

Middleware – Cloud Computing

Verwaltung kleiner Datensätze

Wintersemester 2025/26

Tobias Distler, Christian Berger

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



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT

Verwaltung kleiner Datensätze

Motivation

Amazon Dynamo

- 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?

Verwaltung kleiner Datensätze

Motivation

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.

- 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

■ 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

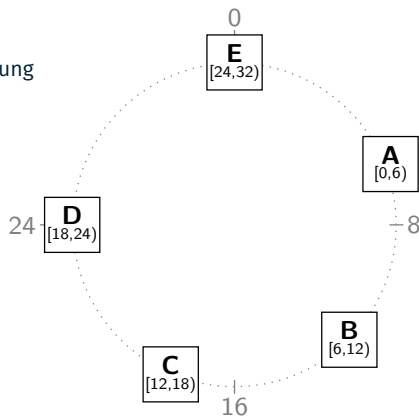
```
{List<Object>, Context} get(Key key)
```

- 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**



■ Ziele

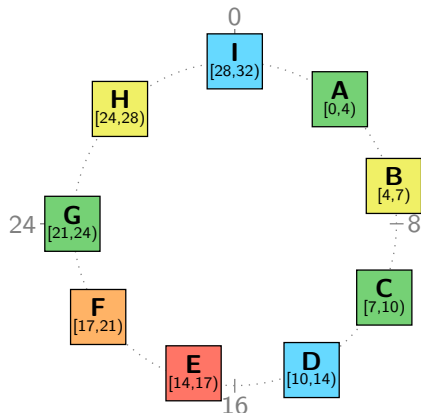
- **Lastverteilung abhängig von der Leistungsfähigkeit** der Knoten
- Gleichmäßige Belastung bei der Tolerierung von Knotenausfällen

■ Ansatz: Einsatz von **virtuellen Knoten**

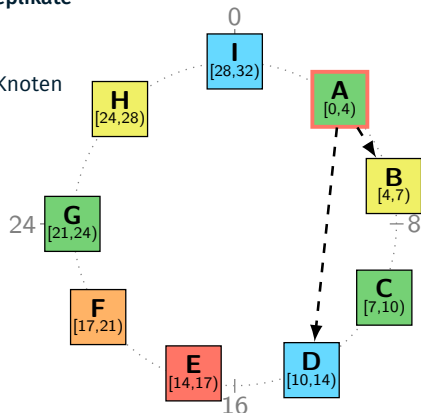
- Mehrere virtuelle Knoten pro physischem Knoten
- Anzahl der virtuellen Knoten abhängig von der Leistungsfähigkeit eines Rechners

■ Konsequenzen

- Leistungsfähigere Rechner sind für **größeren Wertebereich** zuständig
- Beim Hinzufügen und Entfernen von physischen Knoten sind mehrere Rechner beteiligt



- 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: $N = 3, R = 2, W = 2$



■ 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

→ **Strategie zur Auflösung von Konflikten („Reconciliation“) erforderlich**

- **Versionierung mittels Vektoruhren** [Weiterführende Informationen in *Verteilte Systeme*.]
 - Tupel $t = \{k, z\}$: Kombination aus Knoten-ID k und Zähler z
 - Vektoruhr $V = \{t_1, \dots, t_n\}$: 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 $V_{\text{Datensatz}} \prec V_{\text{Anfrage}}$: 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 $(\{\{A, 1\}\}, w_1)$
- **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 $(\{\{A, 2\}\}, w_2)$
- **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 $(\{\{A, 1\}, \{B, 1\}\}, w_3)$

- 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
 - 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 $(\{\{A, 2\}, \{B, 2\}\}, w_4)$

- 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

- Nichttrivial aus Anwendungs(programmierer)sicht
 - **Keine obere Schranke für das Erreichen eines konsistenten Zustands**
 - (Parallele) Leseanfragen sehen eventuell unterschiedliche Teilzustände
 - Neben Fehler- auch Normalfall (→ 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.]