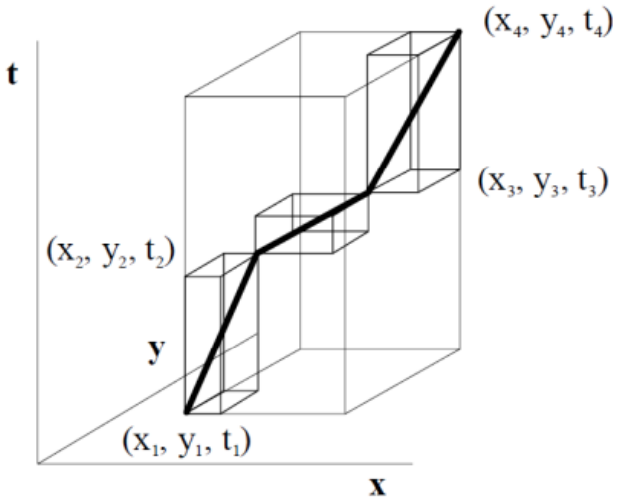
– Verwaltung der Vergangenheit

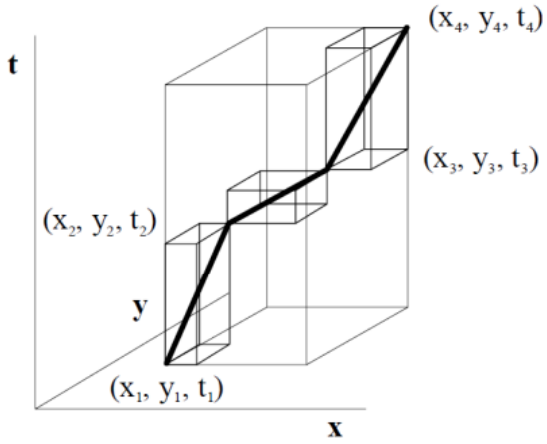
- Idee:
  - Erweiterung des R-Baums um eine weitere Dimension, die Zeit t
  - Die Trajektorie eines Objektes kann als Sequenz von (d+1)-dimensionalen Liniensegmenten repräsentiert werden
  - Die einzelnen Liniensegmente werden in einem R-Baum abgelegt



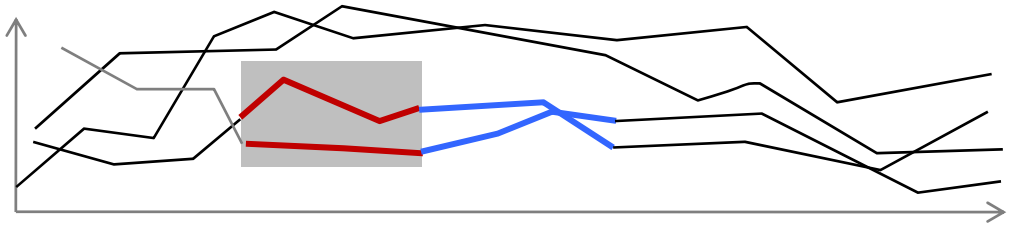
  - Beispiele: 3D-R-Tree [MGA03], STR-Tree und TB-tree [PJT00]
  - ST-Index-Varianten unterscheiden sich gemäß der Gruppierung der Objekte auf die Index-Seiten (unterschiedliche Splitstrategien bei Überlauf von Seiten)

– Der 3D-R-Tree: [TVS96]

- Prinzip:
  - Verwaltung der (d+1)-dimensionalen Liniensegmente in einem herkömmlichen R-Baum (R*-Baum).
- Vorteile:
  - Verwendung einer bereits existierenden Indexstruktur
  - Unterstützt alle Snapshot-Anfragen (d.h. räumliche Anfragen zu einem Zeitpunkt oder über einen Zeitbereich)
  - Einfach zu implementieren
- Nachteile:
  - Segmente der Trajektorie eines Objektes werden als „unabhängige“ Objekte/Einträge betrachtet
    => Eine Trajektorie wird (willkürlich) über mehrere Seiten verstreut
    => Problem für ST-Anfragen über einen größeren Zeitbereich
  - Seitenregion wachsen zu schnell in der Zeitachse → zu wenig Information für einen Zeitpunkt
    => Problem bei Anfragen die sich auf einen Zeitpunkt beziehen



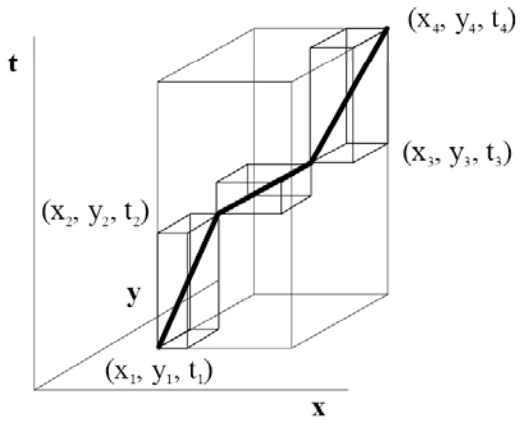
- Weiterer Nachteil:
  - Oft werden zusammenhängende Trajektorien-Segmente zusammen angefragt, wie z.B. bei **Trajektorien-basierten ST-Anfragen**.
  - Bei Trajektorien-basierten Anfragen unterscheidet man zwischen:
    - » Teiltrajektorie die für die Erfüllung des Anfrageprädikates relevant ist.
    - » Teiltrajektorie die als Anfrageergebnis ausgegeben wird.
  - Beispiel:
    - » Wo haben sich die Personen die sich zwischen 8 und 9 Uhr auf dem Kirchplatz aufgehalten haben innerhalb der folgenden Stunde hinbewegt?

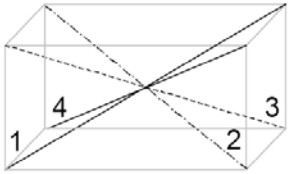


  - Anfrage wird in 2 Schritten durchgeführt:
    - » 1) **Selektion der Trajektorien** über ST-Anfrage: „…zwischen 8 und 9 Uhr auf dem Kirchplatz …“
    - » 2**) Ermittlung der Ergebnis-Trajektorien** die auszugeben sind: „…innerhalb der folgenden Stunde hinbewegt.“
  - Zugriff auf Zusammenhangskomponenten werden im 3D-R-Tree nicht effizient unterstützt.

– Der Spatio-Temporal-R-Baum (STR-Baum) [PJT00]
  - Struktur analog zum 3D-R-Baum:
    – Erweiterung des R-Baums um die Zeit-Dimension.
  - Unterschied zum 3D-R-Baum:
    – Einfüge und Split-Heuristik (siehe später)
    – Zusätzlich: Auf Blattebene ist zu jedem MUR-Eintrag ein Schlüssel für die Orientierung von dem jeweilig approximierten Trajektorien-Segment abgespeichert:

    => Trajektorien-Segment kann mit Hilfe des Schlüssels direkt aus den MUR-Daten ermittelt werden.





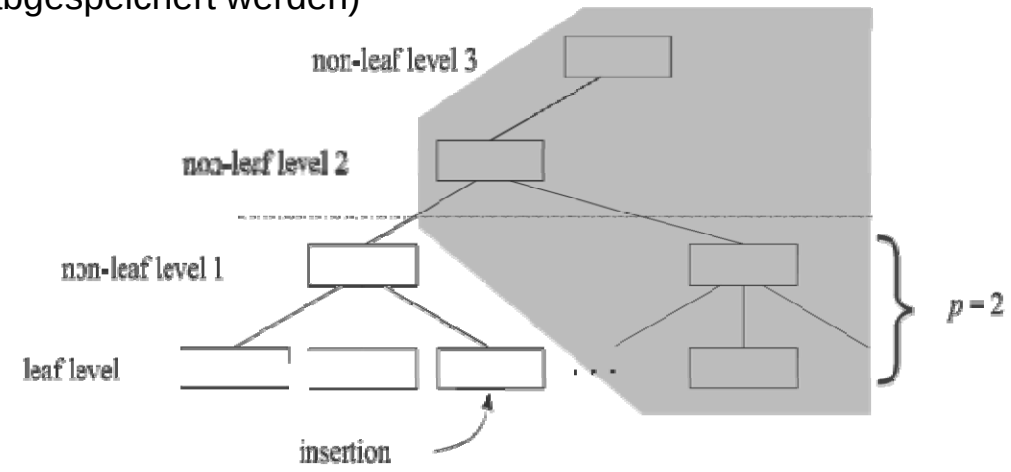
In einem (2+1)-dimensionalen MUR gibt es für ein Segment nur 4 unterschiedliche Orientierungen.

– Auf Blatt-Ebene werden Einträge der folgenden Form abgespeichert:
(*id*,*tid*,*MUR*,*orientation*)
id=(Objekt/Trajektorien)-ID,
tid=Nummer des Segments in der Trajektorie,
MUR=minimal-umgebendes Rechteck des Segments,
orientation=Orientierung des Segments innerhalb des MURs.

- Ziele:
  – Speichere (topologisch nahe) zusammenhängende Trajektoriensegmente möglichst auf der gleichen Datenseite ab:
    » Unterstützung von Anfragen über längere Zeiträume.
    » Unterstützung von Trajektorien-basierten ST-Anfragen.
  – Gruppierung von räumlich nahen Segmenten (unterschiedlicher Trajektorien) soll nicht vernachlässigt werden:
    » Anfragen über kurze Zeiträume (Time-Slice Queries).

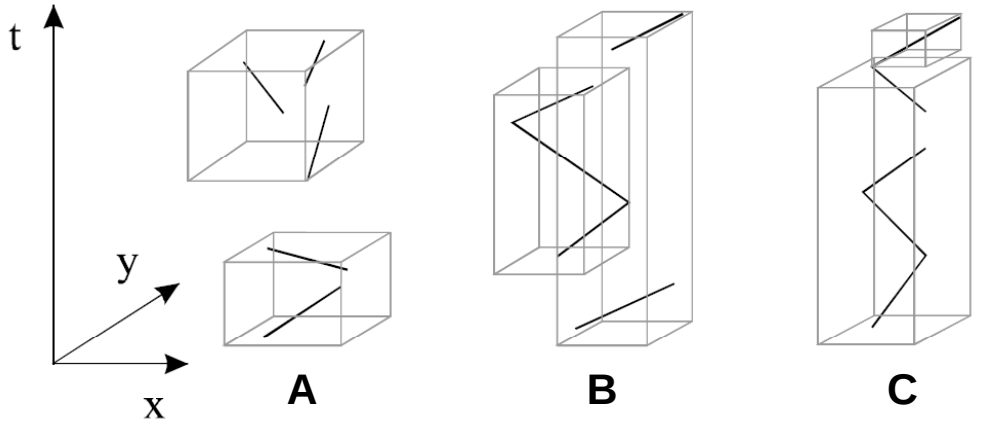
=> Grundlegende Strategie: Trade-off zwischen beiden oben genannten Zielrichtungen.

- Einfüge-Strategie
  - Idee: Objekte werden nicht nur aufgrund räumlicher Nähe, sondern anhand ihrer Zugehörigkeit zu einer Trajektorie in den R-Baum eingefügt
  - Einfügen eines Trajektorien-Segments:
    - » Suche den Knoten mit dem Vorgängersegment des einzufügenden Segmentes
    - » Knoten ist nicht voll: -> Füge neues Segment in den Knoten ein
    - » Knoten ist bereits voll:
      Ist einer der Eltern des Knotens in den p-1 darüber liegenden Hierarchieebenen nicht voll, dann splitte das Blatt (Parameter p kann frei gewählt werden und bestimmt in welchem Nachbarschaftsradius Segmente der gleichen Trajektorie abgespeichert werden)



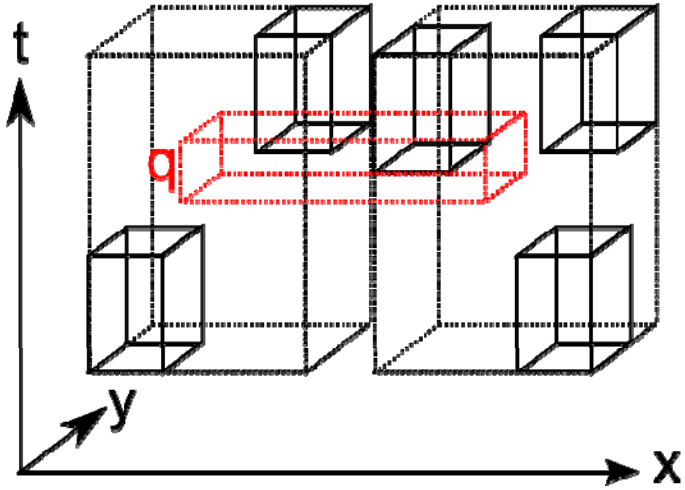
    - » Falls p-1 Elternknoten voll, füge das Segment anhand der R-Baum-Einfüge-Strategie in einen andern p-1-Teilbaum ein (grau-schraffierte Zone).

- Split-Strategie
  - Idee: Füge immer die jüngsten Segmente in den neuen Knoten ein, denn für diesen ist es am wahrscheinlichsten, dass dort künftige Nachfolgesegmente (der gleichen Trajektorie) eingefügt werden.
  - Blattknoten:
    - » Alle Segmente im Blatt sind nicht miteinander verbunden **(A)**: Verwende Quadratischen Algorithmus des R-Baumes
    - » Es gibt mindestens ein nicht-verbundenes Segment **(B)**: Nicht verbundene Segmente werden in den neuen Knoten eingefügt
    - » Es gibt kein nicht-verbundenes Segment **(C)**: Suche das bzgl. der Zeitachse „jüngste“ Segment und füge es in den neuen Knoten ein.



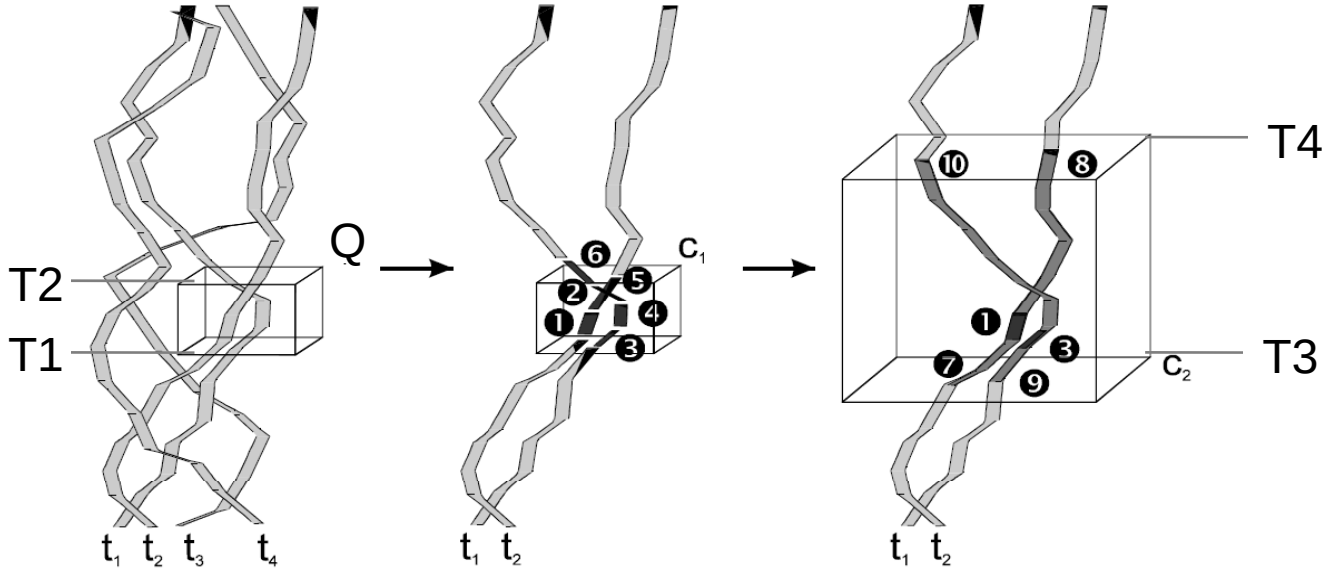
  - Nicht-Blatt Knoten:
    - » Erstelle neuen Eintrag für den neuen Knoten (alter Knoten bleibt unverändert)

- ST-Fenster-Anfrage auf den STR-Baum
  - Anfrage „Liefere mir alle Objekte, die sich innerhalb des Zeitraums (t_1,t_2) im Fenster (x_1,y_1,x_2,y_2) befanden.
  - Prinzipiell wie eine Fensteranfrage auf den R-Baum
  - Einstieg bei der Wurzel und rekursiver Abstieg bis zur Blattebene
  - Anfrage liefert alle Segmente/Trajektorienabschnitte, die das Anfragefenster schneiden.
  - Alternativ können auch nur die Objekt-IDs der resultierenden Objekte zurückgegeben werden.



- Trajektorien-basierte ST-Fenster-Anfrage auf dem STR-Baum
  - Finde zu allen Objekten die sich zwischen T1 und T2 im Abschnitt Q befunden haben die Vorgänger- und Nachfolge-Trajektorie im Zeitintervall T3 und T4:

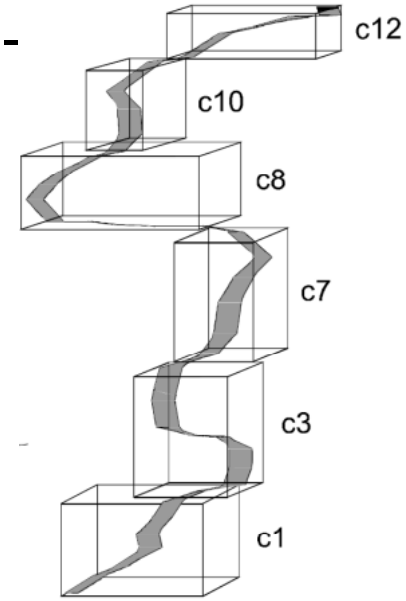
– Die Trajektorien-basierte ST Fenster-Anfrage wird wieder im 2 Schritt-Modus Ausgeführt:



– Schritt 1) **Selektion der Trajektorien**: Fensteranfrage auf den STR-Baum mit Anfragefenster Q
– Schritt 2) **Ermittlung der Ergebnis-Trajektorien**: Verfolgung der in 1) ermittelten Trajektorienabschnitte durch rekursive Bereichsanfrage
– Endpunkt des aktuellen Segments wird als Anfrageobjekt verwendet
– zunächst wird innerhalb der gleichen Seite nach den angrenzenden Segmenten gesucht
– Falls die aktuelle Seite keine direkt angrenzenden Segmente enthält wird die Suche als neue Bereichsanfrage (auf den vollen Index) gestartet.

– Variante: TB-Baum [PJT00]

- Jedes Blatt enthält **nur Segmente**, die zur **gleichen Trajektorie** gehören
- **Ziel:** Stärkere Unterstützung von Trajektorien-basierten Anfragen
- Neue Segmente werden immer in den Blattknoten eingefügt, der das letzte Segment der Trajektorie enthält
- Angepasste Insert- und Splitstrategien
- **Nachteil:** Nahe Segmente, die zu unterschiedlichen Trajektorien gehören, werden in unterschiedlichen Knoten abgelegt



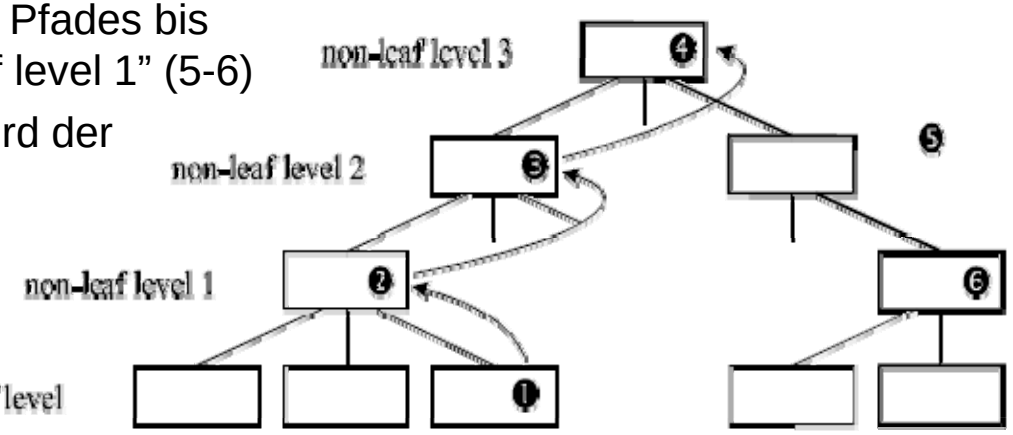
=> Schlechte Unterstützung von Bereichsanfragen die sich auf nur einen Zeitpunkt beziehen (Time-Slice Queries).

- Einfüge-Strategie:
  - Einfügen eines neuen Segments:
  - 1) Suche nach den Blattknoten mit dem Vorgängersegment

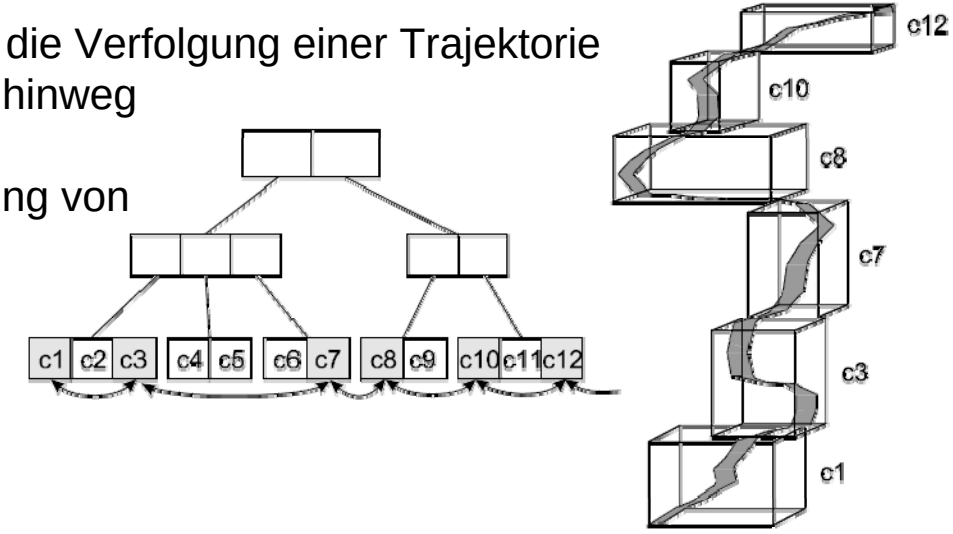
    Bereichsanfrage mit dem MUR des einzufügenden Segments als Anfrageobjekt.

    Rekursiver Abstieg des TB-Baums
  - 2) Falls der Blattknoten nicht voll ist wird das neue Segment eingefügt.

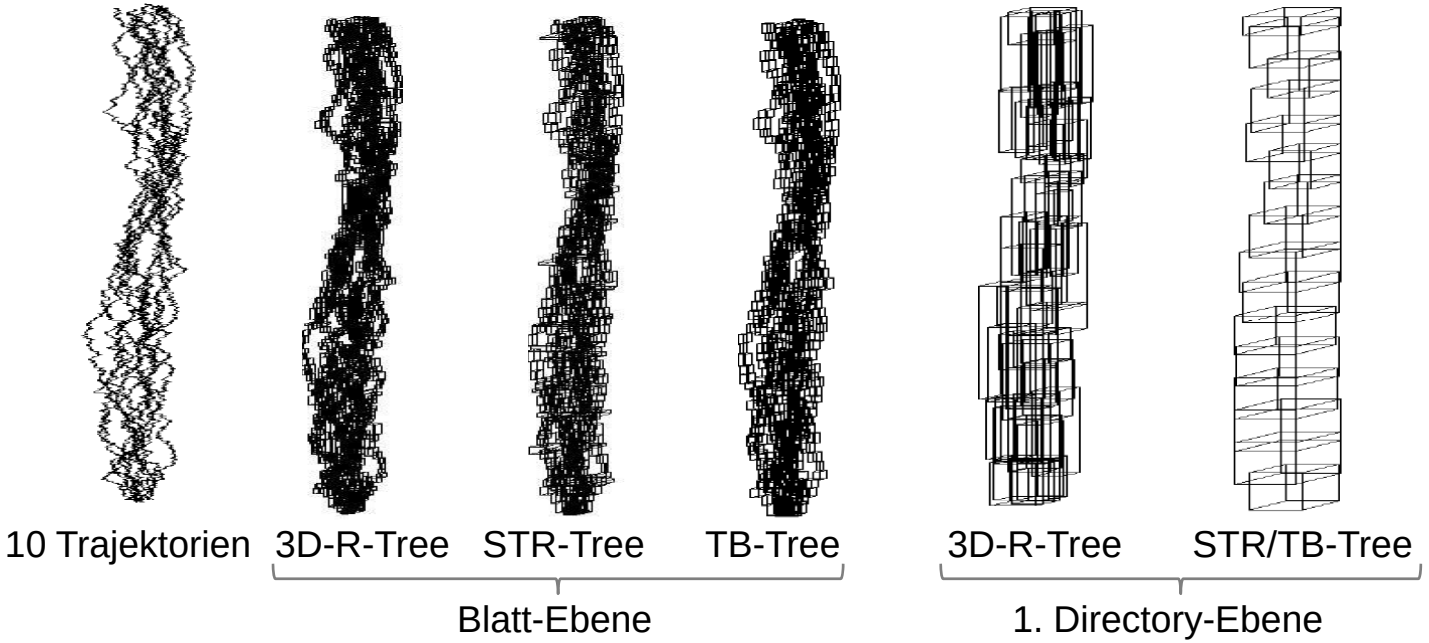
    Ansonsten wird eine **Splitstrategie** initiiert.
- Split-Strategie:
  - Erzeugung eines neuen Blatt-Knotens N
  - Suche nach Vaterknoten der nicht voll ist (rekursiver Aufstieg) (2 – 4)
  - Abstieg des rechtesten Pfades bis Knoten N' auf "non-leaf level 1" (5-6)
  - Falls N' nicht voll ist, wird der Knoten N angehängt
  - Ansonsten (N' voll) wird N' gesplittet und ein neuer Teilpfad mit dem Blattknoten N erstellt.



- Eigenschaften des TB-Baum:
  - Blattebene enthält nur Knoten mit jeweils einer Teiltrajektorie.
  - Eine Trajektorie wird somit über eine Menge von Blattknoten organisiert.
  - Segment-ID muß nicht für jedes Segment abgelegt werden (vgl. STR-Baum), sondern kann als gemeinsame Segment-ID im jeweiligen Blattknoten mitabgespeichert werden.
  - TB-Baum wächst von links nach rechts (Einfügen neuer Knoten im rechtesten Teilbaum; siehe Splitstrategie)
  - Erhaltung der Trajektorie über zusätzliche Querverlinkung von Blattknoten: Zwei Blattknoten sind bi-direktional miteinander verlinkt wenn sie angrenzende Teiltrajektorien enthalten.
  - Durch die Verlinkung wird die Verfolgung einer Trajektorie über mehrere Blattknoten hinweg sehr effizient unterstützt. (Vgl. STR-Baum: Verfolgung von Trajektorien über Bereichsanfragen)

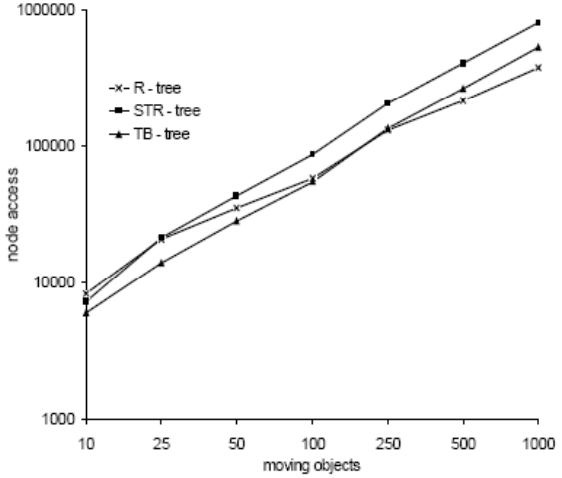


– Vergleich der Indexstrukturen (3D-R-tree, STR-tree, TB-tree)
  - Überlappung der Seitenregionen:

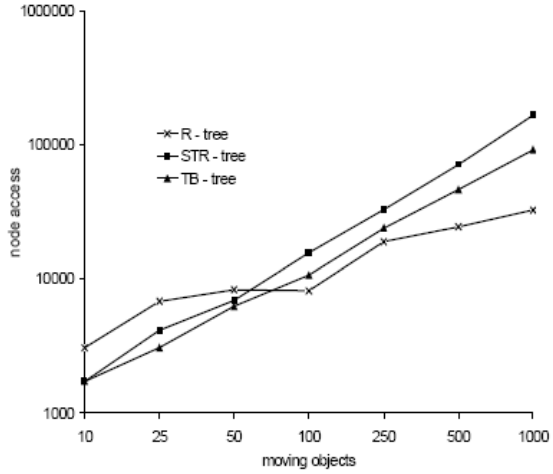


  – Auf Blattebene sind keine großen Unterschiede zwischen allen 3 Indexvarianten zu erkennen.
  – Auf der 1. Directory-Ebene deutlich größere Überlappung der Seitenregionen beim 3D-R-Baum als beim STR-Baum und TB-Baum.

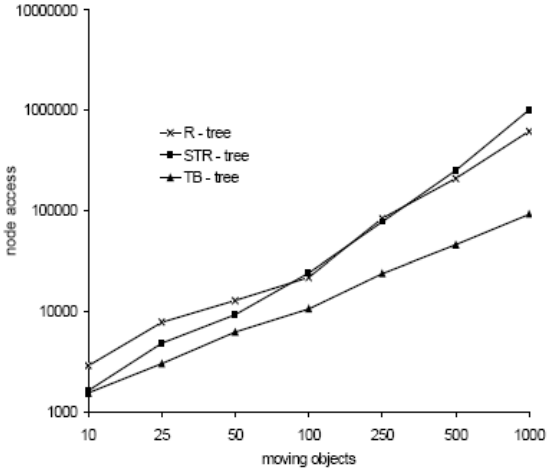
- Anfrageperformanz:



Bereichsanfragen (über Zeitbereich)



Bereichsanfragen (Time Slice)

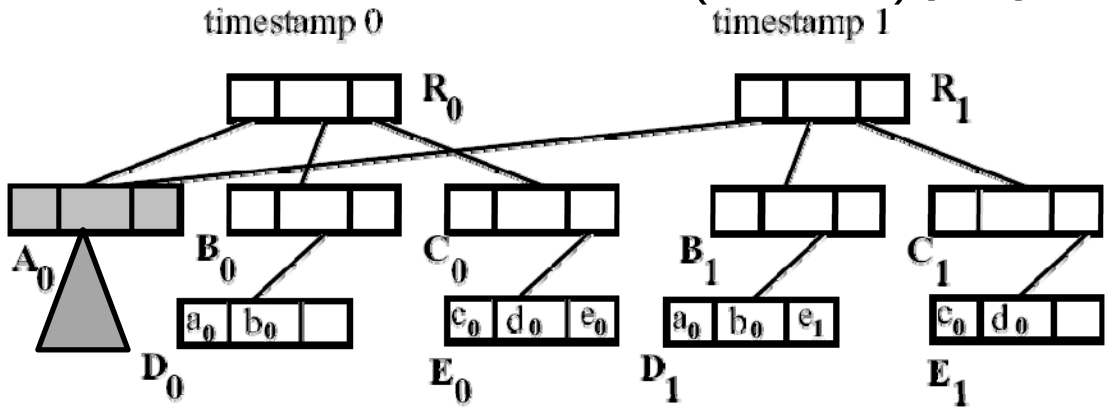


Trajektorien-basierte Anfragen

- 3D-R-Baum skaliert gut bei Bereichsanfragen (insb. bei Time-Slice Anfragen)
- STR-Baum und TB-Baum schlagen den 3D-R-Baum generell bei geringer Anzahl von Trajektorien
- Bei Trajektorien-basierten Anfragen ist der TB-Baum deutlich besser als seine Konkurrenten.
- Bzgl. der Anfrageperformanz stellt der STR-Baum kein guten Kompromiss zwischen den 3D-R-Baum und dem TB-Baum dar.

– Multi-Version R-tree (MVR) Indexe

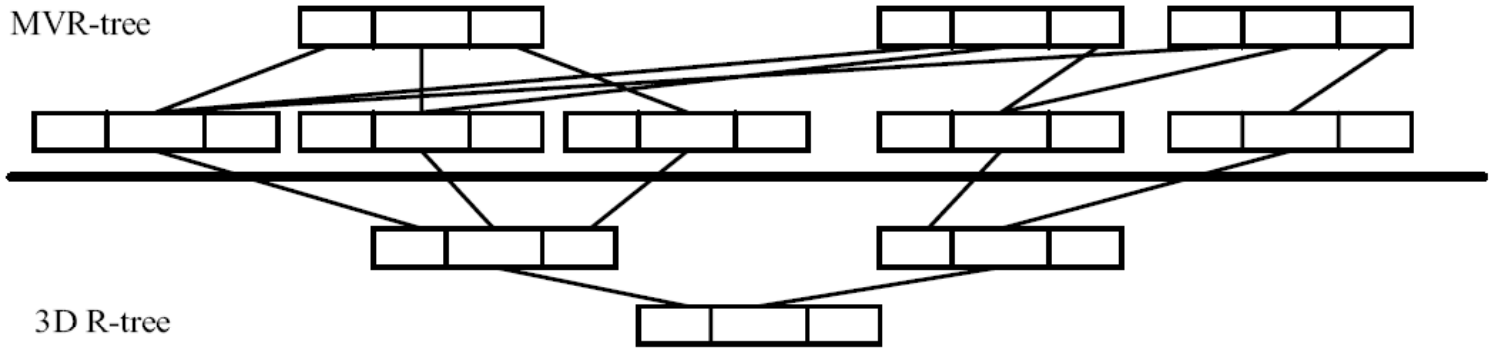
- **Ziel:** Gute Unterstützung von räumlichen Anfragen die sich auf einen Zeitpunkt beziehen (Time-Slice Anfragen).
- **Idee:** Separater Baum (z.B. R-tree) für jeden Zeitpunkt t.
- Beispiel: Der Historische R-Baum (HR-tree) [NS98]



- Objekt e bewegt sich von Objekten c und d in Richtung a und b => Dublizierung der Knoten D und E (D1 und D2 halten die neue Situation unter Zeitpunkt 1 fest.)
- Zusätzliche Verlinkung von Indexknoten die sich über zwei oder mehrere Zeitpunkte nicht verändern um Speicherplatz zu sparen.

- Diskussion
  - 3D-R-Baum und Varianten (STR-tree, TB-tree)
    - TB funktioniert gut für Anfragen über einen größeren Zeitraum
    - Schlechtes Anfrageverhalten bei Anfragen die sich auf einen Zeitpunkt beziehen (R-Baum besser)
  - Multi-Versions R-Bäume (MR, HR und MVR)
    - Funktionieren gut für Anfragen zu bestimmten Zeitpunkten (Snapshot-Anfragen)
    - Anfragebearbeitung degeneriert bei Anfragen über einen größeren Zeitraum
  - Idee: Kombiniere beide Ansätze in eine Indexstruktur
    - Kombination aus 3D-R-Tree-Varianten und MVR-tree zur Unterstützung von Kurzzeit-Anfragen sowie Anfragen über einen längeren Zeitbereich
    - Implementierung dieses Ansatzes: Beispiel: MV3R-tree [TP01]

- Hybride Ansätze wie der MV3R-Baum [TP01]
  - Koppelt zwei Indexstrukturen, den 3D-R-Baum und den MVR-Baum (HR-Baum) miteinander.
  - Beide Bäume haben gemeinsame Blätter (Datenbasis)
  - Vereint die Stärken der beiden Ansätze:
    - 3D-R-Baum für Anfragen über einen gewissen Zeitintervall
    - HR-Baum für Zeitpunkt-Anfragen (Time-Slice Anfragen)
  - Prinzip:
    - Anfragen für kurze Zeitbereiche: Suche im jeweiligen MVR-Baum
    - Anfragen für längere Zeitbereiche: Suche im 3D-R-Baum falls Anfragezeitraum einen Benutzerdefinierten Grenzwert überschreitet.

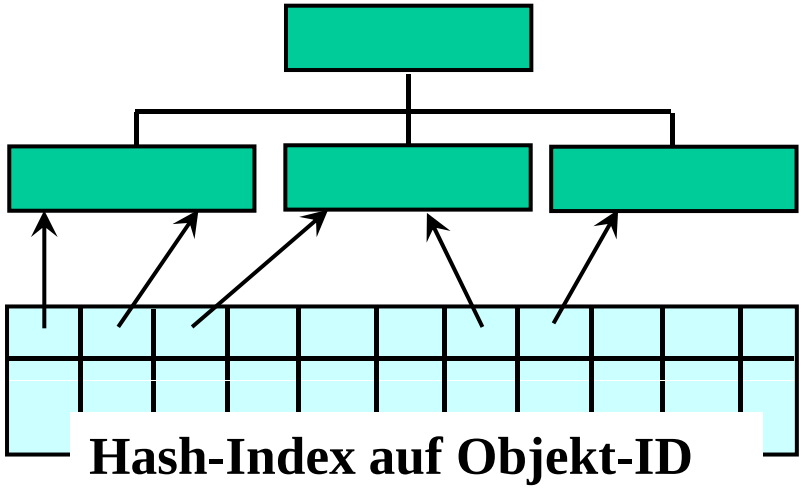


3.2.3 Anfragen an die Gegenwart

- Anfragen beziehen sich auf den aktuellen Zeitpunkt
- Beispiel:
  - Wieviele Objekte befinden sich momentan in Region A?
  - Wo hält sich gerade Objekt B auf?
- Eigenschaften:
  - Daten ändern sich kontinuierlich.
  - Anfragen müssen in Echtzeit durchgeführt werden
    => sehr schnelle Antwortzeiten.
  - Indexstrukturen sollten (sehr) effizient aktualisierbar sein.
  - Anfragen in der Gegenwart werden häufig für kontinuierliche ST-Anfragen (Continuous Queries) benutzt.

– Effiziente Verwaltung der Gegenwart
  - Eigenschaften von Änderungen (Updates) bei ST-Daten:
    – Sehr lokale Änderungen:
      Z.B. kann sich eine Person innerhalb einer Sekunde höchstens einige Meter von seinem letzten Standort entfernt haben.
    – Sehr hohe Update-Frequenz:
      Beobachtungen von kontinuierlich Bewegungen müssen sehr oft aktualisiert werden.
  - Traditionelle R-Baum-updates werden Top-Down durchgeführt.
  - Desweiteren werden gewöhnlich Änderungen als Lösch- und Einfügeoperation implementiert.
  - Fazit: Lokale Änderungen werden bei dem Top-Down-Update Prozess nicht gut unterstützt.
  - 2 Ansätze zur effizienten Unterstützung von (lokalen) Positionsänderungen:
    – Bottom-Up Update Strategie → Beschleunigung des Update Prozesses
    – Lazy-Update Strategie → Veringert die Update-Rate

– Bottom-Up Update Strategie:
  - Idee: Änderung werden direkt auf Blattebene durchgeführt.
    → Vermeidung von unnötigen Lösch- und Einfügevorgängen.
  - Daten (Objekte) die zu ändern sind werden direkt über einen Hilfsindex (Hash-Index auf Objekt-ID) direkt auf der Blattebene des R-Baums zugegriffen und geändert.
  - Eine Änderung wird schrittweise nach oben Richtung Wurzel fortgesetzt.



– Lazy-Update Strategie:
  - Änderungen werden **nicht** sofort an den R-Baum weitergegeben.
  - “Aktuelle” Änderungen werden zunächst in einer Hilfsstruktur (Update-Memo) temporär verwaltet.
  - Nach einen gewissen Zeitraum wird der R-Baum mit den neuen Daten aus dem Update-Memo aktualisiert.
    Diese Daten werden aus den Update Memo gelöscht.
  - Eine ST-Anfrage erfolgt zunächst auf (veralteten) Daten die im R-Baum verwaltet sind.
  - Die finale Antwort wird aus den Ergebnissen des R-Baums und der Information im Update-Memo gebildet.