Fakultät für Informatik und Mathematik 07

Bachelorarbeit

über das Thema

Sinnvolle Einsatzmöglichkeiten und Umsetzungsstrategien für serverless Webanwendungen

Meaningful Capabilities and Implementation Strategies for Serverless Web Applications

Autor: Thomas Großbeck
grossbec@hm.edu

Prüfer: Prof. Dr. Ulrike Hammerschall

Abgabedatum: 09.03.19

I Kurzfassung

Das Ziel der Arbeit ist es, Unterschiede in der Entwicklung von Serverless und klassischen Webanwendungen zu betrachten. Es soll ein Leitfaden entstehen, der Entwicklern und IT-Unternehmen die Entscheidung zwischen klassischen und Serverless Anwendungen erleichtert. Dazu wird zuerst eine Einführung in die Entwicklung des Cloud Computings und insbesondere in das Themenfeld des Serverless Computing gegeben. Im nächsten Schritt werden zwei beispielhafte Anwendungen entwickelt. Zum einen eine klassische Webanwendung mit der Verwendung des Spring Frameworks im Backend und einem Javascript basiertem Frontend und zum anderen eine Serverless Webanwendung. Hierbei werden die Besonderheiten im Entwicklungsprozess von Serverless Applikationen hervorgehoben. Abschließend werden die beiden Vorgehensweisen mittels vorher festgelegter Kriterien gegenübergestellt, sodass sinnvolle Einsatzmöglichkeiten für Serverless Anwendungen abgeleitet werden können.

II Inhaltsverzeichnis

I Kurzfassung **I**

II Inhaltsverzeichnis **II**

III Abbildungsverzeichnis **III**

IV Tabellenverzeichnis **III**

V Listing-Verzeichnis **III**

VI Abkürzungsverzeichnis **III**

1 Einführung und Motivation **1**

2 Grundlagen der Serverless Architektur **3**
2.1 Historische Entwicklung des Cloud Computings 3
2.1.1 Grundlagen des Cloud Computings 6
2.1.2 Abgrenzung zu PaaS 8
2.1.3 Abgrenzung zu Microservices 9
2.2 Eigenschaften von Function-as-a-Service 11
2.3 Allgemeine Pattern für Serverless Umsetzungen 12
2.3.1 Serverless Computing Manifest 13
2.3.2 Schnittstellen zu anderen Architekturen 15

3 Entwicklung einer prototypischen Anwendung **17**
3.1 Vorgehensweise beim Vergleich der beiden Anwendungen 17
3.2 Fachliche Beschreibung der Beispiel-Anwendung 19
3.3 Implementierung der Benutzeroberfläche 20
3.4 Implementierung der klassischen Webanwendung 20
3.4.1 Architektonischer Aufbau der Applikation 20
3.4.2 Implementierung der Anwendung 23
3.4.3 Testen der Webanwendung 29
3.5 Implementierung der Serverless Webanwendung 31
3.5.1 Architektonischer Aufbau der Serverless Applikation 32
3.5.2 Implementierung der Anwendung 32
3.5.3 Testen von Serverless Anwendungen 32
3.6 Unterschiede in der Entwicklung 32
3.6.1 Implementierungsvorgehen 32
3.6.2 Testen der Anwendung 32
3.6.3 Deployment der Applikation 32
3.6.4 Wechsel zwischen Providern 32

4 Vergleich der beiden Umsetzungen **32**
4.1 Vorteile der Serverless Infrastruktur 32
4.2 Nachteile der Serverless Infrastruktur 32

4.3 Abwägung sinnvoller Einsatzmöglichkeiten 32

5 Fazit und Ausblick **32**

6 Quellenverzeichnis **33**

Anhang **I**

A Vollständige Abbildung der Bewertungskriterien **I**

III Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Anteil der Unternehmen, die Cloud Dienste nutzen [KS17] 1
Abb. 2 Operativer Gewinn von Amazon [Bra18] 2
Abb. 3 Zusammenhang Kenntnisstand und Kontroll-Level [Bü17] 4
Abb. 4 Hierarchie der Cloud Services [Kö17, S. 28] 5
Abb. 5 Historische Entwicklung des Cloud Computings 6
Abb. 6 Verantwortlichkeiten der Organisation nach [Rö17] 7
Abb. 7 Aufgabenverteilung: IaaS vs. PaaS vs. Serverless [Bü17] 9
Abb. 8 FaaS Beispiel Anwendung [Tiw16] 12
Abb. 9 Under- und Overprovisioning [A+09, S. 11] 14
Abb. 10 Zusammenhang zwischen Event-driven Computing, FaaS und Serverless [FIMS17, S. 5] 16
Abb. 11 Request Response Pattern [Swa18] 16
Abb. 12 3-Tier Architektur 21
Abb. 13 Layered Architektur nach [Ric15, S. 3] 22
Abb. 14 Beziehung zwischen User und Book 25
Abb. 15 Layered Architektur in Spring 25

IV Tabellenverzeichnis

V Listing-Verzeichnis

1 Einstiegsklasse für Spring Boot Anwendung 24
2 Repository für die Tabelle User 26
3 Beispiel BookController 27
4 Implementierung des UserDetailsService 28
5 Abfrage des authentifizierten Users 28
6 PreAuthorize an einem Endpunkt im Controller 28
7 Testfall im StatisticControllerTest 30
8 Integrationstest für eine Methode aus dem Bookservice 31

VI Abkürzungsverzeichnis

AWS Amazon Web Services

IaaS Infrastructure as a Service

PaaS Platform as a Service

FaaS Function as a Service

NIST National Institute of Standards and Technology

BaaS Backend as a Service

SaaS Software as a Service

SDK Software Development Kit

ORM Object-relational mapping

JPA Java Persistence API

DI Dependency Injection

1 Einführung und Motivation

Durch das enorme Wachstum des Internets werden immer mehr Dienstleistungen über das Netz angeboten [Har02, S. 14]. Viele Dienste sind so als Webanwendung direkt zu erreichen und einfach zu bedienen. Mit der Einführung des Cloud Computings sind schließlich auch Rechenleistung und Serverkapazitäten über das Internet zur Verfügung gestellt worden.

Als eines der aktuell am schnellsten wachsenden Themenfeldern im Informatiksektor hat Cloud Computing eine rasante Entwicklung genommen. So ist beispielsweise der Anteil der deutschen Unternehmen, die Cloud Dienste nutzen, in den letzten Jahren stetig gestiegen. Mittlerweile sind es bereits zwei Drittel der Unternehmen. (siehe Abb. 1)

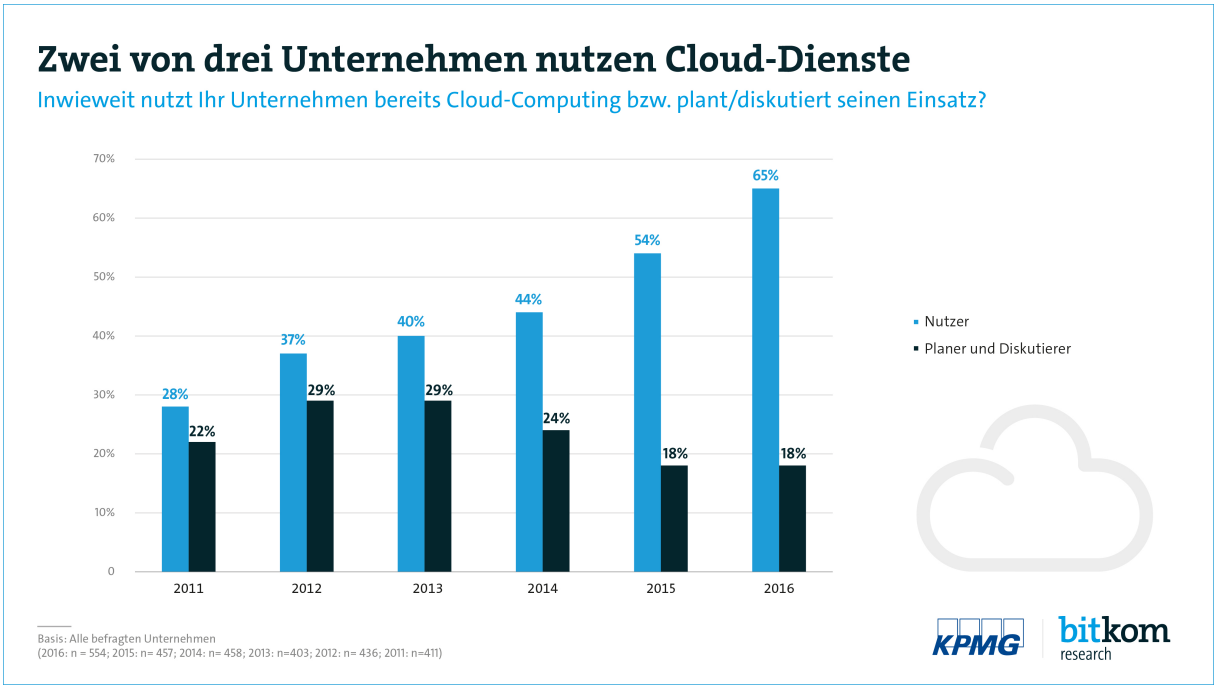

Abbildung 1: Anteil der Unternehmen, die Cloud Dienste nutzen [KS17]

Auf der Seite der Anbieter von Cloud Diensten ist ebenfalls ein großes Wachstum zu erkennen. Amazon als einer der Marktführer auf diesem Gebiet hat zum Beispiel im zweiten Quartal des Jahres 2018 55% des operativen Gewinns durch den Cloud Dienst Amazon Web Services (AWS) erzielt (siehe Abb. 2).

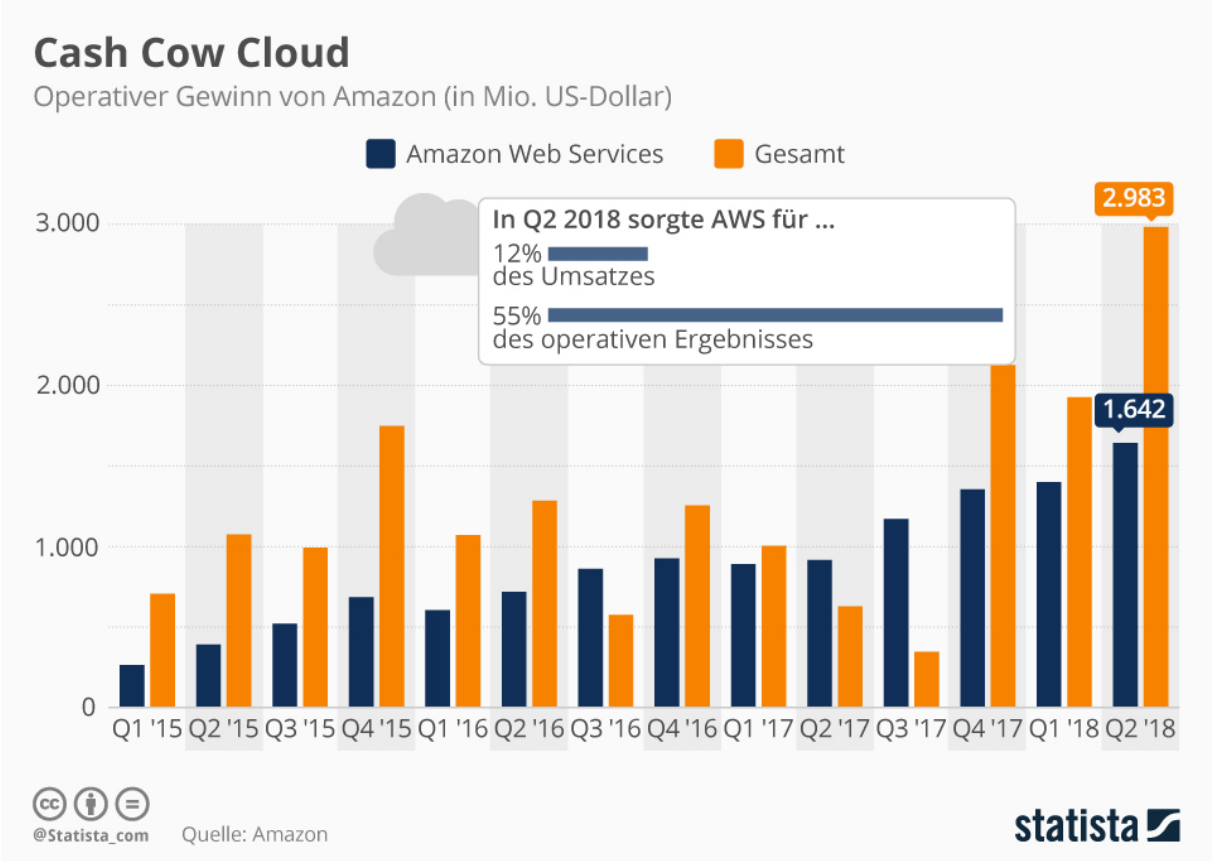

Abbildung 2: Operativer Gewinn von Amazon [Bra18]

Die neueste Stufe in der Entwicklung des Cloud Computings ist das Serverless Computing.

> *„Natürlich benötigen wir nach wie vor Server - wir kommen bloß nicht mehr mit ihnen in Berührung, weder physisch (Hardware) noch logisch (virtualisierte Serverinstanzen). [Kö17, S. 15]“*

Obwohl der Name einen serverlosen Betrieb suggeriert, müssen selbstverständlich Server bereitgestellt werden. Dies übernimmt, wie bei anderen Cloud Technologien auch üblich, der Plattform Anbieter. Allerdings muss sich nicht mehr um die Verwaltung der Server gekümmert werden. [Kö17, S. 15] Dies führt dazu, dass Serverless als sehr nützliches und mächtiges Werkzeug dienen kann. Die Tätigkeiten können dabei vom Prototyping und kleineren Hilfsaufgaben bis hin zur Entwicklung kompletter Anwendungen gehen. [Kö17, S. 11]

Da der Bereich Serverless erst vor wenigen Jahren entstanden ist und sich immer noch weiterentwickelt, gibt es bisher keine allzu große Verbreitung von Standards. Das heißt, es gibt wenige *Best Practice* Anleitungen und auch unterstützende Tools sind oftmals noch unausgereift. Somit ist es schwer für Unternehmen abzuwägen, ob es sinnvoll ist auf Serverless umzustellen bzw. Neuentwicklungen serverless umzusetzen.

Das Ziel der Arbeit ist es daher, die Unterschiede in der Entwicklung einer Serverless und einer klassischen Webanwendung anhand festgelegter Kriterien zu vergleichen, sodass hieraus sinnvolle Einsatzmöglichkeiten für Serverless Webanwendungen abgeleitet werden können, um die Vorteile des Serverless Computings ideal auszunutzen.

Um das Gebiet *Cloud Computing* besser kennenzulernen, wird zum Beginn der Arbeit die historische Entwicklung sowie Grundlagen des Themenfelds beschrieben (Kapitel 2.1). Ebenso werden Eigenschaften der Serverless Architektur erläutert (Kapitel 2.2 und Kapitel 2.3).

Im nächsten Schritt wird die prototypische Webanwendung in zweifacher Ausführung implementiert. Einmal als klassische Variante mit Hilfe des Spring Frameworks im Backend und zum anderen als Serverless Webapplikation. Hierzu werden zuerst die Kriterien sowie das Vorgehen zum Vergleich der beiden Anwendungen festgelegt (Kapitel 3.1). Nachdem die klassische Implementierung beschrieben wurde (Kapitel 3.4), wird die Serverless Umsetzung tiefer gehend betrachtet, um dem Leser einen umfangreichen Einblick in die neue Technologie zu ermöglichen (Kapitel 3.5). Abschließend werden die beiden Webanwendungen gegenüber gestellt und mittels der vorher erarbeiteten Kriterien Unterschiede in der Entwicklung herausgearbeitet (Kapitel 3.6).

Zuletzt werden anhand der Unterschiede Vor- und Nachteile einer Serverless Infrastruktur dargelegt, sodass letztendlich sinnvolle Einsatzmöglichkeiten für Serverless Webanwendungen benannt werden können (Kapitel 4).

2 Grundlagen der Serverless Architektur

2.1 Historische Entwicklung des Cloud Computings

Die Evolution des Cloud Computings begann in den sechziger Jahren. Es wurde das Konzept entwickelt Rechenleistung über das Internet anzubieten. John McCarthy beschrieb das Ganze im Jahr 1961 folgendermaßen. [Gar99, S. 1]

> *„If computers of the kind I have advocated become the computers of the future, then computing may someday be organized as a public utility just as a telephone system is a public utility. [...] The computer utility could become the basis of a new and important industry.“*

McCarthy hatte also die Vision Computerkapazitäten als öffentliche Dienstleistung, wie beispielsweise das Telefon, anzubieten. Der Nutzer soll sich dabei nicht mehr selber um die Bereitstellung der Rechenleistung kümmern müssen, sondern die Ressourcen sind über das Internet verfügbar. Es wird je nach Nutzung verbrauchsorientiert abgerechnet.

Vor allen Dingen durch das Wachstum des Internets in den 1990er Jahren bekam die Entwicklung von Webtechnologien noch einmal einen Schub. Anfangs übernahmen traditionelle Rechenzentren das Hosting der Webseiten und Anwendungen. Hiermit einhergehend war allerdings eine limitierte Elastizität der Systeme. Skalierbarkeit konnte beispielsweise nur durch das Hinzufügen neuer Hardware erlangt werden. Neben der Hardware und dem Application Stack war der Entwickler außerdem für das Betriebssystem, die Daten, den Speicher und die Vernetzung seiner Applikation verantwortlich. [Inc18, S. 6]

Durch das Voranschreiten der Cloud-Technologien konnten immer mehr Teile des Entwicklungsprozesses abstrahiert werden, sodass sich der Verantwortlichkeitsbereich und auch das Anforderungsprofil an den Entwickler verschoben hat (siehe Abb. 3).

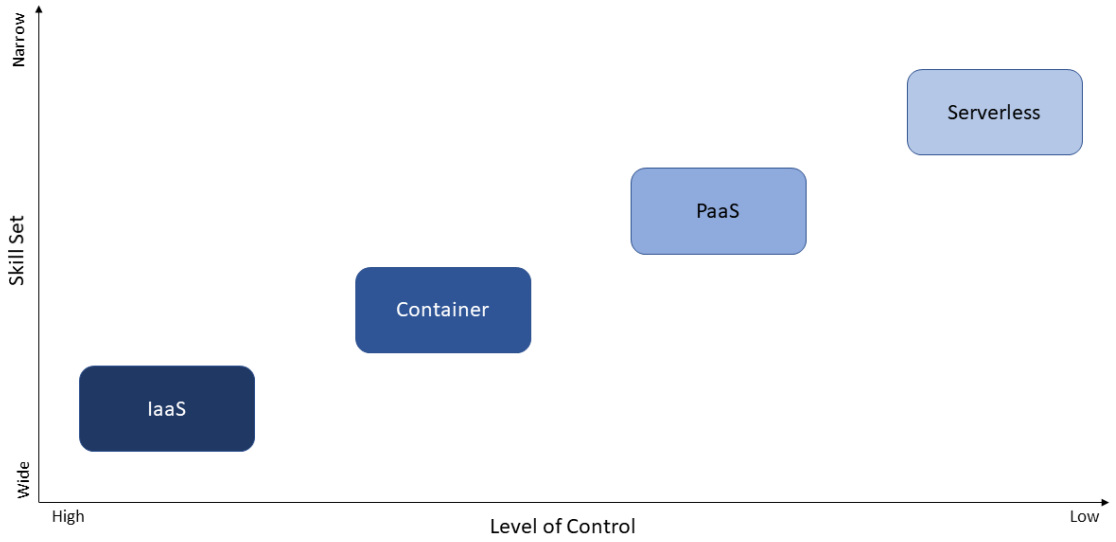

Abbildung 3: Zusammenhang Kenntnisstand und Kontroll-Level [Bü17]

Im ersten Schritt werden hierzu häufig Infrastructure as a Service (IaaS) Plattformen verwendet. Diese wurden für eine breite Masse verfügbar, als die ersten Anbieter in den frühen 2000er Jahren damit anfingen Software und Infrastruktur für Kunden bereitzustellen. Amazon beispielsweise veröffentlichte seine eigene Infrastruktur, die darauf ausgelegt war die Anforderungen an Skalierbarkeit, Verfügbarkeit und Performance abzudecken, und machte sie so 2006 als AWS für seine Kunden verfügbar. [RPMP17]

Ein weiterer Schritt in der Abstrahierung konnte durch die Einführung von Platform as a Service (PaaS) vollzogen werden. PaaS sorgt dafür, dass der Entwickler sich nur noch um die Anwendung und die Daten kümmern muss. Damit einhergehend kann eine hohe

Skalierbarkeit und Verfügbarkeit der Anwendung erreicht werden.

Auf der Virtualisierungsebene aufsetzend kamen schließlich noch Container hinzu. Diese sorgen beispielsweise für einen geringeren Ressourcenverbrauch und schnellere Bootzeiten. Bei PaaS werden Container zur Verwaltung und Orchestrierung der Anwendung verwendet. Es wird also auf die Kapselung einzelner wiederverwendbarer Funktionalitäten als Service geachtet. Dieses Schema erinnert stark an Microservices. Die genauere Abgrenzung zu Microservices wird im weiteren Verlauf der Arbeit behandelt. [Inc18, S. 6-7]

Als bisher letzter Schritt dieser Evolution entstand das Serverless Computing. Dabei werden zustandslose Funktionen in kurzlebigen Containern ausgeführt. Dies führt dazu, dass der Entwickler letztendlich nur noch für den Anwendungscode zuständig ist. Er unterteilt die Logik anhand des Function as a Service (FaaS) Paradigmas in kleine für sich selbstständige Funktionen. [Inc18, S. 7]

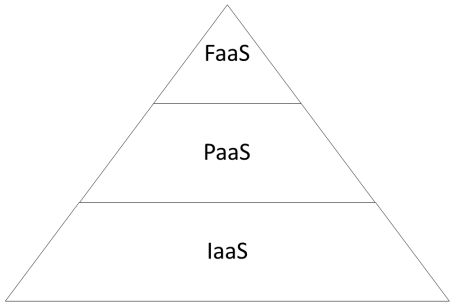

Abbildung 4: Hierarchie der Cloud Services [Kö17, S. 28]

2014 tat sich Amazon dann als Vorreiter für das Serverless Computing hervor und brachte AWS Lambda auf den Markt. Diese Plattform ermöglicht dem Nutzer Serverless Anwendungen zu betreiben. 2016 zogen Microsoft mit *Azure Function* und Google mit *Cloud Function* nach. [RPMP17]

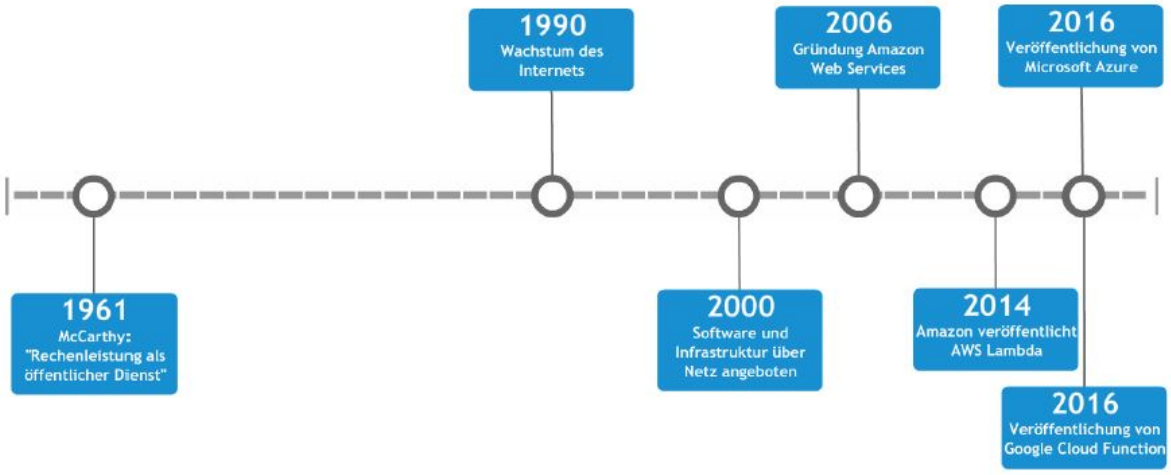

Abbildung 5: Historische Entwicklung des Cloud Computings

2.1.1 Grundlagen des Cloud Computings

„Run code, not Server [Rö17]“

Dies kann als eine der Leitlinien des Cloud Computings angesehen werden. Cloud-Angebote sollen den Entwickler entlasten, sodass die Anwendungsentwicklung mehr in den Fokus gerückt wird. Das National Institute of Standards and Technology (NIST) definiert Cloud Computing folgendermaßen. [MG11]

> *„Cloud computing is a model for enabling ubiquitous, convenient, on-demand network access to a shared pool of configurable computing resources (e.g., networks, servers, storage, applications, and services) that can be rapidly provisioned and released with minimal management effort or service provider interaction.“*

Der Anwender kann also über das Internet selbstständig Ressourcen anfordern, ohne dass beim Anbieter hierfür ein Mitarbeiter eingesetzt werden muss. Der Kunde hat dabei allerdings keinen Einfluss auf die Zuordnung der Kapazitäten. Freie Ressourcen werden auch nicht für einen bestimmten Kunden vorgehalten. Dadurch kann der Anbieter schnell auf einen geänderten Bedarf reagieren und für den Anwender scheint es, als ob er unbegrenzte Kapazitäten zur Verfügung hat.

Zur Verwendung dieses Angebots stehen dem Nutzer verschieden Out-of-the-Box Dienste in unterschiedlichen Abstufungen zur Verfügung (siehe Abb. 6). Dies wären zum einen das IaaS Modell, bei dem einzelne Infrastrukturkomponenten wie Speicher, Netzwerkleistungen und Hardware durch virtuelle Maschinen verwaltet werden. Skalierung kann so zum Beispiel einfach durch allokieren weiterer Ressourcen in der virtuellen Maschinen erreicht

werden. [Sti17, S. 3]

Zum anderen das PaaS Modell. Dabei wird dem Entwickler der Softwarestack bereitgestellt und ihm werden Aufgaben wie Monitoring, Skalierung, Load Balancing und Server Restarts abgenommen. Ein typisches Beispiel hierfür ist Heroku. Ein Webservice bei dem der Nutzer seine Anwendung bereitstellen und konfigurieren kann. [Sti17, S. 3]

Ebenfalls zu den Diensten gehört Backend as a Service (BaaS). Dieses Modell bietet modulare Services, die bereits eine standardisierte Geschäftslogik mitbringen, sodass lediglich anwendungsspezifische Logik vom Entwickler implementiert werden muss. Die einzelnen Services können dann zu einer komplexen Softwareanwendung zusammengefügt werden. [Rö17]

Die größte Abstraktion bietet SaaS. Hierbei wird dem Kunden eine konkrete Software zur Verfügung gestellt, sodass dieser nur noch als Anwender agiert. Beispiele dafür sind Dropbox und GitHub. [Sti17, S. 3]

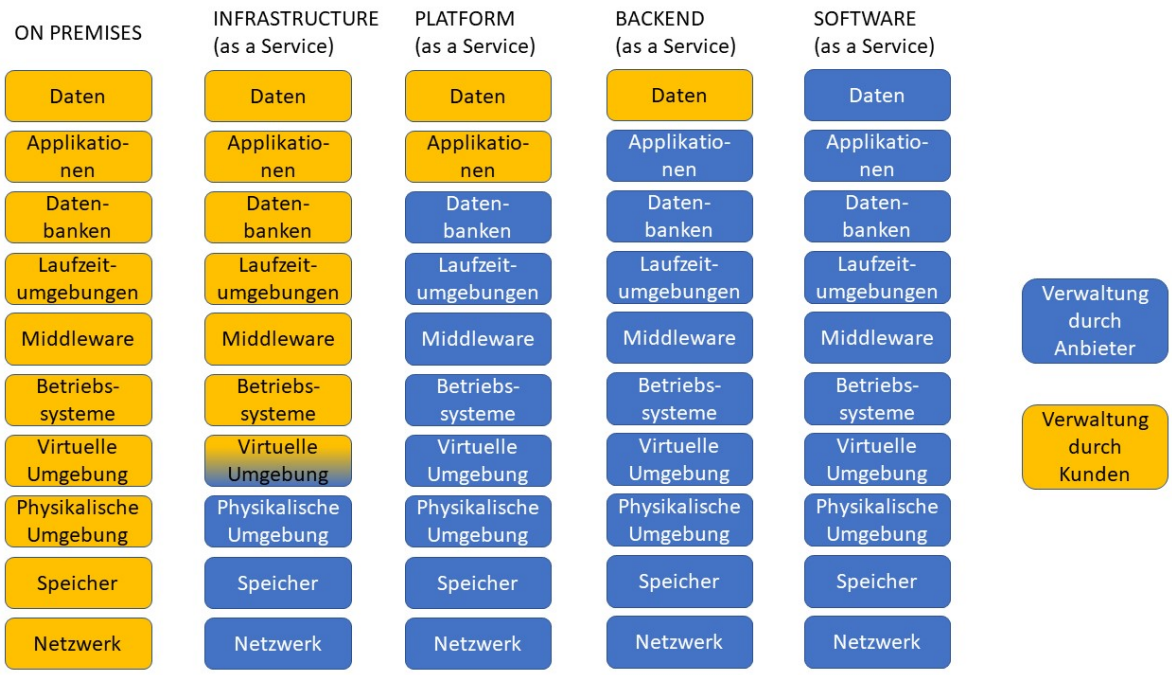

Abbildung 6: Verantwortlichkeiten der Organisation nach [Rö17]

Oftmals nutzen PaaS Anbieter ein IaaS Angebot und zahlen dafür. Nach dem gleichen Prinzip bauen SaaS Anbieter oft auf einem PaaS Angebot auf. So betreibt Heroku zum Beispiel seine Services auf Amazon Cloud Plattformen [Her18]. Ebenso ist es möglich eine Infrastruktur durch einen Mix der verschiedenen Modelle zusammenzustellen.

Letztendlich ist alles darauf ausgelegt, dass sich im Entwicklungs- und operationalen Auf-

wand so viel wie möglich einsparen lässt. Diese Weiterentwicklung wurde zum Beispiel in der Automobilindustrie bereits vollzogen. Dabei war es das Ziel die Fertigungstiefe, das heißt die Anzahl der eigenständig erbrachten Teilleistungen, zu reduzieren [Dja02, S. 8]. Nun findet diese Entwicklung auch Einzug in den Informatiksektor.

Ebenfalls von Bedeutung ist, dass die Anwendung automatisch skaliert und sich so an eine wechselnde Beanspruchung anpassen kann. Außerdem werden hohe Initialkosten für eine entsprechende Serverlandschaft bei einem Entwicklungsprojekt für den Nutzer vermieden und auch die Betriebskosten können gesenkt werden. Dem liegt das Pay-per-use-Modell zugrunde. Der Kunde zahlt aufwandsbasiert. Das heißt, er zahlt nur für die verbrauchte Rechenzeit. Leerlaufzeiten werden nicht mit einberechnet. [Rö17]

Da Cloud-Dienste dem Entwickler viele Aufgaben abnehmen und erleichtern, sodass sich die Verantwortlichkeiten für den Entwickler verschieben, ist dieser nun beispielsweise nicht mehr für den Betrieb sowie die Bereitstellung der Serverinfrastruktur zuständig. Dies führt allerdings auch dazu, dass ein gewisses Maß an Kontrolle und Entscheidungsfreiheit verloren geht.

2.1.2 Abgrenzung zu PaaS

Prinzipiell klingen PaaS und Serverless Computing aufgrund des übereinstimmenden Abstrahierungsgrades sehr ähnlich. Der Entwickler muss sich nicht mehr direkt mit der Hardware auseinandersetzen. Dies übernimmt der Cloud-Service in Form einer Blackbox, sodass lediglich der Code hochgeladen werden muss.

Jedoch gibt es auch einige grundlegenden Unterschiede. So muss der Entwickler bei einer PaaS Anwendung durch Interaktion mit der API oder Oberfläche des Anbieters eigenständig für Skalierbarkeit und Ausfallsicherheit sorgen. Bei der Serverless Infrastruktur übernimmt das Kapazitätsmanagement der Cloud-Service (siehe Abb. 7). Es gibt zwar auch PaaS Plattformen, die bereits Funktionen für das Konfigurationsmanagement bereitstellen, oft sind diese jedoch Anbieter-spezifisch, sodass der Programmierer auf weitere externe Tools zurückgreifen muss. [Bü17]

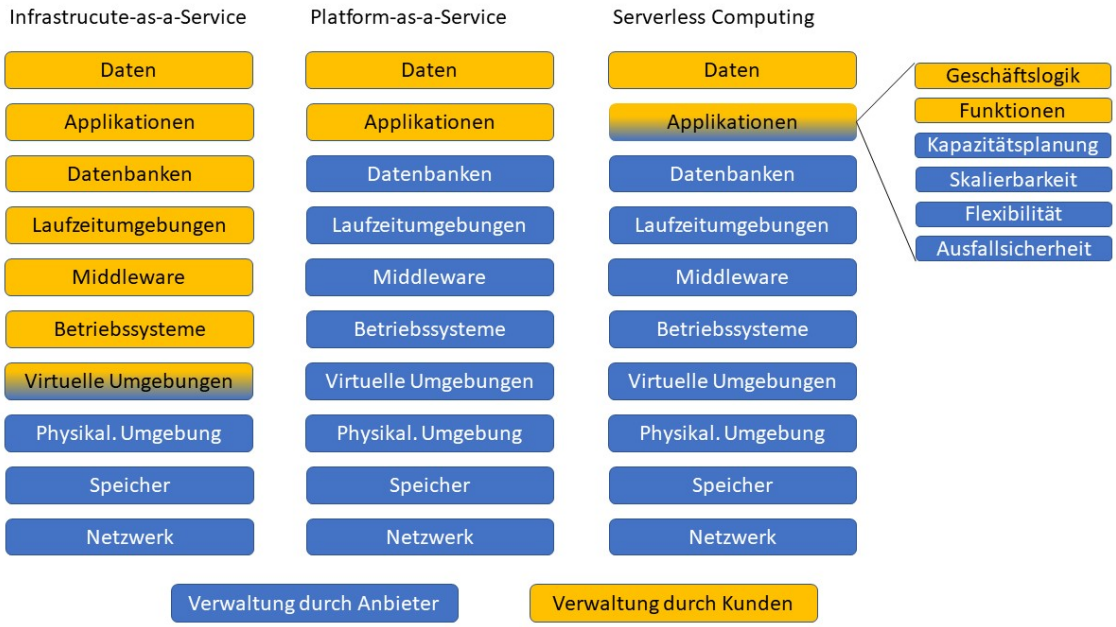

Abbildung 7: Aufgabenverteilung: IaaS vs. PaaS vs. Serverless [Bü17]

Ein weiterer Unterschied ist, dass PaaS für lange Laufzeiten konstruiert ist. Das heißt die PaaS Anwendung läuft immer. Bei Serverless hingegen wird die ganze Applikation als Reaktion auf ein Event gestartet und wieder beendet, sodass keine Ressourcen mehr verbraucht werden, wenn kein Request eintrifft. [Ash17]

Aktuell wird PaaS hauptsächlich wegen der sehr guten Toolunterstützung genutzt. Hier hat Serverless Computing den Nachteil, dass es durch den geringen Zeitraum seit der Entstehung noch nicht so ausgereift ist. [Rob18]

Final stechen als Schlüsselunterschiede zwei Punkte heraus. Dies ist zum einen wie oben bereits erwähnt die Skalierbarkeit. Sie ist zwar auch bei PaaS Applikationen erreichbar, allerdings bei weitem nicht so hochwertig und komfortabel. Zum anderen die Kosteneffizienz, da der Nutzer nicht mehr für Leerlaufzeiten aufkommen muss. Adrian Cockcroft von AWS bringt das folgendermaßen auf den Punkt. [Rob18]

> *„If your PaaS can efficiently start instances in 20ms that run for half a second, then call it serverless.“*

2.1.3 Abgrenzung zu Microservices

Bei der Entwicklung einer Anwendung kann diese in verschieden große Komponenten aufgeteilt werden. Das genaue Vorgehen wird dazu im Voraus festgelegt. Entscheidet sich das Entwicklerteam für eine große Einheit, wird von einer Monolithischen Architektur

gesprochen. Hierbei wird die komplette Applikation als ein Paket ausgeliefert. Dies hat den Nachteil, dass bei einem Problem die ganze Anwendung ausgetauscht werden muss. Auch die Einführung neuer Funktionalitäten braucht eine lange Planungsphase. [Inc18, S. 9]

Auf der anderen Seite steht die Microservice Architektur. Die Anwendung wird in kleine Services, die für sich eigenständige Funktionalitäten abbilden, aufgeteilt. Teams können nun unabhängig voneinander an einzelnen Services arbeiten. Auch der Austausch oder die Erweiterung einzelner Module erfolgt wesentlich reibungsloser. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Anonymität zwischen den Modulen gewahrt wird. Ansonsten kann auch bei Microservices die Einfachheit verloren gehen. Durch die Aufteilung in verschiedene Komponenten erreichen Microservice Anwendungen eine hohe Skalierbarkeit. [Bac18]

Das Konzept die Funktionalität in kleine Einheiten aufzuteilen, findet sich auch im Serverless Computing wieder. Im Gegensatz zur Microservices ist Serverless viel feingranularer. Bei Microservices wird oft das Domain-Driven Design herangezogen, um eine komplexe Domäne in sogenannte *Bounded Contexts* zu unterteilen. Diese Kontextgrenzen werden dann genutzt, damit die fachlichen Aspekte in verschiedene individuellen Services aufgeteilt werden können. [FL14] In diesem Zusammenhang wird auch oft von serviceorientierter Architektur gesprochen. Dahingegen stellt eine Serverless Funktion nicht einen kompletten Service dar, sondern eine einzelne Funktionalität. So eine Funktion kann beispielsweise gleichermaßen auch einen Event Handler darstellen. Daher handelt es sich hierbei um eine ereignisgesteuerte Architektur. [Tur18]

Ebenso ist es bei Serverless Anwendungen nicht notwendig die unterliegende Infrastruktur zur verwalten. Das heißt, dass lediglich die Geschäftslogik als Funktion implementiert werden muss. Weitere Komponenten wie beispielsweise ein Controller müssen nicht selbstständig entwickelt werden. Außerdem bietet der Cloud-Provider bereits eine automatische Skalierung als Reaktion auf sich ändernde Last an. Also auch hier werden dem Entwickler Aufgaben abgenommen. [Inc18, S. 9]

> *„The focus of application development changed from being infrastructure-centric to being code-centric. [Inc18, S. 10]“*

Im Vergleich zu Microservices rückt bei der Implementierung von Serverless Anwendungen die Funktionalität der Anwendung in den Fokus und es muss keine Rücksicht mehr auf die Infrastruktur genommen werden.

2.2 Eigenschaften von Function-as-a-Service

Wenn von Serverless Computing gesprochen wird, ist oftmals auch von FaaS die Rede. Der Serverless Provider stellt eine FaaS Plattform zur Verfügung. Die Infrastruktur des Anbieters kann dabei als BaaS gesehen werden. Eine Serverless Architektur stellt also eine Kombination aus FaaS und BaaS dar. [Rob18]

> *„FaaS entails running back-end code without the task of developing and deploying your own server applications and server systems. [Sti17, S. 3]“*

Der Fokus kann somit vollkommen auf die Geschäftslogik gelegt werden. Jede Funktionalität wird dabei in einer eigenen Function umgesetzt. [Ash17] Die Programmiersprache, in der die Anforderungen implementiert werden, hängt vom Anbieter der Plattform ab. Die geläufigen Sprachen, wie zum Beispiel Java, Python oder Javascript, werden allerdings von allen großen Providern unterstützt. [Tiw16] Jede Function stellt eine unabhängige und wiederverwendbare Einheit dar. Durch sogenannte Events kann eine Function angesprochen und aufgerufen werden. Hinter einem Event kann sich möglicherweise ein File-Upload oder ein HTTP-Request verbergen. Die dabei verwendeten Komponenten, wie zum Beispiel ein Datenbankservice, werden Ressourcen genannt. [RPMP17]

Die Functions sind alle zustandslos. Dadurch lassen sich in kürzester Zeit viele Kopien derselben Funktionalität starten, sodass eine hohe Skalierbarkeit erreicht werden kann. Alle benötigten Zusammenhänge müssen extern gespeichert und verwaltet werden, da sich prinzipiell der Zustand jeder Instanz vom Stand des vorherigen Aufrufs unterscheiden kann. Auch wenn es sich um dieselbe Function handelt. [Bü17]

Der Aufruf einer Function kann entweder synchron über das Request-/Response-Modell oder asynchron über Events erfolgen. Da der Code in kurzlebigen Containern ausgeführt wird, werden asynchrone Aufrufe bevorzugt. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Function bei verschachtelten Aufrufen nicht zu lange läuft. Bedingt durch die automatische Skalierung eignet sich FaaS somit besonders gut für Methoden mit einem schwankendem Lastverhalten. [Rö17]

Auch über die Verfügbarkeit muss sich der Nutzer keine Gedanken mehr machen, da der Dienstleister für die komplette Laufzeitumgebung verantwortlich ist. [Kö17, S. 28]

> *„Eine fehlerhafte Konfiguration hinsichtlich Über- oder Unterprovisionierung von (Rechen-, Speicher-, Netzwerk etc.) Kapazitäten können somit nicht passieren. [Kö17, S. 29]“*

Das heißt, dass alle Ressourcen mit bestmöglicher Effizienz genutzt werden. Die Architektur einer beispielhaften FaaS Anwendung könnte somit folgendermaßen ausschauen (siehe

Abb. 8). Hierbei nimmt das API Gateway die Anfragen des Clients entgegen und ruft die dazugehörigen Functions auf, die jeweils an einen eigenen Speicher angebunden sind. Neben der Möglichkeit HTTP-Requests über das API Gateway an die einzelnen Functions weiterzuleiten, kann auch das Hochladen einer Datei in den sogenannten *Blob Store* eine Function aufwecken. Ein Anwendungsfall in der hier aufgezeigten Beispiel-Anwendung könnte nun wie folgt ablaufen:
Ein Nutzer lädt in der Anwendung ein neues Profilbild hoch. Das API Gateway leitet den Request an die *Upload Function* weiter. Diese speichert das Bild im *Blob Store*, wodurch der Vorgang abgeschlossen sein könnte. Jedoch wird durch das Speichern in der Datenbank ein weiteres Event ausgelöst, das die *Activity Function* auslöst. Diese Function könnte nun zum Beispiel genutzt werden, um das neue Profilbild zu bearbeiten, sich die Bearbeitung in der zugehörigen Datenbank zu merken und es an den Browser zurück zu schicken. Der Vorteil dieses Vorgehens ist es, dass der Nutzer nach dem Hochladen des Bildes eine Antwort erhält und das System nicht bis zum Abschluss der Bearbeitung blockiert ist. Nebst der Möglichkeit die *Activity Function* asynchron über ein Event aufzurufen, kann sie auch über das API-Gateway erreicht werden. So könnte ein bereits bearbeitetes Bild noch einmal angepasst werden.

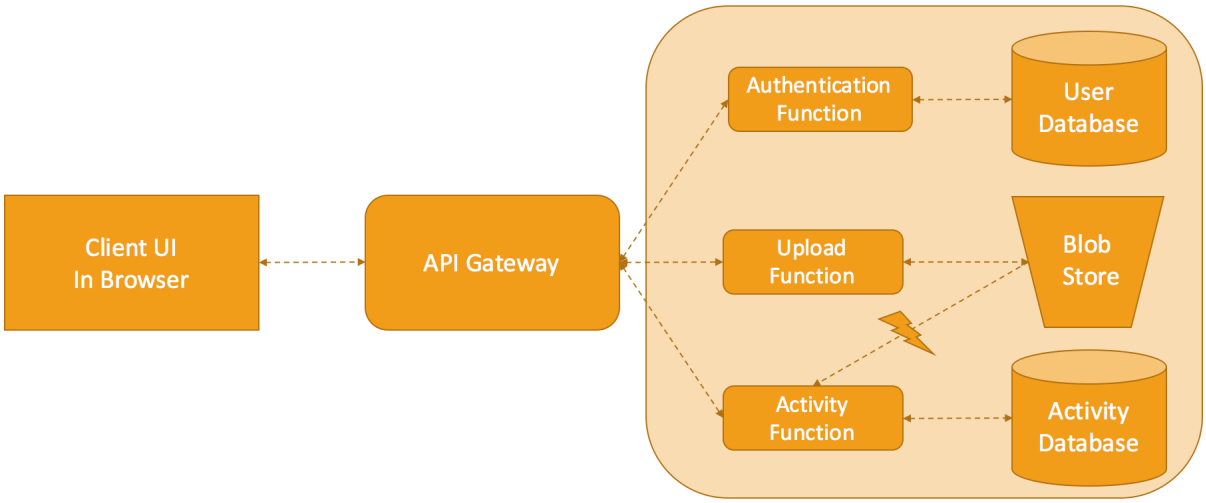

Abbildung 8: FaaS Beispiel Anwendung [Tiw16]

2.3 Allgemeine Pattern für Serverless Umsetzungen

Sogenannte Pattern dienen dazu wiederkehrende Probleme bestmöglich und einheitlich zu lösen. Sie geben ein Muster vor, dass zur Lösung eines spezifischen Problems herangezogen werden kann. Als Richtschnur zur Bearbeitung von Herausforderungen im Serverless Umfeld kann beispielsweise das *Serverless Computing Manifest* verwendet werden.

2.3.1 Serverless Computing Manifest

Viele Grundsätze im Softwaresektor werden durch Manifeste festgehalten. Eines der bekanntesten Manifeste ist das *Agile Manifest*, das die agile Softwareentwicklung hervorbrachte. So ist es auch kaum verwunderlich, dass es im Bereich des Serverless Computing ebenfalls ein Manifest gibt. Das *Serverless Computing Manifesto*. [Kö17, S. 19]

Die Herkunft des Manifests kann nicht eindeutig geklärt werden. Niko Köbler äußert sich hierzu in seinem Buch *Serverless Computing in der AWS Cloud* folgendermaßen. [Kö17, S. 20]

> *„Allerdings findet sich hierfür kein dedizierter und gesicherter Ursprung, das Manifest wird aber auf mehreren Webseiten und Konferenzen einheitlich zitiert. Meine Recherche ergab eine erstmalige Nennung des Manifests und Aufzählung der Inhalte im April 2016 auf dem AWS Summit in Chicago in einer Präsentation namens "Getting Started with AWS Lambda and the Serverless Cloud"von Dr. Tim Wagner, General Manager für AWS Lambda and Amazon API Gateway.“*

Das Manifest besteht aus acht Leitsätzen, die nun genauer betrachtet werden. Einige Prinzipien wurden bereits in vorherigen Kapiteln angeschnitten oder erläutert.

Functions are the unit of deployment and scaling. Functions stellen den Kern einer Serverless Anwendung dar. Eine Function ist nur für eine spezielle Aufgabe verantwortlich und auch die Skalierung erfolgt bei Serverless Applikationen funktionsbasiert. [Kö17, S. 20]

No machines, VMs, or containers visible in the programming model. Für den Nutzer der Plattform sind die Bestandteile der Serverinfrastruktur nicht sichtbar. Er kann mit der Implementierung nicht in die Virtualisierung oder Containerisierung eingreifen. Die Interaktion mit den Services des Providers erfolgt über bereitgestellte Software Development Kits (SDKs). [Kö17, S. 21]

Permanent storage lives elsewhere. Serverless Functions sind zustandslos. Das heißt, dass die selbe Function beim mehrmaligen Ausführen in verschiedenen Umgebungen laufen kann, sodass der Nutzer nicht mehr auf vorherige Daten zurückgreifen kann. Zukünftig benötigte Daten müssen daher immer über einen anderen Dienst persistiert werden. [Kö17, S. 21]

Scale per request. Users cannot over- or under-provision capacity. Die Skalierung erfolgt völlig automatisch durch den Serviceanbieter. Dieser sorgt dafür, dass die Functions parallel und unabhängig voneinander ausgeführt werden können, sodass der Kunde nicht mit diesem Aufgabenfeld in Berührung kommt. Hierzu cachen eini-

ge Anbieter die Containerumgebung, falls sie merken, dass eine Funktion in einem kurzen Zeitraum öfters aufgerufen wird, um eine bessere Performanz zu erreichen. Hierauf kann sich der User jedoch nicht verlassen. [Kö17, S. 21]

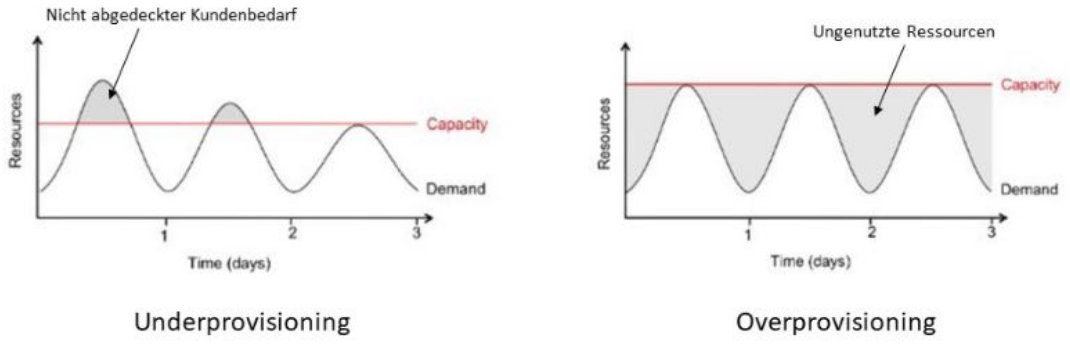

Abbildung 9: Under- und Overprovisioning [A+09, S. 11]

Im linken Diagramm ist die Auswirkung von *Underprovisioning* zu sehen. Hierbei kann es vorkommen, dass der Bedarf die gegebene Kapazität übersteigt und somit nicht mehr genug Ressourcen für alle Kunden bereitgestellt werden können. Dies führt zu unzufriedenen Nutzern und kostet schlussendlich dem Unternehmen Kunden. Bei *Overprovisioning* auf der rechten Seite hingegen ist die Kapazität gleich dem maximalen Bedarf. Hierdurch werden jedoch zu einem Großteil der Zeit mehr Ressourcen bereitgestellt als eigentlich benötigt, sodass unnötige Ausgaben entstehen.

Never pay for idle(no cold servers/containers or their cost). Der Kunde zahlt nur für die tatsächlich genutzte Rechenzeit. Die Bereitstellung der Ressourcen fällt dabei nicht ins Gewicht. Um dies dem Nutzer zu ermöglichen, sollten auf Seiten der Anbieter alle Ressourcen optimal ausgenutzt werden. So werden die Ressourcen keinem bestimmten Kunden zugeordnet, sondern stehen für viele Nutzer bereit. Je nach Bedarf können dem Anwender dynamisch benötigte Ressourcen aus einem großen Pool zugeteilt werden. Sobald die Function durchgelaufen ist, werden die Ressourcen wieder freigegeben und können von jedem anderen verwendet werden. [Kö17, S. 22]

Implicitly fault-tolerant because functions can run anywhere. Da für den Nutzer nicht ersichtlich ist wo seine Functions beim Provider ausgeführt werden, darf in den Implementierungen auch keine Abhängigkeit diesbezüglich bestehen. Dies führt zu einer impliziten Fehlertoleranz, da der Betreiber keinen Einschränkungen unterliegt, in welchen Bereichen seiner Infrastruktur er bestimmte Functions ausführen darf.

[Kö17, S. 22]

BYOC - Bring Your Own Code. Eine Function muss alle benötigten Abhängigkeiten bereits enthalten. Der Anbieter stellt lediglich eine Ablaufumgebung zur Verfügung, sodass zur Laufzeit keine weiteren Bibliotheken nachgeladen werden können. [Kö17, S. 23]

Metrics and logging are a universal right. Da für den Nutzer die Ausführung serverloser Services transparent abläuft und auch keinerlei Zustände in der Serverless Anwendung gespeichert werden, ist es für ihn nicht möglich Informationen über die Ausführung zu erhalten. Damit der User trotzdem Details seiner Anwendung zur Fehlersuche oder Analyse erhält, muss der Serviceprovider diese Möglichkeiten bereitstellen. So bietet er beispielsweise Logs zu einzelnen Funktionsaufrufen an. Des Weiteren werden Metriken, wie zum Beispiel Ausführungsdauer, CPU-Verwendung und Speicherallokation, zur Analyse der Applikation zur Verfügung gestellt. Das Loggen der Funktionsinhalte muss durch die Function selbst übernommen werden. [Kö17, S. 23]

Anhand des Manifestes ist es schon zu erkennen, dass sich Serverless Computing nicht einfach in einem Pattern beschreiben lässt. Es spielen viele Muster zusammen. So enthält das Manifest beispielsweise neben wichtigen Prinzipien auch Pattern, die bei der Umsetzung von Serverless Anwendungen angewendet werden können. Neben dem *Serverless Computing Manifest* gibt es noch weitere Richtlinien, die bei der Umsetzung von Serverless Anwendungen in Betracht gezogen werden können beziehungsweise sich in einigen Punkten des Manifestes widerspiegeln. Einige werden nun im Folgenden genauer betrachtet, um bereits bekannte Pattern besser in den Serverless Kontext einordnen zu können.

2.3.2 Schnittstellen zu anderen Architekturen

Hierzu gehört zum Beispiel das *Microservice Pattern*. Es harmoniert hervorragend mit dem Pattern *Functions are the unit of deployment and scaling*. Jede Funktionalität wird in einer eigenen Function isoliert. Dies führt dazu, dass verschiedene Komponenten einzeln und unabhängig voneinander ausgebracht bzw. bearbeitet werden können, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Außerdem wird es einfach die Anwendung zu debuggen, da jede Function nur ein bestimmtes Event bearbeitet und somit die Aufrufe größtenteils vorhersehbar sind. Nachteilig hieran ist jedoch die Masse an Functions, die verwaltet werden müssen. [Hef16]

Der Aufruf der somit erstellten Functions führt zum nächsten Muster für Serverless Umsetzungen. Die ereignisgesteuerte Architektur sorgt dafür, dass die Functions durch Events

aufgerufen werden können. Dieses Architekturmuster wird natürlich nicht nur bei Serverless Anwendungen verwendet, sondern kann auch in anderen Umfeldern zum Einsatz kommen. Es handelt sich bei Serverless Computing also lediglich um einen kleinen Bestandteil des *Event-driven computings* (siehe Abb. 10). [Boy17]

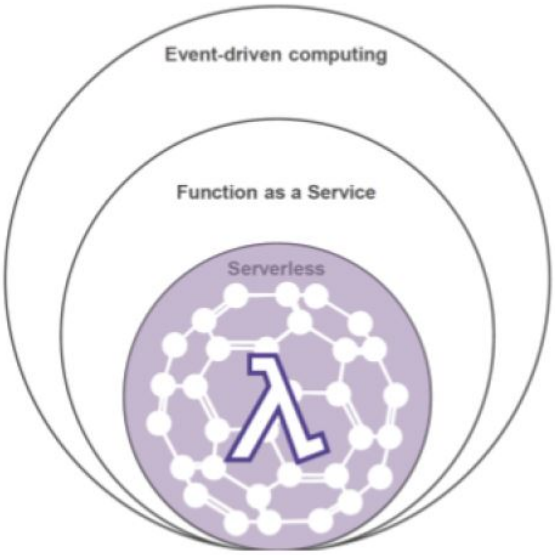

Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Event-driven Computing, FaaS und Serverless [FIMS17, S. 5]

Neben asynchronen Events können Serverless Functions auch durch synchrone Nachrichten angesprochen werden. Hierzu kann als Einstiegspunkt einer Function ein HTTP-Endpunkt dienen. Der Aufruf folgt dann dem *Request-Response Pattern*, das als Basismethode zur Kommunikation zwischen zwei Systemen angesehen werden kann. Der Requester startet mit seinem Request die Kommunikation und wartet auf eine Antwort. Diese Anfrage ist der Aufruf einer Function. Der Provider auf der anderen Seite repräsentiert die Function und wartet auf den Request. Nach der Abarbeitung sendet der Service seine Antwort an den Requester zurück. [Swa18]

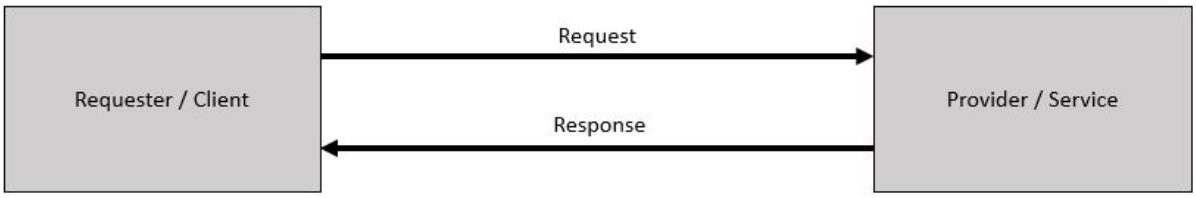

Abbildung 11: Request Response Pattern [Swa18]

3 Entwicklung einer prototypischen Anwendung

3.1 Vorgehensweise beim Vergleich der beiden Anwendungen

Zum Vergleich der beiden Anwendungen werden einige Kriterien abgearbeitet, die dabei helfen eine Aussage über die Qualität der jeweiligen Applikation zu treffen. Diese Kriterien werden nun im Folgenden genauer erläutert:

Implementierungsaufwand Es wird auf den zeitlichen Aufwand sowie auf die Codekomplexität geachtet. Das heißt, es wird untersucht, mit wie viel Einsatz einzelne Anwendungsfälle umgesetzt werden können und wie viel Overhead bei der Umsetzung möglicherweise entsteht.

Frameworkunterstützung Dabei wird analysiert inwieweit die Entwicklung durch Frameworks unterstützt werden kann. Dies gilt nicht nur für die Abbildung der Funktionalitäten, sondern auch für andere anfallende Aufgaben im Entwicklungsprozess wie zum Beispiel dem Testen und dem Deployment.

Deployment Beim Deploymentprozess sollen Änderungen an der Anwendung möglichst schnell zur produktiven Applikation hinzugefügt werden können, damit sie dem Kunden zeitnah zur Verfügung stehen. An dieser Stelle sind eine angemessene Toolunterstützung sowie die Komplexität der Prozesse ein großer Faktor. Optimal wäre in diesem Punkt eine automatische Softwareauslieferung.

Testbarkeit Hier ist zum einen ebenfalls der Implementierungsaufwand relevant und zum anderen sollte die Durchführung der Tests den Entwicklungsprozess nicht unverhältnismäßig lange aufhalten. Es ist dann auch eine effektive Einbindung der Tests in den Deploymentprozess gefragt. Im Speziellen werden mit den beiden Anwendungen Komponenten- und Integrationstests betrachtet.

Erweiterbarkeit Das Hinzufügen neuer Funktionalitäten oder Komponenten wird dabei im Besonderen überprüft. Damit einhergehend ist auch die Wiederverwendbarkeit einzelner Komponenten. Dies bedeutet, dass beleuchtet wird, ob einzelne Teile losgelöst vom restlichen System in anderen Projekten erneut einsetzbar sind.

Betriebskosten In einer theoretischen Betrachtung werden die Betriebskosten für die jeweiligen Anwendungen gegenübergestellt. So können anhand einer Hochrechnung für die Menge der benötigten Ressourcen die Kosten berechnet werden.

Performance Das Augenmerk liegt hierbei auf der Messung von Antwortzeiten einzelner Requests sowie der Reaktion des Systems auf große Last.

Sicherheit An dieser Stelle ist zum Beispiel die Unterstützung zum Anlegen einer Nutzerverwaltung von Interesse. Außerdem werden auch die Möglichkeiten bezüglich verschlüsselter Zugriffe genauer betrachtet.

Die Bewertung der beiden Anwendungen erfolgt nach der *Microservice Framework Evaluation Method (MFEM)*, die René Zarwel in seiner Bachelorarbeit zur Evaluierung von Frameworks erarbeitet hat. Diese Methode betrachtet ein Framework von drei Seiten: Nutzung, Zukunftssicherheit und Produktqualität. Angewendet auf die Beurteilung der beiden Applikationen verschiebt sich der Fokus hin zur Nutzung. Das heißt, wie gestaltet sich die Umsetzung. [Zar17, S. 22]

Der erste Schritt wurde durch das Sammeln der Kriterien und Anforderungen an die Anwendungen auf Seite 17 bereits abgeschlossen.

> *„Damit der Fokus in späteren Phasen auf den wichtigen Anforderungen liegt, werden anschließend alle mit Prioritäten versehen. [Zar17, S. 28]“*

Hierzu kann eine beliebig gegliederte Rangordnung verwendet werden, wobei in der Arbeit eine dreistufige Skala als angemessen angesehen wird. Da bei dem hier durchgeführten Vergleich kein Kontext, wie zum Beispiel Vorgaben eines Unternehmens, auf die sich die Analyse beziehen soll, besteht, wird auf eine Gewichtung der Anforderungen verzichtet.

Des Weiteren können die vorliegenden Punkte durch tiefergehende Fragen verfeinert und in mehrere Unterpunkte unterteilt werden. Die vollständige Abbildung der Kriterien mit passenden Unterpunkten, angeordnet als Baum, ist in Anhang A zu finden.

Damit die festgelegten Kriterien auf beide Applikationen angewendet werden können, werden nun für jede Kategorie Metriken aufgestellt. Diese können dann genutzt werden, um die verschiedenen Eigenschaften der Anwendungen zu messen und vergleichbar zu machen. So kann beispielsweise eine Ordinalskala dabei helfen Erkenntnisse in verschiedenen Abstufungen auszudrücken. [Zar17, S. 29]

Im letzten Schritt folgt die Evaluationsphase und anschließend die Aufbereitung der Ergebnisse.

> *„Während der Evaluation wird das Framework auf die Anforderungen mittels der zuvor definierten Metriken untersucht. [Zar17, S. 31]“*

Die Durchführung der Evaluation wird in zwei Phasen unterteilt. Die subjektive und objektive Evaluation. Bei der Ersten erstellt der Softwareentwickler eine prototypische Anwendung und bewertet das Vorgehen anhand von subjektiven Eindrücken aus dem Entwicklungsprozess [Zar17, S. 32]. Diese Variante wird einen Großteil der Arbeit ausma-

chen. Die objektive Evaluation hingegen nimmt nur einen kleine Anteil der Auswertung ein und bezieht sich auf die Erhebung von neutralen Daten wie zum Beispiel bei Messungen [Zar17, S. 36].

Nachdem die Evaluation durchgeführt wurde, können die Ergebnisse ausgewertet werden. Dazu wird für die jeweiligen Kriterien ein Prozentwert berechnet, der aussagt, in wie weit die definierten Anforderungen erfüllt wurden.

> *„Wie stark einzelne Anforderungen in die zugehörige Kategorie einfließen, hängt von der Priorisierung dieser ab. Wurde eine Anforderung mit A bewertet, zählt das Ergebnis zu 100 Prozent. Entsprechend wird der Einfluss bei Priorität B und C auf 50 bzw. 25 Prozent gesenkt. Dies stellt sicher, dass die Nichterfüllung kleiner Anforderungen das Gesamtergebnis nicht zu stark nach unten ziehen. [Zar17, S. 40-41]“*

3.2 Fachliche Beschreibung der Beispiel-Anwendung

Als Anwendungsfall für die Beispiel-Anwendung dient ein Bibliotheksservice. Der Service kann von zwei verschiedenen Anwendergruppen genutzt werden. Das wären auf der einen Seite Mitarbeiter der Bibliothek. Diese können Bücher zum Bestand hinzufügen oder löschen sowie Buchinformationen aktualisieren. Zur Vereinfachung der Anwendung gibt es zu jedem Buch nur ein Exemplar.

Auf der anderen Seite gibt es den Kunden, dem eine Übersicht aller Bücher zur Verfügung steht. Von diesen Büchern kann der Kunde beliebig viele verfügbare Bücher ausleihen, wobei eine Leihe unbegrenzt ist und somit kein Ablaufdatum besitzt. Seine ausgeliehene Bücher kann er dann auch wieder zurückgeben.

Um nutzerspezifische Informationen in der Anwendung anzeigen zu können und das System vor Fremdzugriffen zu schützen, hat jeder User einen eigenen Account. Mit diesem kann er sich an der Applikation an- und abmelden kann. Zum Start der Anwendungen stehen jeweils ein Nutzer mit der Rolle „Mitarbeiter“ sowie ein User mit der Rolle „’Kunde’“ zur Verfügung. Des Weiteren gibt es einen Administrator, der auf alle Funktionalitäten zugreifen kann. Weitere Nutzer können nicht zur Applikation hinzugefügt werden.

Damit der Servicebetreiber sein Angebot an die Nachfrage der Kunden anpassen kann, merkt sich das System bei jeder Ausleihe zusätzlich die Kategorie des ausgeliehenen Buches, sodass anhand der beliebten Bücherkategorien der Bestand sinnvoll erweitert werden kann. Die Nutzerstatistik ist ausschließlich für Mitarbeitern einsehbar.

Dieser Ablauf könnte in einem anderen Anwendungsfall beispielsweise eine Webseite sein,

die den Nutzer nach der Auswahl eines Werbebanners nicht nur auf die werbetreibende Seite leitet, sondern sich gleichzeitig den Aufruf der Werbung merkt, um ihn später in Rechnung stellen zu können [Rob18].

3.3 Implementierung der Benutzeroberfläche

Da die beiden prototypischen Anwendungen sich lediglich in der Umsetzungsart der Anwendungslogik unterscheiden, kann die selbe Frontendimplementierung für beide Prototypen eingesetzt werden. Dies ist möglich, da beide Anwendungen die gleichen Schnittstellen zur Verfügung stellen.

Die Benutzeroberfläche wird mittels Polymer implementiert. Polymer ist eine Bibliothek zur Frontendentwicklung, die auf der *Web Components Specificaton* des World Wide Web Consortiums (W3C) basiert. So kann eine Seitenansicht aus mehreren verschachtelten Komponenten bestehen. Die hohe Wiederverwendbarkeit solcher Komponenten und das damit einhergehende einheitliche Erscheinungsbild sind zwei Vorteile des komponentenbasierten Konzepts.

TODO: Architektur und Implementierung des Frontends beschreiben

3.4 Implementierung der klassischen Webanwendung

Das Ziel ist es eine klassischen Webanwendung zu entwickeln, die ohne die Verwendung von cloud-spezifischen Komponenten ihre Funktionalitäten für den Nutzer über das Internet bereitstellt. Die Applikation ist konzipiert, um auf einer herkömmlichen Serverstruktur betrieben zu werden. Der Zusatz *klassisch* impliziert außerdem die Verwendung von gut erprobten und weitläufig anerkannten Frameworks zur Unterstützung in der Entwicklung.

3.4.1 Architektonischer Aufbau der Applikation

Nachdem es sich um einen recht übersichtlichen Anwendungsfall handelt, den die Anwendung widerspiegelt, werden die verschiedenen Funktionalitäten nicht in einzelne Microservices aufgeteilt. Die klassische Applikation ist ein Monolith. Dabei wird eine große Einheit als Anwendung ausgeliefert. Trotzdem kann der Code in verschiedene Komponenten unterteilt werden. [Inc18, S. 9]

Diese Unterteilung sowie die Wahl der Architektur kann einen großen Einfluss auf die spätere Anwendung haben. Laut Philippe Kruchten umfasst Softwarearchitektur Themen wie die Organisation des Softwaresystems und wichtige Entscheidungen über die Struktur sowie das Verhalten der Applikation. [Kru04, S. 288]

Im Fall einer Webanwendung bietet sich eine sogenannte *Multi-tier Architektur* an. Hierbei wird auf eine klare Abgrenzung zwischen den einzelnen Tiers, beziehungsweise Schichten geachtet. Am weitesten verbreitet ist die 3-Tier Architektur. Die drei dabei zu trennenden Bestandteile sind die Präsentation, die Applikationsprozesse und das Datenmanagement. Die Applikation wird in Frontend, Backend und Datenspeicher aufgeteilt.

Die Präsentationsschicht enthält die Benutzeroberfläche und stellt die Daten gegenüber dem User dar. Somit kann die Interaktion zwischen Client und Applikation ermöglicht werden. Eine Ebene darunter befindet sich die Logikschicht. Diese enthält die Geschäftslogik und stellt die Funktionalität der Anwendung bereit. Außerdem dient diese Schicht als Verbindung zwischen Präsentation und Datenspeicher. Typischerweise handelt es sich bei einer Webanwendung um einen Applikationsserver, der den Code ausführt und via HTTP mit dem Client kommuniziert. Als drittes folgt die Datenhaltungsschicht. Sie übernimmt das dauerhafte Speichern sowie Abrufen der Daten. Mittels einer API kann die Logikschicht so auf die Datenbank zugreifen (siehe Abb. 12). [Mar15]

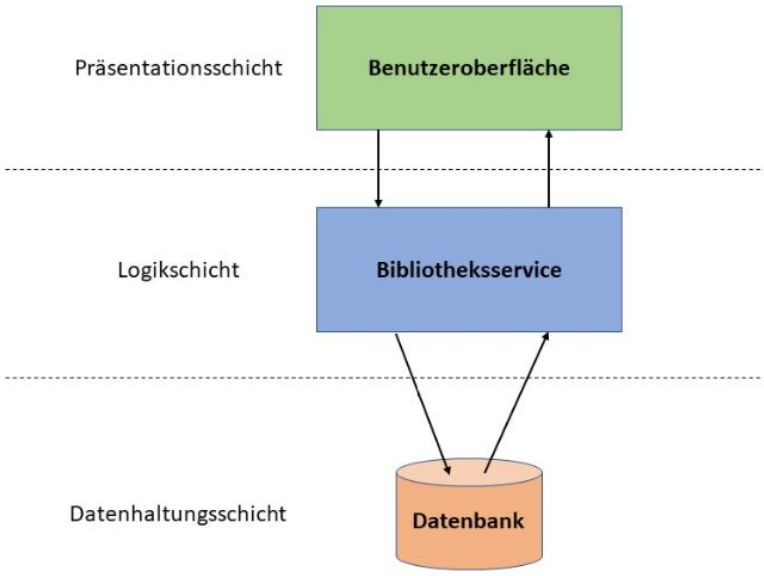

Abbildung 12: 3-Tier Architektur

Ein Vorteil dieses Architekturmusters ist beispielsweise die Möglichkeit Frontend und Backend unabhängig voneinander ausliefern zu können, da diese in unterschiedlichen Tiers getrennt sind. Durch diese Trennung können einzelne Tiers problemlos angepasst und erweitert oder sogar komplett ersetzt werden. Auch die Skalierung gestaltet sich durch die eigenständigen Tiers wesentlich einfacher und effizienter. Des Weiteren können Logik-

und Datenhaltungsschicht für unterschiedliche Präsentationen eingesetzt und somit wiederverwendet werden. [Mar15]

Wie anfangs erwähnt, kann die Implementierung der Geschäftslogik trotz monolithischer Struktur in verschiedene Komponenten unterteilt werden. Die Logikschicht wird dabei in unterschiedliche Layer eingeteilt. Es wird daher von einer *Layered Architektur* gesprochen. Ein Layer betrifft also die logische Trennung von Funktionalitäten, wohingegen ein Tier auch eine physikalische Abgrenzung mit sich bringt. Ein einzelnes Tier kann somit mehrere Ebenen beinhalten.

Die Aufteilung der Layer erfolgt ähnlich wie die Abgrenzung zwischen den einzelnen Tiers. Die Applikation besteht aus Präsentations-, Business- und Persistenzlayer (siehe Abb. 13). Das Präsentationslayer stellt Endpunkte für die Kommunikation mit dem Client bereit. Die Geschäfts- und Anwendungslogik befindet sich im Businesslayer und die Persistierung wird, wie der Name schon sagt, vom Persistenzlayer übernommen.

Neben der horizontalen Aufteilung in Layer ist auch eine vertikale Trennung möglich. Dabei werden die Layer nach fachlichen Aspekten in verschiedene Komponenten aufgeteilt (siehe Abb. 13).

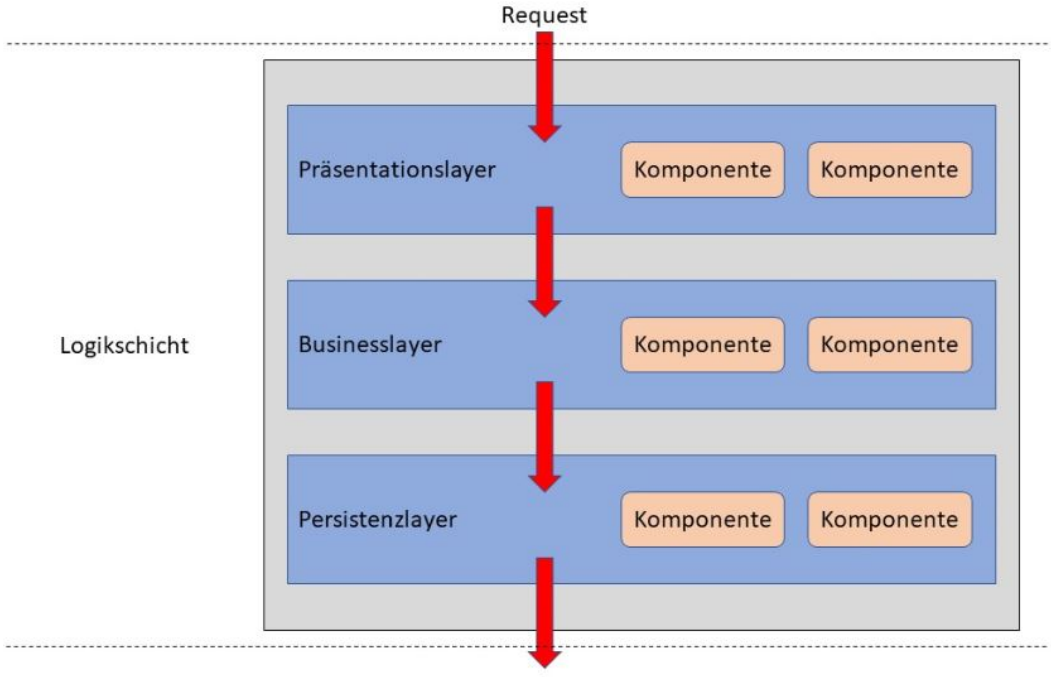

Abbildung 13: Layered Architektur nach [Ric15, S. 3]

Wie bei einigen anderen Architekturmustern ist die Schlüsseleigenschaft der *Layered Architektur* die Abstraktion und Trennung zwischen den verschiedenen Layern. So muss sich

das Präsentationslayer beispielsweise nicht damit befassen, wie Kundendaten aus dem Datenspeicher geladen werden. Oder auch das Businesslayer muss nicht wissen, wo die Daten verwaltet werden. Die Komponenten einer Ebene beschäftigen sich lediglich mit der Logik innerhalb ihres Layers. Durch diese Abgrenzung zwischen den Schichten gestaltet sich die Entwicklung, das Testen und der Betrieb der Anwendung wesentlich einfacher. Auch die Einführung eines Rollen- und Zuständigkeitsmodell zum Beispiel ist deutlich angenehmer und effizienter durchführbar. [Ric15, S. 2]

Ein weiterer wichtiger Punkt in Bezug auf die Schichtenarchitektur ist der Ablauf der Requests. Die Anfragen fließen horizontal von einem Layer zum Nächsten (siehe Abb. 13). Dabei kann es nicht vorkommen, dass eine Schicht übersprungen wird. Dies ist notwendig, um das *layers of isolation* Konzept zu erhalten. Dabei ist es das Ziel die Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Layers so gering wie möglich zuhalten. Änderungen in einzelnen Layers beeinflussen grundsätzlich keine weiteren Schichten. [Ric15, S. 3]

3.4.2 Implementierung der Anwendung

Um das beschriebene Architekturmodell umzusetzen, wird Spring Boot verwendet. Es dient zur Minimierung von *boilerplate code* durch Spring-spezifische Annotationen und vereinfacht so den Umgang mit dem Spring Framework. Spring folgt dem Prinzip *Convention over Configuration*. Dem Entwickler wird so eine Menge an konfigurativen Aufgaben abgenommen. Somit können ohne großen Aufwand standardmäßig bereitgestellte Funktionen in Anspruch genommen oder eigene Funktionalitäten hinzugefügt werden. Spring Boot bringt beispielsweise bereits einen eingebetteten Tomcat-Server mit. Dieser bietet eine vollständige Laufzeitumgebung für die Anwendung und ermöglicht ein einfaches Debugging.

Als Tool zur Abhängigkeitsverwaltung für die Beispielanwendung wird Maven verwendet. Zur Bereitstellung eines Spring Boot Programms ist dann lediglich eine `pom.xml` Datei, die die Abhängigkeiten enthält, sowie eine Klasse zum Starten der Anwendung notwendig (siehe Listing 1). Durch die Abhängigkeit zu Spring Boot werden alle weiteren benötigten Bibliotheken automatisch nachgeladen. Außerdem ist es möglich neue Komponenten zum Klassenpfad hinzuzufügen, die daraufhin automatisch konfiguriert werden. [Wol13]

Listing 1: Einstiegsklasse für Spring Boot Anwendung

```
1  @SpringBootApplication
2  public class ClassicApplication {
3    public static void main(String[] args) {
4      SpringApplication.run(ClassicApplication.class, args);
5    }
6  }
```

Dieses Startbeispiel kann um verschiedene weitere Features aus dem Spring-Stack oder auch um eigene Funktionalitäten erweitert werden. Neben dem eingebetteten Server stellt Spring Boot per Default auch eine H2 In-Memory Datenbank zur Verfügung. Diese eignet sicher hervorragend, um prototypische Anwendungen zu erstellen. Bei der H2 Datenbank handelt sich um einen relationalen Datenspeicher, der mit dem Start der Applikation neu initialisiert und nach dem Beenden wieder zurückgesetzt wird. Das somit voreingestellte Datenbankmanagementsystem kann jedoch auch jederzeit durch einen eigenen Datenbankserver ersetzt werden. Hierzu müssen lediglich ein paar Einstellungen im `application.yml` Dokument, das als Konfiguration für die Spring Boot Anwendung dient, vorgenommen werden.

Damit zum Beginn der Anwendung bereits Daten, wie zum Beispiel Nutzer, vorliegen, wird das Datenbankmigrationstool *Flyway* verwendet. Hierbei kann zum einen die Struktur der Datenbank validiert, sowie zum anderen die Tabellen mit Werten befüllt werden.

Zur Abbildung des Datenmodells auf die Datenbank dient das *Object-relational mapping (ORM)*. Im einfachsten Fall werden dabei Klassen zu Tabellen, die Objektvariablen zu Spalten und die Objekte zu Zeilen in der Datenbank. Bei der Implementierung hilft dabei die *Java Persistence API (JPA)*, die im Spring Umfeld von der Komponente `spring-boot-starter-data-jpa` unterstützt wird. So können Klassen mit der Annotation @Entity versehen werden. Ihre Objekte sind dann bereit, um auf den Speicher reproduziert zu werden. Der Schüssel der Tabelle wird durch die Annotation @Id festgelegt. Des Weiteren kommt die Annotation @Enumerated zum Einsatz. Sie legt fest, ob eine Enum als Text oder Zahl gespeichert wird. Auch der Name @Column sowie Einschränkungen für einzelne Spalten, wie zum Beispiel @NotNull, können über Annotationen festgelegt werden. Elementarer Bestandteil bei relationalen Datenbankmodellen sind die Beziehungen zwischen den Entitäten. Diese können ebenfalls durch Annotationen abgebildet werden. So kann zum Beispiel die Beziehung zwischen Buch und Nutzer wie folgt abgebildet werden (siehe Abb. 14).

Abbildung 14: Beziehung zwischen User und Book

Diese vier Zeilen sind ausreichend, um in der Buchtabelle einen Fremdschlüssel zu erzeugen, der sich auf den Ausleiher bezieht. So kann die Beziehung zwischen einem Nutzer und seinen ausgeliehenen Büchern ohne eine weitere Zuordnungstabelle abgebildet werden.

Nachdem Datenbankmodell und Objektnetz übereinstimmen, kann die Entwicklung mit der Implementierung der Logikschicht fortgesetzt werden. Spring unterstützt hierbei die beschriebene Aufteilung in verschiedene Layer. Wie bei der Darstellung des Datenmodells kommen hierbei ebenso Annotationen zum Einsatz (siehe Abb. 15).

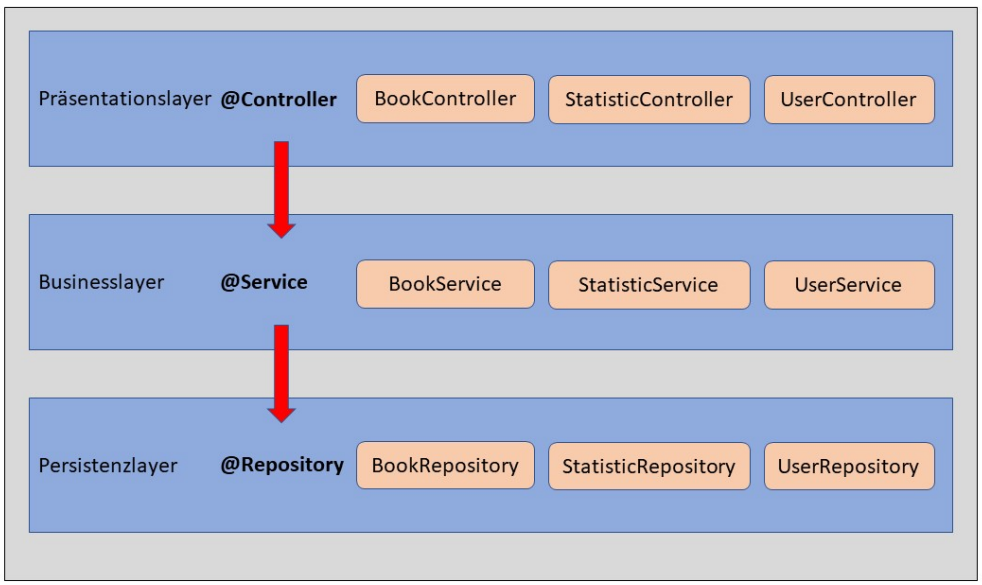

Abbildung 15: Layered Architektur in Spring

Die verschiedenen Layer werden durch sogenannte Spring Beans abgebildet. Diese werden aus mit Spring-Annotationen versehenen Klassen(Controller, Service, Repository) erzeugt

und wen benötigt instanziiert und konfiguriert. [Wol13]

Der Zugriff aus der Logikschicht heraus auf Daten aus der Datenhaltungsschicht wird durch *Repositories* ermöglicht. Hierbei handelt es sich lediglich um Interfaces, die vom `JpaRepository` erben und somit standardmäßig Methoden wie save() oder find() zum Zugriff auf die Daten im Speicher bereitstellen. Außerdem besteht die Möglichkeit spezifischere Abfragen durch sprechende Methodensignaturen hinzuzufügen (siehe Listing 2).

Listing 2: Repository für die Tabelle User

```
1  @Repository
2  public interface UserRepository extends JpaRepository<User, Integer> {
3    User findUserByUsername(String username);
4  }
```

Eine Schicht über den Repositories befinden sich die Serviceklassen. Diese enthalten die Geschäftslogik. Neben unterschiedlichsten Berechnungen und Validitätsprüfungen werden hier Daten geladen, gespeichert und modifiziert. Der Zugriff auf den Datenspeicher erfolgt über die Repositories.

Diese werden den Services mittels Dependency Injection (DI) bereitgestellt. Hierzu bietet Spring implizite Konstruktor Injektion an. Enthält die betroffen Klasse lediglich einen Konstruktor, wird auch nicht mehr wie bisher die Annotation @Autowired benötigt. Ein weiterer Beitrag zur Steigerung des Komforts für den Entwickler. Spring erzeugt nun im Hintergrund das passende Objekt. Hierzu wird aus dem DI-Container, der alle Beans enthält, die passende Klasse initialisiert. Dies führt dazu, dass die Initialisierung der Abhängigkeiten nicht mehr per Hand durchgeführt werden muss und die Objekte erst zur Laufzeit vorliegen müssen. [Kar18]

Zu einer weiteren Entkopplung führt das Implementieren gegen ein Interface. Hierfür wird für jeden Service ein Interface angelegt. Dieses kann dann im Controller mittels Konstruktor Injektion injiziert werden, sodass es jederzeit möglich ist die Umsetzung hinter dem Interface zu ersetzen (siehe Listing 3 Z. 3-7).

Die Servicemethoden werden aus den Controllern heraus aufgerufen. Controller definieren REST-Endpunkte, die für den Client als Einstiegspunkt zur Anwendung dienen und den Zugriff auf die entsprechenden Services ermöglichen (siehe Listing 3 ab Z. 9). Die Endpunkte innerhalb eines Controller unterscheiden sich anhand des Pfades beziehungsweise des REST-Verbs. Durch die Annotation @RequestMapping an der Klasse kann ein Basispfad für alle Einstiegspunkte des Controllers festgelegt werden. So gibt es für jede REST-Methode die entsprechende Mapping-Annotation wie zum Beispiel @GetMapping

und @PostMapping. Um dem Client nun beispielsweise den Zugriff auf alle Bücher sowie das Hinzufügen und Löschen eines Exemplars zu ermöglichen, ist folgende Implementierung des Controllers notwendig (siehe Listing 3).

Listing 3: Beispiel BookController

```
1  @RestController
2  public class BookController {
3    private BookService bookService;
4
5    public BookController(BookService bookService) {
6      this.bookService = bookService;
7    }
8
9    @GetMapping("/books")
10   public ResponseEntity<Collection<Book>> getBooks() {
11     return ResponseEntity.ok(bookService.getBooks());
12   }
13
14   @PostMapping(path = "/books", consumes = "application/json")
15   public ResponseEntity<Book> addBook(@RequestBody Book book) {
16     return ResponseEntity.ok(bookService.addBook(book));
17   }
18
19   @DeleteMapping(path = "/books/{isbn}")
20   public ResponseEntity<Book> deleteBook(@PathVariable String isbn) {
21     return ResponseEntity.ok(bookService.deleteBook(isbn));
22   }
23 }
```

Auch die Authentifizierung wird durch eine passende Spring Komponente erleichtert. Spring Security ermöglicht es die Anwendung durch *Basic Authentication* und andere Authentifizierungsverfahren zu schützen. Vor dem Zugriff auf die Applikation muss sich der User mit einem validen Nutzernamen und Passwort gegenüber der Anwendung authentifizieren. Alle Requests sind nun durch die Authentifizierung gesichert. Über HttpSecurity können einzelne Ressourcen oder auch Pfadgruppen individuell für einen offenen Zugriff freigegeben werden. Des Weiteren kann durch das Einbinden des UserDetailsService der Login an die eigenen Nutzer angepasst werden (siehe Listing 4). Über diesen wird bei der Anmeldung überprüft, ob ein gültiges Userobjekt in der Anwendung vorliegt. Dieses wird als UserDetails zurückgegeben. Der authentifizierte Nutzer kann nun über das Authentication Objekt in der Applikation abgefragt werden (siehe Listing 5).

Listing 4: Implementierung des UserDetailsService

```
1  @Service
2  public class UserServiceImpl implements UserService,
       UserDetailsService {
3    private UserRepository userRepository;
4
5    public UserServiceImpl(UserRepository userRepository) {
6      this.userRepository = userRepository;
7    }
8
9    @Override
10   public UserDetails loadUserByUsername(String username) {
11     User user = userRepository.findUserByUsername(username);
12     if (user == null) {
13       return null;
14     }
15     return new org.springframework.security.core.userdetails.User(
           username, "{noop}" + user.getPassword(), AuthorityUtils.
           createAuthorityList(user.getRole().toString()));
16   }
17 }
```

Listing 5: Abfrage des authentifizerten Users

```
1  public Collection<Book> getLendings(Authentication authentication) {
2    User lender = userRepository.findUserByUsername(authentication.
       getName());
3    return lender.getLendings();
4  }
```

Eine rollenbasierte Autorisierung ist ebenso durch die Security Komponente von Spring erreichbar. Dafür werden lediglich die Einstiegspunkte zur Applikation, das heißt die Endpunkte im Controller, mit @PreAuthorize und der zugehörigen Rolle annotiert (siehe Listing 6 Z. 2).

Listing 6: PreAuthorize an einem Endpunkt im Controller

```
1  @PostMapping(path = "/books", consumes = "application/json")
2  @PreAuthorize("hasAuthority('ADMIN') or hasAuthority('EMPLOYEE')")
3  public ResponseEntity<Book> addBook(@RequestBody Book book) {
4    return ResponseEntity.ok(bookService.addBook(book));
5  }
```

Die letzte noch zu implementierende Funktionalität ist das in 3.2 beschriebene Anlegen

einer Ausleihstatistik. Besonders elegant wäre es hierbei die Aktualisierung der Statistik als Reaktion auf das Ausleihen auszulösen. Die Annotation @PostPersist kann genutzt werden, um auf das Speichern der Ausleihe zu reagieren. Die damit annotierte Methode wird als Callback nach dem erfolgreichen Speichern aufgerufen. Allerdings ist es in dieser Methode nicht möglich ein weiteres Mal auf die Datenbank zuzugreifen. Somit kann die neue Statistik auf diesem Weg nicht persistiert werden. Alternativ wurde nun ein weiterer REST-Endpunkt angelegt, der nach der erfolgreichen Durchführung der Ausleihe über die Oberfläche per Hand aufgerufen wird.

3.4.3 Testen der Webanwendung

Testen ist eine wichtige Aufgabe im Entwicklungsprozess, um die Qualität der Anwendung zu sichern. Neben der Überprüfung des Softwareverhaltens wird die vollständige Abdeckung der Anforderungen kontrolliert. Das Testen einer Spring Webanwendung kann in zwei Teile unterteilt werden. Zum einen werden Komponententests bzw. Unittests benötigt, die die Logik der einzelnen Komponenten individuell verifizieren. Zum anderen werden Integrationstests angelegt. Diese stellen das richtige Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten untereinander sicher. [Inf18]

Im Springumfeld ist es sinnvoll, die Testklasse mit der Annotation @SpringBootTest zu versehen. So wird bei der Ausführung der Tests ein Springkontext, der dem beim Start der Anwendung gleicht, aufgebaut. Nachteil hieran ist allerdings der immer größer werdende Overhead, wenn für jede Testklasse ein neuer Kontext errichtet werden muss. So kann sich die Durchführung vieler Testfälle deutlich verzögern. [Gig18]

Komponenten-/Unittests

Um lediglich ein Modul zu überprüfen, müssen alle Komponenten, die mit diesem Modul interagieren, für den Test ausgeschlossen werden. Hierfür können sogenannte Mocks eingesetzt werden. Im Springkontext gibt es dafür die @MockBean Annotation. Somit können fremde Komponenten durch eine Art Platzhalter ersetzt werden, sodass sie ein vorhersagbares Verhalten annehmen (siehe Listing 7 Z. 5-6 und 21-22). Dadurch kann ausgeschlossen werden, dass das betrachtete Modul durch Fremdeinflüsse beeinträchtigt wird. Für den Test eines Services wird also beispielsweise ein Mock für das verwendete Repository angelegt. [Gig18]

In den Unittests der Controller muss wiederum der zugehörige Service durch einen Mock ersetzt werden. Eine weitere Schwierigkeit in den Testfällen der Controller ist das Simulieren eines HTTP-Requests. Dies ist mit Hilfer der MockMvc Klasse möglich. Im Test kann so ein Request erstellt und die Antwort überprüft werden (siehe Listing 7 Z. 23-27).

[Gig18]

Eine weiterer Besonderheit ist die Annotation @WithMockUser. Hiermit wird der authentifizierte Benutzer mit der zugehörigen Rolle für den Testfall festgelegt. Somit kann auch der Zugriffsschutz mit getestet und beispielsweise eine AccessDeniedException provoziert werden (siehe Listing 7 Z. 19).

Listing 7: Testfall im StatisticControllerTest

```
1  @SpringBootTest
2  @RunWith(SpringRunner.class)
3  public class StatisticControllerTest {
4    private static final Statistic STATISTIC = new Statistic(1, 34,
         Category.SCIENCE);
5    @MockBean
6    private StatisticService statisticService;
7    @Autowired
8    private WebApplicationContext webAppContext;
9    private MockMvc mockMvc;
10
11   @Before
12   public void setup() {
13     MockitoAnnotations.initMocks(this);
14     mockMvc = MockMvcBuilders
15       .webAppContextSetup(webAppContext).build();
16   }
17
18   @Test
19   @WithMockUser(authorities = "EMPLOYEE")
20   public void testGetStatistic() throws Exception {
21     when(statisticService.getStatistic("SCIENCE"))
22       .thenReturn(STATISTIC);
23     RequestBuilder requestBuilder = MockMvcRequestBuilders
24       .get("/statistics/SCIENCE");
25     MvcResult result = mockMvc.perform(requestBuilder).andReturn();
26     assertEquals(200, result.getResponse().getStatus());
27     assertEquals("{\"id\":1,\"count\":34,\"category\":\"SCIENCE\"}",
           result.getResponse().getContentAsString());
28   }
29 }
```

Integrationstests

Nachdem durch die Unittests die Korrektheit der einzelnen Module festgestellt wurde, können Integrationstests dazu genutzt werden, um die Zusammenarbeit zwischen den

verschiedenen Teilen zu testen. Hierzu muss lediglich auf die Mocks verzichtet werden, sodass alle beteiligten Komponenten beim Aufruf ausgeführt und somit überprüft werden können (siehe Listing 8 Z. 7-11). [Gig18]

Da der entwickelte Springkontext auch zum Testen eingesetzt wird, laufen ebenso die Flyway-Skripte bei der Durchführung des Tests. Somit befindet sich die Datenbank während des Tests im selben Zustand wie zum Start der Anwendung.

Listing 8: Integrationstest für eine Methode aus dem Bookservice

```
1  @SpringBootTest
2  @RunWith(SpringRunner.class)
3  public class BookServiceIntegrationTest {
4    @Autowired
5    private BookService bookService;
6
7    @Test
8    public void testGetBooks() {
9      Collection<Book> books = bookService.getBooks();
10     assertThat(books).isNotNull().isNotEmpty();
11     assertEquals(3, books.size());
12   }
13 }
```

3.5 Implementierung der Serverless Webanwendung

Bei der zweiten Anwendung handelt es sich um die Serverless Applikation. Diese wird von einem externen Provider betrieben. Als Betreiber wurde hierfür das Serverless Angebot von Amazon AWS Lambda gewählt. So bietet Amazon als einer der Vorreiter im Cloud-Umfeld nicht nur ein großes Angebot an weiteren Cloudtools, sondern stellt dem Nutzer auch ein Freikontingent an Ressourcen zur Verfügung [Kö17, S. 12]. Des Weiteren ist AWS Lambda der populärste Vertreter auf dem Serverless Markt [Kö17, S. 18]. Es werden die Programmiersprachen JavaScript, Python, C# und Java mit entsprechenden Laufzeitumgebungen unterstützt [Kö17, S. 66]. Um eine Vergleichbarkeit der beiden Anwendungen zu erhalten, wird Java für die beispielhafte Serverless Webanwendung verwendet.

3.5.1 Architektonischer Aufbau der Serverless Applikation
3.5.2 Implementierung der Anwendung
3.5.3 Testen von Serverless Anwendungen
3.6 Unterschiede in der Entwicklung
3.6.1 Implementierungsvorgehen
3.6.2 Testen der Anwendung
3.6.3 Deployment der Applikation
3.6.4 Wechsel zwischen Providern
4 Vergleich der beiden Umsetzungen
4.1 Vorteile der Serverless Infrastruktur
4.2 Nachteile der Serverless Infrastruktur
4.3 Abwägung sinnvoller Einsatzmöglichkeiten
5 Fazit und Ausblick

6 Quellenverzeichnis

[A+09] Armbrust, Michael u. a.: Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing. (2009). http://d1smfj0g31qzek.cloudfront.net/abovetheclouds.pdf. – Zuletzt Abgerufen am 09.01.2019

[Ash17] Ashwini, Amit: Everything You Need To Know About Serverless Architecture. (2017). https://medium.com/swlh/everything-you-need-to-know-about-serverless-architecture-5cdc97e48c09. – Zuletzt Abgerufen am 28.08.2018

[Bü17] Büst, René: Serverless Infrastructure erleichtert die Cloud-Nutzung. (2017). https://www.computerwoche.de/a/serverless-infrastructure-erleichtert-die-cloud-nutzung,3314756. – Zuletzt Abgerufen am 28.08.2018

[Bac18] Bachmann, Andreas: Wie Serverless Infrastructures mit Microservices zusammenspielen. (2018). https://blog.adacor.com/serverless-infrastructures-in-cloud_4606.html. – Zuletzt Abgerufen 09.11.2018

[Boy17] Boyd, Mark: Serverless Architectures: Five Design Patterns. (2017). https://thenewstack.io/serverless-architecture-five-design-patterns/. – Zuletzt Abgerufen am 10.01.2019

[Bra18] Brandt, Mathias: Cash Cow Cloud. (2018). https://de.statista.com/infografik/13665/amazons-operative-ergebnisse/. – Zuletzt Abgerufen am 01.12.2018

[Dja02] Djabarian, Ebrahim: *Die strategische Gestaltung der Fertigungstiefe*. Deutscher Universitätsverlag, 2002. – ISBN 9783824476602

[FIMS17] Fox, Geoffrey C. ; Ishakian, Vatche ; Muthusamy, Vinod ; Slominski, Aleksander: Status of Serverless Computing and Function-as-a-Service (FaaS) in Industry and Research. (2017). https://arxiv.org/abs/1708.08028. – Zuletzt Abgerufen am 10.09.2018

[FL14] Fowler, Martin ; Lewis, James: Microservices. (2014). https://martinfowler.com/articles/microservices.html. – Zuletzt Abgerufen 19.11.2018

[Gar99] Garfinkel, Simson L.: *Architects of the Information Society: Thirty-Five Years of the Laboratory for Computer Science at MIT*. The MIT Press, 1999. – ISBN 9780262071963

[Gig18] Giglione, Marco: Unit and Integration Tests in Spring Boot. (2018). https://dzone.com/articles/unit-and-integration-tests-in-spring-boot-2. – Zuletzt Abgerufen am 13.02.2019

[Har02] Hartmann, Anja K.: *Dienstleistungen im wirtschaftlichen Wandel: Struktur, Wachstum und Beschäftigung.* 2002 http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-121435

[Hef16] Hefnawy, Eslam: Serverless Code Patterns. (2016). https://serverless.com/blog/serverless-architecture-code-patterns/. – Zuletzt Abgerufen am 10.01.2019

[Her18] Heroku: Heroku Security. (2018). https://www.heroku.com/policy/security. – Zuletzt Abgerufen 08.11.2018

[Inc18] Inc., Serverless: Serverless Guide. (2018). https://github.com/serverless/guide. – Zuletzt Abgerufen am 06.09.2018

[Inf18] Inflectra: Software Testing Methodologies. (2018). https://www.inflectra.com/Ideas/Topic/Testing-Methodologies.aspx. – Zuletzt Abgerufen am 13.02.2019

[Kö17] Köbler, Niko: *Serverless Computing in der AWS Cloud.* entwickler.press, 2017. – ISBN 9783868028072

[Kar18] Karia, Bhavya: A quick intro to Dependency Injection: what it is, and when to use it. (2018). – Zuletzt Abgerufen am 12.02.2019

[Kru04] Kruchten, Philippe: *The Rational Unified Process: An Introduction.* Addison-Wesley, 2004. – ISBN 0321197704

[KS17] Klingholz, Lukas ; Streim, Anders: Cloud Computing. (2017). https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Nutzung-von-Cloud-Computing-in-Unternehmen-boomt.html. – Zuletzt Abgerufen am 01.12.2018

[Mar15] Maresca, Paolo: From Monolithic Three-Tiers Architectures to SOA vs Microservices. (2015). https://thetechsolo.wordpress.com/2015/07/05/from-monolith-three-tiers-architectures-to-soa-vs-microservices/. – Zuletzt Abgerufen am 11.02.2019

[MG11] Mell, Peter ; Grance, Tim: The NIST Definition of Cloud Compu-

ting. (2011). https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-145/final. – Zuletzt Abgerufen am 03.11.2018

[Rö17] Röwekamp, Lars: Serverless Computing, Teil 1: Theorie und Praxis. (2017). https://www.heise.de/developer/artikel/Serverless-Computing-Teil-1-Theorie-und-Praxis-3756877.html?seite=all. – Zuletzt Abgerufen am 30.08.2018

[Ric15] Richards, Mark: *Software Architecture Patterns*. O'Reilly, 2015. – ISBN 9781491924242

[Rob18] Roberts, Mike: Serverless Architectures. (2018). https://martinfowler.com/articles/serverless.html. – Zuletzt Abgerufen am 30.08.2018

[RPMP17] Rai, Gyanendra ; Pasricha, Prashant ; Malhotra, Rakesh ; Pandey, Santosh: Serverless Architecture: Evolution of a new paradigm. (2017). https://www.globallogic.com/gl_news/serverless-architecture-evolution-of-a-new-paradigm/. – Zuletzt Abgerufen am 30.08.2018

[Sti17] Stigler, Maddie: *Beginning Serverless Computing: Developing with Amazon Web Services, Microsoft Azure, and Google Cloud*. Apress, 2017. – ISBN 9781484230831

[Swa18] Swarup, Pulkit: Microservices: Asynchronous Request Response Pattern. (2018). https://medium.com/@pulkitswarup/microservices-asynchronous-request-response-pattern-6d00ab78abb6. – Zuletzt Abgerufen am 09.01.2019

[Tiw16] Tiwari, Abhishek: Stored Procedure as a Service (SPaaS). (2016). https://www.abhishek-tiwari.com/stored-procedure-as-a-service-spaas/. – Zuletzt Abgerufen am 30.11.2018

[Tur18] Turvin, Neil: Serverless vs. Microservices: What you need to know for cloud. (2018). https://www.computerweekly.com/blog/Ahead-in-the-Clouds/Serverless-vs-Microservices-What-you-need-to-know-for-cloud. – Zuletzt Abgerufen 15.11.2018

[Wol13] Wolff, Eberhard: Spring Boot - was ist das, was kann das? (2013). https://jaxenter.de/spring-boot-2279. – Zuletzt Abgerufen am 12.02.2019

[Zar17] Zarwel, René: *Microservices und technologische Heterogenität: Entwicklung einer sprachunabhängigen Microservice Framework Evaluationsmethode*. 2017

Anhang

A Vollständige Abbildung der Bewertungskriterien