

Resilienz und Fehlertoleranz in verteilten Systemen

Modul „Software Engineering“

16. Januar 2025
Derhachov, Schmidt, Westholt

HTWK Leipzig, FIM

Dieses Dokument ist unter der Lizenz GNU GPLv3 freigegeben.

Gliederung

- 1 Resilienz und Fehlertoleranz
- 2 Strategien
- 3 Pattern und Konzepte
- 4 Fazit
- 5 Live-Demo
- 6 Quellen

Resilienz und Fehlertoleranz

- Deutsche Bahn

Resilienz und Fehlertoleranz

- Deutsche Bahn
- **Es gibt kein fehlerfreies System.** „Ein Ausfall [...] gilt als unvermeidlich“ [1, 2].

Resilienz und Fehlertoleranz

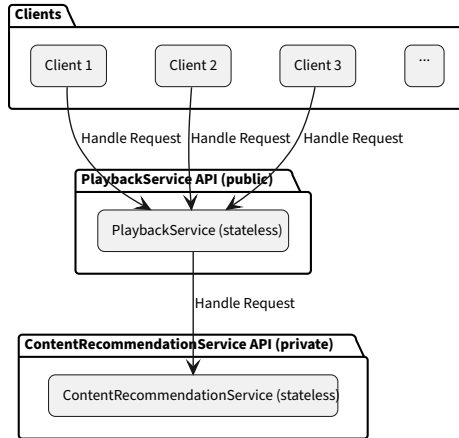
- Deutsche Bahn
- **Es gibt kein fehlerfreies System.** „Ein Ausfall [...] gilt als unvermeidlich“ [1, 2].
- Also: Genügend Umsteigezeit einplanen (Vorkehrungen) und ansonsten alternative Verbindung heraussuchen

Resilienz und Fehlertoleranz

- Deutsche Bahn
- **Es gibt kein fehlerfreies System.** „Ein Ausfall [...] gilt als unvermeidlich“ [1, 2].
- Also: Genügend Umsteigezeit einplanen (Vorkehrungen) und ansonsten alternative Verbindung heraussuchen
- **Resilienz aufbauen**

Resilienz und Fehlertoleranz

Initiales Beispiel: Architekturdiagramm für Videostreaming-Plattform



Resilienz und Fehlertoleranz

Begriffsklärung

Begriffe

- **Resilienz**

- ▶ Funktionsfähigkeit trotz Störungen, Angriffen oder Ausfällen sowie schnelle Erholung

- **Fehlertoleranz**

- ▶ Korrektes Funktionieren trotz Fehlern oder Störungen

Resilienz und Fehlertoleranz

Begriffsklärung - Zusammenhang

Zusammenhang

- **Resilienz** = übergeordnetes Konzept, umfasst Fehlertoleranz sowie Aspekte wie Wiederherstellung, Anpassungsfähigkeit und präventive Maßnahmen
- **Fehlertoleranz** = Fokus auf unmittelbarer Bewältigung von Fehlern während des Systembetriebs

Resilienz und Fehlertoleranz

Begriffsklärung - Ursprung

- beide Begriffe haben ihren Ursprung nicht in der Informatik
- **Resilienz** aus dem Lateinischen *resilire*, entspricht „zurückspringen“ oder „abprallen“
- **Fehlertoleranz** aus den Ingenieurwissenschaften

Resilienz und Fehlertoleranz

Motivation

Motivation

- Störungen im laufenden Betrieb sollen verhindert werden
- Zugunsten der Sicherheit, Kundenzufriedenheit etc.

Strategien

Resilienzstrategien

- Redundanz
- Partitionierung
- Skalierung

Strategien

Resilienzstrategien: Redundanz

Definition Redundanz

Vervielfältigung kritischer Komponenten oder Funktionen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.

- Unterschiede in Arten der Redundanz und Ebenen der Redundanz.

Strategien

Resilienzstrategien: Arten der Redundanz

- Aktive Redundanz
 - ▶ Mehrere Komponenten arbeiten parallel
 - ▶ Nahtloser Übergang bei Ausfall einer Komponente
- Passive Redundanz
 - ▶ Redundante Komponenten im Standby
 - ▶ Aktivierung bei Ausfall der primären Komponente (mit Umschaltzeit)

Strategien

Resilienzstrategien: Ebenen der Redundanz

- **Software-Redundanz**
 - ▶ Mehrere Softwarekomponenten erfüllen dieselbe Funktion
- **Hardware-Redundanz**
 - ▶ Doppelte physische Komponenten (z. B. Netzteile, RAID-Systeme)
- **Daten-Redundanz**
 - ▶ Mehrfach gespeicherte Daten (z. B. Replikation, Backups)
- **Netzwerk-Redundanz**
 - ▶ Alternative Übertragungswege (z. B. redundante Router, Glasfaserverbindungen)
- **Geografische Redundanz**
 - ▶ Verteilung auf mehrere Standorte zur Minimierung großflächiger Ausfälle

Strategien

Resilienzstrategien: Partitionierung

Definition Partitionierung

Physische Unterteilung von Daten in kleinere, logisch zusammenhängende Einheiten für Skalierbarkeit, Leistung und Flexibilität.

Strategien

Resilienzstrategien: Arten der Partitionierung

- Horizontale Partitionierung: Aufteilung von Datensätzen basierend auf einem Partitionsschlüssel
- Vertikale Partitionierung: Gruppierung von Spalten einer Tabelle
- Funktionale Partitionierung: Organisation nach Funktion oder Zweck der Daten
- RANGE-Partitionierung: Unterteilung nach Wertebereichen (z. B. Zeit, Zahlen)
- HASH-Partitionierung: Verteilung durch Hash-Funktion für gleichmäßige Last
- Round-Robin Partitioning: Gleichmäßige, zyklische Datenverteilung ohne Optimierung für spezifische Abfragen

Strategien

Resilienzstrategien: Skalierung

Definition Skalierung

Flexible Anpassung von Ressourcen an veränderte Anforderungen.

Strategien

Resilienzstrategien: Arten der Skalierung

- Vertikale Skalierung (Scale Up):
 - ▶ Aufrüstung von Hardware (z. B. CPU, RAM) eines Systems
 - ▶ Begrenzung auf eine zentrale Einheit
- Horizontale Skalierung (Scale Out):
 - ▶ Hinzufügen von Servern oder Instanzen
 - ▶ Verteilte Last auf mehrere Einheiten
- Automatische Skalierung:
 - ▶ Dynamische Anpassung der Ressourcen
 - ▶ Häufig in Cloud-Umgebungen für optimierte Ressourcennutzung

Strategien

Pattern für Fehlertoleranzstrategien

- Fehlerbehandlung und -isolierung mittels Retry-Pattern
- Nutzung von Fallback-Mechanismen
- Vermeidung kaskadierender Fehler mittels Circuit-Breaker

Pattern und Konzepte

Circuit-Breaker

Definition - Was ist ein Circuit-Breaker?

Entwurfsmuster zur Isolation fehlerhafter Dienste in verteilten Systemen, um Überlastung zu verhindern und Stabilität zu gewährleisten.

Aufgaben

- Isoliert fehlerhafte Dienste
- Unterbricht Anfragen bei wiederholtem Fehler
- Verhindert kaskadierende Ausfälle

Pattern und Konzepte

Circuit-Breaker: Zustandsdiagramm

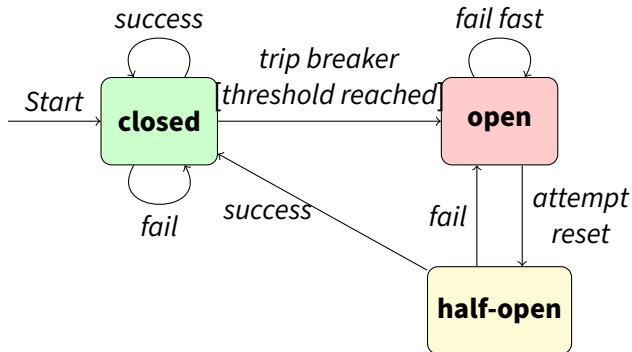


Abbildung 1: Circuit Breaker Zustandsdiagramm [2].

Pattern und Konzepte

Circuit-Breaker: Implementierungsansätze

- Clientseitig
 - ▶ Abfangen externer Anfragen vor der Weiterleitung
- Dienstseitig
 - ▶ Schutz des Dienstes vor Überlastung durch viele fehlerhafte Anfragen
- Proxy-basiert
 - ▶ Circuit-Breaker zwischen Clients und Diensten in Proxys platziert

Pattern und Konzepte

Circuit-Breaker: Vorteile

- Verhindert kaskadierende Ausfälle in verteilten Systemen
- Verbesserte Systemstabilität durch Isolierung fehlerhafter Dienste
- Bessere Benutzererfahrung durch Fallback-Mechanismen
- Unterstützt Resilienz und Wiederherstellung in kritischen Systemen

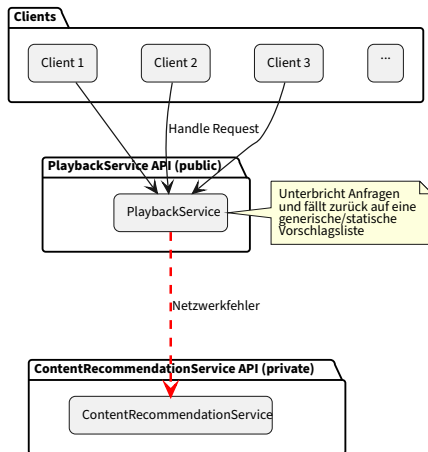
Pattern und Konzepte

Circuit-Breaker: Nachteile

- Erhöhte Komplexität in der Implementierung und Wartung
- Risiko von Fehlkonfiguration (z. B. falsche Schwellenwerte)
- Zusätzlicher Overhead durch Überwachung und Statusverwaltung
- Fallback-Daten können veraltet oder ungenau sein

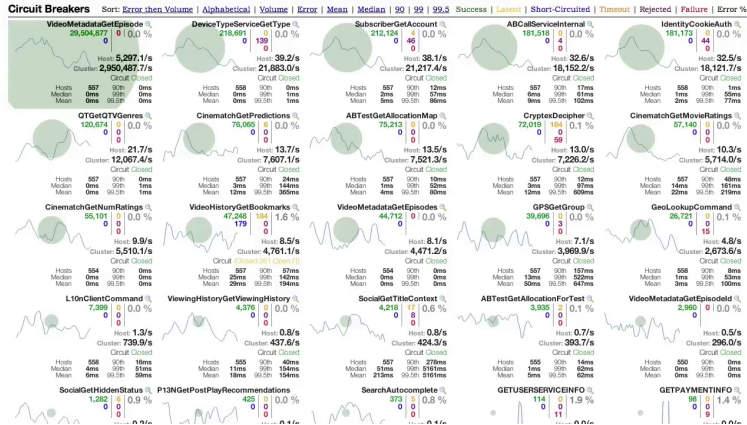
Pattern und Konzepte

Circuit-Breaker: Architekturdiagramm für Videostreaming-Plattform



Pattern und Konzepte

Circuit-Breaker: Hystrix Dashboard von Netflix[3]



Pattern und Konzepte

Retry-Muster

Definition - Was ist ein Retry-Muster?

Architekturmuster zur automatischen Wiederholung fehlgeschlagener Operationen, insbesondere bei vorübergehenden Fehlern.

Funktionen

- Handhabt vorübergehende Fehler durch wiederholte Versuche
- Nutzt dazu exponentielle Backoff-Strategien (= Verlängerung der Wartezeit zwischen Wiederholungen)

Pattern und Konzepte

Retry-Muster: Sequenzdiagramm

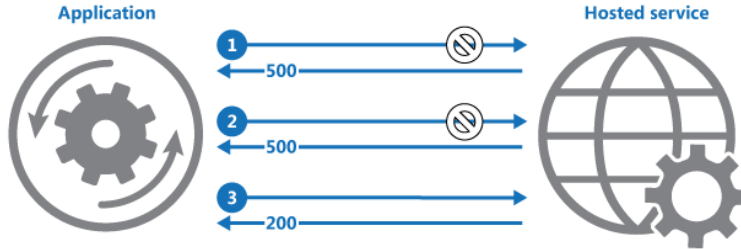


Abbildung 2: Sequenzdiagramm des Retry Patterns [4]

1. Versuch: Fehlgeschlagener Anfrage (HTTP Reponse Code 500)
2. Versuch: Nach kurzer Wartezeit: Erneute fehlgeschlagene Anfrage (500)
3. Versuch: Nach längerer Wartezeit: Erfolg (200)

Pattern und Konzepte

Retry-Muster: Vorteile

- Reduziert die Wahrscheinlichkeit eines vollständigen Anwendungsabsturzes bei vorübergehenden Fehlern
- Verbessert die Zuverlässigkeit, indem kurzfristige Probleme (z. B. Netzwerkprobleme) automatisch überwunden werden
- Ermöglicht ein einheitliches Fehlerbehandlungsmodell in einer Anwendung

Pattern und Konzepte

Retry-Muster: Nachteile

- Erhöhte Komplexität in der Implementierung und Wartung
- Verzögert die Gesamtverarbeitung, wenn ein Vorgang wiederholt fehlschlägt
- Kann echte, dauerhafte Fehler verschleiern, wenn nur wiederholt wird, ohne die Ursache zu analysieren
- Nicht jeder Fehler ist vorübergehend (z. B. Authentifizierungsfehler), was zu unnötigen Wiederholungen führt

Pattern und Konzepte

Fallback-Muster: Code-Beispiel

```
1 FALLBACK_DATA = [  
2     {"title": "Lorem Ipsum: The Beginning", "year": 2020},  
3     ...  
4 ]  
5 def get_recommendation_data():  
6     try:  
7         response = requests.get(RECOMMENDATION_SERVICE_URL)  
8         ...  
9         return JsonResponse(response.json())  
10    except (requests.RequestException, requests.exceptions.  
11           HTTPError) as e:  
        return JsonResponse(FALLBACK_DATA)
```


Pattern und Konzepte

Load Balancing

Definition - Was ist Load-Balancing?

Verteilung der Last auf mehrere Server zur Verbesserung von Leistung und Ausfallsicherheit.

Arten

- Network Load Balancer
- Application Load Balancer

Pattern und Konzepte

Load Balancing: Architekturdiagramm

Komponenten

- Load Balancer
- Service Registry
- Dienstinstanzen

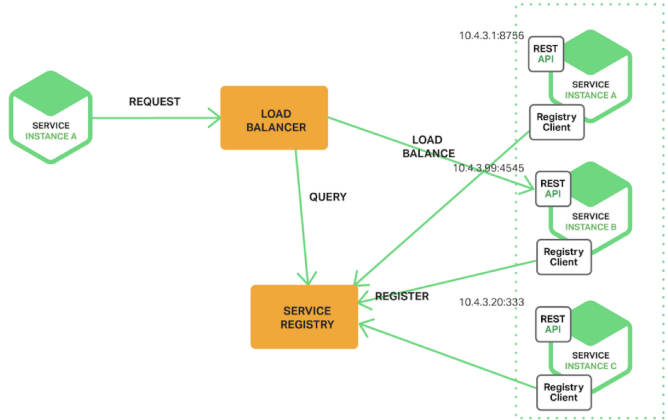


Abbildung 3: Load Balancer mit Server Side Discovery [5]

Pattern und Konzepte

Load Balancing: Service Discovery

Service Discovery

- **Server-side Discovery**
 - ▶ Ein zentraler Load Balancer
 - ▶ Dienste sind unsichtbar für Client
- **Client-side Discovery**
 - ▶ Kein zentraler Load Balancer
 - ▶ Client sieht alle Dienstinstanzen
 - ▶ Client betreibt Load Balancing

Pattern und Konzepte

Load Balancing: statische Strategien

Source IP Hash Load Balancing

- Clients werden praktisch zufällig verteilt
- Anfragen eines Clients werden immer auf der selben Serviceinstanz verarbeitet (*Sticky Sessions*)

Round Robin

- Anfragen werden zyklisch auf Instanzen verteilt

Pattern und Konzepte

Load Balancing: dynamische Strategien

Least Connection

- Anstehende Aufgabe geht an den Dienst mit den momentan wenigsten aktiven Netzwerkverbindungen

Resource Based

- Serviceknoten berichten aktuelle Auslastung (z. B. CPU-Auslastung)
- Nächste Aufgabe geht an den Knoten mit niedrigster Auslastung

Pattern und Konzepte

Load Balancing: dynamische Strategien

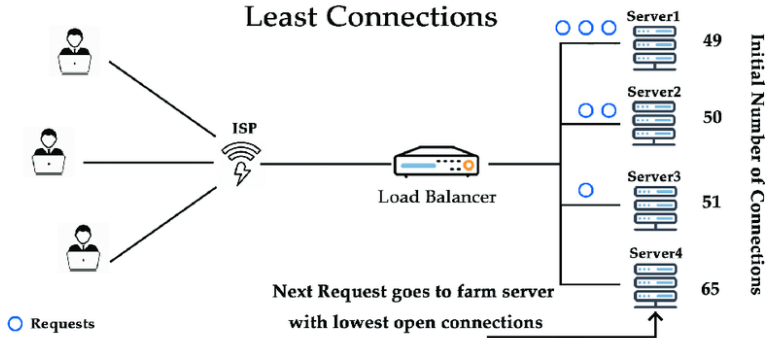


Abbildung 4: Least Connection-basiertes Load Balancing [6]

Pattern und Konzepte

Health Checks bei Load Balancing

Konzept

Dienstinstanzen kommunizieren ihren Grad der Funktionsbereitschaft, um dynamische Lastverteilung zu ermöglichen.

- Dienste haben Endpunkte, um Auslastung oder Fehler abzurufen
- Überlastete Dienste erhalten weniger Anfragen
- Fehlerhafte Dienste können übergangen werden

Pattern und Konzepte

Load Balancing: dynamische Skalierung

Problem

- Die Anzahl der Anfragen ist nicht immer gleich
 - ▶ Zur Spitzenbelastung sind mehr Dienstknoten nötig
 - ▶ In Ruhezeiten verschwenden unterbelastete Knoten Strom und Geld

Die Lösung: dynamische Skalierung

- Der Load Balancer wird befähigt, Dienstinstanzen zu starten und stoppen
- Schwellwerte definieren, wann dies erfolgen soll

Pattern und Konzepte

Load Balancing am Beispiel

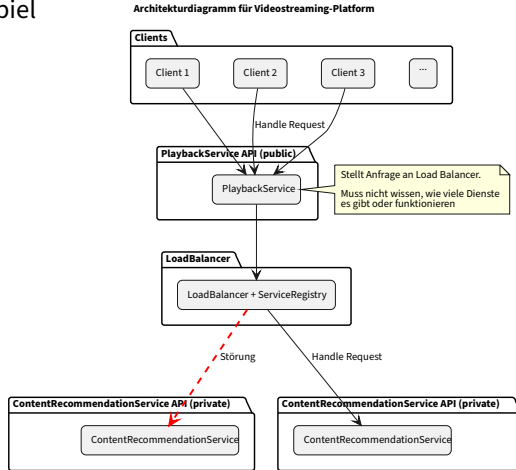


Abbildung 5: Beispiel mit Load Balancer

Pattern und Konzepte

Load Balancing in AWS

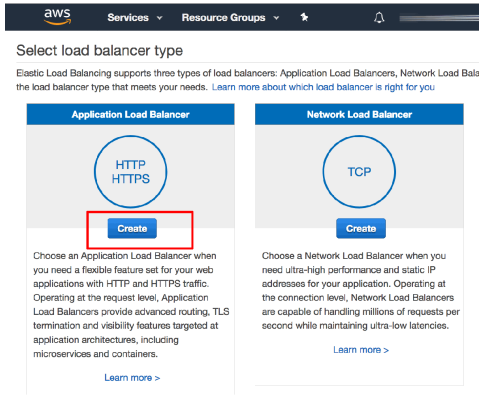
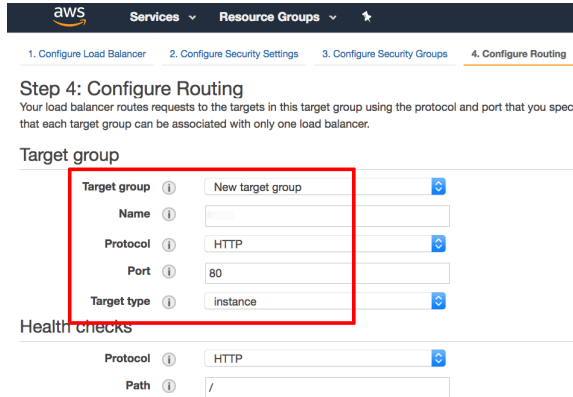


Abbildung 6: Erstellung eines AWS Elastic Load Balancers [7]

Pattern und Konzepte

Load Balancing in AWS



The screenshot displays the AWS Management Console interface for configuring a Load Balancer. The top navigation bar shows the AWS logo and the 'Services' and 'Resource Groups' dropdown menus. Below the navigation bar, there are four steps: 1. Configure Load Balancer, 2. Configure Security Settings, 3. Configure Security Groups, and 4. Configure Routing. The 'Step 4: Configure Routing' section is active, and it contains the following text: 'Your load balancer routes requests to the targets in this target group using the protocol and port that you specify that each target group can be associated with only one load balancer.'

The 'Target group' section is highlighted with a red box. It contains the following fields:

- Target group**: New target group (dropdown menu)
- Name**: (text input field)
- Protocol**: HTTP (dropdown menu)
- Port**: 80 (text input field)
- Target type**: instance (dropdown menu)

The 'Health checks' section is located below the 'Target group' section. It contains the following fields:

- Protocol**: HTTP (dropdown menu)
- Path**: / (text input field)

Abbildung 7: Konfiguration des Balancer → Service Routing [7]

Pattern und Konzepte

Load Balancing: Vorteile

- Gesteigerter Durchsatz durch parallel laufende Dienste
- Hohe Verfügbarkeit durch Redundanz und nahtloses Failover
- Kostenreduktion durch dynamische horizontale Skalierung

Pattern und Konzepte

Load Balancing: Nachteile

- Gesteigerte Komplexität der Infrastruktur
- Zusätzliche Kosten für Load Balancer (Hardware und Lizenz)
- Dienste sind nicht immer geeignet
 - ▶ Healthchecks müssen ggf. implementiert werden
 - ▶ Stateful-Dienste sind nur eingeschränkt verwendbar
- Load Balancer als neuer Single Point of Failure

Pattern und Konzepte

Round Robin DNS

Definition - was ist Round Robin DNS?

- Für eine Domain werden mehrere IP-Adressen hinterlegt
- DNS-Server gibt alle Adressen in rotierender Reihenfolge zurück

Wirkung

- Externes, statisches Load Balancing
- Verfügbarkeit auch bei Totalausfall eines Servers

Pattern und Konzepte

Round Robin DNS

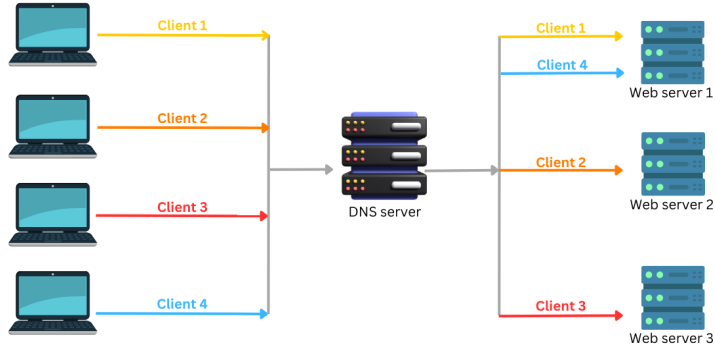


Abbildung 8: Round Robin DNS [8]

Pattern und Konzepte

Round Robin: Erstellung mehrerer DNS-Einträge

DNS management for **yourdomain.com**

[+ Add record](#) [Advanced](#)



Type	Name	Content	TTL	Proxy status	
A	yourdomain.com	1.2.3.4	Auto	 Proxied	Edit ▶
A	yourdomain.com	2.3.4.5	Auto	 Proxied	Edit ▶

Abbildung 9: Mehrere DNS-Einträge bei Cloudflare

Pattern und Konzepte

Round Robin DNS: Vorteile

- Einfach zu implementieren
- Sticky Sessions by default
- Fallback auf eine andere IP-Adresse schützt auch bei einem Serverausfall

Pattern und Konzepte

Round Robin DNS: Nachteile

Balancing

- Nur statische Lastverteilung ist möglich
- Die Reihenfolge der IPs wird vom DNS ein Mal bestimmt, aber danach gecached
 - ▶ Verteilung kann zufällig ungleich werden, da Balancing nur unregelmäßig erfolgt
 - ▶ Neue Server erst nach gewisser Zeit gleich stark ausgelastet

Failover-Verhalten

- Vom Client kontrolliert, nicht vom Server oder DNS
 - ▶ Lange Wartezeiten bis zum Failover sind möglich

Pattern und Konzepte

Geolocation DNS

- Wie Round Robin DNS, aber unterschiedl. IP-Adressen je nach Region der Quell-IP
 - ▶ Hauptziel: reduzierte Latenz
 - ▶ Load Balancing ist sekundär

Aspekte

- Wie wichtig ist die Latenz für den Use Case?
- Wie teuer sind Standorte?
- Ändern sich die Kosten zu Stoßzeiten?

Fazit

Den Überblick behalten

Problem

In großen verteilten Systemen ist die Anzahl der Probleme, Stellschrauben und Handlungen kaum überschaubar.

- Hohe Resilienz erfordert automatische und schnelle Aktionen
- Die hohe Frequenz von Problemen und Reaktionen ist schwer verfolgbar
 - ▶ Wie kann man den Überblick behalten?

Fazit

Den Überblick behalten

Zentralisiertes Logging

Observability: Monitoring, Metriken, Tracing

Fazit

Live-Demo

Quellen I

- [1] Jason Haley. *Using the Retry pattern to make your cloud application more resilient*. 28. Juni 2018. URL: <https://azure.microsoft.com/de-de/blog/using-the-retry-pattern-to-make-your-cloud-application-more-resilient/> (besucht am 05. 01. 2025).
- [2] Fabrizio Montesi und Janine Weber. *Circuit Breakers, Discovery, and API Gateways in Microservices*. 19. Sep. 2016. URL: <http://arxiv.org/pdf/1609.05830>.
- [3] Ben Schmaus, Ben Christensen und Puneet Oberai. *Hystrix Dashboard + Turbine Stream Aggregator*. 11. Dez. 2012. URL: <https://netflixtechblog.com/hystrix-dashboard-turbine-stream-aggregator-60985a2e51df> (besucht am 15. 01. 2025).

Quellen II

- [4] Microsoft. *Retry Pattern*. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/patterns/retry> (besucht am 05. 01. 2025).
- [5] Tom Schöner u. a. „Analyse abstrakter Architekturmodelle in verteilten Systemen“. 31. Aug. 2017.
- [6] Bhavya Alankar u. a. „Experimental Setup for Investigating the Efficient Load Balancing Algorithms on Virtual Cloud“. In: *Sensors* 20.24 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20247342. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/24/7342>.

Quellen III

- [7] **bitnami by Broadcom Inc.** *Configure Elastic Load Balancing with SSL and AWS Certificate Manager for Bitnami Applications on AWS.* URL: <https://docs.bitnami.com/aws/how-to/configure-elb-ssl-aws/> (besucht am 15.01.2025).
- [8] **ClouDNS.** *What is Round-Robin DNS? Optimize Server Load.* URL: <https://www.cloudns.net/wiki/article/182/> (besucht am 15.01.2025).

Cheatsheet: Wichtige Definitionen und Konzepte

1. Grundbegriffe

Resilienz = Übergeordnetes Konzept, Fehlertoleranz + Aspekte wie Wiederherstellung, Anpassungsfähigkeit und präventive Maßnahmen

Fehlertoleranz = Fokus auf unmittelbarer Bewältigung von Fehlern während des Systembetriebs

Ziel: Störungen im laufenden Betrieb vermeiden

2. Resilienzstrategien

Redundanz: Vervielfältigung kritischer Komponenten oder Funktionen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.

-> aktive vs. passive Redundanz; Redundanzebenen!

Partitionierung: Physische Unterteilung von Daten in kleinere, logisch zusammenhängende Einheiten für Skalierbarkeit, Leistung und Flexibilität.

Skalierung: Flexible Anpassung von Ressourcen an veränderte Anforderungen.

-> vertikal vs. horizontal vs. automatisch!

3. Fehlertoleranzstrategien + Pattern

Retry-Muster: Wiederholt fehlgeschlagene Operationen, oft mit Backoff-Strategien.

Circuit-Breaker: Isoliert fehlerhafte Dienste, unterbricht Anfragen bei wiederholtem Fehler, verhindert kaskadierende Ausfälle.

-> clientseitig vs. dienstseitig vs. proxy-basiert!

Load-Balancing: Verteilung der Last auf mehrere Server zur Verbesserung von Leistung und Ausfallsicherheit.

Load-Balancing-Strategien:

- Round Robin DNS: rotierende Rückgabe von IP-Adressen
- Least Connection: Aufgabe an Dienst mit den wenigsten aktiven Netzwerkverbindungen