Bachelorarbeit

Gestaltung und Entwicklung einer stark parallelisierten dreidimensionalen Simulation von orbitalen Himmelskörpern.

Autor:	Dennis Goßler
Matrikel-Nr.:	11140150
Adresse:	Oswald-Greb-Str. 7
	42859 Remscheid
	dennis.gossler@smail.th-koeln.de

Erstprüfer:	Prof. Dr. Christian Kohls
Zweitprüfer:	Msc. Alexander Dobrynin

Remscheid, XX.XX.XXXX

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 Abstract

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und der Erarbeitung einer Anwendung, bei der manche Prozesse parallel als auch sequenziell ausführt werden können. Anhand eines ausgewählten Szenarios soll veranschaulicht werden, inwiefern sich gewisse Problemstellungen, wie zum Beispiel Kollisionserkennungsberechnungen parallelisieren lassen. Die Problemstellungen beinhalten in der Regel immer eine größere Anzahl von Objekten, auf die eine Operation angewendet wird.

Unter Berücksichtigung spezieller Bedingungen wird die Anwendung auf mehrere Systeme appliziert und liefert jeweils Indikatoren über die sequenzielle und parallele Leistung der entwickelten Module.

[…]

2 Einleitung

Die Bachelorarbeit demonstriert den Prozess einer Programmentwicklung. Das Programm ist sequenziell sowie parallel ausführbar. Die geforderte Applikation ist so ausgelegt, dass sie mit einer großen Anzahl von Daten interagiert, um viele kleine Berechnungen in Gruppen zu parallelisieren. Das Szenario soll einen normalen Entwicklungsprozess abbilden und somit zeigen, welchen Mehraufwand und welche Vorteile eine Parallelisierung gewisser Prozesse mit sich bringt.

Die zu entwickelnde Anwendung zeigt eine dreidimensionale Abbildung unserer Welt einschließlich ihrer orbitalen Himmelskörper.

Einstellungen über die Menge der Objekte und deren Verhalten kann individuell gesetzt werden. Diese Einstellungsmethode ermöglicht, bei potenziellen Kollisionen die Menge und Streuung der entstandenen Kind - Objekte zu bestimmen. Durch verschiedene Kameraperspektiven kann die Simulation aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden. Dadurch ist es möglich, sich frei im dreidimensionalen Raum zu bewegen.

2.1 Relevanz

Viele unserer genutzten Anwendungen werden auch heute noch weitestgehend sequenziell ausgeführt. Eine verlängerte Bearbeitungszeit ist oftmals die Folge. Eine Parallelisierung könnte dabei helfen, diese Wartezeiten zu verkürzen. Zudem setzen die größten CPU - Hersteller weitestgehend auf mehr Kerne in ihren CPU‘s statt schnellere Taktfrequenzen einzusetzen, die das parallele Bearbeiten von Aufgaben zusätzlich begünstigt. [Q9 42 Years of Microprocessor Trend Data S.II]

2.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung einer Simulation, die die Kollisionsberechnungen und Bewegungen von Objekten stark parallelisiert und erkennbar macht, ob Leistungsverbesserungen durch die Parallelisierung erkennbar werden. Hierfür wird eine geeignete Projektarchitektur bestimmt. Daraus resultiert eine *Kotlinanwendung*, die mithilfe der *Kotlinx* Bibliothek [Q7 Kotlinx coroutines S.II] die vorgegebenen Prozesse parallelisiert.

2.3 Recherchephase

Zur Ermittlung von dreidimensionalen Kollisionen im Raum muss in der Recherchephase ein Kollisionsalgorithmus gefunden werden. Der Algorithmus soll eine Parallelisierung ermöglichen.

Außerdem gilt es, für die Himmelskörper eine geeignete Formel zur Berechnung einer Gravitation zu finden.

2.4 Projektplan

Die Planung vollzieht sich in mehreren Schritten. Mit Fortschreiten der einzelnen Projektphasen ist das weitere Vorgehen agil geplant. Die Applikation der Bachelorarbeit beruht auf der Entwicklung, Planung und den Tests einer einzigen Person. Das gesamte Projekt beinhaltet vier Hauptphasen. Die gesamte Anwendung basiert auf einem weiteren bereits entwickelten Projekt. Deswegen wird oftmals nur von einer Anpassung oder Ergänzung berichtet. Dieses Thema wird im Kapitel [2.6 Grundaufbau der Anwendung S.5] noch ausführlicher behandelt.

2.4.1 Definitionsphase

Die erste Phase besteht größtenteils aus dem Planen der Architektur, dem Erstellen von Diagrammen und dem Gestalten der Benutzeroberfläche.

Die Architektur ist so gestaltet, dass einzelne Module austauschbar sind. Somit ist das schnelle Auswechseln eines parallel ausgeführten Systems mit einem sequenziellen System gewährleistet [2.9 Parallelisierung S.8].

Um gewisse Abläufe und Prozesse zu veranschaulichen, sind UML Diagramme mittels *Draw.io* zu erstellen [2.10 Programmablauf S.10].

Für das Gestalten der Benutzeroberfläche (*UI*) wird ein virtueller Prototyp erstellt. Dieser zeigt eine Vorabversion der UI und soll eine grobe Version des Layouts zeigen. Zur Vorlagenerstellung des Prototyps dient die Webapplikation *Figma*. [2.8 Benutzeroberflächendesign S.7]

2.4.2 Durchführung

Im Verlauf dieser Phase werden die Applikation und die zugehörigen Algorithmen entwickelt. Durch *JUnit* werden die verwendeten Algorithmen in ihrer sequenziellen und parallelen Form getestet. [2.5 Testumgebung S.4]

Die Projektdurchführung ist nochmals detaillierter im Abschnitt [3 Hauptteil S.12] beschrieben.

2.4.3 Thesenüberprüfung

Um zu überprüfen, ob und inwiefern sich das Parallelisieren des Systems eignet, wird es der herkömmlichen sequenziellen Gestaltungsweise gegenübergestellt. Durch unterschiedlich skalierte Testdurchläufe wird die Leistung des jeweiligen Systems hervorgebracht. Auf der Grundlage von unterschiedlich starken und schwachen CPU's werden die Systeme ausgetestet. Die verwendeten Systeme sind im Anhang [A3 Testsysteme S.VIII] aufgelistet.

2.4.4 Auswertung

Im Verlauf dieser Phase werden die gesammelten Daten zusammengetragen und evaluiert. Es ist an dieser Stelle zu überprüfen, inwiefern sich die Parallelisierung auf die unterschiedlichen Systeme auswirkt. Es ist ebenso zu überprüfen, ob diese Methode CPU's mit wenig Kernen dennoch einen signifikanten Vorteil bietet.

2.5 Testumgebung

Um die verschiedenen Anwendungsalgorithmen zu überprüfen, sind dementsprechend Tests zu erstellen. Diese Tests verwenden die *JUnit* Bibliothek [Q5 JUnit S.I]. Auf Grund der mangelnden Eignung mancher Objekte für die dazugehörigen Tests, wird es nötig, separate Testobjekte zu erstellt, die auf die zugehörige Schnittstelle zugreifen. Die Testung gewisser privater Methoden eines Algorithmus werden durch Reflexion überprüft.

2.6 Grundaufbau der Anwendung

Die zu entwickelnde Simulation basiert auf einer Projektarbeit, die im Zuge des Wahlpflichtfaches *Computergrafik und Animation* entstanden ist. In diesem WPF wurde eine dreidimensionale Weltraumsimulation geschaffen, welche es ermöglicht, verschiedene Sonnensysteme zu generieren und diese zu animieren. Die Applikation nutzt *Kotlin* als Programmiersprache und *OpenGL* zur dreidimensionalen Darstellung.

Das oben genannte Projekt wurde in Zusammenarbeit mit Frau *Anastasia Chouliaras* erstellt [Q1 Projekt OuterSpace S.I]. Die Anwendung dient als Grundstruktur und ist auf die gegebene Problemstellung anzupassen.

Viele der entwickelten Projektmerkmale sind für die spezifische Problemstellung nicht geeignet und müssen verändert oder umgeschrieben werden. In den folgenden Abschnitten des Kapitels wird darauf näher eingegangen.

2.6.1 Gravitation

Das Projekt Outer Space [Q1 Projekt OuterSpace S.I] besitzt Planeten und Monde, die sich auf Umlaufbahnen um ein zentrales Objekt bewegen. Das alte System nutzt trigonometrische Funktionen zum Platzieren der orbitalen Himmelskörper an einem bestimmten Zeitpunkt. Dieses System eignet sich nur sehr bedingt für die zu entwickelnde Applikation.

Das alte System ist gegen einen neuen Algorithmus auszuwechseln, der es ermöglicht, dass alle Objekte miteinander interagieren. Hierfür ist das Newtonsche Gravitationsgesetz[1] zur Veränderung der Objektpositionen einzusetzen.

2.6.2 Kollisionen

Der Grundstruktur des zu entwickelnden Systems besitzt kein Kollisionsalgorithmus. Wie in Abschnitt [2.3 Recherchephase S.3] beschrieben, gilt es einen geeigneten Algorithmus zu favorisieren, der die gegebenen Kriterien erfüllt.

---

[1] [Q2 Demtröder2006_Book_Experimentalphysik1 S.I] (S.80 2.47a)

2.6.3 Kollisionsbearbeiter

Nach einer erfolgten Kollision soll eine Interaktion der kollidierten Objekte stattfinden. Bei diesem Prozess entscheidet der Kollisionsbearbeiter, ob die beiden Objekt voneinander abprallen oder in kleinere Objekte zerlegt werden soll.

2.7 Benutzeroberfläche

Das Projekt Outer Space [Q1 Projekt OuterSpace S.I] besitzt ein sehr rudimentäres Benutzeroberflächensystem. Entsprechend der Bildschirmbreite und Bildschirmhöhe lassen sich Elemente nur prozentual platzieren. Außerdem ist das System nur für die Ausgabe von Bilddateien geeignet und gewährleistet dementsprechend keine direkte Interaktion. Dieses System gilt es so anzupassen, dass auch sehr komplexe Benutzeroberflächen designt werden können.

2.7.1 Elementauflistung

Ein beliebiger Nutzer soll in der Lage sein, eigenständig Texte und Zahlen einzugeben, Knöpfe zu betätigen, Schieberegler zu verschieben als auch Optionen an- und auszuschalten. Folgende Aufzählung impliziert alle zu entwickelnden UI Elemente.

- **Eingabe**
  - Auswahlfeld
  - Knopf
  - Schieberegler
  - Textfeld
  - Umschaltknopf
  - Veränderbarer Text
  - Zahlenfeld
- **Ausgabe**
  - Bild
  - Text
- **Anordnung**
  - Anordnungsliste
  - Anordnungsrechteck
  - Kreis
  - Rechteck
  - Scrollleiste

2.7.2 Schrift

Die zu entwickelnde Anwendung benutzt OpenGL als Darstellungsbibliothek. Diese Bibliothek besitzt keine native Umsetzung zur Darstellung von Schrift.

Da für dieses Projekt oftmals eine direkte Ausgabe von Text von Nöten ist, gilt es diese Funktion zu implementieren. Ein Beispiel für eine solche Textausgabe sind zum Beispiel die *fps*[2], welche dem Nutzer einen Leistungsindikator über ausgeführte Applikation geben.

2.8 Benutzeroberflächendesign

Um Einstellungen über die Applikation vorzunehmen, ist eine Benutzeroberfläche zu implementieren. Diese Einstellungen sollen zum Beispiel entscheiden, ob die Applikation parallel oder sequenziell ausgeführt wird und wie viele Elemente erschaffen werden sollen. Die folgende Abbildung dient als Vorlage der Einstellungsoberfläche und beschreibt das Farbschema der Applikationselemente.

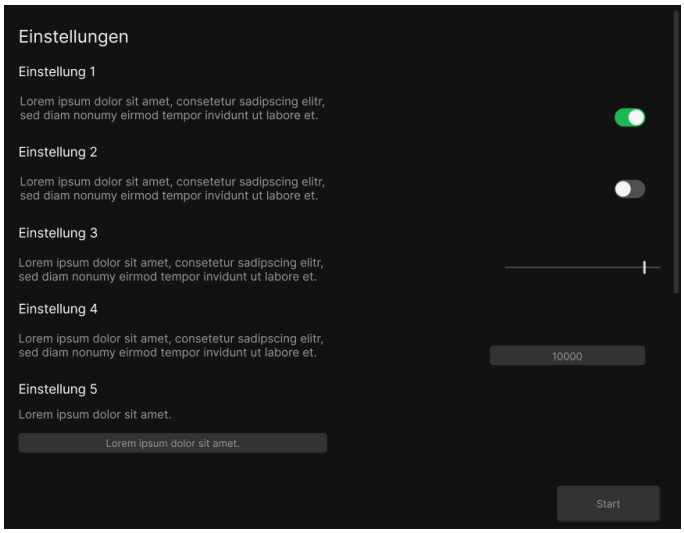


Abbildung 1: [Virtueller Prototyp der Einstellungsoberfläche]

[2] Ist die Abkürzung für *frames per second* (die Bildrate).

2.9 Parallelisierung

Um eine parallele als auch sequenzielle Ausführung der Applikation zu ermöglichen, wird an diesen Stellen eine abstrakte Klasse eingesetzt. Die jeweilige abstrakte Klasse definiert nur Methoden, die sequenziell ausgeführt werden. Wenn eine Methode auch parallel ausgeführt werden soll, wird diese ebenfalls als abstrakt deklariert und in deren Kindklassen implementiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die parallelen Kindklassen eine Variable namens *jobCount* enthalten. Diese Variable wird dann eingesetzt, wenn entschieden werden soll, wie viele Jobs eingesetzt werden.

2.9.1 Sweep and Prune

Das unten dargestellte UML - Klassendiagramm veranschaulicht das verwendete System anhand des Kollisionsalgorithmus. Hierbei werden die zwei Methoden *sort()* und *checkCollision()* in der *ParallelSAP* Klasse parallel sowie in der SAP Klasse sequenziell implementiert.

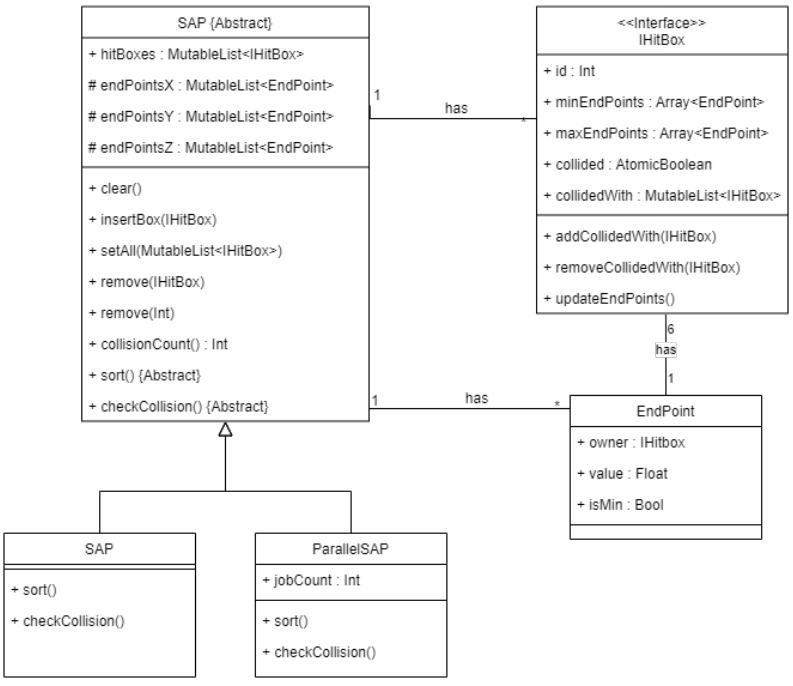


Abbildung 2: [Klassendiagramm SAP]

2.9.2 Gravitationssystem

Ähnlich wie im oberen Abschnitt [2.9.1 Sweep and Prune S.8] soll diese Abbildung das genutzte System zum Austauschen der parallelen und sequenziellen Module veranschaulichen.

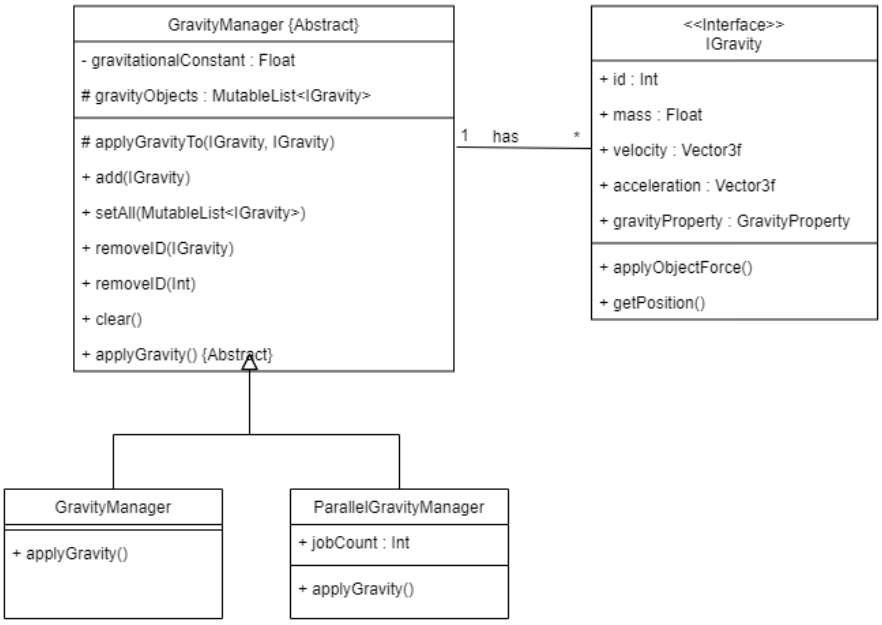


Abbildung 3: [Klassendiagramm Gravitationssystem]

2.9.3 Kollisionsbearbeiter

Folgendes Diagramm zeigt den Aufbau des Kollisionsbearbeiters.

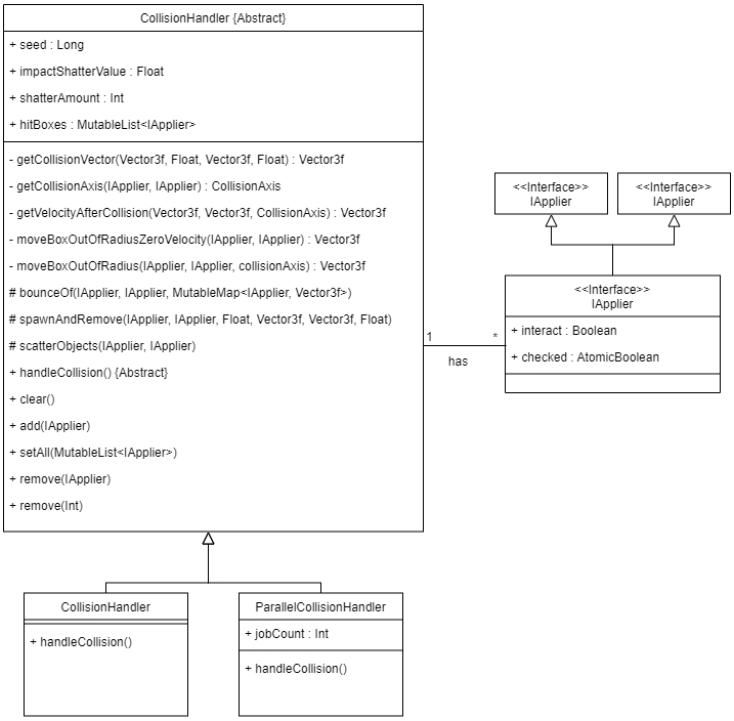


Abbildung 4: [Klassendiagramm Kollisionsbearbeiter]

2.10 Programmablauf

Zu Beginn der Applikation wird eine Schleife gestartet, die so lange von vorne beginnt, bis die Applikation durch den Nutzer beendet wird. Diese Schleife beinhaltet eine Funktion für das Aktualisieren der visuellen Objekte. Sie impliziert ebenfalls eine Funktion für die Aktualisierung der Benutzeroberfläche und eine Funktion für das Zeichnen der Objekte auf dem Bildschirm (*rendern*). Die beiden Aktualisierungsfunktionen sind auf eine bestimmte Anzahl von Aktualisierungen pro Sekunde (*UPS*) limitiert. Die UPS der Benutzeroberfläche sind auf 60 festgesetzt. Die maximalen UPS der Objekte können in der Benutzeroberfläche jedoch auf 1 bis 600 Aktualisierungen pro Sekunde festgelegt werden.

Bei dem wiederholten Ausführen der Schleife wird die *Renderfunktion* jedoch so oft wie möglich aufgerufen. Werden die festgelegten UPS nicht in einer Sekunde erreicht, werden sie zur Vermeidung eines Aufstaus von Aktualisierungen gedrosselt.

2.10.1 Aktualisierungsfunktionen

Die Aktualisierungsfunktion der Benutzeroberfläche (*UI*) aktualisiert die einzelnen UI - Elemente. Dabei wird beispielsweise überprüft, ob die Computermaus über einem Element positioniert ist.

In der Aktualisierungsfunktion der Objekte wird die aktuelle UPS - Anzahl berechnet und dem Nutzer durch die Benutzeroberfläche angezeigt. Zudem werden die Objekte durch Ihre Container [2.9 Parallelisierung S.8] aktualisiert. Bei der Aktualisierung kann ein Objekt verschoben, umgefärbt oder entfernt werden. Folgendes Diagramm zeigt den Ablauf der Objektveränderungen.

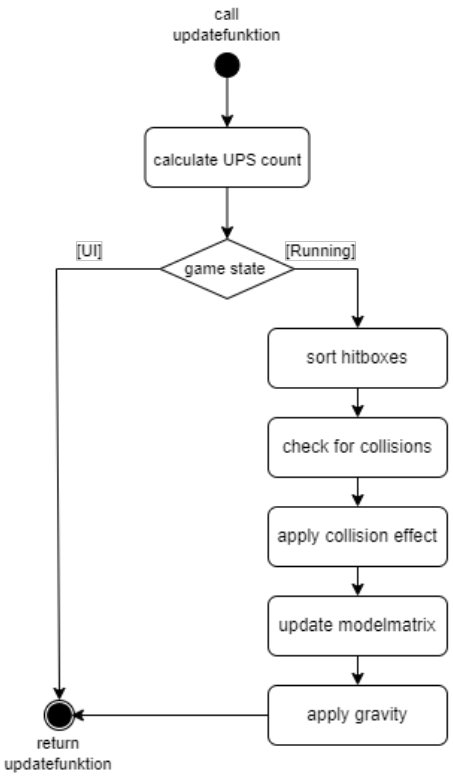


Abbildung 5: [Aktivitätsdiagramm Aktualisierungsfunktion]

2.10.2 Renderfunktion

In der *Renderfunktion* werden die Objektrohdaten an die Grafikkarte übermittelt, damit ein Bild ausgegeben werden kann. Außerdem wird bei der Renderfunktion die aktuelle Framerate (*FPS*) berechnet und angezeigt. Der genaue Prozess zum Anzeigen der Objekte wird im Kapitel [3.5 OpenGL Rendering S.26] noch genauer beschrieben.

3 Hauptteil

Der Hauptteil beschäftigt sich mit der Entwicklung und den daraus folgenden Problemstellungen der einzelnen Implementierungsphasen. Zudem wird die Planung und Durchführung der Analysephase beschrieben.

3.1 Paralleles iterieren auf einer Liste

In dem Projekt wird oftmals über eine List iteriert und auf das ausgewählte Objekt eine Operation angewendet. Wenn eine Operation eine längere Zeitspanne benötigt, kann es von Vorteil sein, dass die Berechnungen auf den einzelnen Objekten parallel ausgeführt werden.

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Entwicklung einer Funktion höherer Ordnung, die es ermöglicht, auf den gegebenen Objekten eine Operation anzuwenden.

3.1.1 Herangehensweise

Eine Aufgabenstellung auf ein Objekt kann sehr unterschiedliche Zeitspannen in Anspruch nehmen. Deswegen nimmt die *foreachParallel* Funktion als ersten Parameter eine Jobanzahl entgegen. Mit diesem Wert wird die Liste in verschiedene Abschnitte unterteilt. Beim Start der Funktion wird die Abschnittsgröße (*c*) und ein Restwert (*r*) bestimmt.

$$c = floor\left(\frac{list.size}{jobCount}\right)$$

$$r = list.size - (c * jobCount)$$

Eine *For-Schleife* zählt nun von 0 bis zur Jobanzahl und erstellt dementsprechend viele Jobs und fügt diese einer Job-Liste hinzu. Jeder Job bearbeitet somit einen gewissen unabhängigen Bereich.

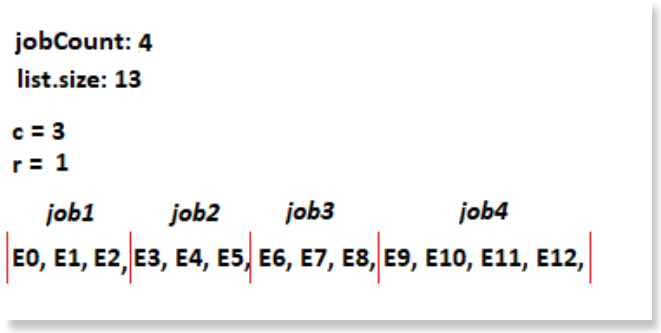


Abbildung 6: [Listenzerteilung zur Parallelisierung]

3.1.2 Funktionsaufbau

Die *foreachParallel* Funktion erweitert die Klasse *List* und nimmt ein *predicate* entgegen, welches die Operation auf das zugehörige Element vornimmt. Zusätzlich kann das *predicate* auch einen Integer aufnehmen, welches den aktuellen Index des Zugriffselements enthält. Um einen redundanten Code zu verhindern, wird die Funktion *foreachParallelIndexed* überladen und somit kann die Funktion auch ohne Zugriffsindex ausgeführt werden.

```
@OptIn(DelicateCoroutinesApi::class)
suspend fun <T> List<T>.foreachParallel(jobCount : Int, predicate : ((T)->Unit)) {
    this.foreachParallelIndexed(jobCount) { t: T, _: Int -> predicate(t) }
}

@OptIn(DelicateCoroutinesApi::class)
suspend fun <T> List<T>.foreachParallelIndexed(jobCount : Int, predicate : ((T, index: Int)->Unit)) {
    val items = this
    val jobs = mutableListOf<Job>()

    val chunkSize = items.size / jobCount
    val remains = items.size - (chunkSize * jobCount)

    for(jobIndex in 0 until jobCount){
        jobs.add(GlobalScope.launch(){
            for(index in jobIndex * chunkSize until (jobIndex + 1) * chunkSize + if(jobIndex != jobCount-1) 0 else remains){
                predicate(items[index], index)
            }
        })
    }
    jobs.joinAll()
}
```

Abbildung 7: [Erweiterungsfunktion foreachParallel]

3.2 Sweep and Prune Algorithmus

Der Sweep and Prune Algorithmus (*SAP*) ist ein Algorithmus zur effizienten Kollisionserkennung von Objekten im dreidimensionalen Raum. Ein Objekt (*Hitbox*) im *SAP* definiert sich durch seinen achsenorientierten Begrenzungskasten. Auf jeder Achse

des dreidimensionalen Koordinatensystems besitzt jedes Objekt bei dieser Darstellungsform einen minimalen (*min*) und einem maximalen *(max*) Wert. Daher hat jedes Objekt in einer dreidimensionalen Umgebung sechs Werte. Die Gesamtheit aller Werte einer Achse werden in einer sortierten Liste gespeichert.

3.2.1 Datenstruktur

Um den Algorithmus darzustellen, werden gewisse Datenstrukturen benötigt. Hierbei orientiert man sich stark an den Strukturen aus dem Paper [Q10 Sweep and prune S.II].

```
abstract class AbstractSAP{

    var hitBoxes : MutableList<IHitBox> = mutableListOf()

    protected var endPointsX : MutableList<EndPoint> = mutableListOf()
    protected var endPointsY : MutableList<EndPoint> = mutableListOf()
    protected var endPointsZ : MutableList<EndPoint> = mutableListOf()

    fun clear(){...}

    fun insertBox(hitBox : IHitBox){...}

    fun setAll(hitBoxes: MutableList<IHitBox>){...}

    fun remove(hitBox : IHitBox){...}

    fun remove(id : Int){...}

    fun collisionCount() = hitBoxes.fold(0){acc, iHitBox -> acc + if (iHitBox.collided.get()) 1 else 0}

    abstract suspend fun sort()

    abstract suspend fun checkCollision()
}
```

Abbildung 8: [Klassendefinition SAP ohne Funktionen]

Das *SAP* enthält alle Objekte und drei sortiere Listen aus deren Endpunkten. Die Endpunktlisten sind immer doppelt so lange, wie die Liste der *Hitboxen*.

```
data class EndPoint(
    val owner : IHitBox,
    var value : Float,
    val isMin : Boolean
)
```

Abbildung 9: [Klassendefinition EndPoint]

Ein Endpunkt enthält immer die Referenz auf seinen Besitzer, den jeweiligen Koordinatenwert und enthält die Festlegung der Frage, ob es sich um den *min* Wert seines Besitzers handelt.

```
interface IHitBox {
    val id : Int

    val minEndPoints : Array<EndPoint>
    val maxEndPoints : Array<EndPoint>

    var collided : AtomicBoolean
    var collisionChecked : AtomicBoolean
    var collidedWith : MutableList<IHitBox>

    fun addCollidedWith(hitBox : IHitBox)
    fun removeCollidedWith(hitBox : IHitBox)

    fun updateEndPoints()
    fun translateLocal(vec : Vector3f)
}
```

Abbildung 10: [Schnittstelle IHitbox]

Jede *Hitbox* besitzt einen unikalen Identifizierer, der bei der Erstellung vom *Sap* zugewiesen wird. Außerdem enthält jede *Hitboxstruktur* die Kollisionspartner, die durch das *SAP* ermittelt werden.

3.2.2 Sequenzielle Kollisionserkennung

Um zu erkennen, ob ein Objekt mit den anderen *n* Boxen im *Sap* kollidiert, wird über die *endPointXListe* iteriert. Wenn es sich um einen minimalen Endpunkt handelt, wird eine zweite Schleife gestartet, die ab dem Endpunktindex beginnt und so lange läuft, bis der zugehörige maximale Endpunktwert gefunden werden konnte. Alle minimalen Endpunkte zwischen den Objektendpunkten können als Kollisionen auf der X-Achse betrachtet werden.

```
endPointsX.forEachIndexed { index, endpoint ->
    if (endpoint.isMin) {

        var i = index + 1
        while ( i < endPointsX.size){
            val endpointNext = endPointsX[i]

            if (endpointNext.isMin){
                val collideWith = endpointNext.owner
                collideWith.collided.set(true)
                collideWith.collidedWith.add(endpoint.owner)
                endpoint.owner.collided.set(true)
                endpoint.owner.collidedWith.add(collideWith)

            }else
                if(endpoint.owner.id == endpointNext.owner.id)
                    break

            i++
        }
    }
}
```

Abbildung 11: [SAP-Kollisionsüberprüfung der X-Achse]

Um zu überprüfen, ob die Objekte auch auf den anderen Achsen kollidieren, wird nun über die Liste der Objekte iteriert. Wenn ein Objekt ein oder mehrere Kollisionen aufweist, werden diese sukzessiv überprüft. Die Überprüfung vergleicht die minimalen und maximalen Werte der potenziell kollidierenden Objekte und entscheidet, ob eine Kollision auf der Y- und Z- Achse stattfindet.

```
hitBoxes.forEach { hitBox ->
    if(hitBox.collided.get()){
        hitBox.collidedWith.toList().forEach { collideHitBox ->

            if(!collideHitBox.collisionChecked.get() &&(
                (hitBox.maxEndPoints[1].value < collideHitBox.minEndPoints[1].value
                || hitBox.minEndPoints[1].value > collideHitBox.maxEndPoints[1].value) ||
                (hitBox.maxEndPoints[2].value < collideHitBox.minEndPoints[2].value
                || hitBox.minEndPoints[2].value > collideHitBox.maxEndPoints[2].value)
            ))
            {
                if(hitBox.collidedWith.size < 2)
                    hitBox.collided.set(false)

                if(collideHitBox.collidedWith.size < 2)
                    collideHitBox.collided.set(false)

                collideHitBox.collidedWith.remove(hitBox)
                hitBox.collidedWith.remove(collideHitBox)
            }
        }
        hitBox.collisionChecked.set(true)
    }
}
```

Abbildung 12: [SAP-Kollisionsüberprüfung der Y /Z-Achse]

3.2.3 Parallele Kollisionserkennung

Beim Ausführen des Algorithmus wird statt der normalen *foreachIndexedSchleife* die neu entwickelte *foreachParallelIndex* Erweiterungsfunktion der Listklasse verwendet [3.1 Paralleles iterieren auf einer Liste S.12].

Da beim Durchlaufen der Liste auf andere Listenobjekte zugegriffen wird, muss gewährleistet sein, dass ein Job nicht mit einem anderen Job gleichzeitig versucht, auf eine Variable zuzugreifen. Dieses Problem wird gelöst, indem atomare Typen, wie zum Beispiel *AtomicBoolean,* verwendet werden. Außerdem werden Operationen, wie ein Kollisionspartner hinzufügen/ entfernen, über eine synchronisierte Funktion in der *Hitbox* Klasse ausgeführt.

Dieses System wird auch beim zweiten Teil der Kollisionserkennung verwendet.

3.2.4 Veränderung der Objektpositionen

Wie im Abschnitt [3.2 Sweep and Prune Algorithmus S.13] beschrieben, müssen alle Endpunktlisten vor der Ausführung der Kollisionserkennung stets sortiert sein. Wenn ein oder mehrere Objekte verschoben oder skaliert werden, müssen seine Endpunktpositionen in den Endpunktlisten neu einsortiert werden. Da in dieser Applikation davon ausgegangen werden kann, dass fast alle Objekte in einem Updatezyklus die Position verändern, ist es effizienter, die drei Listen komplett durchzusortieren.

In der *sortParallel* Funktion des SAP-Objektes, werden die drei Listen in drei verschiedenen Jobs parallel sortiert.

3.2.5 Sequenzielle Teststruktur

Um sicherzustellen, dass der SAP-Algorithmus sequenziell als auch parallel fehlerfrei funktioniert, sind verschiedene Tests entwickelt [A1 Sweep-and-prune Testfälle S.III]. Die einzelnen Tests benutzen statt den Hitboxobjekten eigene Testobjekte, welche auch die Schnittstelle *IHitbox* implementieren.

Die sequenzielle Kollisionserkennung wird getestet, indem drei zuvor bestimmte Anordnungen von Objekten auf Kollisionen hin überprüft werden. Diese Anordnungen wurden mit der Software *Blender*[3] erstellt. Die Anzahl der stattgefundenen Kollisionen entscheidet über den Erfolg oder Misserfolg eines Tests.

3.2.6 Parallele Teststruktur

Die sequenzielle als auch die parallele Teststruktur greifen auf ähnliche Testmethoden zurück. Bei der parallelen Teststruktur muss allerding streng darauf geachtet werden, dass die Variablen bei laufendem Algorithmus threadsicher gesetzt werden. Wenn eine Variable nicht threadsicher gesetzt wird, kann es passieren, dass gewisse Kollisionen nicht erfasst werden.

Um diese Problemstellung zu testen, werden in einem 500 x 500 x 500 großen Bereich 5000 zufällig platzierte Testobjekte erschaffen. Vorab werden diese mit dem

[3] *Blender* ist eine Software, um dreidimensionale Bühnenbilder/ Modelle zu modellieren und zu gestalten.

sequenziellen Algorithmus auf Kollisionen überprüft. Die sequenziellen Testergebnisse ermöglichen einen Vergleich Ergebnisse mit den parallelen Ausführungen. Der Algorithmus wird mit einer Jobanzahl von 1 bis 100 getestet.

3.3 Das Gravitationssystem

Wie in Abschnitt [2.6.1 Gravitation S.5] beschrieben, sollen Himmelskörper einer Gravitation ausgesetzt werden. Hierbei wird das Newtonsche Gravitationsgesetz[4] auf die einzelnen Objekte angewendet. Der folgende Absatz beschäftigt sich mit der Implementierung und dem Testen des Algorithmus.

3.3.1 Gravitationsobjekt

Damit ein Objekt der Gravitation ausgesetzt werden kann, muss es die *IGravity* Schnittstelle implementieren. Nur wenn ein Objekt diese Schnittstelle implementiert, kann es einem *GravityObjectContainer* zugeordnet werden. Jedes *IGravity* Objekt besitzt eine Masse, eine Geschwindigkeit, eine Beschleunigung und eine *GravityProperty*. Außerdem muss ein Objekt, das die Schnittstelle implementiert, in der Lage sein, seine aktuelle Position wiederzugeben.

```
interface IGravity {
    val id : Int

    var mass : Float
    var velocity : Vector3f
    var acceleration : Vector3f
    var gravityProperty : GravityProperties

    fun applyObjectForce()
    fun getPosition() : Vector3f
}
```

Abbildung 13: [Schnittstelle IGravity]

3.3.2 Gravitationsmanager

Der *GravityObjectManager* dient als Container zum Verwalten von *IGravity* Objekten. Es können dem Container *IGravity* Objekte per *add* Funktion hinzugefügt werden. Durch

[4] Q2 Demtröder2006_Book_Experimentalphysik1 [S.68 (2.57b)]

das Aufrufen der *update* Methode werden alle zugehörigen Objekte des Managers versucht, zu verändern. Durch die *GravityProperty* eines *IGravity* Objektes wird entschieden, wie sich die Objekte aufeinander auswirken.

```
enum class GravityProperties {
    source, // Other IGravity are attracted to it
    adopter, // This IGravity object is moved by other IGravity objects
    sourceAndAdopter, // source and adopter combined
    nothing // Doesn't interact with other objects (only the own velocity will be applied)
}
```

Abbildung 14: [Enum GravityProperties]

Ein *IGravity* Objekt kann zum Beispiel als Quelle dienen, so dass andere Objekte angezogen werden können. Durch die *adopter* Eigenschaft kann das Objekt von anderen Objekten beeinflusst werden. Wenn ein Objekt die *GravityProperty nothing* besitzt, wird dieses Objekt nicht behandelt. Dennoch kann es durch eine Startgeschwindigkeit in eine bestimme Richtung fliegen.

3.3.3 Umsetzung des Gravitationsalgorithmus

Wie schon im Abschnitt [3.3 Das Gravitationssystem S.18] erwähnt, wendet der Algorithmus das Newtonsche Gravitationsgesetz an. Um die Kraft *F* zwischen zwei Objekten zu ermitteln, wird nachfolgende Formel verwendet. In dieser Formel ist *G* als Gravitationskonstante, *m* als Masse eines Objektes und *r* als Distanz zwischen den beiden Objekten definiert.

$$F_{obj1} = F_{obj2} = \mathrm{G} \cdot \frac{m_{obj1} \cdot m_{obj2}}{r^2}$$

Um die Geschwindigkeit an Zeitpunkt t+1 zu berechnen, wird die berechnete Kraft (*F*), die Richtung ($\vec{r}$) von *obj1* zu *obj2* und die Beschleunigung ($\vec{a}$) verwendet.

$$\vec{r} = normalsize(\ obj1.pos\ -\ obj2.pos\ )$$

$$\vec{a}_{obj1} = min\left(\frac{\vec{r} \cdot F_{obj1}}{m_{obj1}}, \begin{pmatrix}1.0\\1.0\\1.0\end{pmatrix}\right)$$

$$\vec{v}_{obj1} = \vec{v}_{obj1} + \vec{a}_{obj1}$$

Diese Berechnungen werden für jedes Objekt appliziert, welches die *GravityProperty adopter* besitzt.

Der zugehörige Quellcode ist im Anhang siehe [LINK] einsehbar.

3.3.4 Parallelisierung

Um das Modul zu parallelisieren, wird die *ForeachParallel* Erweiterungsfunktion [3.1 Paralleles iterieren auf einer Liste S.12] auf die Liste mit den Objekten, die von der Gravitation beeinflusst werden, angewendet.

```
//sequential
override suspend fun applyGravity() {

    adopterObjects.forEach{ ob1 ->
        for (ob2 in sourceObjects) {
            applyGravityTo(ob1, ob2)
        }
    }

    gravityObjects.forEach { ob1 ->
        ob1.applyObjectForce()
    }
}

//parallel
@OptIn(DelicateCoroutinesApi::class)
override suspend fun applyGravity() {

    adopterObjects.foreachParallel(jobCount){ ob1 ->
        for (ob2 in sourceObjects) {
            applyGravityTo(ob1, ob2)
        }
    }

    gravityObjects.foreachParallel(jobCount) { ob1 ->
        ob1.applyObjectForce()
    }
}
```

Abbildung 15: [Aufbau der Gravitationsfunktion]

Die obere Abbildung demonstriert sowohl den sequenziellen als auch den parallelen Aufbau der Gravitationsfunktionen.

3.3.5 Teststruktur

Für den Gravitationsalgorithmus sind insgesamt fünf Tests entstanden. Diese Tests benutzen spezielle *TestGravityObjekte*, die auch die *IGravity* Schnittstelle implementieren.

Der erste Test benutzt zwei Testobjekte, welche linear auf der X, Y und Z-Achse mit einem Abstand von -100 und 100 vom Ursprung (0,0,0) liegen. Im Ursprung dieses dreidimensionalen Koordinatensystems befindet sich ein weiteres Objekt, das gleichzeitig von beiden Objekten angezogen wird. Da beide äußeren Objekte nicht dem Einfluss der Gravitation unterliegen und beide Objekte die gleiche Masse besitzen, sollte das Objekt im Ursprung sich nicht bewegen.

Bei der Verifizierung des zweiten, dritten und vierten Testfalls, wird ein Objekt beobachtet, das auf einer bestimmten Achse ein weiteres Objekt im Ursprung umkreist und sich nach einer bestimmten Zeit (t) wieder an seinem Ausgangspunkt ($\vec{p}_{t_0}$) befindet. Hierfür werden die jeweiligen Variablen, d.h. der Radius (*r*), die Masse des Testobjektes im Ursprung ($m_{Central}$) und die Gravitationskonstante (*G*) festgelegt. Die initiale Geschwindigkeit ($\vec{v}$) und die orbitale Periode (*T*) sind mittels der folgenden Formeln bestimmt.

$$\vec{v} = \sqrt{\frac{G * m_{Central}}{r}}$$

$$T = \sqrt{r^3 * \frac{4 * \pi^2}{G * m_{Central}}}$$

Somit kann beim zweiten Testfall davon ausgegangen werden, dass das zentrale Objekt eine Masse von 2 Masseeinheiten besitzt. Das umkreisende Objekt hat einen Abstand von 20 Längeneinheiten und eine Periode von 154 Zeiteinheiten. Die Gravitationskonstante *G* beträgt 6.674.

Der fünfte Test überprüft die parallele Variante des Gravitationsalgorithmus. Bei diesem Versuchsaufbau werden 200 Testobjekte mit einer zufälligen Masse und Position erschaffen. Um diesen Testaufbau überprüfen zu können, wird der Algorithmus sowohl parallel als auch sequenziell ausgeführt. Die Testobjektkoordinaten des sequenziellen Algorithmus werden anschließend mit den Koordinaten des parallelen Algorithmus verglichen.

Die Abbildungen und genutzten Werte der Testfälle sind im Anhang hinterlegt, siehe [A2 Gravitationssystem Testfälle S.IV].

3.4 Kollisionsbearbeiter

Nachdem zwei Objekte miteinander kollidieren, verändert der Kollisionsbearbeiter die Objekte, welche die *IApplier* Schnittstelle nach den vorgegebenen Parametern implementieren. Hierbei wird entschieden, ob die beiden Objekte voneinander abprallen [3.4.2 Abprall von Objekten S.23] oder in viele Splitter zerlegt werden [3.4.4 Zersplitterung S.24]. Zudem müssen die Positionen so verändert werden, dass die Boxen sich nicht mehr überschneiden [3.4.3 Überschneidung der Objektboxen S.23].

```
interface IApplier : IGravity, IHitBox {
    var interact : Boolean
    var checked : AtomicBoolean
}
```

Abbildung 16: [Schnittstelle IApplier]

3.4.1 Kollisionsachse

Wenn zwei Objekte aufeinander zufliegen und kollidieren gibt es immer eine oder mehrere Kollisionsachsen. Diese Achsen werden verwendet, um zum Beispiel im Abschnitt [3.4.2 Abprall von Objekten S.23] die Geschwindigkeit auf einer oder mehreren Achsen anzupassen.

Um die Kollisionsachse zu bestimmen, werden die *Hitboxpositionen* auf den Zeitpunkt t_{-1} umgerechnet. Hierfür wird die jeweilige Objektgeschwindigkeit ($\vec{v}$) von den minimalen und maximalen Endpunktpositionen abgezogen. Die Positionen am Zeitpunkt t_{-1} werden dann miteinander verglichen.

Wenn auf einer Achse keine Kollision am Zeitpunkt t_{-1} stattgefunden hat, ist diese Achse eine Kollisionsachse. Somit gibt es die möglichen Kombinationen einer Kollision auf der X, Y, Z, XY, XZ, YZ und der XYZ Achse. Außerdem kann der Sonderfall eintreten, dass beide Objekte mit einer Initialgeschwindigkeit erschaffen werden, die sie am Zeitpunkt t_{-1} auf allen Achsen kollidieren lässt. Demnach kann die Kollisionsachse nicht bestimmt werden.

3.4.2 Abprall von Objekten

Wenn zwei Objekte miteinander kollidieren, prallen sie voneinander ab. Um die daraus resultierenden Geschwindigkeiten ($\vec{u}$) zu berechnen, wird folgende Formel[5] verwendet. Dabei ist m die Masse eines Objektes und $\vec{v}$ die Geschwindigkeit vor der Kollision.

$$\vec{u}_1 = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}\,\vec{v}_1 + \frac{2\,m_2}{m_1 + m_2}\,\vec{v}_2 = \frac{(m_1 - m_2)\cdot\vec{v}_1 + 2\,m_2\cdot\vec{v}_2}{m_1 + m_2}$$

Da sich nur die Geschwindigkeit auf den Kollisionsachsen variiert, werden nur die Werte auf den Kollisionsachsen ausgetauscht.

3.4.3 Überschneidung der Objektboxen

Bei einer Kollision überschneiden sich die beiden achsenorientierten Hitboxen der Objekte. Da es in der realen Welt bei einer Kollision nicht zu einer Überschneidung kommt, müssen die beiden Objekte auf ihren Flugbahnen so weit zurücksetzt werden, bis sie sich nur noch berühren. Dieses Verfahren benutzt ebenfalls die ermittelte Kollisionsachse [3.4.1 Kollisionsachse S.22].

Wenn die Kollisionsachse der beiden Objekte ermittelt werden kann, wird die Verschiebung auf den Kollisionsachsen bestimmt. Sollte eines der beiden Objekte die Eigenschaft besitzen nicht mit anderen Objekten zu interagieren, wird nur ein Objekt bewegt.

Ist es nicht möglich, eine Bestimmung der Kollisionsachse zwischen den beiden Objekten vorzunehmen, wird ein andere Funktion benutzt, um die Objekte zu translatieren. Die Berechnung der Funktion zielt auf die kleinstmögliche Translation auf einer bestimmten Achse, um die Objekte aus dem jeweiligen Begrenzungsrahmen zu verschieben.

[5] Quelle der Formel: [Q3 Collisions in 1-dimension S.I] (229)

3.4.4 Zersplitterung

Bei einer Kollision von zwei Objekten besteht die Möglichkeit, dass diese nicht voneinander abprallen, sondern in viele kleine Objekte zerlegt werden. Überschreitet die Aufprallgeschwindigkeit ($\vec{v}_c$) einen gewissen Wert, kommt es zu einer Zersplitterung der Objekte.

$$\vec{v}_c = \max(\vec{v}_{obj1}, \vec{v}_{obj2}) - \min(\vec{v}_{obj1}, \vec{v}_{obj2})$$

Dieser Wert und die Anzahl der resultierenden Objekte (c) können über die Einstellungen festgelegt werden. Zur Berechnung der jeweiligen Objektskalierungen wird das Gesamtvolumen (V) der beiden kollidierenden Objekte ermittelt. Die neu erschaffenen Objekte sind Würfel, die alle die gleiche Länge (l) und Masse (m) besitzen.

$$l = \sqrt[3]{\frac{V}{c}}$$

$$m = \frac{(Obj1.m + Obj2.m)}{c}$$

Die beiden kollidierenden Objekte werden nach den Berechnungen entfernt.

3.4.5 Parallelisierung

Damit alle Funktionen des Kollionsbearbeiters parallel sowie sequenziell das gleiche Resultat liefern, muss insbesondere darauf geachtet werden, dass keine *race condition* auftreten. Hierfür wird beispielsweise ein *AtomicBoolean* verwendet, um zu überprüfen, ob ein Objekt abgearbeitet wurde. Außerdem werden alle resultierenden Geschwindigkeiten nicht während des parallelen Iterierens gesetzt, sondern in einer *ConcurrentHashMap* zwischengespeichert und am Ende sequenziell gesetzt.

Der Programmcode der *Zersplitterfunktion* wird außerdem in einen parallelen und einen synchronisierten Abschnitt aufgeteilt. Der synchronisierte Abschnitt plaziert und löscht die neuen und alten Objekte.

Als weitere Problematik stellt sich das zufällige Verteilen der Objektpositionen nach der Zersplitterung heraus. Um das gleiche Resultat bei beiden Ausführungsarten zu garantieren, kann ein *seed* festgelegt werden, der die zufällige Streuung der Geschwindigkeiten bestimmt. Dieser *seed* wird für jeden neu generierten Würfel mit der

kombinierten Objektposition addiert. (Die Parallelisierung setzt voraus, dass nicht festgelegt ist, wann welcher Würfel erschaffen wird. Somit kann nicht bei unterschiedlichen Durchläufen der Anwendung garantiert werden, dass die Identifikationsnummer eines Würfels identisch bleibt.)

3.4.6 Teststruktur

Um zu überprüfen, ob der Algorithmus fehlerfrei funktioniert, sind einige Tests entstanden. Diese Tests verwenden bekannte Eingangsgeschwindigkeiten und Positionen, um nach der Kollision diese mit festgeschriebenen Werten zu vergleichen. So kann garantiert werden, dass die Simulation gewisse Szenarien möglichst naturgetreu abbildet.

Die Resultate beim parallelen und sequenziellen Ausführen des Algorithmus sind in zwei verschiedene Tests aufgeteilt. Dabei muss im Einzelnen sichergestellt werden, dass die sequenziellen Resultate akkurat sind. Sie dienen als Vergleichswerte für die parallelen Resultate.

Der erste Test überprüft das Abprallen von 50000 Objekten in einem Berechnungszyklus. Durch das Vergleichen der Positionen und der Beschleunigung auf den jeweiligen Achsen wird sichergestellt, dass beide Verfahren dasselbe Resultat liefern.

Der zweite Test lässt 1000 Objekte zersplittern. Bei der Überprüfung werden die Positionen und Geschwindigkeiten von sequenziellen und parallel berechneten Objekten verglichen. Hierbei ist davon auszugehen, dass die Position der Objekte in den jeweiligen Listen und die Identifikationsnummer nicht immer identisch sind.

3.5 OpenGL Rendering [Rohform]

Beim rendering werden innerhalb eines *frame's* alle Objekte neu dargestellt. Im Rahmen des OpenGL Renderverfahrens gibt es verschiedene Möglichkeiten des Transfers von Objektdaten an die Grafikkarte. Unter den Daten befinden sich zum Beispiel die Transformationsmatrix[6], die Farbe und weitere Eigenschaften, die die Grafikkarte für den Zeichnungsprozess benötigen könnte. Das aktuelle Kapitel beschäftigt sich mit den einzelnen Möglichkeiten, ein Objekt möglichst effizient an die Grafikkarte zu übergeben und darzustellen.

Außerdem ist die Leistung der verschiedenen Renderverfahren mittels Testversuchen dargestellt.

3.5.1 Simpler Renderprozess

Eine einfache Form mehrere Würfel abzubilden, ist es, sie separat zu behandeln. Hierbei wird jedes Modell des Würfels, jede Transformationsmatrix und jede weitere Eigenschaft für jeden Würfel separat hochgeladen und vom zuständigen *Shader* bearbeitet. Dieser Prozess hat den Vorteil, dass einzelne Eigenschaften sehr einfach bearbeitet und hinzugefügt werden können. Aufgrund des hohen Anteils an redundanten Daten ist dieser Prozess zwar ohne großen Aufwand zu implementieren, aber sehr schlecht skalierbar.

Test	Objektanzahl	Durchschnitte FPS	Arbeitsspeicher	Grafikspeicher
0	0	2970.09	371 kB	481 kB
1	10	2784.03	371 kB	481 kB
2	20	2784.06	373 kB	481 kB
3	50	2396.77	372 kB	481 kB
4	100	1992.03	373 kB	481 kB
5	200	1443.73	376 kB	481 kB
6	500	699.23	380 kB	481 kB
7	1000	321.70	393 kB	481 kB
8	2000	177.07	412 kB	481 kB
9	5000	76.22	465 kB	483 kB
10	10000	39.08	556 kB	485 kB
11	20000	19.85	734 kB	491 kB
12	50000	7.95	1256 kB	505 kB
13	100000	3.89	2114 kB	530 kB
14	200000	1.88	3825 kB	582 kB
15	500000	0.80	9004 kB	732 kB
16	1000000	0.39	13451 kB	983 kB

Tabelle 1: [Leistungstest 1: redundante Objekte]

[6] Die Transformationsmatrix beinhaltet die Skalierung, Verschiebung und die Rotation.

3.5.2 Renderprozess selbes Modell

Um redundante Daten und Hochladeprozesse zu vermeiden, kann es sinnvoll sein, dass Modell nur einmal hochzuladen und vor jedem Rendern einmal zu aktivieren. Um Verzögerungen auf der Grafikkarte zu vermeiden, sollten die Modelle, die ein gleiches Modell verwenden, hintereinander dargestellt werden. Diese Methode ist immer noch sehr flexibel, erfordert aber zusätzlichen Code und bietet immer noch die Möglichkeit vor jedem Renderprozess, spezifische Eigenschaften eines Objektes hochzuladen. Diese Methode wird für die Benutzeroberfläche genutzt, da sehr oft ein spezifisches Rechteck mit verschiedenen Eigenschaften verwendet wird. [3.6 Entwicklung der Benutzeroberfläche S.29]

Test	Objektanzahl	Durchschnitte FPS	Arbeitsspeicher	Grafikspeicher
0	0	3134.45	370 kB	481 kB
1	10	2976.30	373 kB	481 kB
2	20	2911.94	373 kB	481 kB
3	50	2642.30	372 kB	481 kB
4	100	2290.59	372 kB	481 kB
5	200	1807.54	372 kB	481 kB
6	500	1094.92	372 kB	481 kB
7	1000	674.03	373 kB	481 kB
8	2000	378.08	374 kB	481 kB
9	5000	163.43	375 kB	481 kB
10	10000	83.40	379 kB	481 kB
11	20000	42.11	383 kB	481 kB
12	50000	16.68	415 kB	481 kB
13	100000	8.56	432 kB	481 kB
14	200000	4.24	468 kB	481 kB
15	500000	1.77	880 kB	481 kB
16	1000000	0.84	1021 kB	481 kB

Tabelle 2: [Leistungstest 2: gleiches Modell]

3.5.3 Instancing

Für die Darstellung einer Vielzahl von Objekten, welche oftmals sehr ähnliche Eigenschaften besitzen, eignet sich das *Instancing*. Dieses Verfahren benutzt ähnlich wie Abschnitt [3.5.2 Renderprozess selbes Modell S.27] nur ein Modell. Das Besondere an diesem Verfahren ist, dass OpenGL von der CPU aus nur ein *redercall* übermittelt. Dieser Aufruf enthält zusätzlich die Anzahl der zu rendernen Objekte. Zwischen den einzelnen Renderprozessen, können jedoch keine Eigenschaften der Objekte bearbeitet werden. Damit nun die Objekte jeweils eine eigene Transformationsmatrix erhalten, muss vor dem Renderprozess ein *Floatarray* mit den zugehörigen Daten der Grafikkarte übermittelt werden. Zusätzlich wird der Grafikkarte übermittelt, wo ein Attribut eines Würfelns anfängt und aufhört. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere für besonders große Mengen desselben Objektes.

Test	Objektanzahl	Durchschnitte FPS	Arbeitsspeicher	Grafikspeicher
0	0	3089.02	370 kB	481 kB
1	10	3088.12	371 kB	481 kB
2	20	3109.05	371 kB	481 kB
3	50	3111.75	371 kB	481 kB
4	100	3104.71	372 kB	481 kB
5	200	3104.62	373 kB	481 kB
6	500	2983.02	372 kB	481 kB
7	1000	2984.14	372 kB	481 kB
8	2000	3053.60	373 kB	481 kB
9	5000	3067.02	374 kB	481 kB
10	10000	3074.15	379 kB	483 kB
11	20000	3096.33	384 kB	485 kB
12	50000	2413.01	410 kB	487 kB
13	100000	1467.71	432 kB	494 kB
14	200000	821.16	471 kB	507 kB
15	500000	355.43	513 kB	548 kB
16	1000000	183.39	944 kB	614 kB

Tabelle 3: [Leistungstest 3: Instancing]

3.5.4 Testdurchführung

Jedes der drei Verfahren ist mittels eines Testskripts [Abbildung 17 S.28] ausgewertet. Das Testskript beschreibt die jeweils 17 Testdurchläufe. Bei jedem Durchlauf wird die Objektanzahl jeweils erhöht. Vor dem Wechseln zu einem anderen Verfahren wird der genutzte Rechner neugestartet und von jeglichen nicht genutzten IO-Geräten getrennt. Alle Leistungstests werden mittels desselben Rechners (1) [A3 Testsysteme S.VIII] evaluiert.

```
{"cycleCount":600, "cycleSettings":[
 {"updateFrequency":1,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":10,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":20,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":50,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":100,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":200,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":500,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":1000,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":2000,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":5000,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":10000,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":20000,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":50000,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":100000,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":200000,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":500000,"useSampleData":false},
 {"updateFrequency":1,"objectCount":1000000,"useSampleData":false}]
}
```

Abbildung 17: [Testskript Renderverfahren]

Der *cycleCount* beschreibt, wie viele Zeitintervalle (0.05s) für jeden Durchlauf genutzt werden sollen.

3.6 Entwicklung der Benutzeroberfläche [Rohform]

Um die Applikation auf mehreren Systemen zu testen, ist ein Benutzeroberflächensystem entwickelt. Dieses System verwendet verschiedenste Elemente, um eine Schnittstelle mit den Benutzern zu ermöglichen. Dieses Kapitel geht auf die Entwicklung dieses Systems ein.

3.6.1 Grundelement

Jedes Element des Benutzeroberflächensystems erbt seine grundlegenden Eigenschaften von einem abstrakten Grundelement namens *GUIElement*. Dieses Grundelement besitzt immer Einschränkungen der Größe, Einschränkungen der Position, eine Farbe, eine Liste von inneren grundlegenden Elementen und verschiedenste Methoden.

3.6.2 Einschränkungen der Größe und Position

Um die relativen Größen und Positionen der einzelnen Elemente festzulegen wird ein *Constraintsystem* verwendet. Diese Einschränkungen liefern entweder eine relative Größe oder eine Relative Position. Jedes Element besitzt jeweils ein *widthConstraint*, *heightConstraint, positionXConstraint* und ein *positionYConstraint*.

Die Einschränkungen sorgen vor allem dafür, dass die einzelnen Größen und Positionen vom OpenGL System, welches in relativen Angaben abhängig von Fenstergrößen arbeitet, in andere Messgrößen umgewandelt werden, wie zum Beispiel Pixelangaben.

3.6.3 Schachtelung von Elementen

Wie im Anschnitt [3.6.1 Grundelement S.29] beschrieben, besitzt jedes Benutzeroberflächenelement eine Liste von inneren Grundelementen. Dieses Schachtelungssystem ist inspiriert von *HTML*[7] welches auch ermöglicht, dass Objekte andere Objekte beinhalten.

---

[7] Hypertext Markup Language

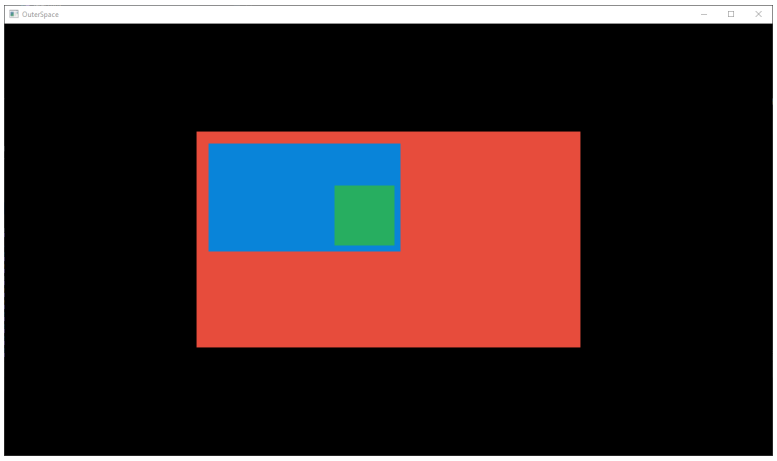


Abbildung 18: [Schachtelung von UI-Elementen]

```
Box(Relative(0.5f),Relative(0.5f), Center(), Center(), Color.red, children = listOf(
        Box(Relative(0.5f),Relative(0.5f), PixelLeft(20), PixelTop(20), Color.blue, children = listOf(
            Box(AspectRatio(), PixelHeight(100), PixelRight(10), PixelBottom(10), Color.green)
    ))
))
```

Abbildung 19: [Zugehöriger Code von Abbildung 11]

Die Abbildung [Abbildung 18 S.30] zeigt die Visualisierung vom Code aus Abbildung [Abbildung 19 S.30]. Dieses Beispiel verdeutlich den Aufbau des UI-Systems und zeigt, wie das Einschränkungssystem die Positionierung von komplexen Szenerien ermöglicht.

3.6.4 Schrift

Um eine komplexe Interaktion von Benutzer und dem Programm zu gewährleisten ist die Ausgabe von Text sehr wichtig. OpenGL bietet keine native Unterstützung zur Ausgabe von Text an. Deshalb ist sich an einem Implementierungsbeispiel [Q11 Font Rendering S.II] orientiert.

Um eine Schrift darzustellen, wird zunächst eine Einstellungsdatei (*.fnt*) und eine zugehörige Bilddatei geladen. In der Einstellungsdatei befinden sich Daten, wie sich das Bild zusammensetzt. Diese Daten beinhalten zum Beispiel die Pixelpositionen der einzelnen Buchstaben und seine zugehörigen Eigenschaften.

Um ein Text dazustellen wird jeder Charakter eines Strings einzeln behandelt. Durch jeden Charakter wird einem *Mesh* ein passendes Rechteck hinzugefügt. Dieses Rechteck enthält Texturkoordinaten, welche die zugehörigen Pixelpositionen der

Schriftbilddatei enthalten. Auf diese Rechtecke wird im Renderprozess anschließend der zugehörige Auszug der Bilddatei gelegt und angezeigt.

Durch die Skalierung und die Translation dieser Rechtecke kann die Größe und Position festgelegt werden.

3.6.5 Interaktion

Das UI-System benutzt die herkömmlichen Ein- und Ausgabegräte eines Computers. Ein UI-Element kann zum Beispiel auf einen Rechts-/ Linksklick reagieren. Dies wird erreicht indem bei einem Klicken mit der Maus in dem Hauptbenutzeroberflächenelement eine Klicküberprüfungsfunktion ausgelöst wird. In dieser Funktion eines *GUIElement* wird die aktuelle Mausposition mit den Eckpunkten des Elements verglichen. Wenn die Maus sich im Element befindet, werden alle inneren Elemente auf die gleiche Weise überprüft. Es wird anschließen die *OnClick* Funktion aufgerufen von dem Element, welches in der Schachtelung am tiefsten ist und den Mauszeiger in seinem Bereich hat. Zusätzlich wird der Fokus auf dieses Element gelegt.

Das UI-System kann zusätzlich Tastatureingaben verarbeiten, diese Tastatureingaben werden an das Element weitergegeben, welches im Fokus der Anwendung ist. Wenn kein Element angeklickt wurde, werden die Eingaben nicht weiter behandelt.

Zusätzlich lassen sich Interaktionen wie *OnHover* und *OnPress* nutzen, um Eingaben oder Veränderungen auszulösen.

3.7 Aufbau der Thesenüberprüfung [Rohform]

Dieser Abschnitt beschreibt, wie das Testsystem aufgebaut ist und wie die Tests jeweils durchführt werden. Zudem wird darauf eingegangen, wie Einstellungen gespeichert und geladen werden.

3.7.1 Einstellungen

In der Anwendung können verschiedenste Einstellungen vorgenommen werden, um das System ausgiebig zu testen. Diese Einstellungen werden in einer Datenklasse zwischengespeichert. Beim Terminieren der Applikation wird die Datenklasse serialisiert und neben der Applikation im Dateisystem gespeichert. Durch das erneute Starten wird die gespeicherte Datei in ein Objekt der Datenklasse umgewandelt und kann erneut verändert werden. Dieser Prozesse wurde durch die *Kotlinx* Bibliothek [Q6 Kotlinx serialization S.I] realisiert.


```
{
    "applyGravityEffect":false,
    "updateFrequency":600,
    "objectCount":10000,
    "seed":2753164209591102606,
    "shatterAmount":5,
    "impactVelocity":3.7183075
}
```


Abbildung 20: [Beispiel einer settings.json Datei]

3.7.2 Test - Konfigurationsdatei

Um die verschiedenen Systeme [A3 Testsysteme VIII] möglichst, ohne großen manuellen Aufwand zu testen, wird eine Test-Konfigurationsdatei verwendet. Die Datei beinhaltet eine Liste von Einstellungsdaten, eine Anzahl von Aktualisierungszyklen. Diese verschiedenen Einstellungen werden hintereinander eingespielt, sodass das System automatisiert die verschiedenen Tests abarbeitet. Nach jedem Testdurchlauf werden die Testresultate einer Ausgabedatei angehangen.

```
{
    "cycleSettings":[
    {
        "first":7500, "second":{"updateFrequency":999,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":5000, "second":{"updateFrequency":999,"objectCount":10,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":5000, "second":{"updateFrequency":999,"objectCount":50,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },
        "first":2000, "second":{"updateFrequency":999,"objectCount":100,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":2000, "second":{"updateFrequency":999,"objectCount":500,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":1500, "second":{"updateFrequency":999,"objectCount":1000,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":1500, "second":{"updateFrequency":999,"objectCount":5000,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":500, "second":{"updateFrequency":999,"objectCount":10000,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":7500,"second":{"executeParallel":false,"updateFrequency":999,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":5000,"second":{"executeParallel":false,"updateFrequency":999,"objectCount":10,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":5000,"second":{"executeParallel":false,"updateFrequency":999,"objectCount":50,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":2000,"second":{"executeParallel":false,"updateFrequency":999,"objectCount":100,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":2000,"second":{"executeParallel":false,"updateFrequency":999,"objectCount":500,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":1500,"second":{"executeParallel":false,"updateFrequency":999,"objectCount":1000,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":1500,"second":{"executeParallel":false,"updateFrequency":999,"objectCount":5000,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    },{
        "first":500,"second":{"executeParallel":false,"updateFrequency":999,"objectCount":10000,"seed":1,"shatterAmount":5,"impactVelocity":3.0}
    }]
}
```


Abbildung 21: [Beispiel der Test - Konfigurationsdatei]

3.7.3 Speicherung der Testresultate

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, werden die Testresultate in einer Datei neben der Applikation im Dateisystem abgelegt. Die Resultate pro Test enthalten jeweils die Test-ID, die Anzahl der erschaffenen Objekte, die durchschnittlichen *FPS* und jeweils die durchschnittlichen Bearbeitungszeiten des Kollisions-, Kollisionsbearbeiter- und des Gravitationssystems in Nanosekunden. Jeder Test wird zeilenweise an die Resultatdatei angehangen.

3.7.4 Testsysteme

Um die aufgestellte These zu überprüfen, werden XXX verschiedene Systeme verwendet. Alle Systeme besitzen unterschiedliche starke Prozessoren, mit einer Anzahl von 1 - 6 Kernen (2 - 12 virtuelle Kernen). Es wird darauf geachtet, dass alle Computer auf der neuesten Version ihres Betriebssystems laufen, dass die Systeme keine Aktualisierungen oder andere Änderungen während der Durchläufe vornehmen und dass sie vor dem Starten des Tests neugestartet sind. Eine Liste aller Testsystem ist im Anhang [A3 Testsysteme S.VIII] zu finden.

4 Fazit

Das Fazit beschreibt die Analyse der Resultate aus den verschiedenen Testdurchläufen. Zudem wird behandelt, wie sich die gewonnenen Informationen mit der aufgestellten These überschneiden.

4.1 Ergebnisse

4.2 Erkenntnisse

4.2.1 Parallelisierung minimaler aufwand

4.3 Ausblick

Quellenverzeichnis

Q1 Projekt OuterSpace

Chouliaras, A. & Gossler, D. (2021, 22. August). *GitHub - DennisGoss99/Prj_OuterSpace: 3D Space game*. Projekt OuterSpace. Abgerufen am 19. Mai 2022, von https://github.com/DennisGoss99/Prj_OuterSpace

Q2 Demtröder2006_Book_Experimentalphysik1

Demtröder, W. (2006). *Mechanik und Wärme* (4. Aufl., Bd. 1). Springer.

Q3 Collisions in 1-dimension

Fitzpatrick, R. (2006, 2. Februar). *Collisions in 1-dimension*. farside.ph.utexas.edu. Abgerufen am 10. Juni 2022, von https://farside.ph.utexas.edu/teaching/301/lectures/node76.html

Q4 Mathematics of Satellite Motion

Henderson, T. (o. D.). *Mathematics of Satellite Motion*. The Physics Classroom. Abgerufen am 17. Mai 2022, von https://www.physicsclassroom.com/class/circles/Lesson-4/Mathematics-of-Satellite-Motion

Q5 JUnit

JUnit. (o. D.). *JUnit – About*. Abgerufen am 19. Mai 2022, von https://junit.org/junit4/

Q6 Kotlinx serialization

Kotlin. (2022a, Mai 26). *GitHub - Kotlin/kotlinx.serialization: Kotlin multiplatform / multi-format serialization*. GitHub. Abgerufen am 20. Juni 2022, von https://github.com/Kotlin/kotlinx.serialization

Q7 Kotlinx coroutines

Kotlin. (2022b, Juni 10). *GitHub - Kotlin/kotlinx.coroutines: Library support for Kotlin coroutines*. GitHub. Abgerufen am 20. Juni 2022, von https://github.com/Kotlin/kotlinx.coroutines

Q8 Lightweight Java Game Library

LWJGL - Lightweight Java Game Library. (o. D.). LWJGL. Abgerufen am 19. Mai 2022, von https://www.lwjgl.org/

Q9 42 Years of Microprocessor Trend Data

Rupp, K. (2018, Februar). *42 Years of Microprocessor Trend Data*. GPGPU/MIC Computing. https://www.karlrupp.net/2018/02/42-years-of-microprocessor-trend-data/

Q10 Sweep and prune

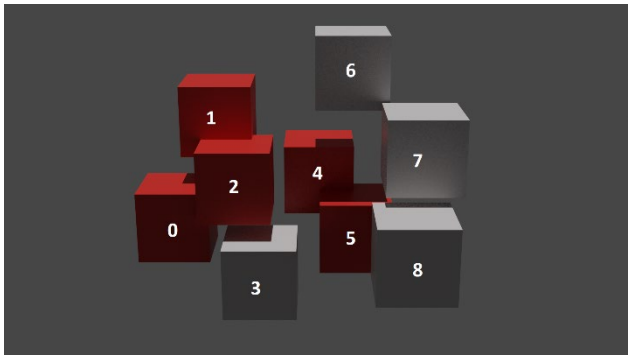
Terdiman, P. (2017, September). *Sweep-and-prune* (Version 0.2). http://www.codercorner.com/SAP.pdf

Q11 Font Rendering

T.M. [ThinMatrix]. (2015, 31. Oktober). *OpenGL 3D Game Tutorial 32: Font Rendering* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=mnIQEQoHHCU&feature=youtu.be

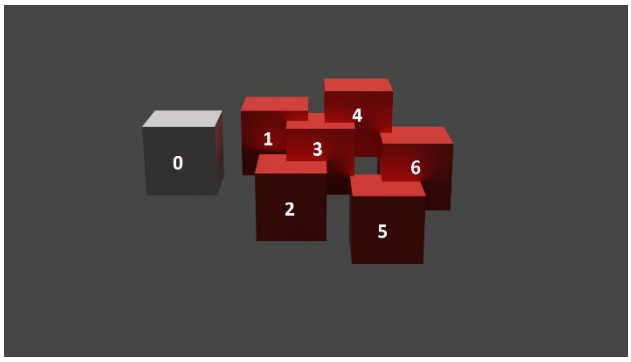
Anhang

A1 Sweep-and-prune Testfälle



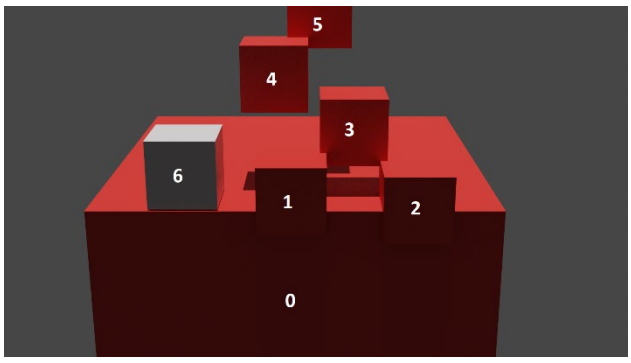
1. Testfall
Würfelanzahl: 9
Würfel kollidieren: 5

Kollisionen:
0: {2}
1: {2}
2: {0,1}
3: {}
4: {5}
5: {4}
6: {}
7: {}
8: {}



2. Testfall
Würfelanzahl: 7
Würfel kollidieren: 6

Kollisionen:
0: {}
1: {3}
2: {3,4}
3: {1,2,4,5}
4: {2,3,6}
5: {3,6}
6: {4,5}



3. Testfall
Würfelanzahl: 7
Würfel kollidieren: 6

Kollisionen:
0: {1,2}
1: {0,3}
2: {0,3}
3: {1,2}
4: {5}
5: {4}
6: {}

A2 Gravitationssystem Testfälle

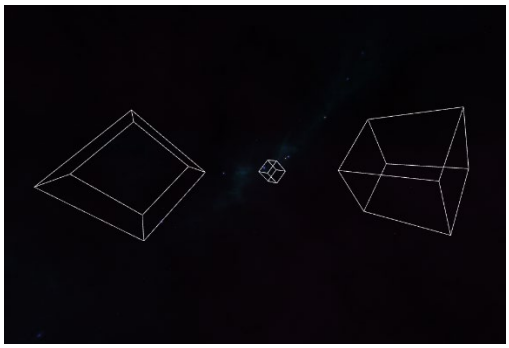


Bild zum 1 Testfall

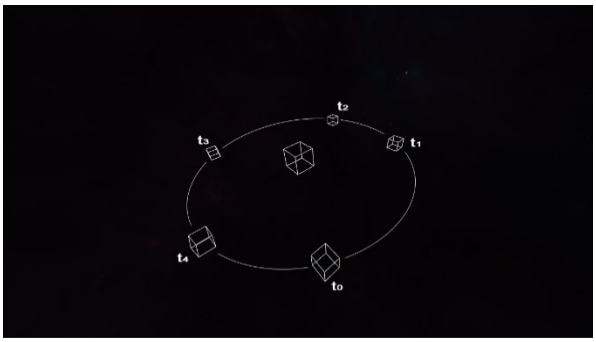


Bild zum 2,3 und 4 Testfall

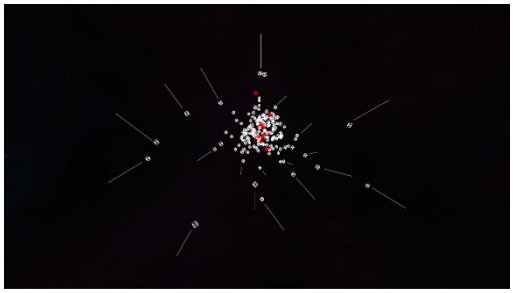


Bild zum 5 Testfall

Zugehöriger Code:

[https://github.com/DennisGoss99/BachelorThesis/blob/main/Application/src/test/kotlin/GravitySystemTest.kt]

$$v = \sqrt{\frac{G * m_{Central}}{r}}$$

$$T = \sqrt{r^3 * \frac{4 * \pi^2}{G * m_{Central}}}$$

($\vec{v}$) = Initiale Geschwindigkeit (G) = Gravitationskonstante = 6.674

($m_{Central}$) = Masse des Testobjektes im Zentrum (r) = Radius der Umlaufbahn

(T) = Periodenzeit

Quelle der Formeln zur Berechnung:

[*QX LINK*]

1. Testfall [zwei stationäre beeinflussen ein Testobjekt]

Objekt 1: $\vec{p} = \begin{pmatrix}100\\100\\100\end{pmatrix}$; *wird nicht von anderen Objekten beeinflusst*

Objekt 2: $\vec{p} = \begin{pmatrix}0\\0\\0\end{pmatrix}$; *wird von anderen Objekten beeinflusst*

Objekt 3: $\vec{p} = \begin{pmatrix}-100\\-100\\-100\end{pmatrix}$; *wird nicht von anderen Objekten beeinflusst*

2. Testfall [Testobjekt umkreist Objekt im Zentrum auf der X-Achse]

Objekt 1:

$$\vec{p} = \begin{pmatrix}0\\0\\0\end{pmatrix}$$

$$m_{Central} = 2$$

wird nicht von anderen Objekten beeinflusst

Objekt 2:

$$\vec{p}_{t_0} = \begin{pmatrix}20\\0\\0\end{pmatrix} \Rightarrow r = 20$$

$$v_y = \sqrt{\frac{G * m_{Central}}{r}} = \sqrt{\frac{6.674 * 2}{20}} = 0.81694555 \Rightarrow \vec{v} = \begin{pmatrix}0\\0.81694555\\0\end{pmatrix}$$

$$T = \sqrt{r^3 * \frac{4 * \pi^2}{G * m_{Central}}} = \sqrt{20^3 * \frac{4 * \pi^2}{6.674 * 2}} = 153.8214 \approx 154$$

wird von anderen Objekten beeinflusst

3. Testfall [Testobjekt umkreist Objekt im Zentrum auf der Y-Achse]

Objekt 1:

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$m_{Central} = 6$$

wird nicht von anderen Objekten beeinflusst

Objekt 2:

$$\vec{p}_{t_0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 36 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow r = 36$$

$$v_z = \sqrt{\frac{G * m_{Central}}{r}} = \sqrt{\frac{6.674 * 6}{36}} = 1.054672 \Rightarrow \vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.054672 \end{pmatrix}$$

$$T = \sqrt{r^3 * \frac{4 * \pi^2}{G * m_{Central}}} = \sqrt{36^3 * \frac{4 * \pi^2}{6.674 * 6}} = 214.4692 \approx 214$$

wird von anderen Objekten beeinflusst

4. Testfall [Testobjekt umkreist Objekt im Zentrum auf der Z-Achse]

Objekt 1:

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$m_{Central} = 80$$

wird nicht von anderen Objekten beeinflusst

Objekt 2:

$$\vec{p}_{t_0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 600 \end{pmatrix} \Rightarrow r = 600$$

$$v_x = \sqrt{\frac{G * m_{Central}}{r}} = \sqrt{\frac{6.674 * 80}{600}} = 0.9433274 \Rightarrow \vec{v} = \begin{pmatrix} 0.9433274 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$T = \sqrt{r^3 * \frac{4 * \pi^2}{G * m_{Central}}} = \sqrt{600^3 * \frac{4 * \pi^2}{6.674 * 80}} = 3996.3972 \approx 3996$$

wird von anderen Objekten beeinflusst

5. Testfall [testen des parallelen Systems]

Objekt [1 …200]:

$$\vec{p}_i = \begin{pmatrix} Math.Random.NextInt(0,101) \\ Math.Random.NextInt(0,101) \\ Math.Random.NextInt(0,101) \end{pmatrix}$$

$$m_{Central} = Math.Random.NextInt(0,101)$$

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Alle Objekte werden und können andere Objekte beeinflussen

A3 Testsysteme

ID	Prozessor	K	V-K	Grafikkarte	Betriebssystem	RAM	VRAM
1	Intel Core i5-4460 @ 3.20 GHz	4	4	AMD RX 5700	WIN-H 10 x64	16 GB 1600MHz	8 GB
2	Intel Core i7-1165G7 @ 2.80 GHz	4	8	Intel(R) Iris(R) XE Graphics	WIN-H 10 x64	32 GB 3200 MHz	15,8 GB
3	U Pc						
4	AMD Ryzen 5 2600 @ 3.7 GHz	6	12	Radeon RX 590	WIN-H 10 x64	16 1067 MHz	8 GB
5	Intel Core i7 6700K @ 4.2 GHz	4	8	NVIDIA GTX 1080	WIN-P 10 x64	32 GB 4100 MHz	8 GB
6	S Pc						
7	Mac						
8	Intel Pentium 4 630 @ 2796.84 MHz	1	2	NVIDIA GTX 460	WIN-H 7 x64	3 GB	1 GB