Web-basierte Systeme

11: Caching

Wintersemester 2025

Rüdiger Kapitza

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Vorläufiger Vorlesungsplan

16. Oktober	Einführung und Darstellung von Webseiten
22. Oktober	HTML und CSS
29. Oktober	Hypertext Transfer Protocol
5. November	
12. November	Browser Schnittstellen
19. November	Kommunikationsschnittstellen im Browser
26. November	WebAssembly
3. Dezember	Architektur moderner Browser
10. Dezember	Clientseitige Architekturmuster
17. Dezember	**Serverseitige Implementierung von Web-basierten Systemen Vorbereitung Papieranalyse**
7. Januar	Lastverteilung durch Zwischenspeicher
14. Januar	Papieranalyse
21. Januar	Aspekte von Web Sicherheit
28. Januar	Web3
5. Februar	Zusammenfassung und Ausblick

Caching

Caching

Zielsetzung der Lerneinheit

- Verstehen, warum die Zwischenlagerung von Daten in webbasierten Systemen sinnvoll und notwendig ist
- Kennenlernen der verschiedenen Möglichkeiten der Zwischenlagerung auf Client- und Serverseite.
- Basiskenntnis von Ansätzen und Strategien zur Lagerung

Caching

Vorüberlegungen

- Daten einer Webanwendung sollen zwar durch einen Dienst bereitgestellt und durch Clients aktualisiert werden können – aber eben auch
  - eine möglichst geringe Zugriffszeit besitzen
  - und skalierbar verfügbar sein.

Caching im Browser – Vorüberlegungen

Vorüberlegungen

- Antwortzeiten und die menschliche Wahrnehmung

Delay	User Reaction
0-100 ms	Instant
100-300 ms	Small perceptible delay
300-1000 ms	Machine is working
1000+ ms	Likely mental context switch
10,000+ ms	Task is abandoned

Caching im Browser – Vorüberlegungen

Vorüberlegungen

- Antwortzeiten und die menschliche Wahrnehmung

Delay	User Reaction
0-100 ms	Instant
100-300 ms	Small perceptible delay
300-1000 ms	Machine is working
1000+ ms	Likely mental context switch
10,000+ ms	Task is abandoned

- Minimale Antwortzeiten unter Einbezug der Datenübertragung

Route	Distance	Time, light in vacuum	Time, light in fiber
NYC to SF	4,148 km	14 ms	21 ms
NYC to London	5,585 km	19 ms	28 ms
NYC to Sydney	15,993 km	53 ms	80 ms
Equatorial circumference	40,075 km	133.7 ms	200 ms

- Natürlich ist die Latenz in der Regel höher, was auf die Vermittlung und andere Faktoren zurückzuführen ist.

Caching

Warum sollte man einen Cache verwenden?

- Ein Cache ist eine Komponente, die Daten transparent speichert, so dass wiederholte Anfragen nach den gleichen Daten schneller beantwortet werden können.

Caching

Warum sollte man einen Cache verwenden?

- Ein Cache ist eine Komponente, die Daten transparent speichert, so dass wiederholte Anfragen nach den gleichen Daten schneller beantwortet werden können.

Wo können im Prinzip Daten zwischengelagert werden?

- Beim Endnutzer im Browser
- Vor den Diensten im ’Netzwerkpfad’
  - Verwendung eines Content Delivery Networks (CDN)
  - Verwendung eines Proxies (abnehmend in der Bedeutung))
- Key/Value Dienste
- Im Anwendungsserver
- In der Datenbank (Anfrage-Cache)

Wie passt das mit der Edge Computing zusammen?

Caching im Browser

Wann und warum *cached* der Browser Daten?

- Es gibt eine Reihe von HTTP-Headern, die festlegen, wie und ob eine Zwischenspeicherung erfolgt.
- Zwischenlagerung kann sowohl vom Server zum Client als auch umgekehrt definiert werden.
- Wir konzentrieren uns auf die Direktiven des Servers.

Caching im Browser

Wann und warum *cached* der Browser Daten?

- Es gibt eine Reihe von HTTP-Headern, die festlegen, wie und ob eine Zwischenspeicherung erfolgt.
- Zwischenlagerung kann sowohl vom Server zum Client als auch umgekehrt definiert werden.
- Wir konzentrieren uns auf die Direktiven des Servers.

HTTP Header (Auswahl)

- Cachebarkeit: `cache-control`
  - Policy: `no-store, no-cache, max-age, public | private`
- `etag`
- `last-modified`
- `if-none-match`
- `if-modified-since`

Caching im Browser

`cache-control: no-store`

- Indiziert dem Browser und evtl. vermittelnden Proxies
  - die Daten nicht persistent zu speichern
  - bzw. jegliche Kopien aus ihrem Speicher unmittelbar zu löschen.
- *Anmerkung:* Browser halten evtl. dennoch eine Kopie im Arbeitsspeicher vor, um eine Vorwärts-/Rückwärtsnavigation zu ermöglichen.
- Im Allgemeinen wird dieser Header verwendet, um 'sensible' Daten zu kennzeichnen.

Caching im Browser

`cache-control: no-cache`

- Indiziert dem Browser und evtl. vermittelnden Proxies
  - die gelagerten Daten sollten auf ihre Aktualität überprüft werden, bevor sie erneut ausgeliefert werden.
- Nützlich, um den Browser und Proxies zu zwingen, die Aktualität der Daten zu überprüfen.

`cache-control: private`

- Die Zwischenspeicherung der Daten wird dem Browser überlassen – Proxies sollten die Daten nicht speichern.

`cache-control: public`

- Kennzeichen, dass die Antwort von jedem Cache zwischengelagert werden kann.

Caching im Browser

`cache-control: max-age=<seconds>`

- Spezifiziert die maximale Zeitdauer, die eine Ressource als aktuell betrachtet wird.
- Im Gegensatz zu *Expires*, ist diese Direktive relativ zum Zeitpunkt der Anfrage.

`cache-control: must-revalidate`

- Abgelaufene Ressourcen sollten nicht verwendet werden und müssen vor der Verwendung überprüft werden

Caching im Browser

Beispiel: Caching komplett verhindern

- `Cache-Control: no-cache, no-store, must-revalidate`

Beispiel: Statische Assets cachen

- Dateien einer Anwendung, die sich nicht ändern, können langfristig zwischengespeichert werden
  - Bspw. statische Assets wie Bilder, CSS- und JavaScript-Dateien
- `Cache-Control: public, max-age=31536000`
  (Lagerung von bis zu einem Jahr)

Caching im Browser

`ETag: "<etag_value>"`

- Ein ETag ist ein eindeutiger Identifikator für die Version einer Ressource und wird mit der Ressource ausgeliefert.
- Für jede neue Version der Ressource wird ein neuer ETag erzeugt (und zwischengespeichert).

`if-none-match:"<etag_value>"`

- Wenn in einer HTTP-Anfrage `if-none-match:` angegeben wird, kann der Server überprüfen, ob die Ressource noch aktuell ist.
- Im Post-Fall wird eine Fehlermeldung zurückgegeben, wenn der ETag nicht mit der ETag-Version des Servers übereinstimmt: `412 Precondition Failed`

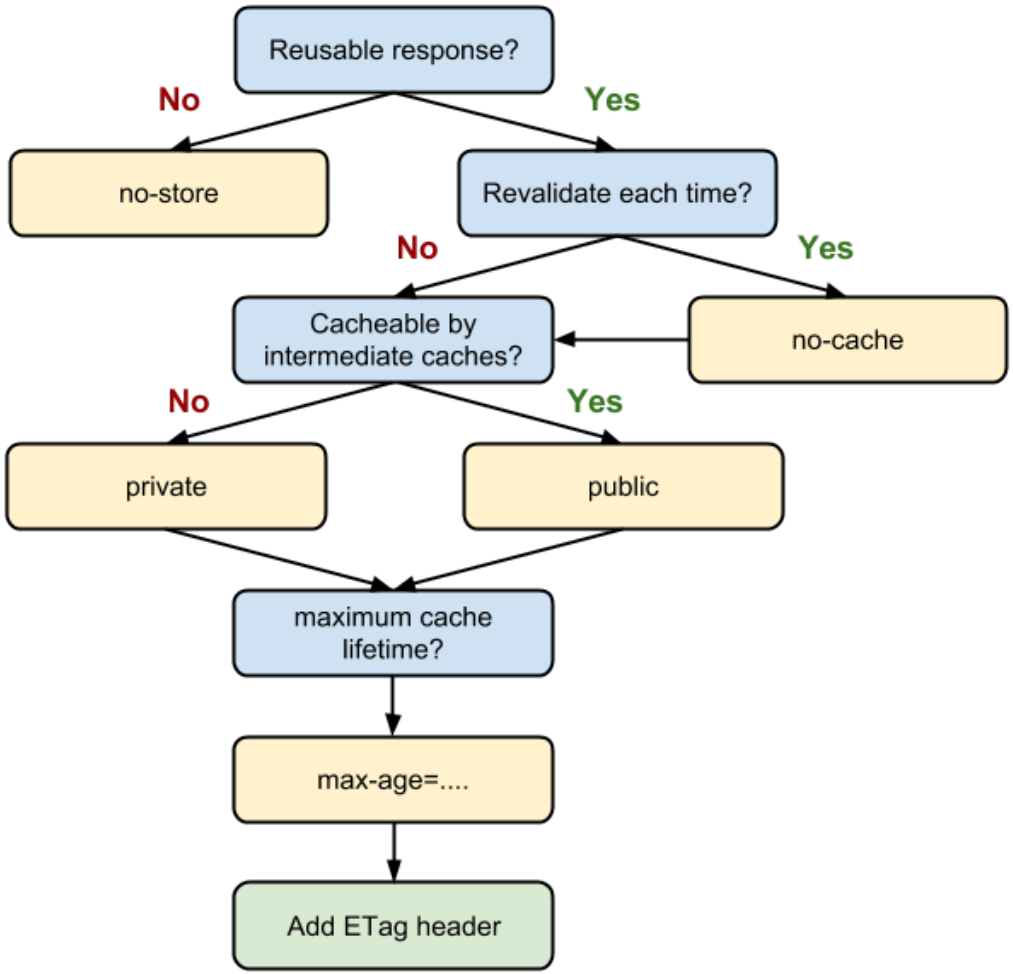
Caching im Browser

`if-none-match:"<etag_value>"`

- Für eine lokal möglicherweise veraltete Version kann in einer GET-Operation auch `if-none-match` angegeben werden.
- In diesem Fall wird, wenn die Ressource auf der Serverseite nicht geändert wurde, `304 Not Modified` zurückgegeben, ohne die Ressource erneut auszuliefern.
- Wenn sich der ETag und damit die Ressource geändert hat, wird sie normal an den Browser übertragen.

Ein ähnliche Vorgehensweise kann mit `last-modified` und `if-modified-since` verfolgt werden.

Caching im Browser



Caching auf der Serverseite

Vorüberlegungen

- Webserver beantworten Anfragen einer Vielzahl von verschiedenen Clients
- Jede Antwort erfordert in der Regel Rechenzeit und I/O-Operationen.
- Oft sind Antworten *recht* ähnlich.
- Für das Caching auf Client-Seite sind wir von identischen Antworten ausgegangen – nun schwächen wir das ab und betrachten auch ähnliche Antworten.

Caching auf der Serverseite

Welche HTTP-Antworten bezogen auf einen einzelnen Webserver könnten ähnlich/gleich sein?

- Einzelne View-Elemente der Webseite
  - Zum Beispiel: Kopf- oder Fußelement, Sidebar oder auch Listen die öfters eingeblendet werden.
- Selten modifizierte Datenobjekte
  - Zum Beispiel: Zugriffsrechte, Konfigurationsparameter, Produktdaten – alles was selten aktualisiert wird.
- Aufwendig zu berechnende Daten
  - Dinge die man evtl. sowieso auslagert
  - Beispiel: Diff zwischen zwei Commits bei *GitHub* oder die Kontaktliste von *LinkedIn*.

Caching auf der Serverseite

Wo könnten Zwischenergebnisse auf der Serverseite gespeichert werden?

1. Direkt im Hauptspeicher des Anwendungs- bzw. Webservers
2. Im lokalen Dateisystem
3. In einem anderen System

Caching auf der Serverseite

Numbers Every Programmer Should Know (2018)

- Zahlen die ursprünglich von Jeff Dean (Google) erarbeitet wurden in aktualisierter Form:

Ressource	Time
L1 cache reference	1ns
Branch mispredict	3ns
L2 cache reference	4ns
Mutex lock/unlock	17ns
Main memory reference	100ns
Compress 1KB wth Zippy	2,000ns $\approx 2\mu$s
Send 2,000 bytes over commodity network	88ns
SSD random read	16,000ns $\approx 16\mu$s
Read 1,000,000 bytes sequentially from memory	5,000ns $\approx 5\mu$s
Round trip in same datacenter	500,000ns $\approx 500\mu$s
Read 1,000,000 bytes sequentially from SSD	78,000ns $\approx 78\mu$s
Disk seek	3,000,000ns $\approx$ 3ms
Read 1,000,000 bytes sequentially from disk	1,000,000ns $\approx$ 1ms
Packet roundtrip CA to Netherlands	150,000,000ns $\approx$ 150ms

Caching auf der Serverseite

Abbildung dieser Zahlen auf serverseitiges Caching

- Zwischenspeichern von Daten im Arbeitsspeicher für den späteren Zugriff ist schnell!
  - Lesen einer zufälligen Stelle im Arbeitsspeicher dauert < 0.1 μs
- Ablegen von Daten auf einer Festplatte (wenn es sich *nicht* um eine SSD handelt) ist langsam
  - Positionieren eines Lesekopfes dauert 4000 μs
  - Anschließendes Lesen 1 MB dauert weitere 2000 μs
- SSDs zu nutzen macht Sinn
  - Lesen einer zufälligen Speicherstelle dauert 16 μs
  - Lesen von einem 1 MB dauert 156 μs
- Speichern von Daten auf einem Rechner innerhalb des gleichen Datenzentrums ist eine Alternative:
  - Round-trip im Datenzentrum dauert 500 μs

Caching auf der Serverseite

Zusammenfassung

- Im Speicher unter hundert μs
- Auf der SSD speichern hunderte von μs
- Auf einer klassischen Festplatte speichern tausende von μs
- Auf einer entfernten Maschine: zusätzlich hunderte von μs

Fazit

- Arbeitsspeicher < SSD < entfernter Rechner

Reicht das schon aus als Daumenregel?

Caching auf der Serverseite

Hit rate bzw. Trefferquote in Abhängigkeit des Speicherortes

- Werden die Daten im Arbeitsspeicher abgelegt, kann in der Regel nur der lokale Prozess davon profitieren
- Werden die Daten auf der lokalen SSD gespeichert, können alle Prozesse der Maschine zugreifen
- Im Falle eines entfernten Rechners können alle Rechner des Clusters darauf zugreifen

Fazit

- Man sollte zwischen Zugriffszeit und Trefferquote abwägen!

Caching auf der Serverseite

Beipiel: Memcached[1]

- Wird häufig zum zwischenlagern von Daten verwendet
- Speichert alle verwalteten Daten im Arbeitsspeicher
- Hat eine einfache über TCP ansprechbare Schnittstelle
- Kann verteilt betrieben werden
- Datengranularität
  - Schlüssel können eine Länge von 250 byte haben
  - Werte eine maximale Größe von 1 MB
- LRU (least recently used) wird verwendet, um sicherzustellen, dass Platz für neue Daten vorhanden ist
- Alle wichtigen Methoden haben eine konstante Zugriffszeit!

[1] `https://memcached.org`

Content Delivery Networks (CDN)

Motivation

- Ein einziger Standort für die Bereitstellung sehr populärer Inhalte bringt inhärente Probleme mit sich:
  - Skalierbarkeit, Zuverlässigkeit und Performanz
- *Flash crowd!*
  - Spontane Popularität
- Zwischenablage von Ressourcen an den *Rändern* des Netzes
  - Zugriffe auf den primären Server reduzieren
  - Schnellerer Zugriff für Nutzer da näher

Content Delivery Networks (CDN)

Motivation

- Ein einziger Standort für die Bereitstellung sehr populärer Inhalte bringt inhärente Probleme mit sich:
  - Skalierbarkeit, Zuverlässigkeit und Performanz
- *Flash crowd!*
  - Spontane Popularität
- Zwischenablage von Ressourcen an den *Rändern* des Netzes
  - Zugriffe auf den primären Server reduzieren
  - Schnellerer Zugriff für Nutzer da näher

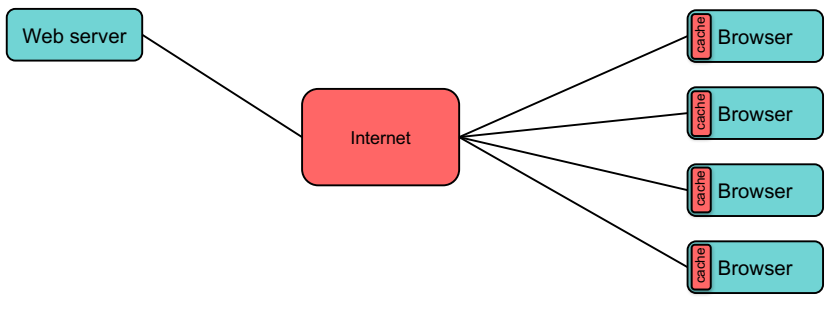
Was sollte ausgelagert werden?

- Vor allem statische Inhalte – da sie den größten Teil des Datenverkehrs ausmachen
  - Z.B. Bilder, Videos, CSS und andere statische Seitenbestandteile

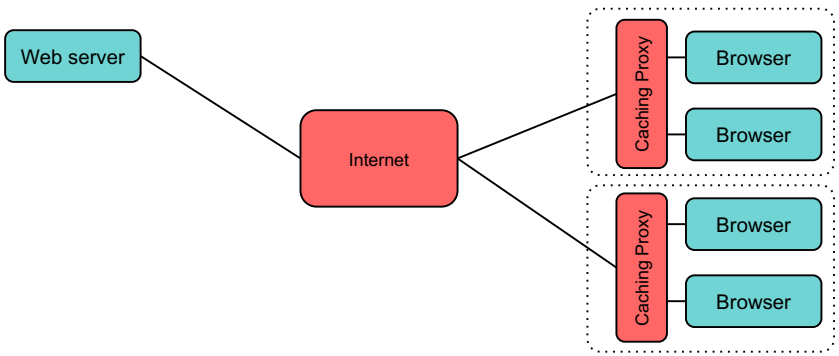
Vorüberlegungen zu CDNs

Bisherige Möglichkeiten im Überblick

- Jede *initiale* Anfrage muss vom Server beantwortet



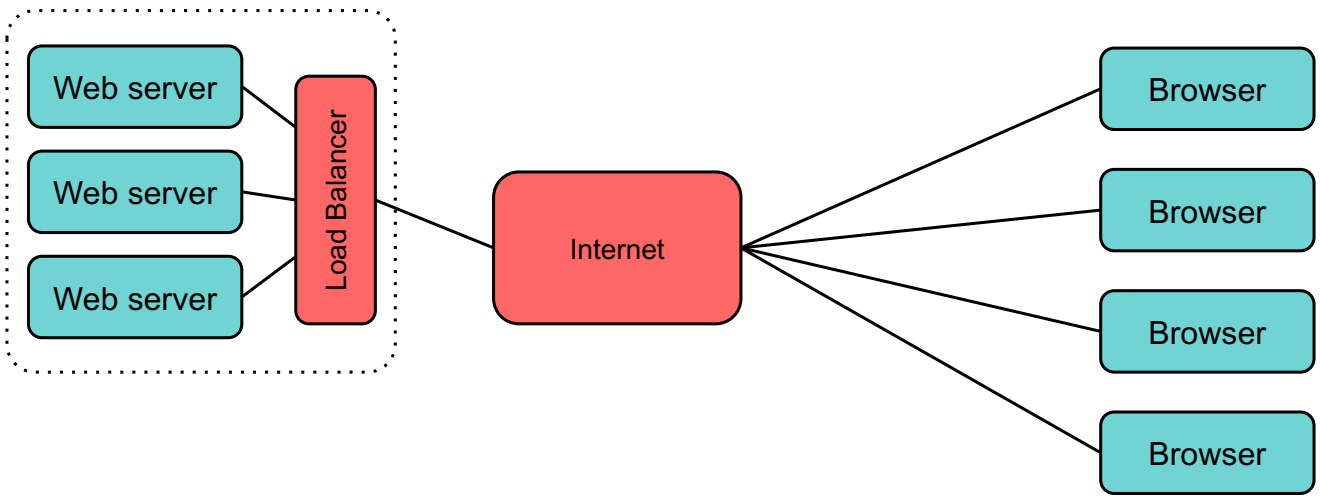
- Caching innerhalb einer Institution



Vorüberlegungen zu CDNs

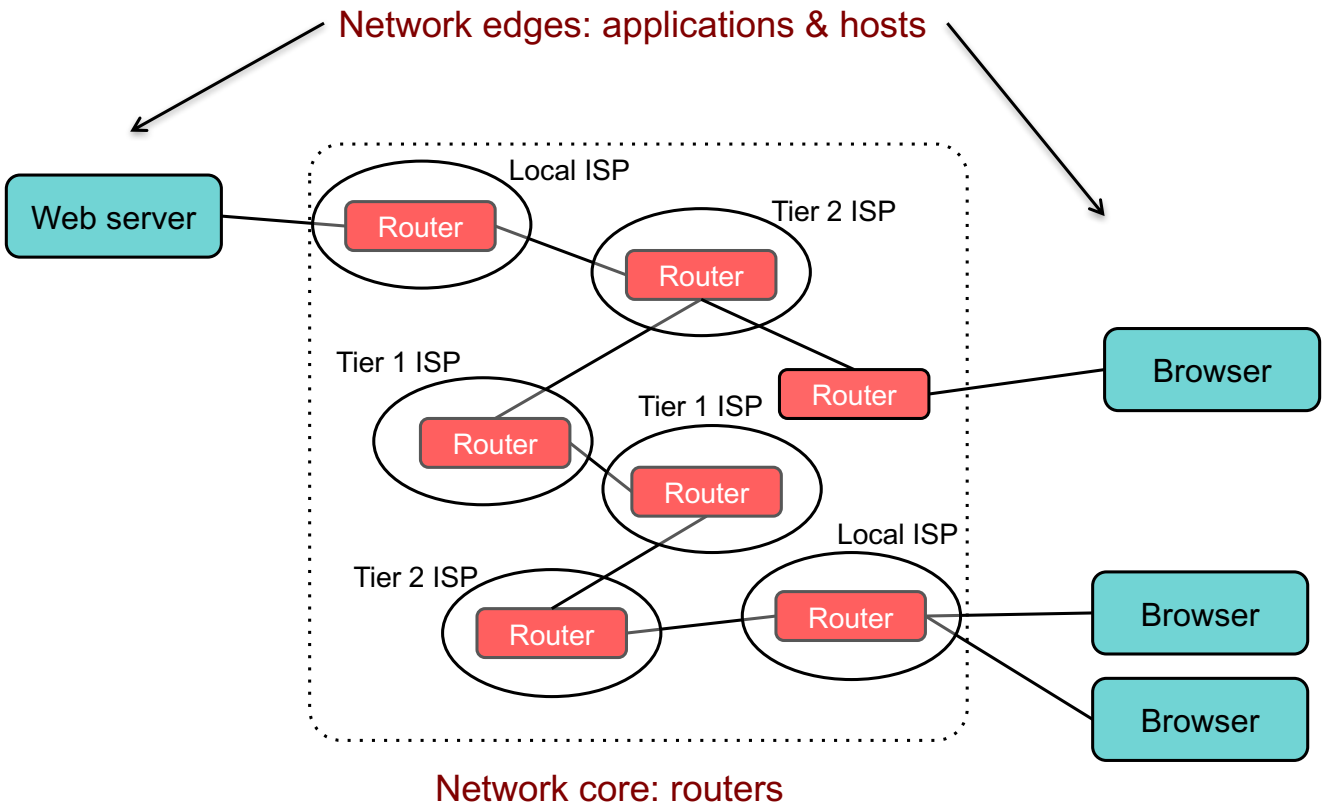
Bisherige Möglichkeiten im Überblick

- Eine andere Möglichkeit wäre, die Serverseite mit einem *Load Balancer* skalierbarer zu machen
- Anbindung an das Netzwerk kann jedoch einen Engpass darstellen
- Latenz zwischen Client und Server ist nach wie vor hoch



Vorüberlegungen zu CDNs

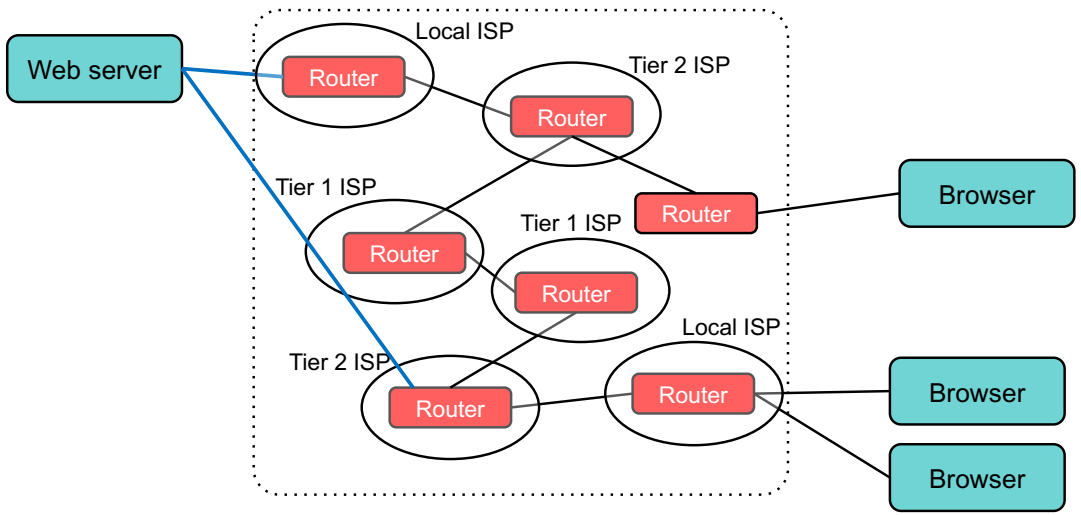
Weitere Möglichkeiten



Vorüberlegungen zu CDNs

Multihoming

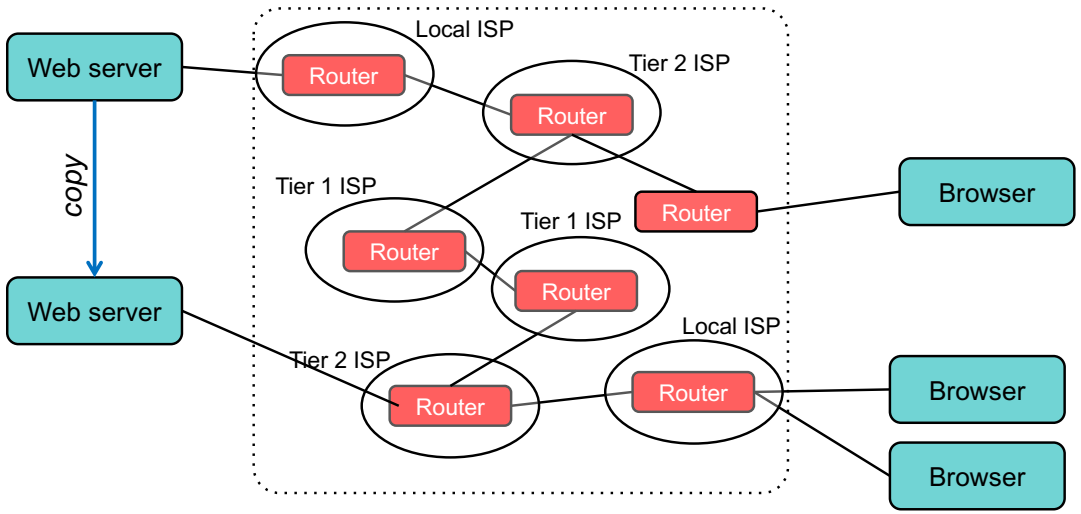
- Etablierung von Netzwerkverbindungen zu verschiedenen ISPs
- Eine IP, aber mehrere Links, über die sie erreicht werden kann
- Adressen werden über Border Gateway Protocol (BGP) vermittelt
- Clients können nun verschiedene Routen nutzen und Ausfall eines ISPs kann toleriert werden



Vorüberlegungen zu CDNs

Mirroring bzw. Replikation

- Synchronisation mehrerer Server
- Einbindung von verschiedenen ISPs ermöglicht Load Balancing in Abhängigkeit Clients
- Fehlertoleranz gegenüber Ausfällen von ISPs und Servern



Vorüberlegungen zu CDNs

Vorzüge der Ansätze

- Skalierbarkeit
  - Replikation über mehrere Server (Load Balancing)
  - Nutzung verschiedener ISPs, falls das Netzwerk ein Engpass ist
- Verfügbarkeit
  - Replikation der Server
  - Nutzung verschiedener Datenzentren und ISPs
- Performanz
  - Caching der Inhalte in der Nähe der Clients

Vorüberlegungen zu CDNs

Probleme der bisher diskutierten Ansätze

- Lokales Load Balancing
  - Datenzentren können natürlich ausfallen
- Multihoming
  - Es dauert einige Zeit bis neue Routen gefunden sind
- Mirroring
  - Synchronisation ist nicht immer einfach
- Proxy Server
  - Lösung außerhalb der Kontrolle des Dienstbetreibers mit oft geringem Nutzen (Trefferquote)

Akamai als Beispiel für ein CDN

Akamai

- Entstand basierend auf Forschung am MIT
- Ziel ist es, eine Antwort auf das *flash crowd* Problem zu geben
- Aktuelle Daten der Firma [2]:
  - Mehr als >345,000 Server in >1,300 Netzwerken über >135 Länder verteilt
  - Liefert zwischen 15-30% der Web-Daten aus
  - Akkumulierte Bandbreite beträgt 30 Terabit pro Sekunde (ältere Daten von 2020)
- Ziele: Daten über Server bereitzustellen
  - die bzgl. der Latenz am nächsten sind,
  - nicht überlastet sind
  - und am wahrscheinlichsten die Daten auch vorhalten.

[2] https://www.akamai.com/uk/en/about/facts-figures.jsp

Akamai als Beispiel für ein CDN

Das Internet besteht aus vielen autonomen Systemen

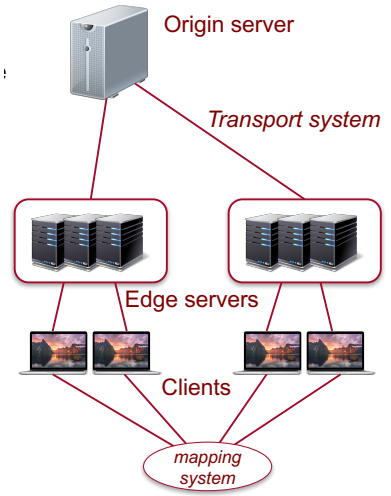
- Verknüpfung der jeweiligen Netze beruht zumeist auf vertraglichen Beziehungen
- ISPs sind vor allem an
  - einer schnellen Verbindung zwischen Nutzer und ihrem Netzwerk (sogenannte *last mile*), sowie
  - einer schnellen Anbindung von Servern in ihrem Netz interessiert.

Basis von Akamai: *Overlay* Netzwerk

- Verbund von Caching-Servern, die über eine Vielzahl von ISPs verteilt sind
- Alle Server sind untereinander verbunden

Akamai als Beispiel für ein CDN

1. Namensauflösung
   - Mittels eines *Mapping Systems* Abbildung auf einen Server
   - Verwendung von eigenen DNS Servern
     - Zielsetzung Weiterleitung auf den nächstgelegenen *Edge* Server
2. Vermittlung der Anfrage vom Browser zum ausgewählten Server
   - Edge Server hat evtl. die benötigten Daten schon lokal vorliegen
   - Falls nicht wird der Ursprungsdienst angefragt



Akamai als Beispiel für ein CDN

Abbildung von Anfragen auf Server durch dynamische Zuweisung über DNS-Server

- Ermittlung des zuständigen Servers unter Einbezug:
  - des Ursprungs der Anfrage
  - Verfügbarkeit und Last von Servern
  - Netzwerkbedingungen
- Grundsätzlich ist ein Server im ISP-Netz des anfragenden Clients zu bevorzugen

Akamai als Beispiel für ein CDN

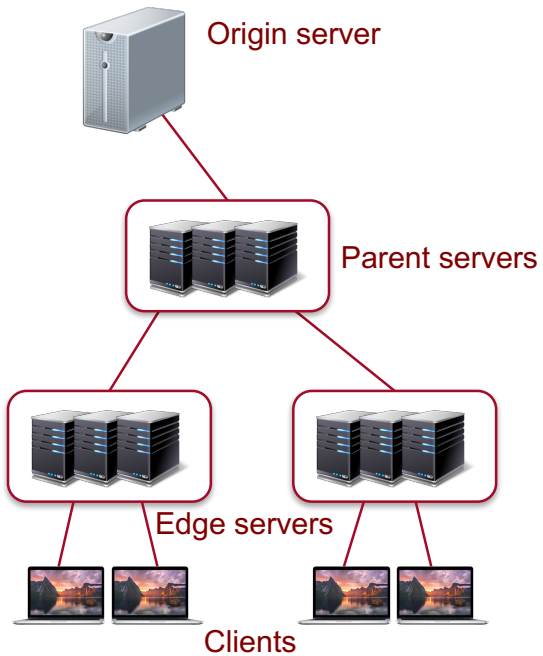
Sammeln von wichtigen Monitoringinformationen

- Abbildung der Netzwerktopologie
  - Nutzung von BGP und *traceroute* Informationen
  - Ermöglicht es Anzahl der Hops und Übertragungszeit abzuschätzen
- Server melden ihre aktuelle Belastung an eine zentrale Monitoringanwendung
- Diese vermittelt die Informationen weiter an Akamai DNS Server
- Informationen werden verwendet, um den richtigen Server für eine Anfrage auszuwählen
- Sollten Server zu überlastet sein, werden diese erstmal nicht weiter in Betracht gezogen

Akamai als Beispiel für ein CDN

Vorzüge eines CDNs

- Daten werden bereits lokal vor Ort vorgehalten
- Dynamische Inhalte liegen immer noch beim Ursprungsserver
- Es ist auch möglich, eine Hierarchie von Caches zu erstellen, um die Trefferquote zu erhöhen



Akamai als Beispiel für ein CDN

Welche Arten von Inhalten können/sollten zwischengelagert werden?

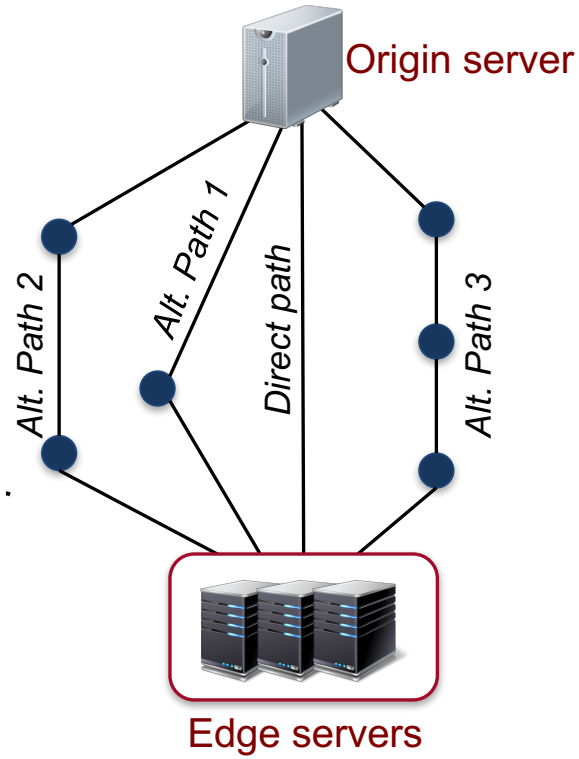
- Statische Inhalte
  - Sehr variable Lagerungszeiten
- Dynamische Inhalte sind möglich
  - Proxies können dies nicht
  - Akamai setzt auf Edge Side Includes[3]
  - Zusammenführung von Inhalten kann in Edge Servern erfolgen
  - Konzept ähnlich zu Server Side Includes (SSI)
- Streaming
  - Daten werden intern über das Akamai Netzwerk verteilt und an mehrere Edge Server ausgeliefert

[3] https://www.w3.org/TR/esi-lang/

Akamai als Beispiel für ein CDN

Vorzüge eines CDNs: Routing

- Routen von Edge zu Ursprungsservern werden über eigenes Overlay etabliert
- Entscheidung der Route bezieht eine Vielzahl von Faktoren ein
- Zwischenknoten vermitteln die Daten



Akamai als Beispiel für ein CDN

Vorzüge eines CDNs: **Sicherheit**

- Hohe Kapazität
  - Widerstandsfähig gegenüber DDoS
- Expertise
- Gehärtete Infrastruktur
  - Spezieller Netzwerkstack
  - Monitoring zum Erkennen von Angriffen
- Schutz der Ursprungsdienste
  - Der Angreifer sollte die IP des eigentlichen Dienstes garnicht kennen

Zusammenfassung

- Rigorose Nutzung von Caching reduziert Last- und Bandbreitenbedarf eines Websites
- Vielzahl von Möglichkeiten mit unterschiedlicher Trefferquote und Auswirkung auf die Anfragelatenz
- Systemeigenschaften bei Auswahl der Verfahren im Blick haben!
- Auch wenn Webseiten evtl. aktuell schwach besucht sind kann sich dies spontan ändern …

Literatur

[1] John Dilley et al. “Globally Distributed Content Delivery”. In: *IEEE Internet Computing* 6.5 (Sep. 2002), S. 50–58. ISSN: 1089-7801.

[2] Ilya Grigorik. *High Performance Browser Networking: What every web developer should know about networking and web performance*. O’Reilly Media, Inc., 2013.