

Middleware – Cloud Computing

Latenzminimierung in Datenzentren

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

Latenzminimierung in Datenzentren

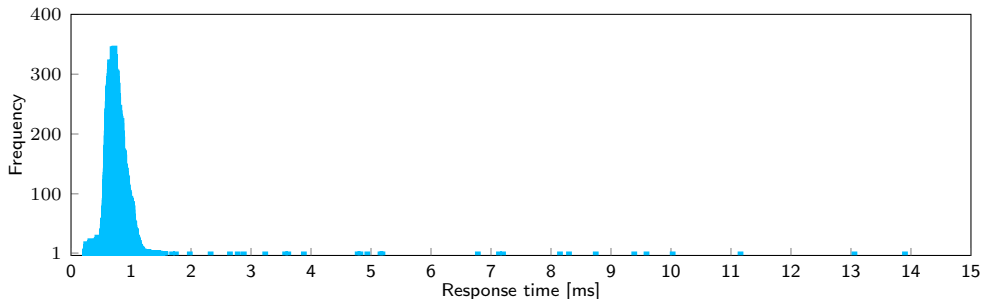
Motivation

Ansätze und Techniken

■ Typische Antwortzeitverteilung in der Praxis

- Mehrheit der Anfragen wird in relativ kurzer Zeit beantwortet
 - **Ausreißer mit höherer Antwortzeit**
 - Zahlenmäßig geringer Anteil an der Gesamtmenge aller Anfragen
 - Antwortzeiten übersteigen Mittelwert um ein Vielfaches
- „Tail Latency“

■ Beispiel: ZooKeeper-Implementierung aus der Übungsaufgabe



Gründe für Antwortzeitschwankungen

- Warten beim **Zugriff auf geteilte Ressourcen**
 - Lokal: CPU, Caches, Speicher, Netzwerk etc.
 - Global: Koordinierungsdienste, verteilte Dateisysteme etc.
- Verzögerungen durch **Warteschlangen auf verschiedenen Ebenen**
- Zusatzbelastung durch die Aktivierung periodischer Tasks (Beispiele)
 - Garbage-Collection
 - Datenrekonstruktion in Dateisystemen
 - Komprimierung von Log-Dateien
- Variabilität durch **Einflüsse unterschiedlicher Energiesparmodi**
- ...
- Literatur
 -  Jeffrey Dean and Luiz André Barroso
The tail at scale
Communications of the ACM, 56(2):74–80, 2013.

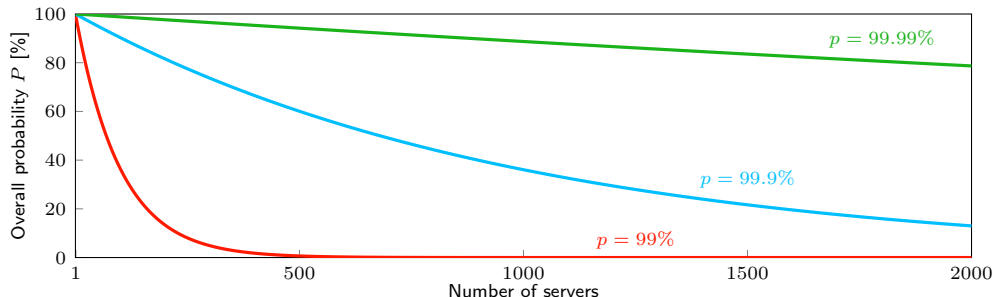
- Bearbeitung von Anfragen durch mehrere Server
 - **Aufspaltung in kleine Teilaufgaben**
 - Eventuell weitere Aufgliederung der Teilaufgaben
 - Bestimmung der **Gesamtantwort auf Basis der Teilergebnisse**
- Beispiel: Teilaufgaben bei Ausführung einer Suchmaschinenanfrage
 - Bereitstellung von statischen Elementen der Web-Seite
 - Ermittlung des Suchergebnisses
 - Zusammenstellung von Vorschlägen für verwandte Suchanfragen
 - Aufbereitung von Kontextinformationen
 - Auswahl der eingeblendeten Werbung
 - ...
- Problem
 - Gesamtantwortzeit einer Anfrage hängt von vielen Faktoren ab
 - **Schwankungen in einzelnen Servern** wirken sich unmittelbar aus

Auswirkungen langsamer Server

■ Vereinfachtes Systemmodell

- An der Bearbeitung einer Anfrage sind **parallel s Server beteiligt**
- Bei der Erfüllung seiner Teilaufgabe ist jeder Server
 - mit Wahrscheinlichkeit p : *schnell*
 - mit Wahrscheinlichkeit $1 - p$: *langsam*
- Antwort erfolgt, sobald alle Server mit ihren Teilaufgaben fertig sind

■ Wahrscheinlichkeit für die schnelle Ausführung einer Anfrage: $P = p^s$



■ Beobachtung

„Systems that respond to user actions quickly (**within 100ms**) feel **more fluid and natural** to users than those that take longer.“
[Dean et al.]

■ Wahl der Metrik

- Arithmetisches Mittel: Ungeeignet, da kaum Aussage über Ausreißer
- **n %-Quantil** (n^{th} -percentile)
 - Bedeutung: Antwortzeit für n % aller Anfragen ist $\leq n$ %-Quantil
 - Typische Werte: $n = 95$ oder $n = 99$

■ Kombiniertes Ansatz zur Minimierung von Gesamtantwortzeiten

- Techniken zur Vermeidung von Ausreißern
- Konzipierung von *tail-toleranten* Systemen
- Vergleiche: Vorgehensweise beim Umgang mit Fehlern

■ Herausforderungen

- Wie lässt sich die Anzahl bzw. das Ausmaß von Ausreißern reduzieren?
- Wie geht man mit Verzögerungen bei der Bearbeitung von Teilaufgaben um?

Latenzminimierung in Datenzentren

Motivation

Ansätze und Techniken

Vermeidung von Ausreißern mittels Lastbalancierung

■ Probleme

- Zugriffshäufigkeit variiert zwischen Objekten des Anwendungszustands
- Erhöhte Antwortzeiten als Konsequenz **überlasteter Partitionen**
- Zugriffsmuster können sich ändern → statische Partitionierung unwirksam

■ Einsatz von **Mikropartitionen**

- Anzahl der Partitionen $\gg$ Anzahl der Server
- Vorteile
 - Feingranulare Lastverteilung möglich
 - Effizientes Verschieben von Partitionen zwischen Servern
- Beispiele
 - Verwaltung von Range-Partitions im Microsoft Azure Storage Partition Layer
 - Aufteilung eines MapReduce-Jobs in Tasks

■ **Selektive Replikation**

- Replikationsgrad eines Objekts ist abhängig von seiner „Popularität“
- Beispiel: Dateispezifischer Replikationsfaktor in HDFS

■ Priorisierung zeitsensitiver Anfragen

- Einteilung von Anfragen in Dienstklassen
- Beispiel: BEEMR
 - Interaktive Jobs
 - Batch-Jobs
- Vorteil: Verzögerungen betreffen vor allem nicht-zeitsensitive Operationen

■ Aufspaltung nicht-zeitsensitiver Aufgaben mit langer Bearbeitungszeit

- Ausführung als Sequenz mehrerer kurzer Operationen
- Bessere Verzahnung mit zeitsensitiven Anfragen möglich
- Vorteil: Steigerung der Effektivität des Priorisierungsansatzes

■ Optimierte Einplanung von Hintergrundaktivitäten

- Ausführung in Zeiten mit geringer Systemlast
- Abstimmung zwischen unterschiedlichen Servern
- Vorteil: Störender Einfluss ist auf wenige zeitsensitive Anfragen begrenzt

■ Abgesicherte Anfragen (*Hedged Requests*)

- Aktionen des Clients
 - Senden derselben Anfrage an mehrere Replikate
 - Verwendung der schnellsten Antwort
 - Abbruch der noch ausstehenden Ausführungen
- Effiziente Implementierung
 - Senden der Anfrage an das vermutlich schnellste Replikat
 - Kontaktierung weiterer Replikate erst nach Timeout

■ Verknüpfte Anfragen (*Tied Requests*)

- Anwendungsfall
 - Größere Schwankungen in den Wartezeiten vor der eigentlichen Ausführung
 - Relativ konstante Bearbeitungszeiten
- Vorgehensweise
 - Client verschickt dieselbe Anfrage an zwei Replikate
 - Anfrage enthält Replikataadressen
 - Bei Ausführungsbeginn: Replikat sendet Abbruchnachricht an das andere

■ Prüfung mittels Stichproben (*Canary Requests*)

- Problem
 - Ungewöhnliche Anfrage resultiert in Ausführung ungetesteter Code-Pfade
 - Parallele Verzögerungen oder Fehler auf mehreren Servern
- Lösung
 - Senden von ein oder zwei Teilaufgaben an die entsprechenden Server
 - Verteilung der restlichen Teilaufgaben an die anderen Server erst bei Erfolg

■ Einschränkung der Funktionalität (*Graceful Degradation*)

- Ausklammern von Teilaufgaben, deren Bearbeitung zu lange dauert
- Ausliefern der Gesamtantwort, sobald ihre Qualität „gut genug“ ist
- Beispiele
 - Weglassen der Werbung
 - Ausblenden der Kommentarfunktion
- Vorteile
 - Reduzierung des Einflusses einzelner Ausreißer auf die Gesamtantwortzeit
 - Im Allgemeinen bemerken die meisten Nutzer den Unterschied nicht