

# Middleware – Cloud Computing

Verwaltung kleiner Datensätze

---

Wintersemester 2022/23

Tobias Distler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)



Lehrstuhl für Verteilte Systeme  
und Betriebssysteme



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

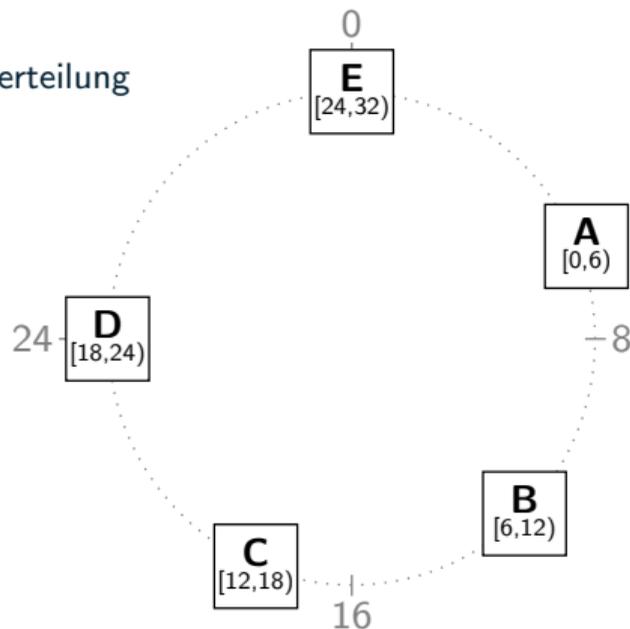
```
{List<Object>, Context} get(Key key)
```

- 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

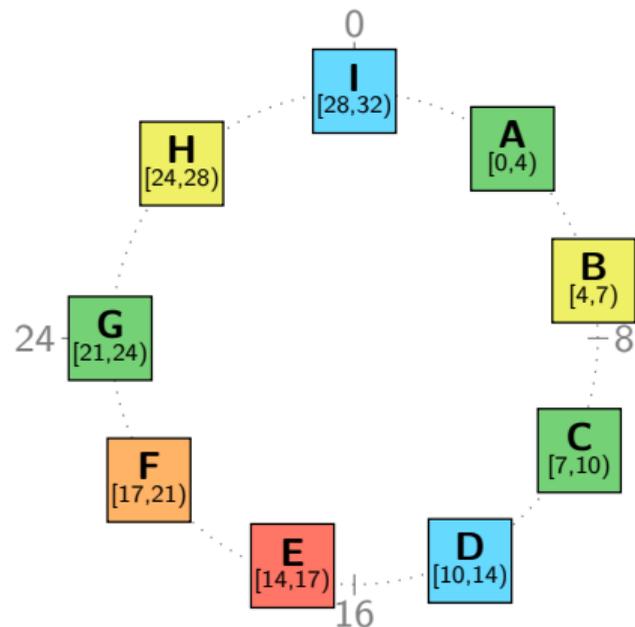
# Partitionierung mittels konsistentem Hashing

- 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**

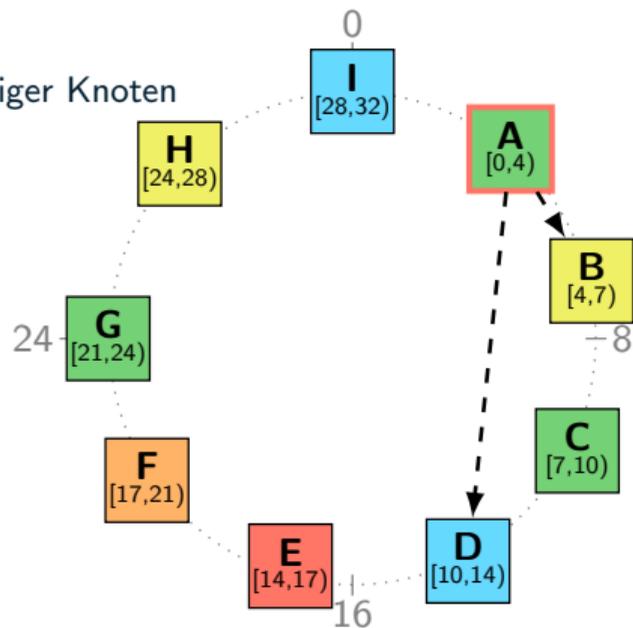


# Virtuelle Knoten

- 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



- 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  $V_{Datensatz} \prec V_{Anfrage}$ : 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  $(\{\{A, 1\}\}, w_1)$
  
- **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.]