%xmm10,%xmm13
cross[2] = v1[0] * v2[1] - v1[1] * v2[0];
b55:  c5 2a 59 54 24 68      vmulss 0x68(%rsp),%xmm10,%xmm10
    product += this->x[i] * factor.x[i];
b5b:  c4 62 19 99 ec         vfmadd132ss %xmm4,%xmm12,%xmm13
cross[1] = v1[2] * v2[0] - v1[0] * v2[2];
b60:  c4 41 32 59 ff         vmulss %xmm15,%xmm9,%xmm15
b65:  c4 e2 01 9b 74 24 68    vfmsub132ss 0x68(%rsp),%xmm15,%xmm6
    product += this->x[i] * factor.x[i];
b6c:  c4 e2 11 99 f0         vfmadd132ss %xmm0,%xmm13,%xmm6

```

```

cross[2] = v1[0] * v2[1] - v1[1] * v2[0];
b71:    c4 62 31 bb 54 24 78    vfmsub231ss 0x78(%rsp),%xmm9,%xmm10
    product += this->x[i] * factor.x[i];
b78:    c4 c2 61 b9 f2        vfmsub231ss %xmm10,%xmm3,%xmm6
// Der Schnittpunkt der direction von origin aus mit der Ebene des Dreiecks
Vector<T, 3> intersection = origin + t * direction;

// Ist der Schnittpunkt innerhalb des Dreiecks?
Vector<T, 3> vector1 = cross_product(p2 - p1, intersection - p1 );
if ( normal.scalar_product(vector1) < 0.0 ) {
    b7d:    c5 78 2e e6        vucomiss %xmm6,%xmm12
    b81:    0f 87 7f 01 00 00    ja     d06
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0x586>
    difference.x[i] = this->x[i] - subtract.x[i];
    b87:    c5 7a 10 6c 24 74    vmovss 0x74(%rsp),%xmm13
    b8d:    c5 7a 10 7c 24 4c    vmovss 0x4c(%rsp),%xmm15
    b93:    c4 41 12 5c d7        vsubss %xmm15,%xmm13,%xmm10
    b98:    c5 7a 10 6c 24 28    vmovss 0x28(%rsp),%xmm13
    b9e:    c4 41 12 5c ff        vsubss %xmm15,%xmm13,%xmm15
    ba3:    c5 fa 10 74 24 64    vmovss 0x64(%rsp),%xmm6
    ba9:    c5 7a 10 6c 24 40    vmovss 0x40(%rsp),%xmm13
    baf:    c5 4a 5c ca        vsubss %xmm2,%xmm6,%xmm9
    bb3:    c5 92 5c d2        vsubss %xmm2,%xmm13,%xmm2
    bb7:    c5 7a 10 6c 24 30    vmovss 0x30(%rsp),%xmm13
    bbd:    c5 8a 5c f5        vsubss %xmm5,%xmm14,%xmm6
    bc1:    c5 92 5c ed        vsubss %xmm5,%xmm13,%xmm5
    cross[0] = v1[1] * v2[2] - v1[2] * v2[1];
    bc5:    c4 41 52 59 e9        vmulss %xmm9,%xmm5,%xmm13
    bca:    c4 62 69 bb ee        vfmsub231ss %xmm6,%xmm2,%xmm13
    cross[2] = v1[0] * v2[1] - v1[1] * v2[0];
    bcf:    c4 c1 6a 59 d2        vmulss %xmm10,%xmm2,%xmm2
    cross[1] = v1[2] * v2[0] - v1[0] * v2[2];
    bd4:    c4 c1 4a 59 f7        vmulss %xmm15,%xmm6,%xmm6
    cross[2] = v1[0] * v2[1] - v1[1] * v2[0];
    bd9:    c4 42 69 9b cf        vfmsub132ss %xmm15,%xmm2,%xmm9
    product += this->x[i] * factor.x[i];
    bde:    c5 78 28 fc        vmovaps %xmm4,%xmm15
    cross[1] = v1[2] * v2[0] - v1[0] * v2[2];
    be2:    c4 c2 49 9b ea        vfmsub132ss %xmm10,%xmm6,%xmm5
    product += this->x[i] * factor.x[i];
    be7:    c4 42 19 99 fd        vfmsub132ss %xmm13,%xmm12,%xmm15
    bec:    c5 78 29 fa        vmovaps %xmm15,%xmm2
    bf0:    c4 e2 79 b9 d5        vfmsub231ss %xmm5,%xmm0,%xmm2
    bf5:    c4 c2 61 b9 d1        vfmsub231ss %xmm9,%xmm3,%xmm2
    return false;
}

vector1 = cross_product(p3 - p2, intersection - p2 );
if ( normal.scalar_product(vector1) < 0.0 ) {
    bfa:    c5 78 2e e2        vucomiss %xmm2,%xmm12
    bfe:    0f 87 02 01 00 00    ja     d06
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0x586>
    difference.x[i] = this->x[i] - subtract.x[i];
    c04:    c5 fa 10 54 24 74    vmovss 0x74(%rsp),%xmm2
    c0a:    c5 3a 5c 44 24 30    vsubss 0x30(%rsp),%xmm8,%xmm8
    c10:    c5 ea 5c 74 24 28    vsubss 0x28(%rsp),%xmm2,%xmm6
    c16:    c5 7a 10 7c 24 40    vmovss 0x40(%rsp),%xmm15
    c1c:    c5 fa 10 54 24 64    vmovss 0x64(%rsp),%xmm2
    c22:    c5 c2 5c 7c 24 28    vsubss 0x28(%rsp),%xmm7,%xmm7
    c28:    c4 41 6a 5c d7        vsubss %xmm15,%xmm2,%xmm10
    c2d:    c5 8a 5c 54 24 30    vsubss 0x30(%rsp),%xmm14,%xmm2

```

```

    c33:    c4 c1 72 5c cf                vsubss %xmm15,%xmm1,%xmm1
cross[0] = v1[1] * v2[2] - v1[2] * v2[1];
    c38:    c4 41 3a 59 f2                vmulss %xmm10,%xmm8,%xmm14
    c3d:    c4 62 71 bb f2                vfmsub231ss %xmm2,%xmm1,%xmm14
cross[2] = v1[0] * v2[1] - v1[1] * v2[0];
    c42:    c5 f2 59 ce                vmulss %xmm6,%xmm1,%xmm1
cross[1] = v1[2] * v2[0] - v1[0] * v2[2];
    c46:    c5 c2 59 d2                vmulss %xmm2,%xmm7,%xmm2
cross[2] = v1[0] * v2[1] - v1[1] * v2[0];
    c4a:    c4 c2 71 9b fa                vfmsub132ss %xmm10,%xmm1,%xmm7
    product += this->x[i] * factor.x[i];
    c4f:    c5 f8 28 cc                vmovaps %xmm4,%xmm1
cross[1] = v1[2] * v2[0] - v1[0] * v2[2];
    c53:    c4 62 69 9b c6                vfmsub132ss %xmm6,%xmm2,%xmm8
    product += this->x[i] * factor.x[i];
    c58:    c4 c2 19 99 ce                vfmaddd132ss %xmm14,%xmm12,%xmm1
    c5d:    c4 c2 79 b9 c8                vfmaddd231ss %xmm8,%xmm0,%xmm1
    c62:    c4 e2 61 b9 cf                vfmaddd231ss %xmm7,%xmm3,%xmm1
    return false;
}

Vector<T, 3> vector2 = cross_product(p1 - p3, intersection - p3 );
if (normal.scalar_product(vector2) < 0.0 ) {
    c67:    c5 78 2e e1                vucomiss %xmm1,%xmm12
    c6b:    0f 87 95 00 00 00          ja     d06
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0x586>
    square_of_length += ( this->x[i] * this->x[i] );
    c71:    c4 e2 19 99 e4                vfmaddd132ss %xmm4,%xmm12,%xmm4
    c76:    c4 42 19 99 ed                vfmaddd132ss %xmm13,%xmm12,%xmm13
    c7b:    c4 e2 59 99 c0                vfmaddd132ss %xmm0,%xmm4,%xmm0
    c80:    c4 e2 11 99 ed                vfmaddd132ss %xmm5,%xmm13,%xmm5
    c85:    c4 e2 79 99 db                vfmaddd132ss %xmm3,%xmm0,%xmm3
    c8a:    c4 42 51 99 c9                vfmaddd132ss %xmm9,%xmm5,%xmm9
    return false;
}

// u und v berechnen. Wurzel jeweils erst am Ende ziehen
T area = normal.square_of_length();
u = sqrt(vector1.square_of_length() / area);
    c8f:    c5 b2 5e c3                vdivss %xmm3,%xmm9,%xmm0
    c93:    c5 f1 57 c9                vxorpd %xmm1,%xmm1,%xmm1
    c97:    c5 fa 5a c0                vcvtsd2sd %xmm0,%xmm0,%xmm0
    c9b:    c5 f9 2e c8                vucomisd %xmm0,%xmm1
    c9f:    c5 cb 51 f0                vsqrtsd %xmm0,%xmm6,%xmm6
    ca3:    0f 87 fd 08 00 00          ja     15a6
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0xe26>
    ca9:    c4 42 19 99 f6                vfmaddd132ss %xmm14,%xmm12,%xmm14
    cae:    c4 42 09 99 c0                vfmaddd132ss %xmm8,%xmm14,%xmm8
    cb3:    c4 e2 39 99 ff                vfmaddd132ss %xmm7,%xmm8,%xmm7
v = sqrt(vector2.square_of_length() / area);
    cb8:    c5 c2 5e db                vdivss %xmm3,%xmm7,%xmm3
u = sqrt(vector1.square_of_length() / area);
    cbc:    c5 cb 5a f6                vcvtsd2ss %xmm6,%xmm6,%xmm6
v = sqrt(vector2.square_of_length() / area);
    cc0:    c5 e2 5a db                vcvtsd2sd %xmm3,%xmm3,%xmm3
    cc4:    c5 f9 2e cb                vucomisd %xmm3,%xmm1
    cc8:    c5 c3 51 fb                vsqrtsd %xmm3,%xmm7,%xmm7
    ccc:    0f 87 b2 08 00 00          ja     1584
<_Z8raytraceR6CameraR5SceneR6ScreenP6KDTree+0xe04>

```


Zeitmessung

Zeitmessung in E203 mit dem Befehl

```
g++ -Wall -pedantic -march=native -mfpmath=sse -mavx -O3 raytracer.cc statistics.cc  
bzw.
```

```
g++ -Wall -pedantic -march=native -mfpmath=sse -mavx -O3 -D OPTIMIZED_INTERSECTS  
raytracer.cc statistics.cc
```

| Durchlauf | Zeit ohne Optimierung (in Sekunden) | Zeit nach Optimierung (in Sekunden) |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. | 8.21939 | 6.87551 |
| 2. | 8.09439 | 6.90676 |
| 3. | 8.21939 | 6.96924 |
| 4. | 8.07875 | 6.87547 |
| 5. | 8.17247 | 6.87547 |
| 6. | 8.04746 | 6.92238 |
| 7. | 8.09433 | 6.84424 |
| 8. | 8.07870 | 6.90674 |
| 9. | 8.14120 | 6.84424 |
| 10. | 8.06309 | 6.89112 |
| Durchschnitt | 8.120917 | 6.891117 |

Differenz des Durchschnitts: 1.2298 s

Interpretation

Die Zeit für einen Durchlauf hat sich um mehr als eine Sekunde verbessert. Dies liegt vor allem daran, dass in der nicht optimierten Version, jedes Mal eine Wurzel zu Beginn der Methode gezogen wurde. Dies geschah in der Zeile: `T area = normal.length();` Dies wurde bei einer Auflösung von 256x256 insgesamt 519.950.720 Mal ausgeführt. In den meisten Fällen wurde das Ergebnis dieser Berechnung jedoch nicht weiterverarbeitet, sondern die Methode wurde vorzeitig verlassen, weil sich kein Schnittpunkt ergab. Nur in 35.294 Fällen wird das Ergebnis benötigt, deshalb wurde die Zeile an das Ende der Methode verschoben und wird nun nur in diesen Fällen ausgeführt.

Um weitere Zeit zu sparen, wurden die drei Quadratwurzeln durch zwei ersetzt. Dazu wurden zunächst die Längen der Vektoren im Quadrat berechnet und erst am Schluss die Wurzel der berechneten Division gezogen. Dies war möglich, da folgende Rechenregel gilt:

$$\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{b}} = \sqrt{\frac{a}{b}}$$

Weitere Zeit konnte dadurch eingespart werden, dass ein Dreieck nicht mehr überprüft wird, wenn bereits ein näheres, davor liegendes Dreieck gefunden wurde. Dies geschieht in der Zeile

```
if ( t < 0.0 || t > minimum_t) {  
    return false;  
}
```

Hierdurch hat sich die Anzahl der gefunden Schnittpunkte von 38.215 auf 35.294 reduziert. In diesen 2.921 eingesparten Fällen, konnte die Methode nach dem Vergleich von `t` und `minimum_t` abgebrochen werden und die Quadratwurzeln mussten nicht berechnet werden.

Aufgabe 2: Quadratwurzel

Quelltext

| | |
|---|---|
| <p>In sqrt1 wird jede Quadratwurzel-Berechnung sequenziell ausgeführt. Die beiden Float-Pointer werden zunächst zu Int-Pointern gecastet. Anschließend wird mit ihnen ein Startwert für das Newton-Verfahren berechnet. Ausgehend von diesem Startwert</p> | <pre>template <size_t LOOPS = 2> float sqrt1(float * a) { float root = 0; // a zu int casten int * ai = reinterpret_cast<int *>(a) ; // initial berechnen int * initial = reinterpret_cast<int *>(&root) ; * initial = (1 << 29) + (*ai >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; // Newton Verfahren durchfuehren for (unsigned int j = 0; j < LOOPS; j++) { root = 0.5 * (root + (* a / root)); } return root; }</pre> |
| <p>wird das Newton-Verfahren so oft durchgeführt, wie die Template-Variable „LOOPS“ angibt. Danach wird das Ergebnis zurückgegeben.</p> | |
| <p>Sqrt2 setzt die gleiche Funktionalität, wie Sqrt1 um, jedoch wird nicht eine Variable mitgegeben, sondern ein Array aus vier Werten. Für jeden der vier Werte wird das Newton-Verfahren durchgeführt und die Ergebnisse in einem weiteren Array gespeichert.</p> | <pre>template <size_t LOOPS = 2> void sqrt2(float * __restrict__ a, float * __restrict__ root) { // a zu int casten int * ai = reinterpret_cast<int *>(a) ; // initial berechnen int * initial = reinterpret_cast<int *>(root) ; initial[0] = (1 << 29) + (ai[0] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; initial[1] = (1 << 29) + (ai[1] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; initial[2] = (1 << 29) + (ai[2] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; initial[3] = (1 << 29) + (ai[3] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; // Newton Verfahren durchfuehren for (unsigned int j = 0; j < LOOPS; j++) { root[0] = 0.5 * (root[0] + (a[0] / root[0])); root[1] = 0.5 * (root[1] + (a[1] / root[1])); root[2] = 0.5 * (root[2] + (a[2] / root[2])); root[3] = 0.5 * (root[3] + (a[3] / root[3])); } }</pre> |
| <p>Auch in Sqrt3 werden die Werte als vierer Array mitgegeben. Diese werden dann zu einem Vector gecastet, um immer vier Werte auf einmal zu verarbeiten. Mit diesem Vector wird dann das Newton-Verfahren auf vier Werte gleichzeitig angewandt.</p> | <pre>template <size_t LOOPS = 2> void v4sf_sqrt(v4sf * __restrict__ a, v4sf * __restrict__ root) { // a zu int casten v4si * ai = reinterpret_cast<v4si *>(a) ; // initial berechnen v4si * initial = reinterpret_cast<v4si *>(root) ; * initial = (1 << 29) + (*ai >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; // Newton Verfahren durchfuehren for (unsigned int j = 0; j < LOOPS; j++) { * root = 0.5 * (* root + (* a / * root)); } } // wrapper für v4sf_sqrt template <size_t LOOPS = 2> void sqrt3(float * __restrict__ a, float * __restrict__ root) { v4sf *as = reinterpret_cast<v4sf *>(a); v4sf_sqrt<LOOPS>(as, reinterpret_cast<v4sf *>(root)); }</pre> |

Assemblercode

```
$ cd /cygdrive/c/Users/RebeccaS/Documents/raytracer/src
g++ -Wall -pedantic -march=native -mfpmath=sse -mavx2 -O3 -c -g sqrt_opt.cc
objdump -S sqrt_opt.o > sqrt_opt.s
```

| | |
|---|---|
| Sqrt1 Die Additionen werden einzeln durchgeführt | <pre>* initial = (1 << 29) + (*ai >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; 439: c4 e2 6a f7 84 24 84 sarx %edx,0x84(%rsp),%eax 440: 00 00 00 443: c5 fa 10 a4 24 84 00 vmovss 0x84(%rsp),%xmm4 44a: 00 00 44c: 05 00 40 bb 1f add \$0x1fbb4000,%eax 451: 83 f9 02 cmp \$0x2,%ecx 454: 89 44 24 20 mov %eax,0x20(%rsp) 458: c5 f9 6e 74 24 20 vmovd 0x20(%rsp),%xmm6 root = 0.5 * (root + (* a / root)); 45e: c5 da 5e ee vdivss %xmm6,%xmm4,%xmm5 462: c5 d2 58 ee vaddss %xmm6,%xmm5,%xmm5 466: c5 d2 59 e8 vmulss %xmm0,%xmm5,%xmm5 46a: c5 da 5e e5 vdivss %xmm5,%xmm4,%xmm4 46e: c5 da 58 e5 vaddss %xmm5,%xmm4,%xmm4 472: c5 da 59 e0 vmulss %xmm0,%xmm4,%xmm4 476: c5 fa 11 a4 24 84 35 vmovss %xmm4,0xc3584(%rsp) 47d: 0c 00 47f: 0f 84 68 10 00 00 je 14ed <_Z17measure_sqrt_timeLLm2EEvv+0x14ed></pre> |
| Sqrt1 mit 4x pro Schleife SIMD-Befehle werden genutzt | <pre>* initial = (1 << 29) + (*ai >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; 608: c4 a1 7d 6f 24 36 vmovdqa (%rsi,%r14,1),%ymm4 60e: 41 83 c7 01 add \$0x1,%r15d 612: c5 d5 72 e4 01 vpsrad \$0x1,%ymm4,%ymm5 617: c5 d5 fe f3 vpaddq %ymm3,%ymm5,%ymm6 root = 0.5 * (root + (* a / root)); 61b: c5 dc 5e ee vdivps %ymm6,%ymm4,%ymm5 61f: c5 d4 58 ee vaddps %ymm6,%ymm5,%ymm5 623: c5 d4 59 ea vmulps %ymm2,%ymm5,%ymm5 627: c5 dc 5e e5 vdivps %ymm5,%ymm4,%ymm4 62b: c5 dc 58 e5 vaddps %ymm5,%ymm4,%ymm4 62f: c5 dc 59 e2 vmulps %ymm2,%ymm4,%ymm4</pre> |
| Sqrt2 SIMD-Befehle werden genutzt (256-Bit Register packed single precision) | <pre>initial[0] = (1 << 29) + (ai[0] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; initial[1] = (1 << 29) + (ai[1] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; initial[2] = (1 << 29) + (ai[2] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; initial[3] = (1 << 29) + (ai[3] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; // Newton Verfahren durchfuehren for (unsigned int j = 0; j < LOOPS; j++) { root[0] = 0.5 * (root[0] + (a[0] / root[0])); e98: c5 54 5e ce vdivps %ymm6,%ymm5,%ymm9 e9c: c5 34 58 ce vaddps %ymm6,%ymm9,%ymm9 initial[1] = (1 << 29) + (ai[1] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; ea0: c5 cd 72 e4 01 vpsrad \$0x1,%ymm4,%ymm6 ea5: c5 cd fe f3 vpaddq %ymm3,%ymm6,%ymm6 root[1] = 0.5 * (root[1] + (a[1] / root[1])); ea9: c5 dc 5e fe vdivps %ymm6,%ymm4,%ymm7 root[0] = 0.5 * (root[0] + (a[0] / root[0]));</pre> |

| | |
|---|--|
| | <pre> ead: c5 34 59 ca vmulps %ymm2,%ymm9,%ymm9 eb1: c4 c1 54 5e e9 vdivps %ymm9,%ymm5,%ymm5 root[1] = 0.5 * (root[1] + (a[1] / root[1])); eb6: c5 c4 58 f6 vaddps %ymm6,%ymm7,%ymm6 initial[2] = (1 << 29) + (ai[2] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; eba: c5 c5 72 e1 01 vpsrad \$0x1,%ymm1,%ymm7 ebf: c5 c5 fe fb vpaddd %ymm3,%ymm7,%ymm7 root[1] = 0.5 * (root[1] + (a[1] / root[1])); ec3: c5 cc 59 f2 vmulps %ymm2,%ymm6,%ymm6 root[2] = 0.5 * (root[2] + (a[2] / root[2])); ec7: c5 74 5e c7 vdivps %ymm7,%ymm1,%ymm8 root[0] = 0.5 * (root[0] + (a[0] / root[0])); ecb: c4 c1 54 58 e9 vaddps %ymm9,%ymm5,%ymm5 ed0: c5 d4 59 ea vmulps %ymm2,%ymm5,%ymm5 root[1] = 0.5 * (root[1] + (a[1] / root[1])); ed4: c5 dc 5e e6 vdivps %ymm6,%ymm4,%ymm4 root[2] = 0.5 * (root[2] + (a[2] / root[2])); ed8: c5 3c 58 c7 vaddps %ymm7,%ymm8,%ymm8 initial[3] = (1 << 29) + (ai[3] >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; edc: c5 c5 72 e0 01 vpsrad \$0x1,%ymm0,%ymm7 ee1: c5 c5 fe fb vpaddd %ymm3,%ymm7,%ymm7 root[2] = 0.5 * (root[2] + (a[2] / root[2])); ee5: c5 3c 59 c2 vmulps %ymm2,%ymm8,%ymm8 root[3] = 0.5 * (root[3] + (a[3] / root[3])); ee9: c5 7c 5e d7 vdivps %ymm7,%ymm0,%ymm10 root[1] = 0.5 * (root[1] + (a[1] / root[1])); eed: c5 dc 58 e6 vaddps %ymm6,%ymm4,%ymm4 ef1: c5 dc 59 f2 vmulps %ymm2,%ymm4,%ymm6 root[2] = 0.5 * (root[2] + (a[2] / root[2])); ef5: c4 c1 74 5e c8 vdivps %ymm8,%ymm1,%ymm1 root[3] = 0.5 * (root[3] + (a[3] / root[3])); efa: c5 ac 58 ff vaddps %ymm7,%ymm10,%ymm7 efe: c5 c4 59 fa vmulps %ymm2,%ymm7,%ymm7 f02: c5 fc 5e c7 vdivps %ymm7,%ymm0,%ymm0 root[2] = 0.5 * (root[2] + (a[2] / root[2])); f06: c4 c1 74 58 c8 vaddps %ymm8,%ymm1,%ymm1 f0b: c5 f4 59 ca vmulps %ymm2,%ymm1,%ymm1 root[3] = 0.5 * (root[3] + (a[3] / root[3])); f0f: c5 d4 14 e1 vunpcklps %ymm1,%ymm5,%ymm4 f13: c5 d4 15 c9 vunpckhps %ymm1,%ymm5,%ymm1 f17: c5 fc 58 c7 vaddps %ymm7,%ymm0,%ymm0 f1b: c4 e3 5d 18 f9 01 vinsertf128 \$0x1,%xmm1,%ymm4,%ymm7 f21: c4 e3 5d 06 c9 31 vperm2f128 \$0x31,%ymm1,%ymm4,%ymm1 f27: c5 fc 59 c2 vmulps %ymm2,%ymm0,%ymm0 </pre> |
| <p>Sqrt3</p> <p>SIMD-Befehle werden genutzt</p> | <pre> * initial = (1 << 29) + (*ai >> 1) - (1 << 22) - 0x4C000; 1052:c5 f9 6f 44 05 00 vmovdqa 0x0(%rbp,%rax,1),%xmm0 1058:c5 f1 72 e0 01 vpsrad \$0x1,%xmm0,%xmm1 105d:c5 f1 fe d4 vpaddd %xmm4,%xmm1,%xmm2 // Newton Verfahren durchfuehren for (unsigned int j = 0; j < LOOPS; j++) { * root = 0.5 * (* root + (* a / * root)); 1061:c5 f8 5e ca vdivps %xmm2,%xmm0,%xmm1 1065:c5 f0 58 ca vaddps %xmm2,%xmm1,%xmm1 </pre> |

| | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1069:c5 f0 59 cb | vmulps %xmm3,%xmm1,%xmm1 |
| 106d:c5 f8 5e c1 | vdivps %xmm1,%xmm0,%xmm0 |
| 1071:c5 f8 58 c1 | vaddps %xmm1,%xmm0,%xmm0 |
| 1075:c5 f8 59 c3 | vmulps %xmm3,%xmm0,%xmm0 |
| 1079:c4 c1 78 29 44 05 00 | vmovaps %xmm0,0x0(%r13,%rax,1) |

Zeitmessung

Zeitmessung für vier Iterationen in E203 mit dem Befehl

```
g++ -Wall -pedantic -march=native -mfpmath=sse -mavx2 -O3 sqrt_opt.cc
```

```
./a.exe
```

| Durchlauf | Math.Sqrt [ns] | Sqrt1, ein Mal pro Schleife [ns] | Sqrt1, vier Mal pro Schleife [ns] | Sqrt2 [ns] | Sqrt3 [ns] |
|--------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------|------------|
| 1. | 1015718 | 359401 | 375045 | 359385 | 359402 |
| 2. | 1031334 | 359389 | 375031 | 359420 | 359388 |
| 3. | 1015724 | 359405 | 375031 | 375030 | 359388 |
| 4. | 1015725 | 343777 | 359403 | 375049 | 359404 |
| 5. | 1015725 | 359388 | 375047 | 359387 | 359421 |
| 6. | 1015702 | 359402 | 406295 | 406267 | 406293 |
| 7. | 1031344 | 359385 | 375028 | 390672 | 359402 |
| 8. | 1031347 | 359384 | 359402 | 359402 | 359402 |
| 9. | 1015718 | 359402 | 375028 | 359402 | 359402 |
| 10. | 1031328 | 343775 | 359419 | 375011 | 359420 |
| Durchschnitt | 1 021 966,5 | 356 270,8 | 373 472,9 | 371 902,5 | 364 092,2 |

Interpretation

Die implementierten Newton-Sqrt-Verfahren haben sich um einen Faktor von ca. 3 verbessert im Vergleich zur Standardimplementierung. Alle Ausführungszeiten der Newton-Versionen liegen dicht beieinander. Eine Verbesserung konnte durch die SIMD-Befehle nicht erreicht werden. Es zeigt sich, dass sqrt1 mit einer Berechnung pro Schleife am schnellsten ist, obwohl alle Berechnungen Sequenziell durchgeführt werden. Sqrt3 braucht die zweit wenigste Zeit zum Ausführen, da hier die Berechnungen mit SIMD-Befehlen in vierer-Blöcken parallelisiert wurden. Da diese Version nicht schneller ist als die erste Sqrt1 Version, könnte an dem zusätzlichen Aufwand der Typkonvertierung zu Vektoren liegen. Sqrt1 mit vier Berechnungen pro Schleife benötigt die meiste Zeit. Dies könnte an der zusätzlichen Schleife liegen, die jedes Mal durchlaufen werden muss.

Aufgabe 3: k-d-Baum

Quelltext



| | |
|--|---|
| <p>Die Bounding-Box wird entlang der längsten Achse in der Mitte in zwei Hälften aufgeteilt. Zuerst wird bestimmt, welches die längste Seite ist. Danach werden je nach ausgewählter Achse neue Minimal- und Maximal-Eckpunkte gewählt für die beiden neuen Bounding-Boxen.</p> | <pre> void BoundingBox::split(BoundingBox & left, BoundingBox & right) { Vector<FLOAT,3> div = max - min; Vector<FLOAT,3> leftMax; Vector<FLOAT,3> rightMin; if (div[0] >= div[1] && div[0] >= div[2]) { FLOAT x = min[0] + 0.5 * div[0]; leftMax = {x, max[1], max[2]}; rightMin = {x, min[1], min[2]}; } else if (div[1] >= div[2]) { FLOAT y = min[1] + 0.5 * div[1]; leftMax = {max[0], y, max[2]}; rightMin = {min[0], y, min[2]}; } else { FLOAT z = min[2] + 0.5 * div[2]; leftMax = {max[0], max[1], z}; rightMin = {min[0], min[1], z}; } left = *new BoundingBox(min, leftMax); right = *new BoundingBox(rightMin, max); } </pre> |
| <p>Die erste contains-Methode prüft, ob ein bestimmter Punkt in der Bounding-Box enthalten ist. Die zweite contains-Methode nutzt die erste, um zu bestimmen, ob ein Dreieck mit mindestens einem seiner Eckpunkte in der Bounding-Box liegt.</p> | <pre> bool BoundingBox::contains(Vector<FLOAT, 3> v) { for (unsigned int i = 0; i < 3; i++) { if (min[i] > v[i] v[i] > max[i]) { return false; } } return true; } bool BoundingBox::contains(Triangle<FLOAT> *triangle) { return contains(triangle->p1) contains(triangle->p2) contains(triangle->p3); } </pre> |
| <p>Die statische Methode buildTree erstellt einen neuen k-d-Baum und gibt das Wurzel-Element zurück. Dazu wird zuerst die Bounding-Box um die gesamte Szene berechnet und für das Wurzel-Element abgespeichert. Anschließend wird der restliche Baum über die private Methode buildTree rekursiv gebildet.</p> | <pre> KDTree * KDTree::buildTree(std::vector< Triangle<FLOAT> * > & triangles) { KDTree * root = new KDTree(); Triangle<FLOAT> *triangle = triangles[0]; Vector<FLOAT,3> min = triangle->p1; Vector<FLOAT,3> max = triangle->p1; for (unsigned int i = 0; i < triangles.size(); i++) { triangle = triangles[i]; for (unsigned int x = 0; x < 3; x++) { //(b < a && b < c) ? b : ((a < c) ? a : c) FLOAT minTPoint = (triangle->p1[x] < triangle->p2[x] && triangle->p1[x] < triangle->p3[x]) ? triangle->p1[x] : ((triangle->p2[x] < triangle->p3[x]) ? triangle->p2[x] : triangle->p3[x]); min[x] = (min[x] < minTPoint) ? min[x] : minTPoint; FLOAT maxTPoint = (triangle->p1[x] > triangle->p2[x] && triangle->p1[x] > triangle->p3[x]) ? triangle->p1[x] : ((triangle->p2[x] > triangle->p3[x]) ? triangle->p2[x] : triangle->p3[x]); max[x] = (max[x] > maxTPoint) ? max[x] : maxTPoint; } } root->box = *new BoundingBox(min, max); return root->buildTree(root, triangles); } </pre> |

| | |
|--|---|
| <p>Die Methode prüft zunächst, ob die Anzahl der zu speichernden Dreiecke kleiner ist als die maximal zulässige Anzahl Dreiecke für ein Blatt des Baumes. Ist dies der Fall, so bricht die Rekursion ab. Ist dies nicht der Fall, so werden zwei weitere Knoten an den aktiven Knoten angehängt. Die Dreiecke werden dann den neuen beiden Knoten zugeteilt. Ist ein Dreieck in beiden Knoten enthalten, so verbleibt es im aktiven Knoten und wird nicht zugeteilt.</p> | <pre> KDTree * KDTree::buildTree(KDTree * tree, std::vector< Triangle<FLOAT> *> & triangles) { if (triangles.size() <= MAX_TRIANGLES_PER_LEAF) { this->triangles = triangles; return tree; } left = new KDTree(); right = new KDTree(); BoundingBox *leftBox = new BoundingBox(); BoundingBox *rightBox = new BoundingBox(); box.split(*leftBox, *rightBox); left->box = *leftBox; right->box = *rightBox; std::vector< Triangle<FLOAT> *> leftTriangles; std::vector< Triangle<FLOAT> *> rightTriangles; for (unsigned int i = 0; i < triangles.size(); i++) { Triangle<FLOAT> *triangle = triangles[i]; if (leftBox->contains(triangle)) { if (rightBox->contains(triangle)) { this->triangles.push_back(triangle); } else { leftTriangles.push_back(triangle); } } else { rightTriangles.push_back(triangle); } } left->buildTree(left, leftTriangles); right->buildTree(right, rightTriangles); return tree; } </pre> |
| <p>Die letzte zu implementierende Methode ermittelt das erste Dreieck, welches von einem Sehstrahl getroffen wird. Auch diese Methode wird rekursiv ausgeführt, um den k-d-Baum zu durchlaufen. Zuerst wird überprüft, ob der Sehstrahl die Bounding-Box durchquert. Ist dies nicht der Fall, so bricht die Rekursion hier ab. Dann wird die Methode erneut für die beiden anhängenden Knoten durchgeführt. Anschließend wird mit den im Knoten gespeicherten Dreiecken ein Schnittpunkttest durchgeführt. Wurde</p> | <pre> bool KDTree::hasNearestTriangle(Vector<FLOAT,3> eye, Vector<FLOAT,3> direction, Triangle<FLOAT> * & nearest_triangle, FLOAT &t, FLOAT &u, FLOAT &v, FLOAT minimum_t) { if (!box.intersects(eye, direction)) { return false; } FLOAT minimum_u = u, minimum_v = v; if (left != nullptr) { bool intersect = left->hasNearestTriangle(eye, direction, nearest_triangle, t, u, v, minimum_t); if (intersect) { if ((nearest_triangle == nullptr) (t < minimum_t)) { minimum_t = t; minimum_u = u; minimum_v = v; } } } if (right != nullptr) { bool intersect = right->hasNearestTriangle(eye, direction, nearest_triangle, t, u, v, minimum_t); if (intersect) { if ((nearest_triangle == nullptr) (t < minimum_t)) { minimum_t = t; minimum_u = u; minimum_v = v; } } } for (unsigned int i = 0; i < triangles.size(); i++) { Triangle<FLOAT> *triangle = triangles[i]; bool intersect = triangle->intersects(eye, direction, t, u, v, minimum_t); if (intersect) { if ((nearest_triangle == nullptr) (t < minimum_t)) { </pre> |

| | |
|--|---|
| ein Schnittpunkt gefunden, so wird überprüft, ob dies der nächste Schnittpunkt des Sehstrahl ist. Ist dies der Fall, so wird die Variable „nearest_triangle“ auf dieses Dreieck gesetzt und zurückgegeben, dass die Suche erfolgreich war. | <pre> nearest_triangle = triangle; minimum_t = t; minimum_u = u; minimum_v = v; } } } t = minimum_t; u = minimum_u; v = minimum_v; return nearest_triangle != nullptr; } </pre> |
|--|---|

Zeitmessung

| Durchlauf | Zeit ohne Optimierung (in Sekunden) | Zeit mit Optimierung (in Sekunden) |
|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1. | 6.91346 | 1.70324 |
| 2. | 6.87557 | 1.70325 |
| 3. | 6.89121 | 1.73451 |
| 4. | 6.91299 | 1.70325 |
| 5. | 6.93803 | 1.70325 |
| Durchschnitt | 6.90625 | 1.70950 |

| | Ohne Optimierung | Mit Optimierung |
|---------------------------------|---|--|
| Durchgeführte Schnittpunkttests | 519 950 720 | 139 090 305 |
| gefundene Schnittpunkte | 35 294 | 36 806 |
| Ergebnis |  |  |

Interpretation

Mit der Optimierung ist das Programm ca. 4-mal schneller als vor der Optimierung. Dies liegt daran, dass sich auch die durchgeführten Schnittpunkttests in etwa um diesen Faktor verringert haben. Dies wurde dadurch erreicht, dass die Dreiecke in mehrere verschachtelte Bounding-Boxen aufgeteilt wurden. Kreuzt ein zu testender Sehstrahl eine Bounding-Box nicht, so können alle darin enthaltenen Dreiecke für die weitere Schnittpunktberechnung mit diesem Sehstrahl ignoriert werden.