Ludwig Maximilians Universität München
Institut für Informatik
Lehr- und Forschungseinheit für Datenbanksysteme

Skript zur Vorlesung

Managing and Mining Multiplayer Online Games

im Sommersemester 2016

Kapitel 2: Der Game Core

Skript © 2012 Matthias Schubert

http://www.dbs.ifi.lmu.de/cms/VO_Managing_Massive_Multiplayer_Online_Games

Kapitelübersicht

- Generelle Modellierung eines Spielzustandes (Game State)
- Zeit-Modellierung (Zug- und Tick-System)
- Aktionsverarbeitung
- Interaktion mit anderen Komponenten der Game Engine
- Räumliche Verwaltung und Aufteilung des Game States

Interne Darstellung von Spielen

Benutzersicht

ID	Type	PosX	PosY	Health	…
412	Knight	1023	2142	98	…
232	Soldier	1139	2035	20	…
245	Cleric	1200	2100	40	…
…					

Game State

Gutes Design: Strikte Trennung von Daten und Darstellung (Model-View-Controller Pattern)

- MMO-Server: Verwalten des Game State / keine Darstellung notwendig
- MMO-Client: Teile des Game States aber I/O und Darstellungskomponente
- Begünstigt die Implementierung unterschiedlicher Clients für dasselbe Spiel (unterschiedliche Graphikqualitäten)

Game State

Gesamtheit aller Daten, die den Spielzustand repräsentieren

- Modellierung mit ER-Modell oder UML möglich (Objekte, Attribute, Beziehungen, ...)
- Modell aller veränderlichen Informationen
- Liste aller Game Entities
- Attribute der Game Entities
- Informationen über das gesamte Spiel

Informationen, die nicht im Game State stehen müssen:

- Statische Informationen
- Umgebungsmodelle/Karten
- Standard-Attribute von Einheiten

Game Entitäten

Entsprechen den Objekten

Beispiele für Game Entities:

- Einheiten in einem RTS-Spiel
- Felder in einem Brettspiel
- Charaktere in einem RPG
- Gegenstände
- Umgebungsobjekte (Truhen, Türen, ...)

Attribute und Beziehungen

Regelrelevante Eigenschaften einer Game Entity

Entspricht Attributen und Beziehungen

Beispiele:

- Aktuelle HP (max. HP nur wenn veränderlich)
- Ausbaustufe von Einheiten in einem RTS
- Umgebungsobjekte: offene oder geschlossene Türen
- Beziehungen zwischen Objekten:
    - Charakter A hat Item X im Inventar (1:n)
    - A ist mit B in einer Gruppe (n:m)
    - A befindet sich im Kampf mit C (n:m)
    - A hält Waffe W in der rechten Hand (1:1)

Informationen über das gesamte Spiel

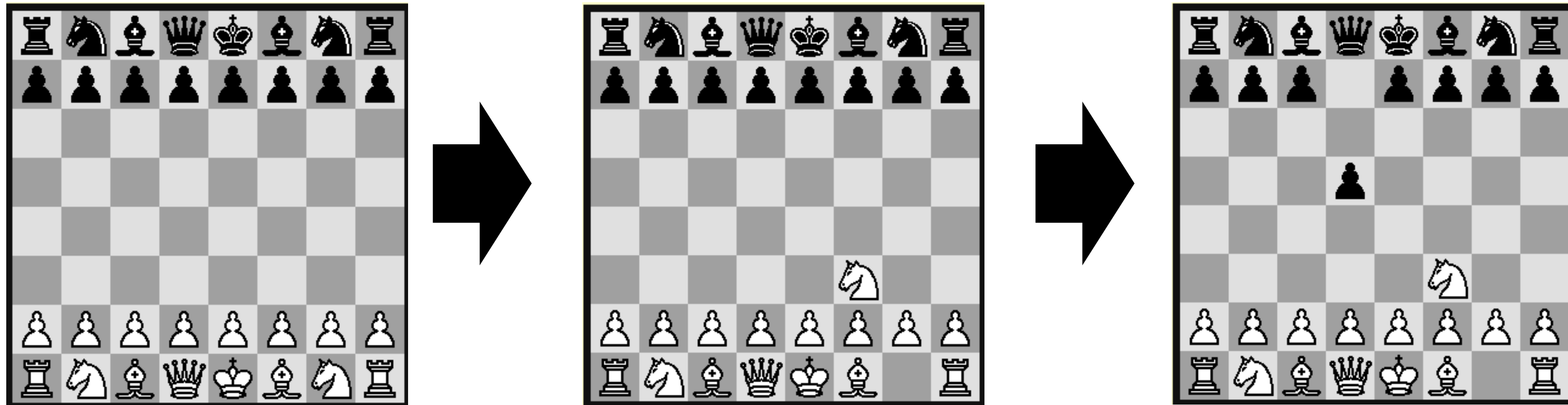
Alle Informationen über den Spielzustand, die nicht über Entitäten erfassbar sind

- Tageszeiten im Spiel
- Karte auf der gespielt wird
- Sichtbereich der Spieler in einem RTS Game
  (Falls für die Spieler kein abstraktes Entity erzeugt wird)
- Servertyp in einem MMORPG (PVP/PVE/RP)
- …

Achtung:

Informationen können als Attribute des Game States oder auch als Entitäten modelliert werden.

Beispiel: Schach



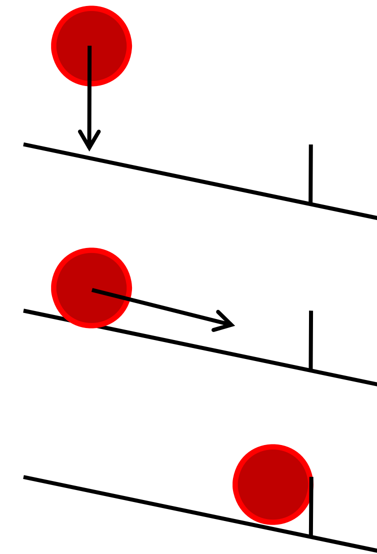
- Information über das Spiel:
  - Spieler und Zuordnung der Seite (schwarz oder weiß)
  - Spielmodus: mit „Schachuhr“ oder ohne
- Game State:
  - Positionen aller Figuren/ Belegung aller Spielfelder (Entitäten sind hier entweder Figuren oder Felder)
  - Spieler, der gerade am Zug ist
  - verbleibende Zeit für beide Spieler (abhängig vom Spielmodus)

Aktionen

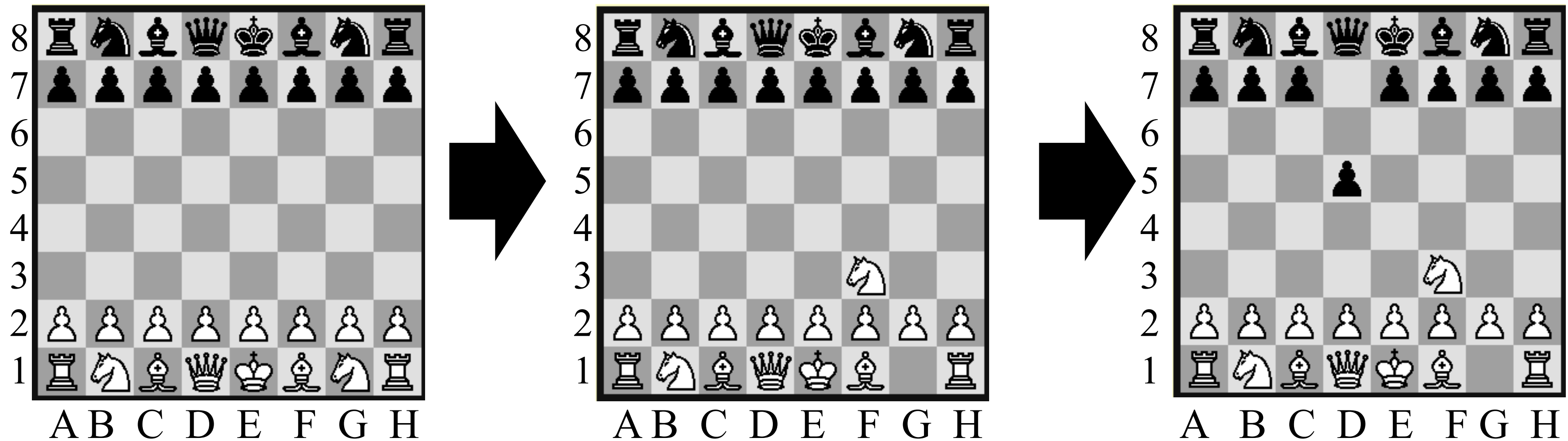
- Aktionen überführen einen gültigen Game State in einen anderen gültigen Game State
- Aktionen implementieren die Regeln des Systems
- Game Core organisiert die Entstehung durch:
  - Spieler (Benutzereingabe)
  - NPC-Steuerung (AI-Steuerung)
  - das Umgebungsmodell

    Beispiel:

    - Ball wird auf eine Schräge gelegt
    - Umgebungsmodell berechnet mit Hilfe der Physics Engine, dass Ball rollt
    - Aktion, die sowohl die Position als auch den Zustand des Balls (Beschleunigung) ändert, wird ausgelöst



Beispiel: Schach



- Aktionen: ändern die Position der Figuren/Belegung der Felder
  - Pferd von G1 auf F3
  - Bauer von D7 auf D5
- Aktionen realisieren die Regeln:
  - schwarzer Bauer 2 Felder nach vorne falls er noch nicht bewegt wurde
  - Pferd darf 2 nach vorne und 1 nach links (unter anderem)

Zeitmodellierung der Aktionen

- Regelt den Ausführungszeitpunkt einer Aktion
- Verhältnis von Spielzeit (verarbeitete Aktionen/Zeiteinheit) zur Echtzeit (Wall-Clock Time)
- Synchronisation mit anderen Komponenten des Spiels:
  - Rendering (Grafik/Sound)
  - Abfrage von Benutzereingaben
  - Aufrufe der AI für NPCs
  - …
- Umgang mit Aktionen, die noch nicht verarbeitet werden können
  - Löschen (2ter Zug in Folge von einem Spieler im Schach)
  - Verzögern (Ausführen der Aktion sobald sie erlaubt ist)

- Lösung hängt stark vom Spielprinzip ab

Aktionsverarbeitung bei Eventsteuerung

Rundenbasierte Spiele: Art und Reihenfolge der Aktionen ist festgelegt und wird vom Game Core verwaltet

- Game Core ruft Aktionserzeuger in fester Reihenfolge auf
- Realisierung über Schleifen, Zustandsautomaten, ...
- Keine Nebenläufigkeit möglich
- *Beispiele*:
  - Schach
  - Civilization
  - Siedler von Catan
  - Rundenbasierte RPGs

Nachteile:

- Anwesenheit der Spieler erforderlich
- Spielprinzip würde eventuell gleichzeitiges Ziehen mehrerer Spieler zulassen (weniger Wartezeit)

Aktionsverarbeitung bei Eventsteuerung

Realtime/Transaktionssystem

- Game verwendet keine feste Steuerung der Aktionserzeugung
- Spieler können Züge asynchron zueinander absetzen
- NPC/Umgebungsmodelle können in unabhängigen Threads agieren
- Nebenläufigkeit kann wie bei Transaktionssystemen realisiert werden (sperren, rücksetzen, …)
- Beispiel:
    - bestimmte Browser Games

Aktionsverarbeitung bei Eventsteuerung

Vorteile:

- Kann auf Standardlösungen aufsetzen (z.B. DBS)
- Vollständige Nebenläufigkeit:
  - wenig Wartezeit auf andere Spieler (Spiel kann Wartezeiten verlangen)
  - verteilte Realisierung ist einfach

Nachteile:

- Keine Synchronisation zwischen Spielzeit und Echtzeit
  => Spielzeit (Aktionen/Minute) kann stagnieren
- Keine Kontrolle über max. Handlungen pro Zeiteinheit
- Gleichzeitige Handlungen sind unmöglich (Serialisierbarkeit)

Realisierung der Zeitabhängigkeit

Tick-Systeme (Soft-Real-Time Simulation)

- Handlungen werden nur zu fest getakteten Zeitpunkten (Ticks) verarbeitet.
- Aktionen können zu beliebigen Zeitpunkten erzeugt werden
- Ein Tick hat eine Mindestdauer (z.B. 1/24 s)

  => feste Synchronisation von Echtzeit und Spielzeit
- Alle Aktionen innerhalb eines Ticks gelten als gleichzeitig

  (keine Serialisierung)
- Der nächste Game State entsteht aus einer kumulierten Betrachtung aller Aktionen (keine Isolation)
- Verwendetes Modell im Rendering, da hier feste Frameraten und gleichzeitige Änderungen notwendig sind

Zeit-Modellierung für Aktionen

Bewertung des Tick-Systems

Vorteile:

- Synchronisation zwischen Echt- und Spielzeit
- Faire Regelung der Aktionen pro Zeiteinheit
- Gleichzeitigkeit

Nachteile:

- Lag-Behandlung
  (Server schafft Tick-Berechnung nicht rechtzeitig)
- Konfliktlösung bei gleichzeitigen und widersprüchlichen Aktionen
- Zeitliche Reihenfolge
  (alle Aktionen, die in einem Tick ankommen werden als gleichzeitig betrachtet)

Zeit-Modellierung für Aktionen

weitere wichtige Aspekte im Tick-System:

- Berechnungszeit eines Ticks hängt von vielen Einflüssen ab:
  - Hardware
  - Größe des Game States
  - Aktionen
  - Komplexität der Aktionen
  - Durchführung der Synchronisation und der Aufgaben anderer Subsysteme:
    - Verteilung eines Game States an das Persistenz-System

Aktionen und Transaktionen

Züge/Handlungen erinnern stark an Transaktionen in DBS

- Atomarität: Zug/Handlung wird ganz oder gar nicht durchgeführt

  Beispiel: Spieler A zieht, Schachuhr für A wird angehalten, Schachuhr für B läuft weiter
- Consistency: Überführen eines gültigen Game States in einen anderen gültigen Game State

- Dauerhaftigkeit: Ergebnisse von Transaktionen stehen fest im Game State und werden (zumindest partiell) an das Persistenz-System übergeben.

Außerdem:

Übergänge müssen den Spielregeln entsprechen (Integritätserhalt)

- statisch: Game State ist regelkonform
- dynamisch: Übergang ist regelkonform

Unterschiede zu Transaktionen

Zeitliche Verarbeitung der Handlungen spielt eine wichtige Rolle

- Durchführung von Handlungen sollte möglichst fair sein
  - keine Verzögerung der Handlungen eines Spielers
  - Anzahl der max. Handlungen pro Zeit für alle Spieler gleich
- Gleichzeitiges Handeln (Simulation der Realität) sollte prinzipiell möglich sein
- max. Bearbeitungsdauer ist für ein flüssiges Spiel notwendig
  evtl. wegfallen von Handlungen bei Zeit-Überschreitungen
- Zeitsynchronisation zwischen Spielzeit und Echtzeit sollte möglich sein

Unterschiede zu Transaktionen

kein zwingender logischer Einbenutzerbetrieb (Isolation)

- Bei gleichzeitigen Handlungen müssen Aktionen in Abhängigkeit berechnet werden. (keine Serialisierbarkeit)
- *Beispiel:*
  - Charakter A hat 100/100 HP (=Hit Points)
  - Zum Zeitpunkt t_j bekommt A 100 HP Schaden von Charakter B
  - Zum Zeitpunkt t_j bekommt A 100 HP Heilung von Charakter C

  Ergebnis unter Isolation:
  - Erst Heilung (Überheilung) und dann Schaden => A hat 0 HP und stirbt
  - Erst 100 Schaden => A stirbt und Heilung ist nicht mehr möglich

  Ergebnis unter gleichzeitigen Handlungen:
  - A bekommt 100 Schaden und 100 Heilung: Verrechnet heben sich beide Effekte auf.

Umsetzung im Game Loop

- Endlosschleife, in der Aktionen auf den aktuellen Game State angewendet werden und diesen so konsistent verändern (Handlungsverarbeitung)
- Zeitmodell ist für den Start der nächsten Iteration verantwortlich
- weitere Funktionalitäten, die vom Game Loop abhängen
  - Lesen und Verarbeiten von Benutzereingaben (=> Benutzerhandlungen)
  - Aufruf der KI von NPCs (=> NPC Handlungen)
  - Aufruf Umgebungsmodell

  } erzeugen Handlungen

  - Grafik und Sound Rendering
  - Speichern bestimmter Spielinhalte auf dem Sekundärspeicher
  - Übermittlung von Daten an das Netzwerk
  - Update unterstützender Datenstrukturen (räumliche Indexstrukturen, Graphik-Buffer, …)
  - …

Realisierung von Game Loops

- Ein Game Loop für alle Aufgaben:
  - kein Overhead durch Synchronisation => effizient
  - schlechte Schichtung der Architektur: bei Änderung eines Aspektes muss auch der Game Core überarbeitet werden

- Unterschiedliche Game Loops für unterschiedliche Subsysteme (Bsp.: AI-Loop, Netzwerk-Loop, Rendering Loop, …)
  - Gute Schichtung des Systems
  - Subsysteme können bei Client-Server Einteilung ausgeschaltet werden
    - Client braucht keine eigene NPC Steuerung
    - Server braucht keine Rendering Loops
  - Synchronisation der Game Loops

Kommunikation mit dem Game Loop

- Game Loop ruft andere Module auf
  - Lösung für Systeme, die im Takt oder langsamer als Game Loop laufen
  - Schlecht geeignet für Multi-Threading
  - Beispiel: Persistenz-System, Netzwerk, Sound Rendering, …
- Game Loop schickt Messages an Subsystem
  - Erlaubt Multi-Threading
  - Aufrufhäufigkeit ist ein Vielfaches vom Takt der Game Loop
  - ***Beispiel***: NPC-Steuerung, Synchronisation mit Clients, Sound-Rendering, …
- Synchronisation über lesenden Zugriff auf Game State
  - Bei schneller getakteten Systemen benötigt das Subsystem eine eigene Loop
  - Multi-Threading mit umfassendem Zugriff auf den Game State
  - Gelesene Daten müssen konsistent sein (noch nicht geändert)

    z.B. Grafik-Rendering, Persistenz-System, …

Verarbeiten von Aktionen

- Aufgabe der Aktionsverarbeitung: Umsetzung von Spiel-Aktionen (laufen, schießen, springen, …) in Änderungen des Game State
- Aktionsverarbeitung ist dabei Umsetzung der Spielmechanik
- Berechnungsvorschriften für erlaubte Aktionen
- Leseoperation
- Schreiboperation
- Verwendung von Subsystemen möglich

  z.B. Spatial Management Modul oder Physics Engine

Konsistenzerhalt bei der Aktionsverarbeitung

- Im Tick-System: gleichzeitige Aktionen möglich
- Reihenfolgeunabhängigkeit bzgl. der Aktionen in einem Tick
- Problem: Lesen von bereits geänderten Daten
- Lösungen:
  - Schattenspeicherkonzept:
    - Es gibt 2 Game States G1 und G2
    - G1 enthält den letzten konsistenten Stand (aktiv)
    - G2 wird in aktueller Iteration geändert (inaktiv)
    - Bei Abschluss des Ticks wird G2 auf aktiv und G1 auf inaktiv gesetzt
  - Feste Reihenfolge von Lese und Schreibeoperationen
    - Erfordert das Zerlegen und Neuordnen der Aktionen
    - Alle Aktionen werden gleichzeitig bearbeitet

Konflikte bei Gleichzeitigkeit

- Bei Gleichzeitigkeit können Konflikte entstehen (z.B. gleichzeitiges aufheben einer Goldmünze)
- Problem: das Ergebnis der Handlung kann nicht in Isolation berechnet werden. (Wenn A die Münze bekommt, kann B sie nicht auch bekommen.)
- Konfliktbehandlung:
  - Streichen beider Handlungen (Undo both)

    => Konflikterkennung und evtl. rücksetzen der Daten
  - Zufällige Auswahl einer der Aktionen und löschen (random)
    => Konflikt muss erkannt und evtl. rücksetzen der Daten
  - Erste Aktion bekommt recht (natural order)

    => Lösung nicht unbedingt fair
    (Ausführungsreihenfolge ≠ Handlungsreihenfolge)

    => **aber**: Einteilung in Ticks kann die Handlungsreihenfolge ohnehin beeinflussen

Modellierung von Aktionen

Wie werden die erlaubten Aktionen eines Spiels umgesetzt?

- Direkte Implementierung in der Host-Sprache
  - **Vorteil**: hohe Effizienz
  - **Nachteile**:
    - Doppelte Implementierung der gleichen Effekte
    - Redundanter Code
    - Inkonsistenzen sind schwer überprüfbar
- Verwendung von Packages und Subsystemen, die bestimmte Teile der Aktionsverarbeitung kapseln:
  - Physics Engine (Kollisionstests, Beschleunigung, Abprallen, …)
  - Spatial Management Module (nächste Nachbarn, Sichtbereiche, …)
  - AI Engine (Wegewahl, Schwarmverhalten, …)

Modellierung von Aktionen

- Scripting Engine
  - Stellt eigene Programmiersprache zur Verfügung
  - Befehle können direkten Zugriff auf Game State verhindern (unterstützt Konsistenzerhalt)
  - Entitäten und ihr Verhalten werden einheitlich modelliert
  - Nachteil: nicht alle Designoptionen sind ohne Änderungen der Skriptsprache umsetzbar
  - **Beispiel**: LUA (http://http://lua-users.org/wiki/ClassesAndMethodsExample)

```
require("INC_Class.lua")
--===========================
 cAnimal=setclass("Animal")

function cAnimal.
        methods:init(action, cutename)
        self.superaction = action
        self.supercutename = cutename
end
```

```
--===========================
cTiger=setclass("Tiger", cAnimal)

function cTiger.methods:init(cutename)
         self:init
        super("HUNT (Tiger)", "Zoo Animal (Tiger)")
        self.action = "ROAR FOR ME!!"
        self.cutename = cutename
 end
```

Physics Engines

- Umsetzung von Festkörperphysik/klassische Mechanik
- Game Entität muss alle benötigten Parameter abbilden
  - Räumliche Ausdehnung (Polygonmesh, Vereinfachungen: Zylinder, MUR)
  - Geschwindigkeitsvektor
  - Masse
  - …
- Umsetzung meist über Differentialgleichungssysteme
- Für realistische Effekte: hohe Tick-Raten und detaillierte Modellierung
- hoher Berechnungsaufwand macht effiziente numerische Näherungsalgorithmen notwendig

Physics Engines und MMO-Server

- Viele der Ergebnisse einer klassischen Physics Engine werden nur zur realistischeren Darstellung benötigt

  z.B. Partikelfilter, Rag-Doll Animation, …
- Gekoppelte Berechnung mit Darstellungs-Layer ist häufig sinnvoll, da Ergebnisse für Änderung der Darstellung und des Game States notwendig sind (Bewegung)
- Hohe Tick-Raten

⇒ Client-seitige Verwendung

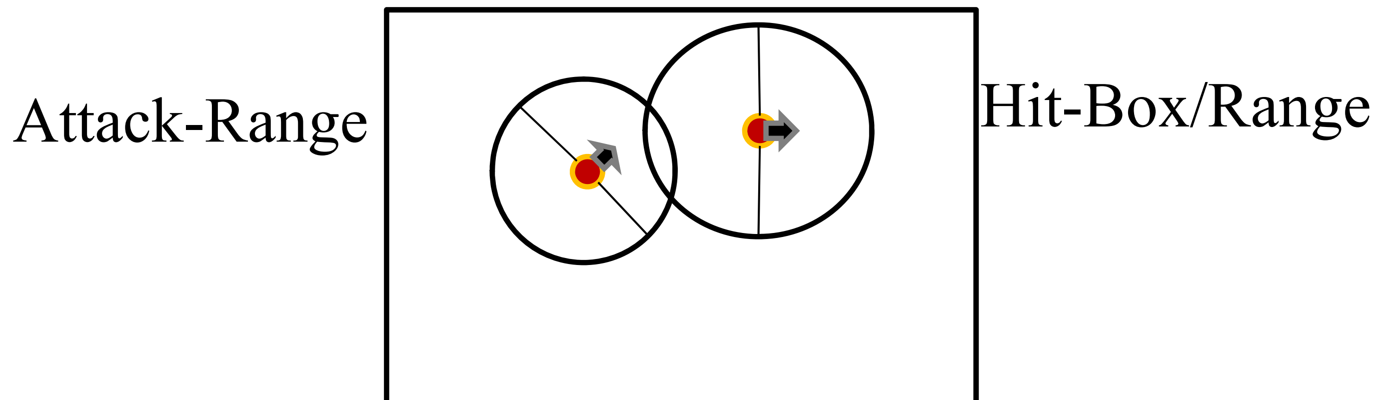
⇒ Auf Serverseite meist zu hoher Aufwand

⇒ Für Umsetzung des Designs reichen häufig grobe Vereinfachungen

⇒ Verwendung einer Physics Engine kann auch zur Parameterbestimmung von direkten Implementierungen verwendet werden

Spatial Management in Game Servern

- Großteil der Spiele besitzt eine räumliche Komponente z.B. 2D/3D Karten, Spielwelt, …
- Aktionsverarbeitung, NPC-Steuerung und Netzwerk-Layer beinhalten räumliche Anfragen:
  - Welche anderen Game Entitäten kann ich beeinflussen, können mich beeinflussen oder kann ich überhaupt sehen? (AoI = Area of Interest)
  - Unterstützung von Kollisionsanfragen (vgl. Physics Engine) und Bereichsschnittmengen
  - Welcher Spieler steht mir am nächsten?
  - Betritt ein Spieler die Angriffsumgebung (Aggro-Range) eines NPCs?



Spatial Management in Game Servern

- Bei kleinen Spielwelten wenige räumliche Objekte (Game State als Liste organisiert)
- Anfragebearbeitung über sequentielle Suche
- Bei wiederholter Anfragebearbeitung und großer Anzahl beweglicher Entitäten entsteht erheblicher Suchaufwand

  Beispiel: 1000 Game Entities in einer Zone, 24 Ticks/s

  naive AoI Berechnung: 24 Mio. Distanzvergleiche pro Sekunde

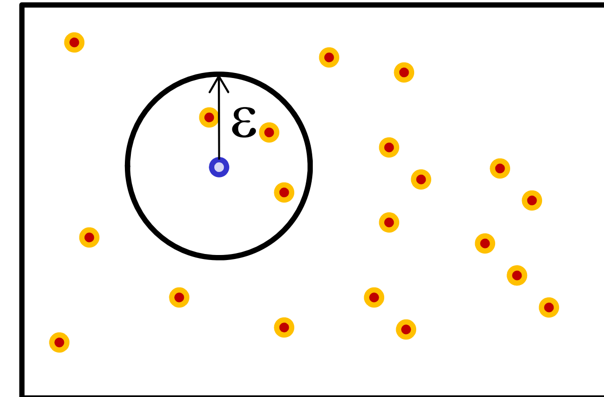
- **Folge**: bei wachsenden Game States fällt sehr viel Berechnungsaufwand für räumliche Anfragen an.

räumliche Anfragen (1)

Räumliche Anfragen (hier mit euklidischer Distanz im IR^2)

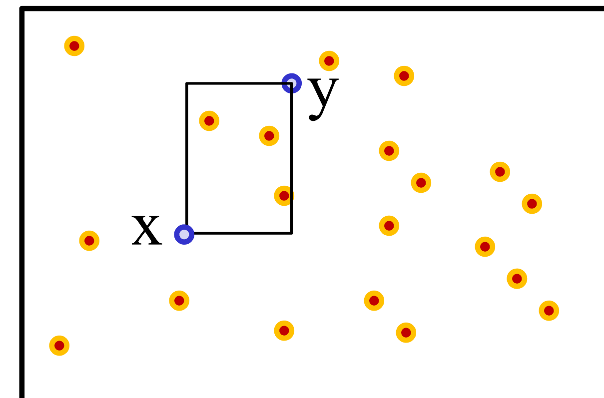
- Range-Query

  $RQ(q,\varepsilon) = \{v \in GS \mid \sqrt{(q_1 - v_1)^2 + (q_2 - v_2)^2} \le \varepsilon\}$



- Box-Query

  $BQ(x,y) = \{v \in GS \mid x_1 \le v_1 \le y_1 \wedge x_2 \le v_2 \le y_2\}$

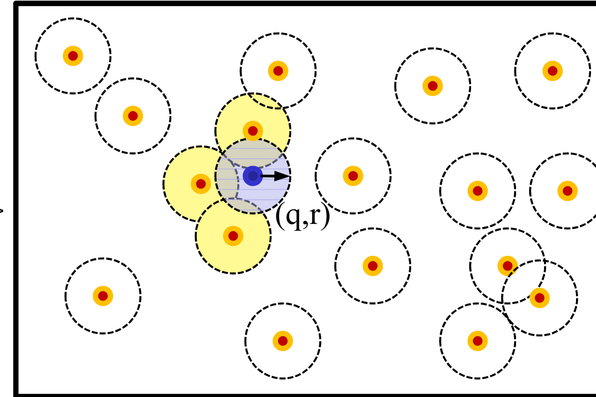


räumliche Anfragen (2)

- Intersection Query

$SIQ(q,r) =$

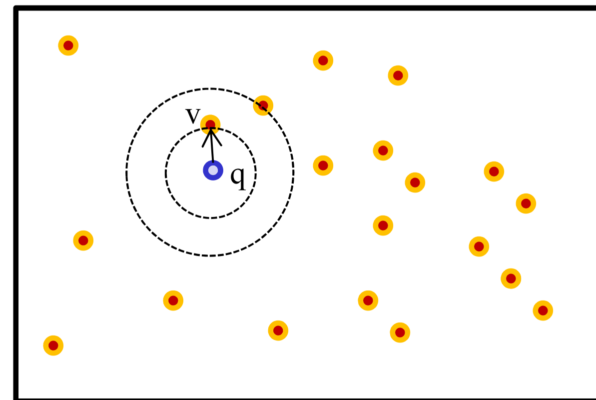
$$\left\{ (v,s) \in GS \times IR \middle| \sqrt{(q_1 - v_1)^2 + (q_2 - v_2)^2} \le r + s \right\}$$



- NN-Query

$NN(q) =$

$$\left\{ v \in GS \mid \forall x \in GS : \sqrt{(q_1 - v_1)^2 + (q_2 - v_2)^2} \le \sqrt{(q_1 - x_1)^2 + (q_2 - x_2)^2} \right\}$$



Effizienzsteigerung für räumliche Anfragen

- Methoden zur Reduktion der betrachteten Objekte (Pruning)
  - Aufteilung der Spielwelt (Zoning, Instanziierung, Sharding, …)
  - Index-Strukturen (BSP-Tree, KD-Tree, R-Tree, Ball-Tree)

- Reduktion der Aufrufe von räumlichen Anfragen
  - Reduktion der Anfrage-Ticks
  - Spatial-Publish-Subscribe

- Effiziente Anfragealgorithmen
  - Nearest-Neighbor Anfragen
  - ε-Range Join (gleichzeitiges Bestimmen aller Areas of Interest)

Sharding und Instanziierung

- Kopieren einer räumlichen Region für eine bestimmte Gruppe
- Dabei existiert die gleiche Region der Karte beliebig häufig
- Instanzen und Shards wurden primär zur Umsetzung des Game Designs geschaffen
  (Begrenzung der Spieler zum Lösen einer Aufgabe)
- Aber: Je mehr Spieler sich in einer Instanz aufhalten,
  desto weniger Performanz Probleme entstehen in der offenen Welt.

Problem:

- Löst das Problem nicht (keine zusammenhängende MMO Welt)
- Speicherung des lokalen Game States, auch wenn kein Spieler mehr in der Instanz ist

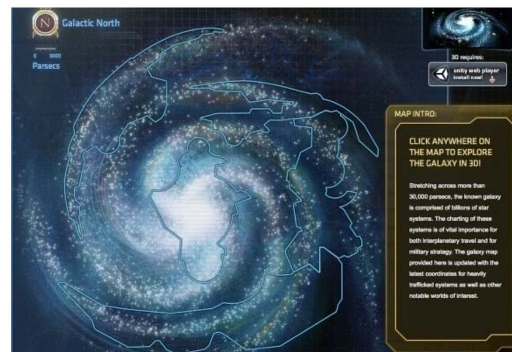
  => Management der Instanzen kann Aufwand verursachen
  (Worst Case: 1000 parallele Game States für 1000 Spieler)

Zoning

- Aufteilen der offenen Spielwelt in mehrere feste Teillandschaften
- Anfragen müssen nur Objekte in der aktuellen Zone berücksichtigen
- Teilt nicht nur den Raum, sondern auch den Game State auf
- Erleichtert Verteilung der Spielwelt auf mehrere Rechner

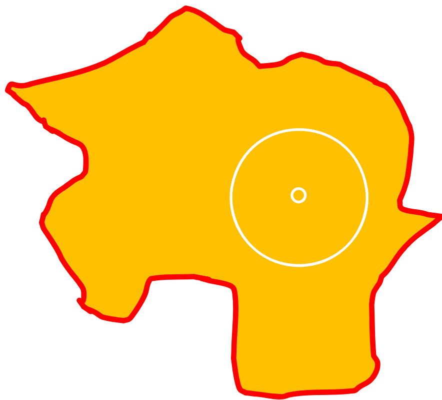
Probleme:

- Bei Randbereichen müssen evtl. Objekte in mehreren Zonen berücksichtigt werden
- Ungleichmäßige Verteilung der Spieler

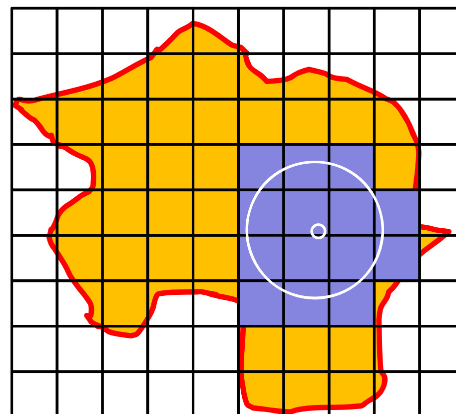


Micro-Zoning

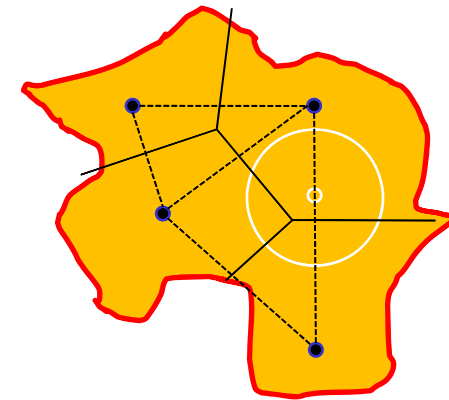
- Spielwelt wird in viele kleine Zonen (Micro-Zonen) aufgeteilt
- Game Entities werden in ihrer aktuellen Micro-Zone verwaltet
- Nur Zonen, die die AoI schneiden sind relevant
- Sequentielle Suchen innerhalb der Region
- Zonen können durch verschiedene Methoden erzeugt werden (Grids, Voronoi-Zellen, …)



Zoning



Micro-Zoning (grid-basiert)



Micro-Zoning (Voronoi-basiert)

Spatial Publish-Subscribe

- Micro-Zoning in Kombination mit Subscriber-System
- Game Entities werden in ihre aktuelle Micro-Zone eingetragen (publish)
- Game Entities abonnieren die Informationen aller Micro-Zonen, die ihre AoI schneiden (subscribe)
- Liste aller Game Entities in AoI über Vereinigung der Einträge der abonnierten Micro-Zonen

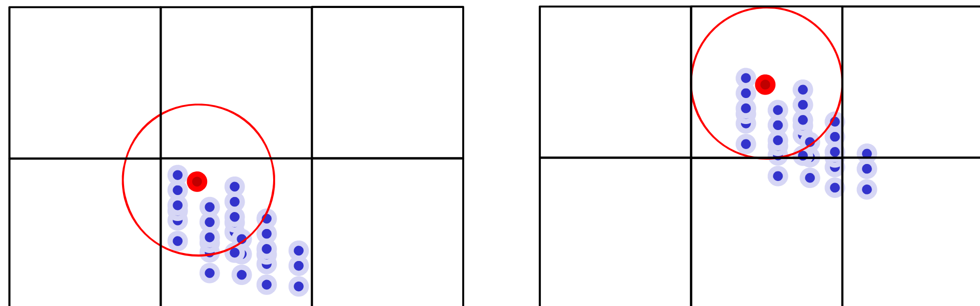
Vorteile:

- Effiziente Bestimmung nahe gelegener Objekte
- Bei Änderung können neue Informationen an Subscriber durchgereicht werden (keine regelmäßige Anfrage notwendig)

Micro Zoning und Spatial Publish-Subscribe

Nachteile:

- Auch Micro-Zonen können überfüllt sein
  => je kleiner die Fläche, desto weniger wahrscheinlich
- Bei zu kleinen Zonen steigt der Overhead für einen Zonenwechsel
  => je kleiner die Zonen, je häufiger der Wechsel
- Lage der Zonengrenzen kann zu starken Schwankungen bei den betrachteten Objekten führen.
- Bei sehr hohen Änderungsraten steigt der Overhead eines Zonen-Wechsel extrem an.
  => sehr viele Subscribe- und Unsubscribe-Vorgänge bremsen das System aus

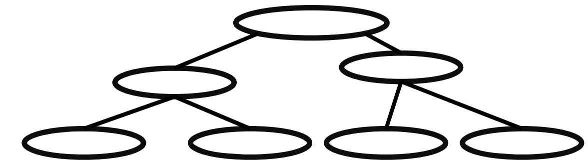


Klassische Indexstrukturen

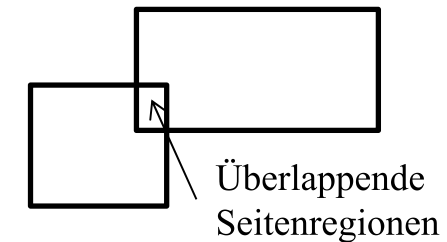
- Verwaltung von räumlichen Objekten kann auch über räumliche Suchbäume erfolgen
- Suchbäume passen ihre Seitenregionen (Zonen) der Datenverteilung an
  - ⇒ Garantie über maximale Füllung einer Seitenregion/Zone
  - ⇒ Bessere Suchperformanz durch Reduktion der betrachteten Objekte
  - ⇒ Es entsteht ein Aufwand bei der Anpassung des Suchbaumes
- Anpassung durch rekursive Aufteilung des Raumes (Quad-Tree, BSP-Trees)
- Anpassung durch Aufteilen der Daten auf minimal umgebende Seitenregionen

Wichtige Merkmale von räumlichen Suchbäumen

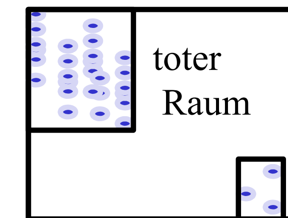
- *Seitenregion*: umgebende Approximation mehrerer Objekte



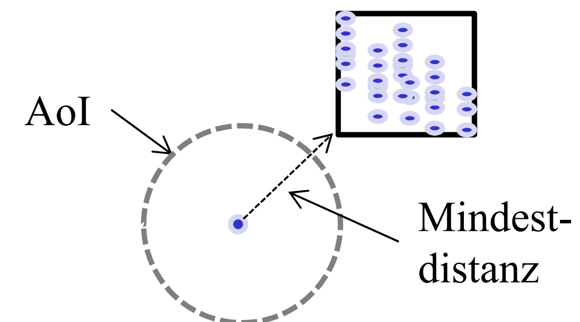
- *Balancierung*: Unterschiedlichkeit der Pfadlängen von der Wurzel zu den Blattknoten



- *Seitenkapazität*: Anzahl der Objekte, die mindestens/höchstens in der Seitenregion liegen



- *Überlappung*: Schnitt zwischen Seitenregionen ist erlaubt
- *toter Raum*: Raum, in dem keine Seitenregionen/Objekte liegen
- *Pruning*: Ausschluss aller Objekte in einer Seitenregion durch den Test auf Seitenregionen



Anforderungen an MMO Server

- i.d.R. liegt der ganze Baum im Hauptspeicher
- hohe Änderungsrate, jede Positionsänderung eines Game Entities
  - Je nach Spiel eine Änderung pro Tick
  - Struktur des Baums kann sich drastisch verändern
- hohe Anfragerate
- Unterstützung mehrerer Anfragen in einem Tick
- Dimensionalität der Objekte ist 2D bzw. 3D
- Objekte haben räumliche Ausdehnungen (Kollision, Hitbox, …)

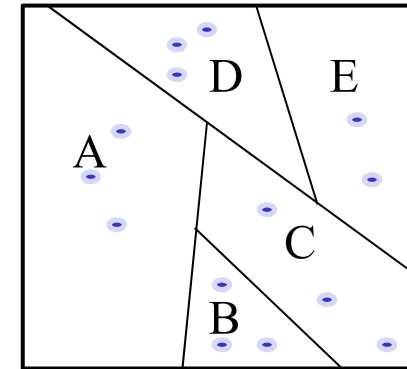
Folgerungen:

$\Rightarrow$ Datenstrukturen, die primär Seitenzugriffe optimieren sind ungeeignet (Baum ist im Hauptspeicher)

$\Rightarrow$ Overhead für Index-Aufbau/-Anpassung muss durch die Anfragebearbeitung aufgewogen werden.

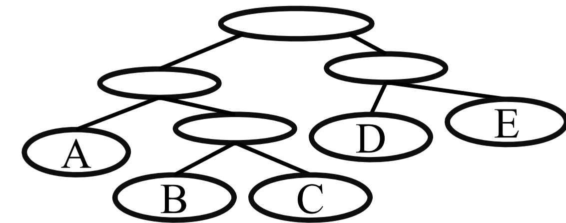
Binary Space Partitioning Trees (BSP-Tree)

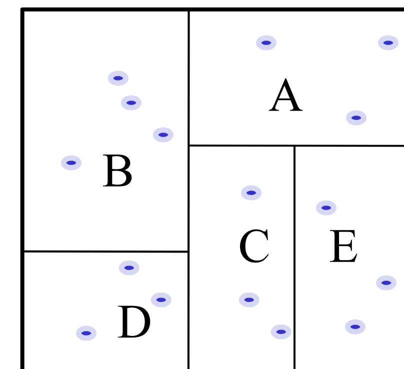
- Wurzel enthält gesamten Datenraum
- Jeder innere Knoten hat 2 Söhne
- Datenobjekte in den Blättern



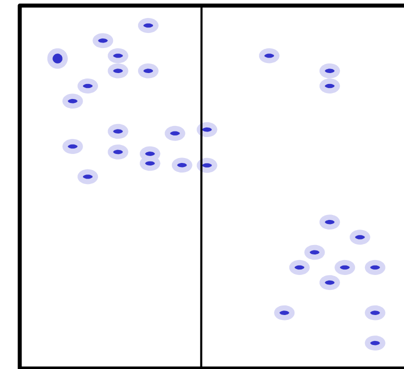
Bekannteste Variante: ***kD-Tree***

- max. Seitenkapazität sind *M* Einträge
- min. Seitenkapazität sind *M/2* Einträge
- bei Überlauf achsenparalleler Split
- nach Löschen Vereinigung von Geschwisterknoten
- Split-Achse wechselt nach jedem Split
- 50%-50% Aufteilung der Daten



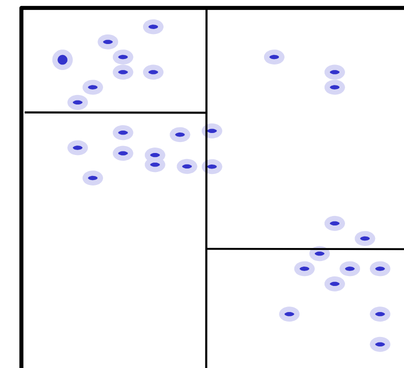


Binary Space Partitioning Trees (BSP-Tree)



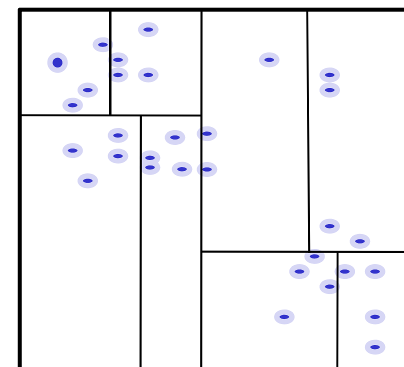
Problem bei dynamischen Verhalten:

- keine Balancierung (Degeneration des Baums)
- Korrektur der Balancierung möglich aber aufwendig
  => Hohe Update-Komplexität



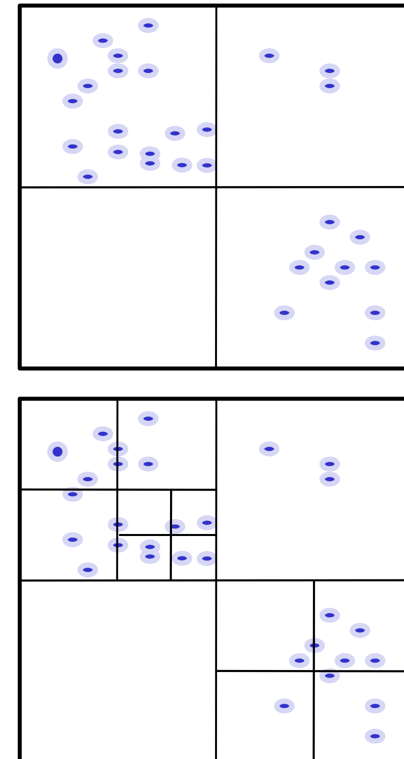
Bulk-Load

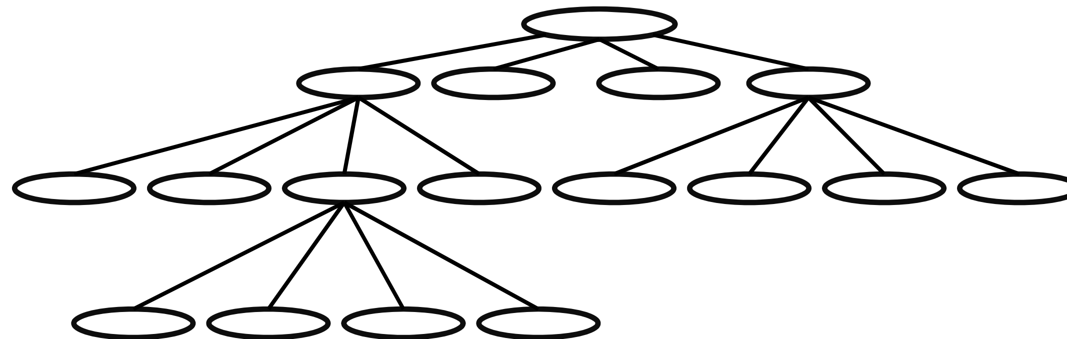
- Annahme: Kenntnis aller Datenobjekte
- Aufbau: durch rekursive 50-50 Aufteilung der Objekte bis jedes Blatt weniger als *M* Objekte enthält
- Bulk-Load erzeugt immer einen balancierten Baum
- Datenseite eine Baums mit *n* Objekten und Höhe *h* enthält mindestens $\left\lfloor \frac{n}{2^h} \right\rfloor$ Objekte und höchstens $\left\lfloor \frac{n}{2^h} \right\rfloor + 1$



Quad-Tree

- Wurzel stellt den ganzen Datenraum dar
- Jeder innere Knoten hat 4 Nachfolger
- Geschwisterknoten teilen den Raum ihres Elternknotens in 4 gleich große Teile ein
- Quad-Trees sind i.d.R. nicht balanciert
- Seiten haben einen max. Füllungsgrad *M*, aber keine Mindestfüllung
- Datenobjekte in den Blättern



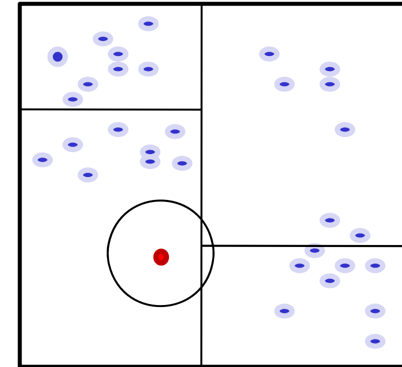


Datenpartitionierende Index-Strukturen

Raumpartitionierende Verfahren:

- Aufteilung des gesamten Datenraums durch Splits in den Dimensionen
- Seitenregionen enthalten toten Raum

  => evtl. schlechtere Suchperformanz bei räumlichen Anfragen



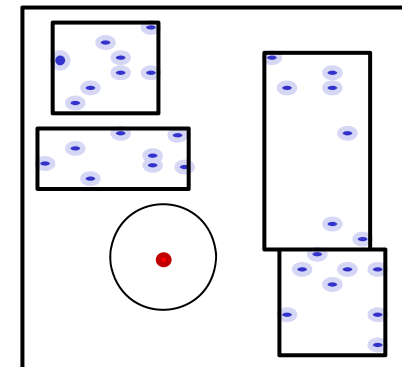
Range-Query in BSP-Tree

Datenpartitionierende Verfahren:

- Beschreibung der Seiten-Region durch minimal umgebende Regionen (z.B. Rechtecke)

  => Bessere Pruning Leistung
- Seitenregionen können überlappen

  => Degeneration bzgl. Überlappung
- Split- und Einfüge-Algorithmen minimieren:
  - Überlappung der Seitenregionen
  - Toten Raum in den Seiten
  - Balancierung bzgl. des Füllungsgrades



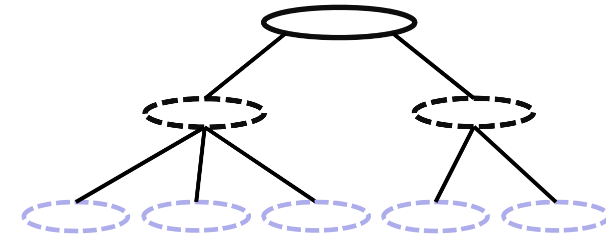
Range-Query in R-Tree

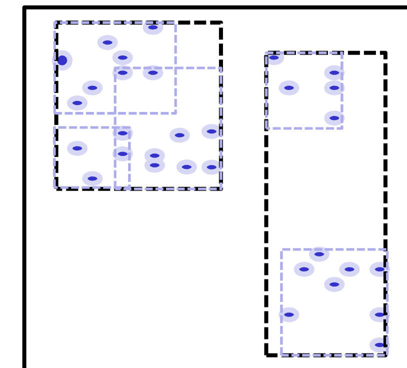
R-Baum

Struktur eines R-Baums:

- Wurzel umgibt den gesamten Datenraum und hat maximal *M* Einträge
- Seitenregionen werden durch minimal umgebende Rechtecke (MUR) modelliert
- innere Knoten im R-Baum haben zwischen *m* und *M* Nachfolger (wobei m ≤ M/2)
- Das MUR eines Nachfolgers ist vollständig im MUR des Vorgängers enthalten
- Alle Blätter sind auf dem gleichen Level
- Datenobjekte werden in den Blättern gespeichert

  Mögliche Datenobjekte:
  - Punkte
  - Rechtecke





Einfügen in den R-Baum

Das Objekt x ist in einen R-Baum einzufügen

Durch Überlappung können 3 Fälle auftreten

- Fall 1: x fällt in genau ein Directory-Rechteck D
  ⇒ Einfügen in Teilbaum von D
- Fall 2: x fällt in mehrere Directory-Rechtecke $D_1, \ldots, D_n$
  ⇒ Einfügen in Teilbaum von D_i, das die geringste Fläche aufweist
- Fall 3: x fällt in kein Directory-Rechteck
  ⇒ Einfügen in Teilbaum von *D,* das den geringsten Flächenzuwachs erfährt (in Zweifelsfällen, das die geringste Fläche hat)
  ⇒ *D* muss entsprechend vergrößert werden

Split-Algorithmus im R-Baum

(im Folgenden wird von inneren Knoten ausgegangen: Objekte sind MURs)

Der Knoten K läuft mit $|K| = M+1$ über:

$\Rightarrow$ Aufteilung auf zwei Knoten K_1 und K_2, so dass $|K_1| \geq m$ und $|K_2| \geq m$

Quadratischer Algorithmus

- Wähle das Paar von Rechtecken R_1 und R_2 mit dem größten Wert für den „toten Raum" im MUR, falls R_1 und R_2 in denselben Knoten K_i kämen.

  $$d(R_1, R_2) := \text{Fläche}(\text{MUR}(R_1 \cup R_2)) - \text{Fläche}(R_1) - \text{Fläche}(R_2)$$

  Setze $K_1 := \{R_1\}$ und $K_2 := \{R_2\}$
- Wiederhole den folgenden Schritt bis zum STOP:
  - wenn alle R_i zugeteilt sind: STOP
  - wenn alle restlichen R_i benötigt werden, um den kleineren Knoten minimal zufüllen: teile sie alle zu und STOP
  - sonst: wähle das nächste R_i und teile es dem Knoten zu, dessen MUR den kleineren Flächenzuwachs erfährt. Im Zweifelsfall bevorzuge den K_i mit kleinerer Fläche des MUR bzw. mit weniger Einträgen

schnellere Splitstrategie für R-Baum (1)

Linearer Algorithmus

- Der lineare Algorithmus ist identisch mit dem quadratischen Algorithmus bis auf die Auswahl des initialen Paars (R_1, R_2).
- Wähle das Paar von Rechtecken R_1 und R_2 mit dem „größten Abstand”, genauer:
  - Suche für jede Dimension das Rechteck mit dem kleinsten Maximalwert und das Rechteck mit dem größten Minimalwert (*maximaler Abstand*).
  - Normalisiere den *maximalen Abstand* jeder Dimension, indem er durch die Summe der Ausdehnungen der R_i in der Dimension dividiert wird (*setze den maximalen Abstand der Rechtecke ins Verhältnis zur ihrer Ausdehnung*).
  - Wähle das Paar von Rechtecken mit dem größten normalisierten Abstand bzgl. aller Dimensionen. Setze $K_1 := \{R_1\}$ und $K_2 := \{R_2\}$.
- Dieser Algorithmus ist linear in der Zahl der Rechtecke *(2m+1)* und in der Zahl der Dimensionen *d*.

Splitalgorithmus im R*-Baum

Idee der R*-Baum Splitstrategie

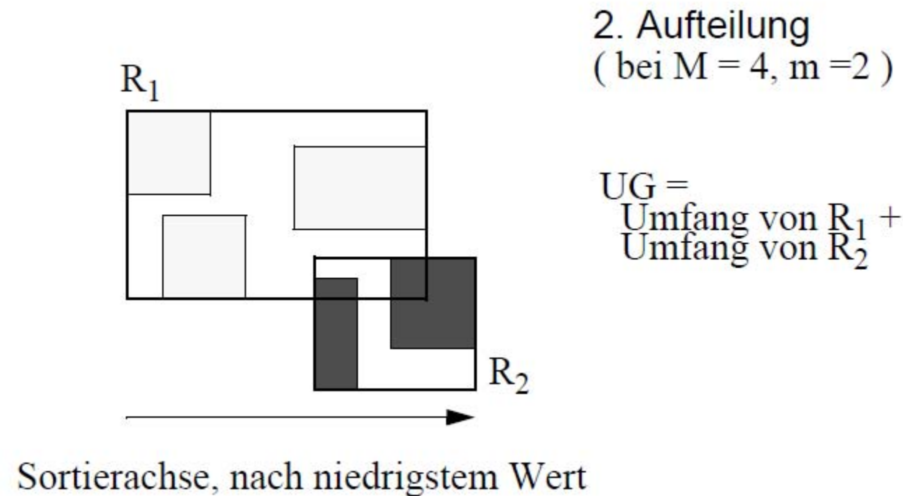
- sortiere die Rechtecke in jeder Dimension nach beiden Eckpunkten und betrachte nur Teilmengen nach dieser Ordnung benachbarter Rechtecke
- Laufzeitkomplexität ist $O(d \cdot M \cdot \log M)$ für d Dimensionen und M Rechtecke

Bestimmung der Splitdimension

- Sortiere für jede Dimension die Rechtecke gemäß beider Extremwerte
- Für jede Dimension:
  - Für jede der beiden Sortierungen werden $M\text{-}2m+2$ Aufteilungen der $M+1$ Rechtecke bestimmt, so dass die 1. Gruppe der j-ten Aufteilung die ersten $m\text{-}1+j$ Rechtecke und die 2. Gruppe die übrigen Rechtecke enthält
  - U_G sei die Summe aus dem Umfang der beiden MURs R_1 und R_2 um die Rechtecke der beiden Gruppen
  - U_S sei die Summe der U_G aller berechneten Aufteilungen

⇒ Es wird die Dimension mit dem geringsten U_S als Splitdimension gewählt.

Splitalgorithmus im R*-Baum



Bestimmung der Aufteilung

- Es wird die Aufteilung der gewählten Splitdimension genommen, bei der R_1 *und* R_2 die geringste Überlappung haben.
- In Zweifelsfällen wird die Aufteilung genommen, bei der R_1 und R_2 die geringste Überdeckung von toten Raum besitzen.

⇒ Die besten Resultate hat bei Experimenten $m = 0{,}4 \cdot M$ ergeben.

Bulk-Loads im R-Baum

- **Vorteile**:
  - schneller im Aufbau
  - Struktur ermöglicht i.d.R. schnellere Anfragebearbeitung
- **Optimierungskriterien**:
  - möglichst hoher Füllungsgrad der Seiten (geringe Höhe)
  - geringe Überlappung
  - wenig toter Raum

Sort-Tile-Recursive:

- Bottom-up Aufbau des R-Baums
- keine Überlappung auf Blattebene bei Punktobjekten
- Zeitkomplexität: $O(n \log(n))$

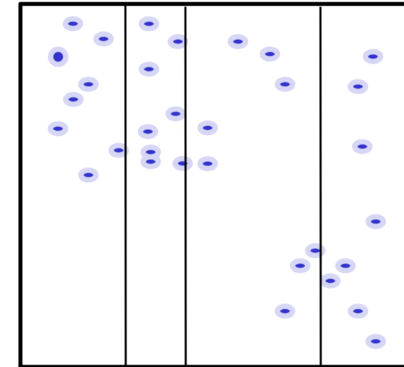
Sort-Tile Recursive

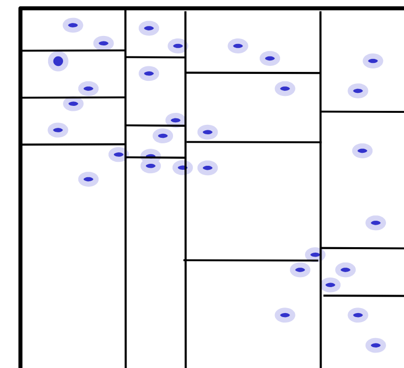
Algorithmus:

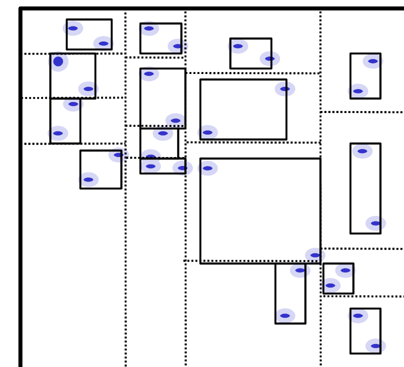
1. Setze DB gleich der Objektmenge P mit |P| = n
2. Berechne Anzahl der Quantile: $q = \left\lceil \sqrt{\frac{n}{M}} \right\rceil$
3. Sortiere Datenelemente in Dimension 1
4. Bilde Quantile nach jeweils $q \cdot M$ Objekten in Dim. 1
5. Sortiere Objekte in jedem Quantil nach Dimension 2
6. Bilde Quantile nach jeweils M Objekten in Dim. 2
7. Bilde eine MUR um die Punkte in jeder Zelle
8. Starte den Algorithmus mit der Menge abgeleiteten MURs oder stoppe falls $q < 2$
   (alle verbleibenden MURs fallen in die Wurzel)

Anmerkung:

- bei Punkten entstehen überlappungsfreie MURs
- bei Rechtecken kann es zu Überlappungen kommen
- bei Rechtecken ist die Einteilung in Quantile nach Minimalwerten, Maximalwerten oder komplizierteren Heuristiken möglich







Löschen im R-Baum

Das Objekt x ist aus dem R-Baum zu löschen

Löschen :

- Teste ob Seite S nach entfernen von x unterfüllt ist: $|S| < m$
- Falls nicht, entferne x und STOP
- Falls ja bestimme, welche Vorgängerknoten ebenfalls unterfüllt sind
- Für jeden unterfüllten Knoten:
  - Lösche die unterfüllte Seite aus dem Vorgängerknoten
  - Füge die restlichen Elemente der Seite in den R-Baum ein
  - Falls die Wurzel nur noch 1 Kind enthält wird Kind zur neuen Wurzel (Höhe verringert sich)

Bemerkungen:

- Löschen ist mit diesem Algorithmus nicht auf einen Pfad beschränkt
- Erfordert das Einfügen eines Teilbaums auf Ebene l in den R-Baum
- Im Worst Case sehr teuer

Suchalgorithmen auf Bäumen

Bereichsanfragen:

```
FUNCTION List RQ(q,ε):
List  C // Kandidatenliste (MURs/Objekte)
List  Result // Liste aller Objekte in ε-Umgebung von q
C.insert(Wurzel)
WHILE(not C.isEmpty())
        E := C.removeFirstElement()
        IF E.isMUR()
            FOREACH F ∈ E.children()
                IF minDist(F,q) < ε
                    C.insert(F)
        ELSE
            Result.insert(E)
RETURN Result
```

Bemerkung: BOX und Intersection-Queries funktionieren nach demselben Prinzip.

Nächste-Nachbar-Anfragen

NN-Anfragen: Top-Down Best-First-Search

```
FUNCTION Object NNQuers(q):
    PriorityQueue  Q // noch zu untersuchende Objekte/Seiten nach
                     //mindist sortiert
    Q.insert(0,Wurzel)
    WHILE(not Q.isEmpty())
        E := Q.removeFirstElement()
        IF E.isMUR()
            FOREACH F ∈ E.children()
                Q.insert(mindist(F,q), F)
        ELSE
            RETURN E
```

Bemerkung:

- *mindist(R,P) ist die minimale Distanz zwischen 2 Punkten in R und P. Sind R und P Punkte gilt: mindist = dist*
- *PriorityQueue sind i.d.R über Heap-Strukturen implementiert (vgl. Heapsort)*

Spatial Joins

Idee: Definiere Join-Anfragen über räumliche Prädikate.

Vorteil: Parallele Verarbeitung vieler Anfragen in einem Durchlauf.

Beispiel: ε -Range-Join

Seien G und S Mengen räumlicher Objekte mit G,S $\subseteq$ D,
dist:$D \times D \rightarrow IR$ ein Distanzfunktion und $\varepsilon \in IR$.

Dann heißt

$$S \underset{dist(s,r) < \varepsilon}{\bowtie} G = \{(g,s) \in G \times S \mid dist(g,s) < \varepsilon\}$$

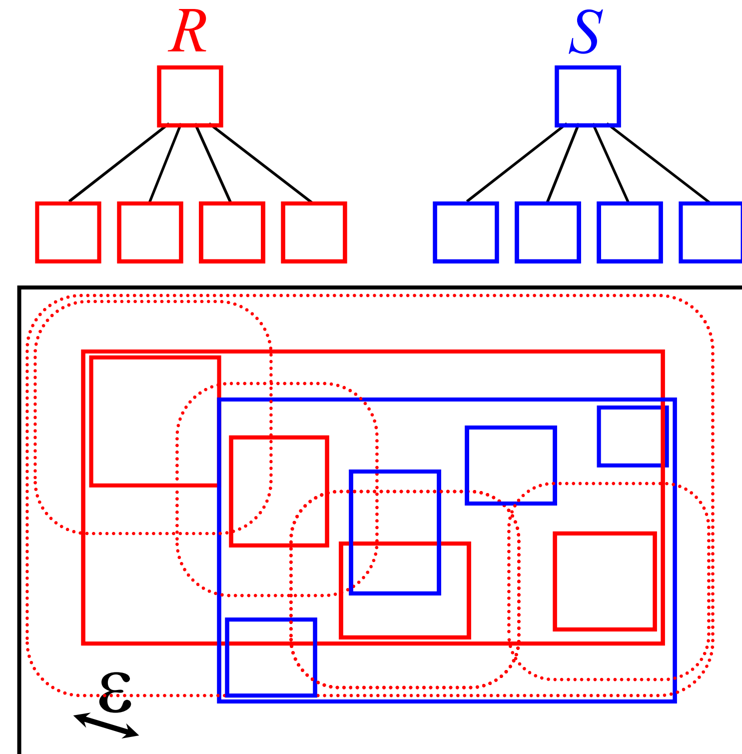
ε-Range-Join von G und S.

Anwendung: Bestimme AoI für alle Spielerentitäten in einem Tick.

R-tree Spatial Join (RSJ)

Algorithmus:

FUNCTION rTreeSimJoin (*R, S, result,* ε)
 IF R.isDirectoryPage() or S. isDirectoryPage()
  FOREACH $r \in R$.children()
   FOREACH $s \in S$.children()
    IF minDist(r,s) $\leq$ ε
      rTreeSimJoin(r,s,result,ε)
 ELSE //assume *R,S* are both DataPoints
  FOREACH $p \in R$.points
   FOREACH $q \in S$.points
    IF dist(p,q) $\leq$ ε
      result.insertPair(p,q)
RETURN result



Probleme durch Datenvolatilität

Probleme bei räumlicher Fortbewegung aller Objekte:

In Spielen bewegt sich die Mehrzahl der Objekte mehrmals pro Sekunde.

- Positionsänderungen durch Löschen und Einfügen
  - dynamische Änderungen können die Struktur negativ beeinflussen (Verlust der Balance, Erhöhung von Überlappungen, Überfüllung einer Micro-Zone)
  - Änderung hat hohen Overhead (Suche nach Objekt, Folge-Einfügungen, Underflow- und Overflow-Behandlungen)
- Positionsänderung durch spezielle Änderungsoperationen
  - Ausdehnen von Seitenregionen: Overlap der Seiten kann extrem ansteigen *(nur bei Datenpartitionierung möglich)*
  - Wechsel der Seitenregionen:
    - *Balance kann negativ beeinflusst werden*
    - *Unterfüllung und Überfüllung von Seiten*

Fazit: Dynamische Änderungen sind entweder aufwendig in der Berechnung oder können die Organisation der Daten ungünstig für Anfragealgorithmen beeinträchtigen.

Throw-Away Indices

Idee:

- Bei sehr volatilen Daten ist die Änderung vorhandener Datenstrukturen teurer als ein Neuaufbau mittels Bulk-Load.
- Ähnlich wie beim Game-State existieren immer 2 Indexstrukturen:
  - Index I1 organisiert Positionen des letzen konsistenten Ticks und wird zur Anfragebearbeitung genutzt
  - Index I2 wird parallel zu I1 aufgebaut:
    - Aufbau per Bulk-Load: geringere Nebenläufigkeit, aber schneller Aufbau, gute Struktur
    - Dynamischer Aufbau: mehr Rechenaufwand und evtl. schlechtere Struktur, aber Aufbau bei jeder neuen Position möglich
  - bei Beginn des neuen Ticks wird auf I2 angefragt und I1 gelöscht und anschließend neu aufgebaut

Fazit: Entscheidend ist, dass der Tick mit Aufbau des Baums schneller verarbeitet wird als ohne unterstützende Datenstruktur.

(Abhängigkeit vom Game-Design)

Game Design

Die räumliche Problematik hängt stark vom Spiel-Design ab:

- Anzahl und Verteilung der räumlichen Objekte
- Anzahl und Verteilung der Spieler
- Umgebungsmodell Felder, 2D oder 3D

  (3D Umgebung macht 3D-Indexing nicht unbedingt notwendig)
- Bewegungsgeschwindigkeit und Bewegungsart der Objekte

Lernziele

- Game State und Game Entities
- Aktionen und Zeitsteuerung
- Game Loop und Synchronisation mit anderen Subsystemen
- typische Verarbeitungsschritte in einer Iteration
- Zusammenhang Scripting-Engine, Physics Engine und Spatial Management
- Zoning, Sharding und Instanziierung
- Micro-Zoning und Spatial-Publish-Subscribe
- BSP-Tree, KD-Tree, Quad-Tree und R-Tree
- Einfügen, Löschen, Bulk-Load
- Anfragebearbeitung: Range-Query, *NN*-Query und Range-Join
- Probleme bei hoch volatilen Daten

Literatur und Material

- Shun-Yun Hu, Kuan-Ta Chen
  VSO: Self-Organizing Spatial Publish Subscribe
  In 5th IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, SASO 2011, Ann Arbor, MI, USA, 2011.
- Jens Dittrich, Lukas Blunschi, Marcos Antonio Vaz Salles
  Indexing Moving Objects Using Short-Lived Throwaway Indexes
  In Proceedings of the 11th International Symposium on Advances in Spatial and Temporal Databases, 2009.
- Hanan Samet. 2005. **Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures** *(The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics and Geometric Modeling)*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.