Middleware – Cloud Computing

Verwaltung kleiner Datensätze

Wintersemester 2024/25

Tobias Distler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Überblick

- Verwaltung kleiner Datensätze
  - Motivation
  - Amazon Dynamo

Verwaltung kleiner Datensätze

- Charakteristika
  - Nutzdaten pro Datensatz oftmals **weniger als 1 MB**
  - Repräsentation als Schlüssel-Wert-Paar
- Beispielanwendungen
  - Sicherung von Nutzereinstellungen
  - Speicherung von Informationen zur Verwaltung von Client-Sitzungen
- Typisches Zugriffsmuster: Atomares Schreiben und Lesen
  - Bei Modifikationen wird **immer der komplette Datensatz** neu geschrieben
  - Kein teilweises Lesen von Datensätzen
- Herausforderungen
  - Welche Möglichkeiten eröffnet die geringe Größe der Datensätze?
  - Wie lässt sich ein Datenspeichersystem **inkrementell skalierbar** gestalten?
  - Wie kann der Heterogenität von Hardware Rechnung getragen werden?

Überblick

Verwaltung kleiner Datensätze

- Motivation
- Amazon Dynamo

Amazon Dynamo

- Anwendungsbeispiel: Warenkorb
- Anforderungen
  - Inkrementelle Skalierbarkeit des Gesamtsystems
  - **Hohe Verfügbarkeit** der gespeicherten Daten
  - Leistungsabhängige Lastverteilung im Umfeld heterogener Hardware
- Amazon Dynamo
  - **Dezentraler Peer-to-Peer-Ansatz**
  - Partitionierung der Daten
  - Fehlertoleranz durch Replikation über mehrere Datenzentren
  - Konsistenzgarantie: **Letztendliche Konsistenz** (*Eventual Consistency*)
- Literatur

Giuseppe DeCandia, Deniz Hastorun, Madan Jampani, Gunavardhan Kakulapati et al.
Dynamo: Amazon's highly available key-value store
Proc. of the 21st Symp. on Operating Systems Principles (SOSP '07), S. 205–220, 2007.

Anforderungsdetails

- Zu verwaltende Datensätze
  - Binärdaten (*Blobs*)
  - **Weniger als 1 MB** pro Schlüssel-Wert-Paar
  - Atomares Schreiben und Lesen erforderlich
- Zugriffsmuster: **Schreibzugriffe wichtiger als konsistente Lesezugriffe**
  - Hohe Verfügbarkeit beim Schreiben von Daten („*Always writeable*“)
  - Beispiel: Aktualisierung des Warenkorbs sollte immer möglich sein
- Dienstgüte
  - **Maximalwert für die Bearbeitungsdauer** von 99.9 % aller Anfragen
  - Durchschnittswert der Antwortzeiten ist zweitrangig
- Weitere Charakteristika
  - Unterschiedliche Dynamo-Instanzen für unterschiedliche Anwendungen
  - Keine Authentifizierung für Clients erforderlich

Schnittstelle

- Datentypen
  - Nutzdaten in Form von Schlüssel-Wert-Paaren aus `Keys` und `Objects`
  - Kapselung von **systeminternen Metadaten** in `Context`-Objekten
- Schreibzugriff

```
void put(Key key, Context context, Object object)
```

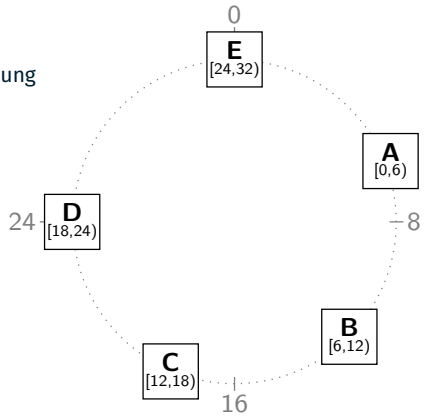
  - Atomares Speichern eines Schlüssel-Wert-Paars
  - **Nutz- und Metadaten werden gemeinsam verwaltet**
- Lesezugriff

```
{List<Object>, Context} get(Key key)
```

  - Atomarer Zugriff auf Datensätze über Schlüssel
  - Rückgabewert: Tupel aus Ergebnisliste und `Context`-Objekt
    - Normalfall: Ein Element in Ergebnisliste
    - **Ausnahmefall**: Ergebnisliste enthält mehrere Elemente
- Meist geht einem Schreib- ein **Lesezugriff auf dasselbe Objekt** voraus

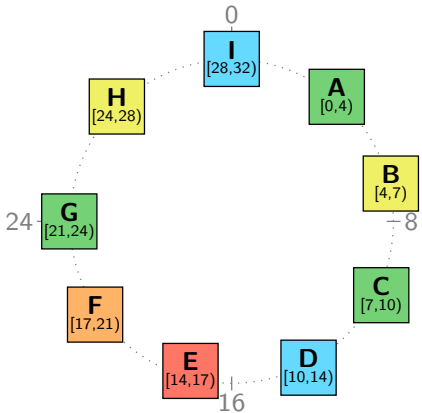
Partitionierung mittels *konsistentem Hashing*

- Zuteilung von Daten zu Rechnern (*Knoten*)
  - Anwendung einer **Hash-Funktion auf die Schlüssel** von Nutzdaten
  - Abbildung des Wertebereichs der Hash-Funktion auf einen Ring
  - Jeder Knoten ist **für einen Teilbereich** verantwortlich
  - Vorteile
    - In der initialen Konfiguration: Gleichmäßige Lastverteilung
    - Einfaches Hinzufügen bzw. Entfernen von Knoten
  - Nachteile
    - In der Praxis: Ungleichmäßige Lastverteilung
    - Ungeeignet für heterogene Knoten
    - Asymmetrische Belastung bei Knotenausfällen
- Einfügen eines Schlüssel-Wert-Paars
  1. Berechnung des Schlüssel-Hash-Werts
  2. Senden der Schreibanfrage an den Knoten an der **nächsthöheren Position**



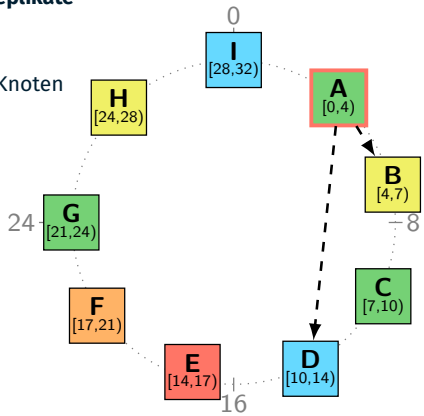
Virtuelle Knoten

- Ziele
  - **Lastverteilung abhängig von der Leistungsfähigkeit** der Knoten
  - Gleichmäßige Belastung bei der Tolerierung von Knotenausfällen
- Ansatz: Einsatz von **virtuellen Knoten**
  - Mehrere virtuelle Knoten pro physischem Knoten
  - Anzahl der virtuellen Knoten abhängig von der Leistungsfähigkeit eines Rechners
- Konsequenzen
  - Leistungsfähigere Rechner sind für **größeren Wertebereich** zuständig
  - Beim Hinzufügen und Entfernen von physischen Knoten sind mehrere Rechner beteiligt



Replikation

- Redundante Speicherung auf mehreren Knoten
  - Verwaltung von Replikatinformationen in **Präferenzlisten**
    - Von jedem Knoten im System abhängig vom Datensatzschlüssel berechenbar
    - Referenzen auf N **für den Datensatz verantwortliche Replikate**
    - Referenzen auf weitere Ersatzreplikate
  - Zusammenstellung der Präferenzliste
    - Für Teilbereich des Schlüssel-Hash-Werts zuständiger Knoten
    - Nachfolger dieses Knotens im Ring
    - Auslassen von virtuellen Knoten bereits involvierter physischer Rechner
- Bearbeitung von Client-Anfragen
  - **Mindestanzahl beteiligter Replikate**
    - Leseanfragen: R Replikate
    - Schreibanfragen: W Replikate
  - Wahl der Parameter
    - In der Praxis meistens $R, W < N$
    - Beispiel: $N = 3, R = 2, W = 2$



Datenzugriffe

- Allgemeines Vorgehen
  1. **Auswahl eines Koordinators** aus den ersten N Knoten der Präferenzliste (Alternativen)
     - Per Client-Library
     - Über einen vom System bereitgestellten Load-Balancer
  2. Senden der Anfrage an den Koordinator
  3. Koordinator leitet Anfrage an die $N - 1$ anderen Knoten weiter
  4. Bearbeitung der Anfrage
  5. Koordinator sammelt Ergebnisse
  6. Koordinator antwortet dem Client sobald R bzw. W Resultate verfügbar
- Letztendliche Konsistenz in Amazon Dynamo
  - $N - W$ Replikate bearbeiten Schreibaufruf evtl. erst nach der Bestätigung
  - Replikate liefern möglicherweise **voneinander abweichende Antworten**
  - **Kein global eindeutiger Koordinator** pro Datensatz
    - Replikate führen Anfragen potentiell in unterschiedlicher Reihenfolge aus
    - Es existieren eventuell mehrere Versionen eines Datensatzes im System

  $\rightarrow$ **Strategie zur Auflösung von Konflikten („*Reconciliation*“) erforderlich**

Detektion von Konflikten

- **Versionierung mittels *Vektoruhren*** [Weiterführende Informationen in *Verteilte Systeme*.]
  - Tupel $t = \{k, z\}$: Kombination aus Knoten-ID k und Zähler z
  - Vektoruhr $V = \{t_1, ..., t_n\}$: Vektor aus Tupeln (initial sind alle Zähler 0)
  - Definition von Relationen
    - $<$ für Tupel: $t_x < t_y \Leftrightarrow t_x.k = t_y.k \wedge t_x.z < t_y.z$
    - $\leq$ für Tupel: $t_x \leq t_y \Leftrightarrow t_x.k = t_y.k \wedge t_x.z \leq t_y.z$
    - $\prec$ für Vektoruhren: $V_A \prec V_B \Leftrightarrow (\forall i : t_{A,i} \leq t_{B,i}) \wedge (\exists i : t_{A,i} < t_{B,i})$
  - Einsatz von **Vektoruhren als Zeitstempel für Modifikationen**
- Anwendung von Vektoruhren bei Schreibanfragen
  - Koordinator
    - Empfang einer Schreibanfrage mit dem Zeitstempel ($\rightarrow$ `Context`-Parameter der `put`-Methode) der letzten dem Client bekannten Version
    - **Inkrementieren des Zählers im Tupel des Koordinators**
    - Verteilung des aktualisierten Zeitstempels zusammen mit der Anfrage
  - Replikate
    - Falls $V_{Datensatz} \prec V_{Anfrage}$: Überschreiben der alten Version des Datensatzes
    - Sonst: Paralleles Speichern beider Versionen des Datensatzes

- **Anlegen eines Datensatzes** mit dem Wert w_1
  - Koordinator: Knoten A
  - Vektoruhr der Anfrage: $\{\{A, 1\}\}$
  - Replikate: Speicherung von $(\{\{\mathsf{A}, 1\}\}, w_1)$
- **Zuweisung eines neuen Werts** w_2 nach dem Lesen von w_1
  - Koordinator: Knoten A
  - Referenzzeitstempel: $\{\{A, 1\}\} \rightarrow$ Vektoruhr der Anfrage: $\{\{A, 2\}\}$
  - Replikate
    - Vektoruhrenvergleich zeigt Abhängigkeit $\rightarrow$ **Überschreiben des alten Werts**
    - Speicherung von $(\{\{\mathsf{A}, 2\}\}, w_2)$
- **Zuweisung eines neuen Werts** w_3 nach dem Lesen von w_1
  - Koordinator: Knoten B
  - Referenzzeitstempel: $\{\{A, 1\}\} \rightarrow$ Vektoruhr der Anfrage: $\{\{A, 1\}, \{B, 1\}\}$
  - Replikate
    - Vektoruhrenvergleich zeigt keine Abhängigkeit $\rightarrow$ **Aufheben des alten Werts**
    - Speicherung von $(\{\{A, 2\}\}, w_2)$ und $(\{\{A, 1\}, \{B, 1\}\}, w_3)$

Auflösung von Konflikten

- Bearbeitung von Leseanfragen durch den Koordinator
  - Sammlung aller Datensatzversionen von R Replikaten
  - **Aussortieren veralteter/abhängiger Versionen** (*Syntactic Reconciliation*)
  - Inhalt der Antwortnachricht an den Client
    - Alle voneinander unabhängigen Versionen des Datensatzes
    - Kombinierte Vektoruhr als Teil des `Context`-Objekts
- Auflösung des Konflikts liegt in der Verantwortung des Clients
  - **Auswahl der zukünftig verwendeten Version** (*Semantic Reconciliation*)
  - Kombinierte Vektoruhr als Referenz für nächste Schreibanfrage

  $\rightarrow$ Replikate verwerfen die alten, unabhängigen Versionen
- Anwendungsbeispiel: Warenkorb
  - Standardoperationen: Hinzufügen bzw. Herausnehmen einer Ware
  - Möglicher Konflikt: Eine Version des Warenkorbs enthält eine bereits gelöschte Ware noch, bei der anderen Version wurde die Ware bereits entfernt
  - Angewandte Strategie: **Wahl des Warenkorbs, der die Ware enthält**

- Ausgangssituation (siehe vorheriges Beispiel)
  - **Existenz zweier unabhängiger Versionen desselben Datensatzes**
  - Separate Speicherung: $(\{\{A, 2\}\}, w_2)$ und $(\{\{A, 1\}, \{B, 1\}\}, w_3)$
- Lesezugriff auf den Datensatz
  - Koordinator sendet w_2 und w_3 an den Client
  - **Kombinierte Vektoruhr** mittels tupelweiser Maximumsbildung: $\{\{A, 2\}, \{B, 1\}\}$
- Auflösung des Konflikts und anschließender Schreibzugriff
  - Client
    - Festlegung auf w_2 als gültigen Wert
    - Berechnung eines neuen Werts w_4 auf Basis von w_2
    - Absetzen einer Schreibanfrage für w_4 mit kombinierter Vektoruhr
  - Koordinator: Knoten $B \rightarrow$ Vektoruhr der Anfrage: $V_{w_4} = \{\{A, 2\}, \{B, 2\}\}$
  - Replikate
    - $\{\{A, 2\}\} \prec V_{w_4}$ und $\{\{A, 1\}, \{B, 1\}\} \prec V_{w_4} \rightarrow$ **Verwerfen der alten Versionen**
    - Speicherung von $(\{\{A, 2\}, \{B, 2\}\}, w_4)$

Hinted Handoff-Mechanismus

- Aufgabe: Behandlung temporärer Replikatausfälle
- Ausfall eines Replikats wird vom System erkannt
- Einbindung eines Ersatzreplikats aus der Präferenzliste
  - Anfragen enthalten Hinweis auf ausgefallenes Replikat
  - Ersatzreplikat bearbeitet betroffene Anfragen **in separater Datenbank**
  - Zustandstransfer, sobald ausgefallenes Replikat wiederhergestellt ist
- Weiterführende (manuelle) Maßnahmen, falls Replikatausfall dauerhaft

Letztendliche Konsistenz in Dynamo in der Praxis

- Nichttrivial aus Anwendungs(programmierer)sicht
  - **Keine obere Schranke für das Erreichen eines konsistenten Zustands**
  - (Parallele) Leseanfragen sehen eventuell unterschiedliche Teilzustände
  - Neben Fehler- auch Normalfall ($\rightarrow$ konkurrierende Zugriffe) problematisch
- Vermeidung der Entstehung verschiedener Versionen im Nichtfehlerfall
  - Kaum konkurrierende Schreibzugriffe auf denselben Datensatz
  - Seltener Wechsel des Koordinators
- Warenkorb: 99,94% der Anfragen sehen nur eine Version [DeCandia et al.]