

Bachelorarbeit  
**Cloud Service Provider Evaluierung  
auf Basis von  
Infrastructure as Code Unterstützung**

im Studiengang Softwaretechnik und Medieninformatik  
der Fakultät Informationstechnik  
Wintersemester 2021/2022

Julian Schallenmüller

**Zeitraum:** 15.10.2021 - 15.01.2022

**Prüfer:** Prof. Dr.-Ing. Kai Warendorf

**Zweitprüfer:** Prof. Dr. rer. nat. Mirko Sonntag

---

**Firma:** Noavtec Consulting GmbH

**Betreuer:** Dipl.-Ing. (BA) Matthias Häussler



# Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Esslingen, den 12. November 2021

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

# Sperrvermerk

Die nachfolgende Bachelorarbeit enthält vertrauliche Daten der Noavtec Consulting GmbH. Veröffentlichungen oder Vervielfältigungen dieser Arbeit – auch nur auszugsweise – sind ohne ausdrückliche Genehmigung der Noavtec Consulting GmbH nicht gestattet. Diese Arbeit ist nur den Prüfern sowie den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen.

# Zitat

*„Showing a strong success and visible benefits is key to getting others to agree to try your way of doing things.“*

Frederic Rivain

# Vorwort

Dank an die Firma und die Firmenmitarbeiter, max. 1/2 Seite

# Kurz-Zusammenfassung

„Aushängeschild“ der Arbeit, max 1 Seite

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.2	Motivation und Ziele der Arbeit . . . . .	1
2	Grundlagen	3
2.1	Funktionsprinzip, Vorteile und Herausforderungen des modernen Cloud Computings . . . . .	3
2.1.1	Definition und Funktionsweise . . . . .	3
2.1.2	Zu erwägende Vor- und Nachteile des Einsatzes von Cloud Computing	6
2.1.3	<b>Grundlegende Erklärung von DevOps</b> . . . . .	7
2.1.4	Überblick über die wichtigsten Public Cloud Service Provider . . . . .	8
2.2	Infrastructure as Code . . . . .	11
2.2.1	Technologischer Wandel und das Cloud Age Mindset . . . . .	11
2.2.2	Vorteile von IaC und durch IaC gelöste Probleme des manuellen Provisionings . . . . .	12
2.2.3	Herausforderungen und Argumente gegen den Einsatz von IaC . . . . .	13
2.2.4	Die drei Kernverfahren von IaC . . . . .	15
2.2.5	Die Rolle von Terraform im IaC Anwendungsprozess . . . . .	16
2.2.6	Terraform Grundprinzipien . . . . .	18
3	Aufbau und Untersuchung	19
3.1	High-level Aufbau der Infrastruktur des Versuchsobjekts . . . . .	19
3.2	Zu analysierende Aspekte und Eigenschaften . . . . .	19
3.3	Konkreter Aufbau in Microsoft Azure . . . . .	19
3.4	Konkreter Aufbau in Amazon AWS . . . . .	19
3.5	Konkreter Aufbau in Google Cloud Platform . . . . .	19
3.6	Literaturverweise . . . . .	19
4	Ergebnisse	20
4.1	Bewertung Azure . . . . .	20
4.2	Bewertung AWS . . . . .	20
4.3	Bewertung GCP . . . . .	20
4.4	Resultate und Vergleichsmatrix . . . . .	20
5	Schluss	21
5.1	Gewonnenen Erkenntnisse . . . . .	21

---

5.2	Zusammenfassung der Arbeit . . . . .	21
5.3	Mögliche weitere untersuchenswerte Aspekte . . . . .	21
5.4	Aktuelle und zukünftige Entwicklungen . . . . .	21
A	Kapitel im Anhang	22
	Literaturverzeichnis	23



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Die grundlegenden Cloud Service Modelle im Überblick . . . . .	4
2.2	CSP Market Share Q2 2020 nach Umsatz . . . . .	8
2.3	CSP Gartner Magic Quadrant August 2020 . . . . .	10
2.4	Iron Age vs Cloud Age . . . . .	11
2.5	Iron Age vs Cloud Age IaC Busch S.6 . . . . .	15
2.6	Überblick IaC Tools <a href="https://medium.com/cloudnativeinfra/when-to-use-which-infrastructure-as-code-tool-665af289fbde">https://medium.com/cloudnativeinfra/when-to-use-which-infrastructure-as-code-tool-665af289fbde</a> . . . . .	17

# Tabellenverzeichnis

1

# 1 Einleitung

## 1.1 Einleitung

Eines der wichtigsten Schlagworte im Zeitalter der fortschreitenden Digitalisierung ist der Begriff des Cloud Computings. Auch in Bereichen der Industrie wie der Finanz- und Versicherungsbranche die sich zu großen Teilen aufgrund von Sicherheits- und anderen Bedenken lange Zeit gegen die Nutzung Cloud-basierter Systeme entschieden hatte gewinnt das Thema mehr und mehr Relevanz. Die Nutzung von Cloud-Technologien verspricht die Möglichkeit schneller auf Anforderungen von Kunden reagieren zu können, kostengünstige und flexible Skalierung der eigenen Rechenkapazitäten, Einsparungen durch den Wegfall eigener IT-Infrastruktur Fachleute und mehr.

Gemeinsam mit der Eröffnung neuer Möglichkeiten bringt die Einführung neuer Technologie auch immer eine Reihe eigener Herausforderungen mit sich. Für eine erfolgreiche und gewinnbringende Einführung dieser ist es essentiell diese zu verstehen und die passende Denkweisen und Werkzeuge mit denen die aufkommenden Probleme gelöst werden können entsprechend einzusetzen.

## 1.2 Motivation und Ziele der Arbeit

Das Thema mit dem sich diese Arbeit befassen wird ist das automatisierte Managen und Bereitstellen von Cloud Computing Ressourcen, zusammengefasst unter dem Begriff Infrastructure as Code (IaC). Die Grundlagenkapitel werden zu diesem Zweck auf den technischen Kontext und die Relevanz von Cloud Computing, IaC und dem Software Tool Terraform eingehen. Es wird erläutert werden an welcher Stelle die ausgewählten Plattformen und Software zum Einsatz kommen, welche Probleme dadurch gelöst werden, wo deren Vorteile und Grenzen liegen sowie welche Alternativen existieren und wo ergänzende Werkzeuge zum Einsatz kommen können.

Den Kern der Arbeit bildet ein Vergleich der ausgewählten Cloud Service Provider auf Basis der Unterstützung Von IaC mit Terraform. Hierfür wird die Infrastruktur einer Schulung der Firma Novatec Consulting GmbH in der die wichtigsten grundlegenden Cloud Computing Ressourcen Verwendung finden auf verschiedenen Plattformen mit Terraform bereitgestellt und einem Vergleich unterzogen. Als Vergleichsmetriken werden Kriterien der Norm ISO/IEC 25000 herangezogen um eine fachgerechte und neutrale Bewertung zu gewährleisten. Dabei soll auch in Betracht gezogen werden wie hoch der Aufwand für die

Migration eines bestehenden Systems zu IaC ausfällt. Nach der Auswertung der Vergleichsergebnisse werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst, weitere untersuchenswerte Aspekte aufgeführt und ein Ausblick auf aktuelle und zukünftige Entwicklungen gegeben. Durch die sehr aktuelle Relevanz des Themas werden sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in Zukunft neue Software und Technologien durchsetzen, alte verdrängt und neue Lösungsansätze für bestehende Herausforderungen und Probleme etabliert werden. Diese Arbeit wird jedoch nur die aktuell relevantesten Plattformen und Tools betrachten, um eine Entscheidungsbasis für deren Einsatz zum aktuellen Zeitpunkt bieten zu können.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Funktionsprinzip, Vorteile und Herausforderungen des modernen Cloud Computings

#### 2.1.1 Definition und Funktionsweise

Das National Institute of Standards and Technology (NIST) der Vereinigten Staaten von Amerika definiert Cloud Computing im Abstract der NIST SP-800-145 folgendermaßen:

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. This cloud model is composed of five essential characteristics, three service models, and four deployment models.

Cloud Computing beschreibt ein Modell das es ermöglicht ortsunabhängig, zweckdienlich und zeitunabhängig auf einen konfigurierbaren Pool an Computerressourcen (Netzwerke, Server, Datenspeicher, Anwendungen und Services) zuzugreifen die schnell und mit minimalem Aufwand und minimaler notwendiger Interaktion bereitgestellt und wieder abgebaut werden können. Dieses Cloud Modell beschreibt fünf essentielle Charakteristiken, drei Servicemodelle und vier Bereitstellungsmodelle.

Weiter definiert das Dokument die fünf Charakteristiken in den folgenden Punkten:

**On-demand-self-service:** Der Nutzer kann eigenmächtig die benötigten Ressourcen automatisch bereitstellen, es wird keine menschliche Interaktion benötigt.

**Broad network access:** Auf Leistungen wird über das normale Internet mit standard Mechanismen die die Nutzung von Thin Clients und Fat Clients (Smartphones, Tablets, Laptops oder Workstations) fördern zugegriffen.

**Resource Pooling::** Die Computerressourcen des Anbieters werden in einem gemeinsamen Pool für mehrere Kunden in einem mandantentauglichen Modell bereitgestellt, physische

und virtuelle Ressourcen werden nach dynamisch zugewiesen und entsprechend der Nachfrage neu verteilt. Es wird eine empfundene Ortsunabhängigkeit hergestellt indem der Nutzer kein genaues Wissen darüber besitzt wo sich dessen Resources befinden, auf höherem Level wie beispielsweise dem Staat, der Region oder auch Rechenzentrum kann der Ort vom Nutzer spezifiziert werden. Die bereitgestellten Ressourcen beinhalten zum Beispiel Datenspeicher, Rechenleistung, Rechenspeicher und Netzwerkbandbreite.

**Rapid Elasticity:** Rechenkapazitäten werden dehnbar bereitgestellt und abgebaut, teilweise automatisch, um entsprechend der Nachfrage schnell hoch- und wieder zurück skalieren zu können, Rechenkapazitäten erscheinen dadurch unbegrenzt und zu jeder Zeit in jedem Umfang bereitgestellt werden.

**Measured Service:** Cloud systeme kontrollieren und optimieren Ressourcennutzung automatisch mithilfe eines Messungs-systems dass auf einer abstrakten Ebene den entsprechenden Service (Datenspeicher, Rechenleistung, Benutzerkonten) überwacht, kontrolliert und Bericht erstattet um sowohl für Anbieter als auch Kunden Transparenz herzustellen.

Es wird zwischen drei grundlegende Cloud Service Modellen unterschieden: Infrastructure as a Service (IaaS), Platform as a Service (PaaS) und Software as a Service (SaaS).

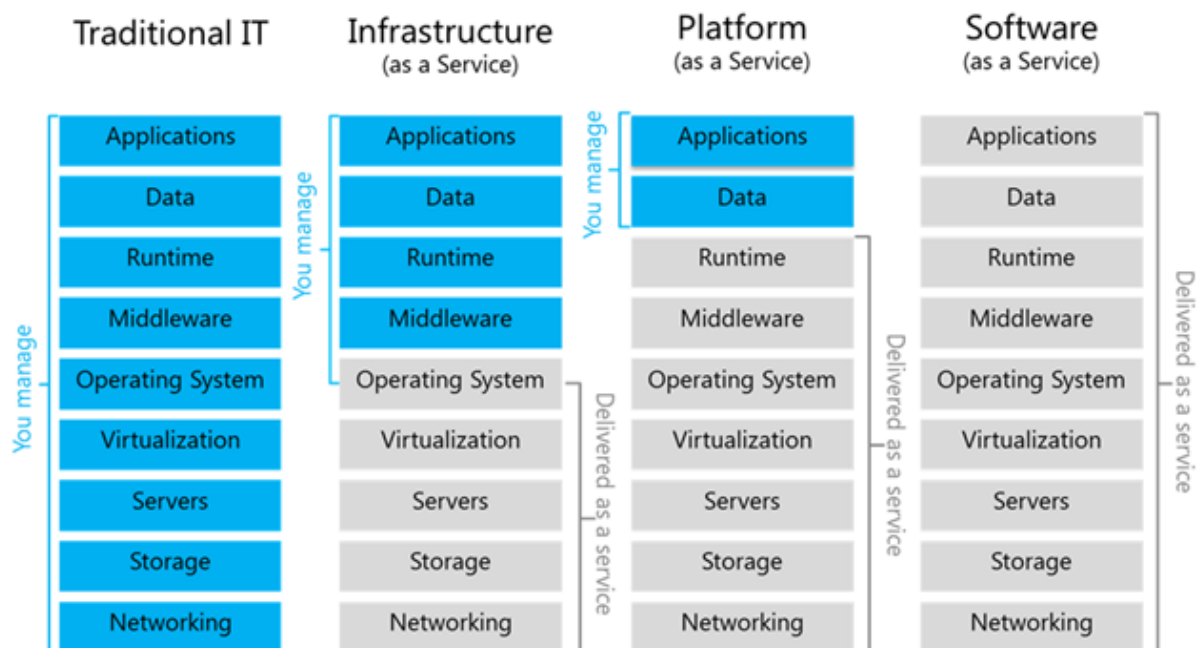


Abb. 2.1: Die grundlegenden Cloud Service Modelle im Überblick

**Infrastructure as a Service:** Der Nutzer hat die Fähigkeit Rechenleistung, Datenspeicher Netzwerke und weitere fundamentale Computerressourcen bereitzustellen und beliebige Software darauf zu betreiben, dazu können Betriebssysteme und Anwendungen gehören.

Die darunterliegende Infrastruktur wird vom Anbieter betrieben, der Nutzer kann aber eingeschränkte Kontrolle über bestimmte Komponenten haben, dazu gehören beispielsweise Firewalls.

**Platform as a Service:** Der Nutzer verfügt über die Fähigkeit seine eingekaufte oder selbst erstellten Anwendungen auf der Cloud Infrastruktur zu betreiben, die notwendige Umgebung die über Sprachen, Bibliotheken, Tools und Services verfügt wird vom Anbieter bereitgestellt. Die darunter liegende Infrastruktur mit Netzwerken, Servern, Betriebssystemen und Speicher wird vom Anbieter betrieben, der Nutzer hat die Kontrolle über die Anwendung und Konfiguration der Umgebung in der die Anwendung betrieben wird.

**Software as a Service:** Dem Nutzer wird der Zugriff auf die vom Anbieter in der Cloud Infrastruktur betriebenen Softwareanwendung gewährt. Auf diese wird mithilfe eines Thin oder Fat Clients zugegriffen, dabei kümmert sich der Nutzer nicht um den Betrieb und die Konfiguration der darunterliegenden Cloud Infrastruktur wie Netzwerke, Server, Betriebssystem, Speicher und die Anwendung selbst mit Ausnahme eingeschränkter Nutzereinstellungen.

Die von NIST unterschiedenen grundlegenden Service Modellen können noch weiter differenziert werden. Ein Beispiel hierfür ist das Modell Function as a Service (FaaS) als Subset von PaaS. FaaS erlaubt es Programmcode auszuführen ohne sich um die Bereitstellung weiterer Infrastruktur kümmern zu müssen wie es der Betrieb eines gewöhnlichen Microservices verlangt.

In Art der Bereitstellung eines Cloud Services werden vier grundlegende Modelle unterschieden; Public, Private, Hybrid und Community Cloud Modelle.

**Private Cloud:** Die Cloud Infrastruktur wird ausschließlich für die Nutzung durch eine einzige Organisation mit mehreren Nutzern bereitgestellt. Besitz und Betrieb liegen dabei entweder bei der selben Organisation, einer Drittpartei oder einer Kombination beider, die Infrastruktur kann dabei On- oder Off Premise betrieben werden.

**Public Cloud:** Die Public Cloud steht für die Nutzung durch die allgemeine Öffentlichkeit bereit. Die Cloud Infrastruktur befindet sich im Besitz eines Unternehmens, Bildungseinrichtung, Regierungsorganisation oder einer Kombination aus diesen und wird auch von der selben Organisation On Premise betrieben.

**Community Cloud:** Eine Community Cloud wird von einer Gemeinschaft von Nutzern mit gemeinsamen Anliegen eingesetzt. Der Besitz und Betrieb liegen dabei bei einem oder mehreren Mitgliedern dieser Gemeinschaft, einer Drittpartei und kann Off oder On Premise betrieben werden.

**Hybrid Cloud:** Die Hybrid Cloud besteht aus einer Kombination der beschriebenen Modelle (Public, Private und Community). Diese bilden dabei eigene Instanzen die aber durch standardisierte oder proprietäre Schnittstellen den Transfer von Daten und Anwendungen zwischen den Instanzen erlauben.

## 2.1.2 Zu erwägende Vor- und Nachteile des Einsatzes von Cloud Computing

### Vorteile und Treiber der Adoption von Cloud Computing

**Wirtschaftliche Vorteile:** Ein Vorteil in der Nutzung von Cloud Computing kann darin liegen dass ein Großteil der für den Betrieb notwendigen Infrastruktur nicht mehr vom Unternehmen selbst eingekauft, eingerichtet und betrieben werden muss (vgl. linke Seite Abb 2.1). Potentiell hohe Kosten die bereits vor der Inbetriebnahme eines Systems mit einem höheren Risiko aufgewendet werden mussten stellen in Form von individuell geringeren laufenden Beträgen ein deutlich reduziertes Risiko da.

Sofern der Einsatz von Cloud Computing in einer sinnvollen und korrekten Weise erfolgt können je nach Fall die Gesamtkosten um einen hohen Anteil reduziert werden.

Die Gesamtkostenersparnisse stehen auch im Zusammenhang mit Skaleneffekten die für große Cloudanbieter gelten. Der Betrieb eines einzelnen Servers ist im Verhältnis mit bedeutend höheren Kosten verbunden als das hinzufügen eines äquivalenten System zu einem Rechenzentrum im Betrieb von AWS oder einem vergleichbaren Anbieter.

**Skalierbarkeit:** Besonders für schnell wachsende Unternehmen ist die Option der schnellen Skalierbarkeit einer der prominentesten Vorteile der Cloud. Es kann nicht nur auf vorhersagbare Anstiege (zum Beispiel ausgelöst durch eine Verkaufsaktion) sondern auch auf unvorhersehbare Ereignisse reagiert werden. Zusätzlich ist es möglich diese Skalierung nicht nur bis zu einem bestimmten Limit, sondern nahezu unendlich zu betreiben. Wichtig ist auch dass sowohl auf steigende als auch sinkende Nachfrage reagiert werden kann.

**Resilienz:** In einem worst case Szenario kann ein ganzes Rechenzentrum durch unvorhergesehen Ereignisse wie beispielsweise Brände, Naturkatastrophen oder anderes vollständig zerstört werden. Selbst wenn Backup-Rechenzentren verfügbar sind ist eine Übertragung der Operationen kein trivialer Ablauf und birgt oft nicht außer Acht zu lassende Risiken. Die Flexibilität der Cloud erlaubt es die gesamte Infrastruktur mit sehr geringem Aufwand in nicht betroffene Regionen zu verlagern und die Kontinuität der Geschäftstätigkeiten mit minimaler Unterbrechung aufrecht zu erhalten.

**Security:** Security Aspekte können sowohl einen Vor- als auch Nachteil von Cloud Computings darstellen. Hier sollen zuerst Vorteile dargelegt werden, potentielle Probleme werden im nächsten Unterkapitel beschrieben. Die technischen Möglichkeiten und besonders auch die Wahrung des Themas Sicherheit in der Cloud unterlagen und unterliegen auch immernoch einem deutlichen Wandel. Cloud Anbieter investieren viele Ressourcen in Sicherheit und stellen dem Nutzer zum Beispiel bereits sicher implementierte Verschlüsselungen zur Verfügung oder bieten einen gewissen Schutz vor Denial-of-Service Angriffen durch die natürliche Skalierbarkeit.



## Nachteile und Risiken

**Netzwerkabhängigkeit:** Da der Zugriff auf Cloud Dienste über das Internet erfolgt entsteht dadurch entsprechend auch eine hohe Abhängigkeit. Eine stabile und schnelle Netzwerkanbindung ist Voraussetzung dass effektiv gearbeitet werden kann, bei lokal gehosteten Systemen ist diese Abhängigkeit entsprechend geringer.

**Vendor Lock-in:** Bei der Nutzung eines Cloud Anbieters entsteht die Gefahr sich zu sehr in Abhängigkeit eines einzelnen Anbieters zu begeben. Im Fall einer Änderung der Nutzungsbedingungen oder einer Änderung im Bezahlmodell die den eigenen Interessen stark entgegen steht besteht die Gefahr bereits so abhängig von diesem Anbieter zu sein dass die Kosten eines Wechsels derart hoch ausfallen dass man gezwungen ist die Bedingungen zu akzeptieren.

**Security und Privacy:** Sicherheitsrisiken sind einer der meistgenannten Gründe die gegen Cloud Computing sprechen, besonders im Fall der Nutzung einer Public Cloud. Die Gefahr dass Daten in die Hände dritter gelangen kann zum Beispiel nicht vollständig ausgeschlossen werden. Da die Verantwortung über die Sicherheit der Daten dem Cloud Anbieter unterliegt kann es auch zu Problemen in Hinsicht der Privatsphäre der Daten kommen, sollte eine Regierungsorganisation Zugriff auf bestimmte Daten eines Nutzer verlangen könnten diese ohne dessen Einverständnis gewährt werden.

**Kosten:** Auch wenn die Nutzung von Cloud Computing mit dem Vorteil geringerer Kosten beworben ist dies nicht zwingend garantiert. Werden die vorhandenen Systeme ungünstig verwendet, zum Beispiel bleiben viele gebuchte Ressourcen ungenutzt und IP-Adressen unverwendet, können hohe Kosten entstehen, auch in der Phase des Übergangs zu Cloud Computing können höhere Kosten entstehen als in einem vergleichbaren Zeitraum davor.

### 2.1.3 Grundlegende Erklärung von DevOps

Die exakte Definition und Abgrenzung des Begriffes DevOps ist ein Thema über das es keine uniform akzeptierte allein gültige Definition und Abgrenzung gibt. Im allgemeinen aber bezeichnet DevOps eine stärkere Vereinigung der Entwicklungs- (Dev) und Betriebs- (Ops) Teams eines Softwareprojekts durch die Anwendung einer effektiveren Arbeitskultur und -philosophie mit neuen Methoden, Werkzeugen und Prozessen. Verschiedene Organisationen legen hierbei in ihrer Definition die Schwerpunkte auf unterschiedliche Aspekte. Als Beispiel betont Amazon hierbei besonders die schnelle Auslieferung neuer Produkte ("ability to deliver applications and service at high velocity"), Microsoft die Kollaboration zwischen den beteiligten Teams ("DevOps enables formerly siloed roles - development, IT operations, quality engineering, and security - to coordinate and collaborate to produce better, more reliable products.").

Das DevOps Research and Assessment (DORA) Team hat über sieben Jahre mit 32.000 Beteiligten die Praktiken und Fähigkeiten untersucht die hohe Leistungsfähigkeit bei Entwicklung und Auslieferung von Software fördern. Eine Übersicht über die Erkenntnisse

dieser Studie ist als Diagramm im Anhang ... zu finden.

Infrastructure as Code spielt als Werkzeug für die automatisierte Bereitstellung der benötigten Computerressourcen eine wichtige Rolle im DevOps Prozess.

### GitOps als Werkzeug für Continuous Delivery im Rahmen von DevOps

GitOps wird von Gitlab als ein betriebliches Rahmenkonzept (operational Framework) definiert das DevOps Best Practices in der automatisierten Bereitstellung von Infrastruktur anwendet. GitOps benötigt dabei drei Hauptkomponenten:

Infrastructure as Code, Merge Requests und CI/CD. Organisationen die mit einer ausgereiften Anwendung der DevOps Kultur arbeiten können über GitOps hunderte Male pro Tag neuen Code auf den Produktionsservern installieren. Im praktischen Teil dieser Arbeit wird GitOps verwendet um da es eine einfache Integration mit Github ermöglicht, Github selbst wird als Versionskontrollsystem verwendet da es weithin etabliert und breit unterstützt ist und von der Novatec Consulting GmbH bevorzugt eingesetzt wird.

#### 2.1.4 Überblick über die wichtigsten Public Cloud Service Provider

Da der Kern der Arbeit die Infrastructure as Code Unterstützung der wichtigsten Cloud Service Provider in deren Public Cloud untersucht soll hier ein kurzer Überblick über den aktuellen Markt in diesem Bereich gegeben werden.

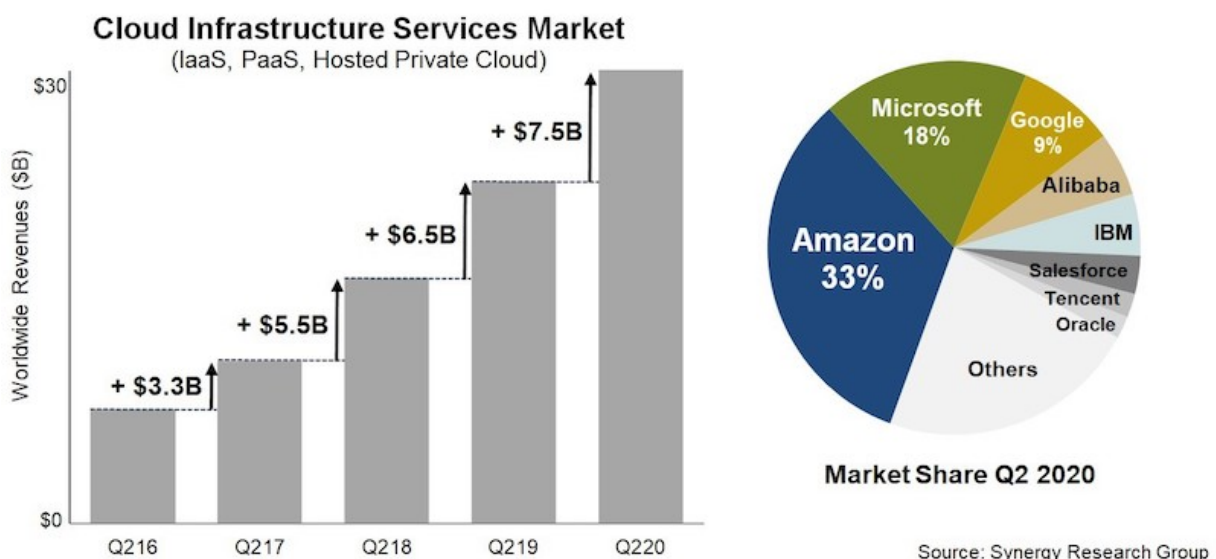
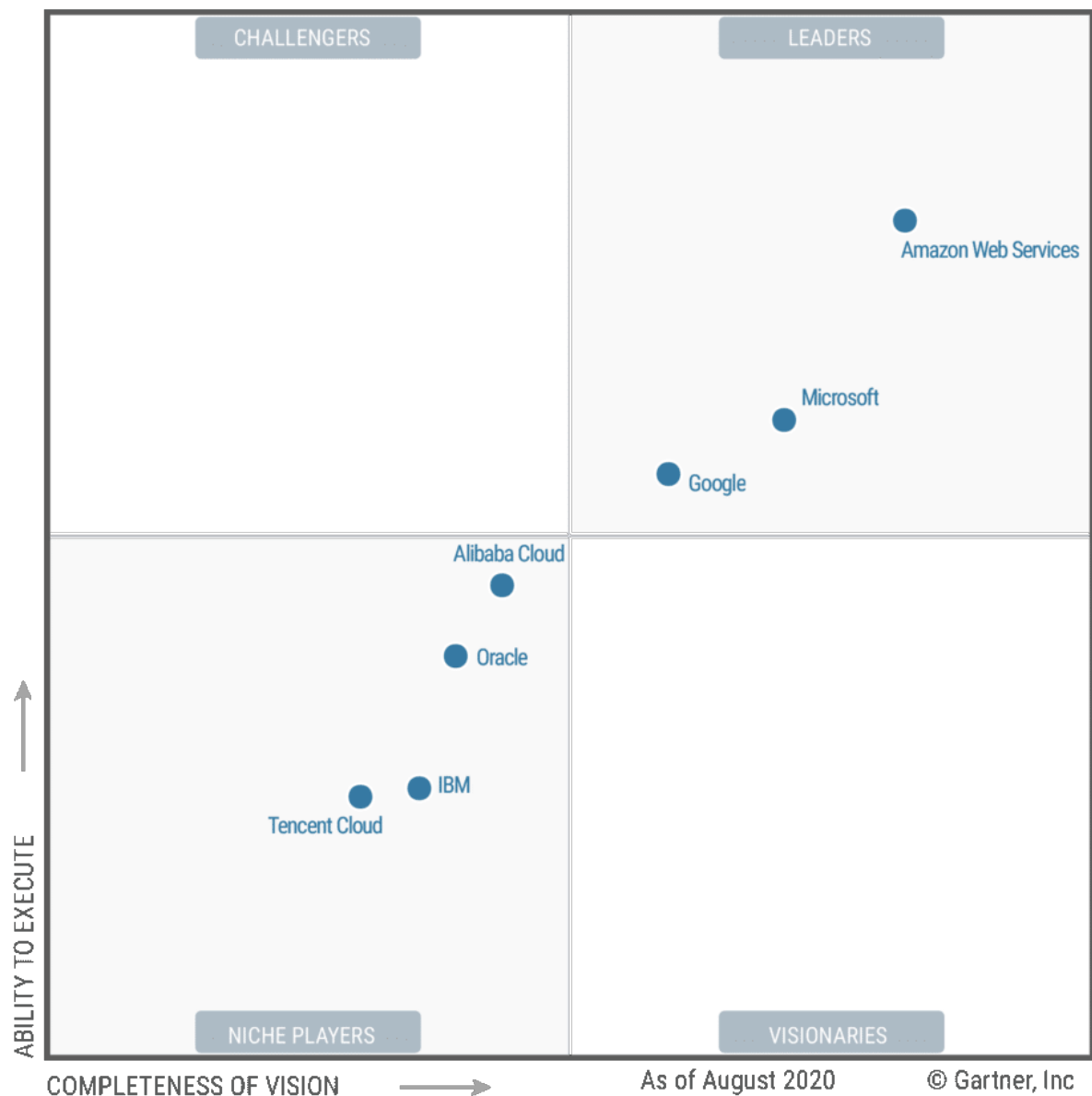


Abb. 2.2: CSP Market Share Q2 2020 nach Umsatz

- 1. Amazon:** Amazon besitzt mit 33% den größten Anteil am Markt. Die Amazon Elastic Compute Cloud (EC2) ist die älteste der aktuell großen Cloud Computing Plattformen, der erste Release fand im August 2006 statt.
- 2. Microsoft:** Microsoft stellt den zweitgrößten Anteil am Markt mit 18%, der erste Release von Microsoft Cloud Computing Service Microsoft Azure erfolgte im Oktober 2008. Gemeinsam besaßen Amazon und Microsoft 2020 über 50% des gesamten Marktes.
- 3. Google:** Google's Google Cloud Platform steht mit 9% an dritter Stelle. Google Compute Engine, die IaaS Komponente der Cloud Services von Google wurde im Juni 2012 veröffentlicht.
- 4. Alibaba Cloud:** Die viertgrößte Cloud Plattform ist die Alibaba Cloud der Alibaba Group. Alibaba Cloud bietet zusätzlich zu seinem Elastic Compute Service (ECS) einen dedizierte GPU basierten Service an.
- 5. IBM Cloud:** Die aktuell fünftgrößte Cloud Computing Plattform ist die IBM Cloud von IBM. Bis Juni 2013 eine eigene Firma unter dem Namen Softlayer wurde diese von IBM übernommen und 2017 gemeinsam mit den anderen Cloud Services der Firma in ein einheitliches Portfolio unter dem Namen IBM Cloud aufgenommen.



**Abb. 2.3:** CSP Gartner Magic Quadrant August 2020

Der Gartner Magic Quadrant für Cloud Service Provider bietet einen groben Überblick über den Umfang der Angebote (Completeness of Vision) und die Ausgereiftheit einer Plattform (Ability to Execute). Deutlich erkennbar ist hier die Vormachtsstellung von Amazon gegenüber Microsoft und Google sowie der Abstand von Google zum nächst größten Anbieter Alibaba Cloud. TODO: Irgendwas mit IBM Ability to Execute vs Marktanteil verglichen mit Oracle

## 2.2 Infrastructure as Code

Infrastructure as Code beschreibt einen Ansatz zur Automatisierung der Bereitstellung von Infrastruktur basierend auf Methoden aus der Softwareentwicklung (vgl Kief Morris Infrastructure as Code S.4).

Statt eines manuellen Aufbaus und direkter Konfiguration der einzelnen Komponenten werden maschinenlesbare Dateien verfasst welche dann von einem IaC Tool eingelesen und verarbeitet werden. Dabei kommen bevorzugt deklarative Sprachen zum Einsatz deren höhere Abstraktion mehr Flexibilität als ein imperativer Ansatz erlaubt. (vgl. <https://docs.microsoft.com/us/devops/deliver/what-is-infrastructure-as-code>)

### 2.2.1 Technologischer Wandel und das Cloud Age Mindset

Durch die Technologien der Cloud ist es möglich eine gewünschte IT-Infrastruktur sehr viel schneller bereitzustellen als zuvor möglich. Statt des Einkaufs, Anschließens und Einrichtens eines physischen Servers das, je nach Szenario einen Zeitraum von mindestens mehreren Stunden oder Tagen bis zu Wochen gedauert hätte können virtuelle Ressourcen in der Cloud in wenigen Minuten bereitgestellt werden. Der schnellere Ablauf wird durch die Automatisierung von Prozessen wie etwa der Bereitstellung der Infrastruktur mithilfe von IaC Tools noch verstärkt, nicht nur bei der initialen Mit diesen Veränderungen wird das Management und die Erweiterung der bestehenden Systeme jedoch nicht unbedingt einfacher (vgl IaC Kief Morris S.3), die Verwendung der alten IT-Governance Modelle (TODO Fußnotenerklärung) die sich bisher bewährt haben sind jedoch aufgrund der Veränderungen ungeeignet. Kief Morris stellt die fundamentalen Unterschiede des Arbeitens mit Cloud-Technologien mithilfe der folgenden Tabelle dar.

Iron Age	Cloud Age
Cost of change is high	Cost of change is low
Changes represent failure (changes must be "managed," "controlled")	Changes represent learning and improvement
Reduce opportunities to fail	Maximize speed of improvement
Deliver in large batches, test at the end	Deliver small changes, test continuously
Long release cycles	Short release cycles
Monolithic architectures (fewer, larger moving parts)	Microservices architectures (more, smaller parts)
GUI-driven or physical configuration	Configuration as Code

**Abb. 2.4:** Iron Age vs Cloud Age

Veränderungen in der 'Iron Age' sind aufwändig und teuer und stellen ein Risiko dar, es wird versucht diese Risikopunkte zu reduzieren daher werden viele Veränderung gebündelt

getestet und eingeführt wodurch lange Release-Zyklen entstehen. Die Architekturen die dadurch befördert werden sind eher monolytisch die Konfiguration erfolgt eher mithilfe von GUI gesteuerten Programmen oder physischen, zum Beispiel wenn ein neuer Server in ein Netzwerk eingebunden wird. Veränderungen in der Cloud stellen fast genau das Gegenteil dar, daher wird erkennbar dass eine auf die 'Iron Age' zugeschnittene Arbeitsweise für die Cloud nicht effektiv ist, es ist ein neues Cloud Age Mindset das die rechte Spalte der Tabelle verinnerlicht erforderlich um die Vorteile der Cloud wirklich effektiv nutzen zu können.

### 2.2.2 Vorteile von IaC und durch IaC gelöste Probleme des manuellen Provisionings

**Kein Configuration Drift durch einheitliche Codebase:** Configuration drift bezeichnet eine über die Zeit wachsende Abweichung zweier ursprünglich identischer Systeme. Wird ein gleiches System, zum Beispiel ein Applikationsserver, in verschiedenen Umgebungen eingesetzt stellen diese oftmals auch leicht verschiedene Anforderungen auf die dann mit Optimierungen, etwa in Form spezifischer Konfigurationsdetails, reagiert werden kann. Wird nun das ursprüngliche System geupdated werden individuelle, oft undokumentierte Anpassungen nicht berücksichtigt und ein Update kann unbequeme Konsequenzen nach sich ziehen. Werden alle Veränderungen in einer einheitlichen Codebase verwaltet und Updates häufig vorgenommen verhindert man starken Configuration Drift der über Zeit stattfindet

**Wiederverwendbarkeit durch einheitlichen Code:** Ein weiterer Vorteil der durch die Verwendung einer einheitlichen Codebase entsteht ist die Wiederverwendbarkeit und Reproduzierbarkeit eines Systems. Wenn ein identisches System an einer anderen Stelle aufgebaut werden soll oder sollte das System aus unvorhergesehen Gründen in seiner Gesamtheit verloren gehen kann es schnell und mit verhältnismäßig geringem Aufwand reproduziert werden. Ein dazu passender Ausdruck in Bezug auf Server ist 'Cattle not Pets'. Statt sich individuell und mit großem Aufwand um einzelne Server zu kümmern wie man es etwa mit dem eigenen Haustier tut sollten Server wie leicht ersetzbares Vieh behandelt werden.

**Schnelleres Provisioning durch Cloud:** Ein bereits häufig angesprochener Vorteil ist die schnelle Bereitstellung, auf tiefere Erklärung kann daher hier verzichtet werden.

**Schnellerer Profit:** Schnellere Bereitstellung der Hardware und schnellere Auslieferung von Software die durch DevOps Methoden begünstigt werden erzeugen entsprechend auch schneller einen Mehrwert.

**Einheitliches Tooling in Dev, Ops und weiteren Beteiligten Teams:** Verwendung von IaC fördert die einheitlicheres Tooling in allen Bereichen die mit einem Softwareprodukt in Zusammenhang stehen. Cloud Technologien fördern und ermöglichen diese Ver-

einheitlichung, manuelles Provisioning ohne ein Cloud Modell erschwert dies oder macht es sogar unmöglich.

**Stärkere Automatisierung im Arbeitsablauf:** Automatisierung bedeutet immer einen gewissen upfront Overhead, jedoch kann auf längere Sicht deutlich von automatisierten Abläufen profitiert werden. Ein Beispiel hierfür sind automatisierte und in eine CI/CD Pipeline integrierte Tests.

**Höhere Zuverlässigkeit und Sicherheit durch schnelle Updates:** Von einer Struktur die schnelle und häufige Veränderungen fördert kann auch die Sicherheit und Zuverlässigkeit eines Systems profitieren. Auf Sicherheitsrisiken kann in kurzer Zeit und ohne viel Aufwand reagiert werden, eine unsichere Funktion kann etwa schnell durch eine sichere Variante ausgetauscht werden, mögliche damit verbundene Probleme können dann in automatisierten Tests erkannt werden wodurch das System zuverlässig bleibt.

**Schnellere Fehlersuche und -behebung:**

Fehler die dennoch auftreten können dann durch den Einsatz kleinerer Komponenten schneller isoliert, gefunden und behoben werden. Monolithische Systeme erschweren dies durch dadurch dass weniger klar isolierte Komponenten vorhanden sind die häufig mehr Abhängigkeiten aufweisen und daher schwerer als einzelne Einheit getestet werden können.

### 2.2.3 Herausforderungen und Argumente gegen den Einsatz von IaC

Kief Morris benennt drei Argumente die gegen die Einführung von IaC genannt werden, diese sollen hier im Kontext der genannten Vorteile betrachtet werden.

**Veränderungen werden nicht oft genug durchgeführt um Automatisierung zu rechtfertigen.**

Die Idee dass ein System einmal erstellt und dann "fertig" ist und Automatisierung der Veränderungen daher überflüssig ist entspricht sehr selten der tatsächlichen Realität. IT-Systeme und damit auch IT-Infrastruktur wird während ihrem gesamten Lebenszyklus mehr oder weniger kontinuierlich verändert und erweitert.

Sicherheitslücken in alten Versionen von Softwarepackages oder Betriebssystemen sind keine Seltenheit und müssen gepatcht werden um einen sicheren und Zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten, neue Features in bestehender Software kann neue Infrastruktur, zum Beispiel in Form eines neuen Datenbankservers, notwendig machen oder eine veränderte Konfiguration ist nötig um die Performance zu steigern. Gerade bei Sicherheitslücken ist es wichtig Anpassungen nicht erst nach längerer Zeit sondern so schnell wie möglich durchzuführen um Sicherheit und Stabilität nicht zu gefährden. Ein weiteres Szenario das die Stabilität eines Systems gefährden kann ist ein schneller Zuwachs an Last die das System erfährt, daher sollte es möglich schnell und unkompliziert das System zu verändern indem mehr Ressourcen zur Verfügung gestellt werden.

Ä fundamental truth of the Cloud Age is: Stability comes from making changes."(IaC Buch S. 5)

Eine fundamentale Wahrheit des Cloud Zeitalters ist: Stabilität entsteht durch Veränderung.

**Infrastruktur soll zuerst aufgebaut, danach automatisiert werden.**

Die Umsetzung von Infrastructure as Code stellt eine durchaus große Herausforderung, das Erlernen eine "Steep Curve"(IaC Buch S.6) dar, deren Nutzen nicht unbedingt direkt ersichtlich ist. Dadurch kommt es zu Situationen in denen es attraktiv erscheint Infrastruktur zuerst aufzubauen sich erst später um die Automatisierung zu kümmern. Mit diesem Ansatz werden viele der Vorteile von IaC jedoch verwirkt und die Schwierigkeit der Umsetzung von IaC fällt deutlich größer aus, verglichen mit einem Projekt das von Beginn auf IaC ausgelegt ist da "Automatisierung Teil des Designs und der Implementierung eines Systems ist"(IaC Buch S.6).

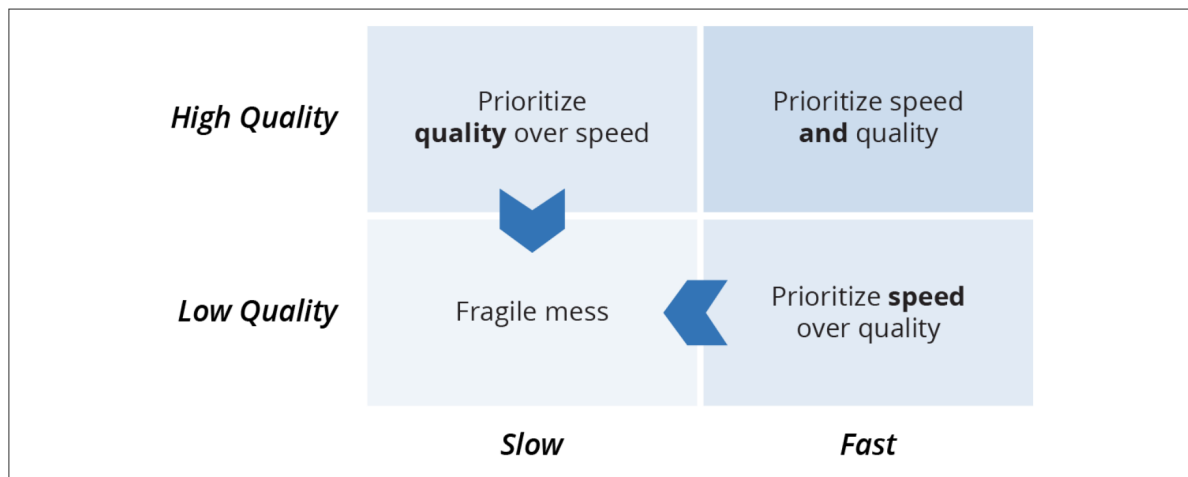
Automatisierung mit IaC vereinfacht auch die Implementierung automatisierter Tests eines Systems was es wiederum erlaubt Fehler schneller zu beheben. Ist dies bereits von Beginn an Teil des Arbeitsprozesses verbessert dies die Qualität der Infrastruktur.

TODO: Wenn erfolgreich werden neue Features gefordert, ohne Automatisierung gerät Management der wachsenden Infrastruktur schnell außer Kontrolle Deliver steady stream of value , build system incrementally

**Es muss zwischen schneller Umsetzung und hoher Qualität gewählt werden.**

Die Idee dass der Fokus auf hohe Geschwindigkeit und hohe Qualität sich gegenseitig behindert oder ausschließt mag logisch erscheinen, in der Praxis ist dies jedoch nicht der Fall. Die "Accelerate State of DevOps Report" Studie kam zu dem Schluss das Organisationen dazu tendieren entweder gut oder schlecht in beiden Kriterien abzuschneiden, wird eines vernachlässigt führt es am Ende in der Regel zu einem "fragile Mess"wie die untenstehende Tabelle erläutert.





**Abb. 2.5:** Iron Age vs Cloud Age IaC Busch S.6

Wird Geschwindigkeit über Qualität gestellt (Quadrant links oben) entstehen mit der Zeit chaotische und instabile Systeme an denen Veränderungen mit der Zeit nur noch erschwert und deshalb langsam durchgeführt werden können.

Wird Geschwindigkeit zu niedrig priorisiert führt es allerdings auch dazu dass letzten Endes durch Druck von Deadlines und schnellen workarounds technische Schulden aufgebaut werden die ebenfalls zu einem qualitativ schlechten System führen da notwendige Veränderungen nicht schnell genug eingearbeitet werden können.

Aufgrund dieser Probleme ist es wichtig Geschwindigkeit und Qualität gleichermaßen zu priorisieren, moderne Entwicklungsansätze DevOps haben das Ziel dies zu erreichen, der Erfolg wird von der Accelerate Studie belegt.

#### 2.2.4 Die drei Kernverfahren von IaC

Kief Morris identifiziert drei Kernverfahren ("Core Practices") zur Implementierung von Infrastructure as Code:

- **Define everything as Code:** Alle Teile eines System in Form von Code zu definieren bringt mehrere Vorteile mit sich.  
Code kann mehrfach ausgeführt werden, daher ist eine als Code definiertes System Wiederverwendbar. Es können unkompliziert mehrere identische Instanzen erstellt werden, das Gilt auch für den Fall wenn Fehler auftreten und ein Neuaufbau erforderlich ist. Das Verhalten des Systems ist vorhersehbar, fortlaufendes automatisches Testen ist möglich und damit auch zuverlässiger.  
Definition in Code macht auch den Aufbau eines Systems transparenter, da dieser immer dem tatsächlichen Zustand des Systems entspricht und damit auch dokumentiert.

- **Continuously Test and Deliver All Work in Progress:** Fortlaufendes, automatisiertes Testen und Integrieren aller Komponenten die sich in Entwicklung befinden dient dem Ziel die Qualität eines Systems nicht nur einzutesten sondern von Beginn an und kontinuierlich einzubauen (The idea is to build quality in rather than trying to test quality in. (vgl IaC Buch S.10)). Nach der Accelerate Studie fördert es die Qualität der Arbeit eines Teams wenn jedes Mitglied mindestens einmal am Tag den eigenen Fortschritt integriert.
- **Build Small, Simple Pieces That You Can Change Independently:** Systeme die aus mehreren kleineren voneinander unabhängigen Komponenten bestehen sind generell stabiler als große Monolithen. Eine Änderung die einen Fehler verursacht betrifft nur diese Komponente in der die Änderung stattfindet, diese kann dann leichter isoliert und das Problem behoben werden, kleine Komponenten sind in der Regel auch weniger komplex und dadurch leichter zu verstehen. Ein einzelner Fehler nach einem Update hat auch den Vorteil dass nur diese Komponente und nicht das gesamte restliche System auf eine ältere Version zurückgesetzt werden muss um den Betrieb wieder herzustellen.

### 2.2.5 Die Rolle von Terraform im IaC Anwendungsprozess

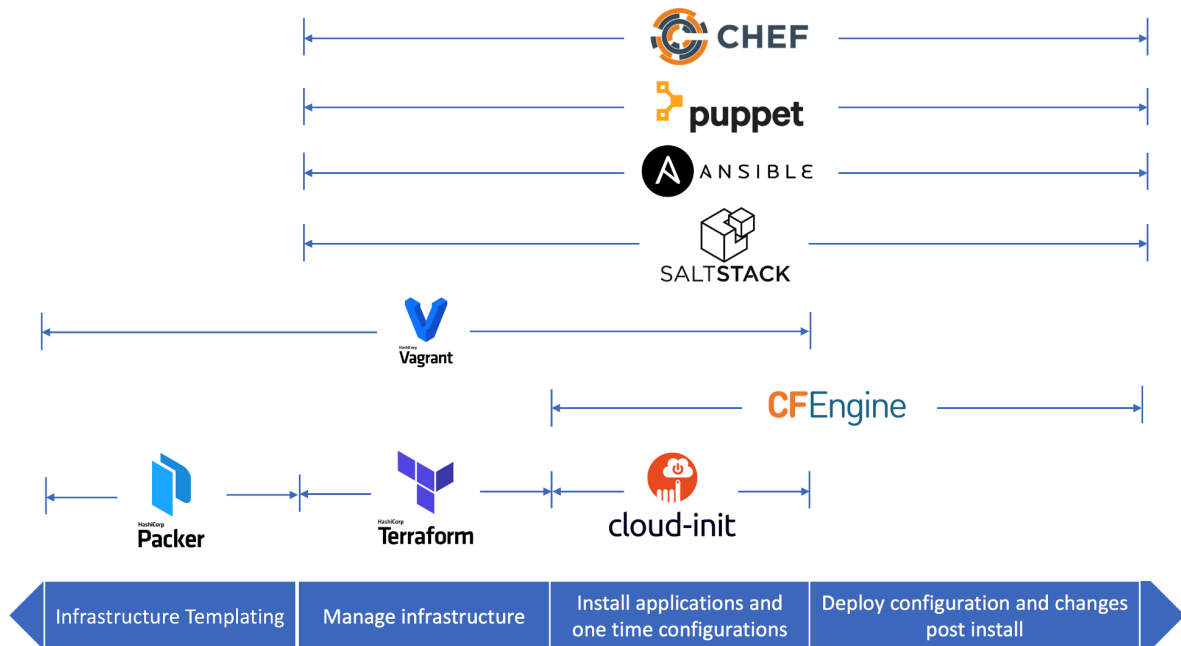
Während der Anwendung von Infrastructure as Code kann primär zwischen zwei wichtigen Phasen unterschieden werden, einer initialen Einrichtungsphase und der darauf folgenden Wartungs- und Betriebsphase.

In der Einrichtung wird die Infrastruktur bereitgestellt und konfiguriert, genauso wird auch Software installiert und eingerichtet.

Nachdem das System dann in Betrieb genommen wurde können Anpassung notwendig werden, Server werden hinzugefügt und abgebaut, Software wird aktualisiert und neu konfiguriert.

#### Überblick über die wichtigsten Infrastructure as Code Tools

Infrastructure as Code beinhaltet verschiedene konkrete Anwendungsfälle und entsprechend existieren auch Tools die zum Teil ein breiteres Spektrum von IaC abdecken, zum Teil aber auch eher spezialisiert sind; Terraform ist dabei ein Beispiel für ein spezialisiertes Tool. Die untenstehende Abbildung soll einen Überblick über die aktuell relevantesten Tools verschaffen, die Einordnungen sind dabei aber nicht unbedingt als absolut anzusehen. Es ist zum Beispiel möglich innerhalb eines Terraform-Deployments auch Software zu installieren und zu konfigurieren, allerdings wird die tatsächliche Installation dann eher per von Terraform aufgerufenen Skripten vorgenommen statt von Terraform selbst verwaltet zu werden, daher ist Terraform hier ausschließlich als Infrastruktur-Management Tool eingeordnet.



**Abb. 2.6:** Überblick IaC Tools <https://medium.com/cloudnativeinfra/when-to-use-which-infrastructure-as-code-tool-665af289fbde>

### Vorteile und Limitierungen von Terraform

Da sich diese Arbeit primär mit dem Provisioning von grundlegender Cloud Computing Infrastruktur in Form von VM's, Netzwerken, Datenspeicher und anderen grundlegenden Komponenten beschäftigen soll bietet sich der Einsatz eines darauf spezialisierten Tools an.

Hier gibt es zusätzlich zu Terraform eine weitere prominente Alternative: Pulumi.

Pulumi bietet im Vergleich zu Terraform mehrere Vorteile, es gibt allerdings auch diverse Nachteile die gegen den Einsatz von Pulumi sprechen. Die folgenden Vorteile bietet Pulumi gegenüber Terraform:

- **Sprache:** Im Gegensatz zu Terraforms Domänen-spezifischer HashiCorp Configuration Language (HCL) setzt Pulumi auf den Einsatz bekannter General-Purpose Programmiersprachen, Python, TypeScript, JavaScript, Go, C# und F#, werden aktuell unterstützt.  
Durch den Einsatz dieser Sprachen können Schleifen, Funktionen und weitere bekannte Konstrukte verwendet werden, Terraform bietet diese Möglichkeiten nicht, ähnliche Effekte werden nur mit Workarounds erreicht.
- **Testing:** Um Terraform-code testen zu können werden Third-party Tools benötigt, Terraform selbst bietet kein Test-Framework. Durch den Einsatz bekannter General-Purpose Programmiersprachen in Pulumi ist es auch möglich die dort zum Einsatz

kommenden Frameworks zu verwenden, Integrationstest sind allerdings nur in Go unterstützt (<https://phoenixnap.com/blog/pulumi-vs-terraform>).

- **Provider Support:** TODO
- **State Management:** TODO

TODO: Pulumi gut, eventuell besser in Hinsicht auf DevOps dennoch Terraform weil:

- **Modularität:** Terraforms Module erlauben es ein System in mehrere klar definierte Komponenten zu strukturieren, dadurch wird eine Wiederverwendbarkeit dieser ermöglicht. Die daraus resultierenden Vorteile wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln dargelegt, daher soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden.
- **Ausgereiftheit:** Terraform hat den Vorteil die ältere (Fußnote Terraform Release 2014 vs 2017 Pulumi) und auch ausgereiftere Option zu sein. TODO:
- **Weitere Verbreitung und größere Popularität:** -größere Community mehr Ressourcen
- **Dokumentation:** Terraform verfügt über eine umfangreiche offizielle Dokumentation

- Warum Terraform statt Pulumi - Hochwertige Dokumentation, breitere Verwendung, bessere Eignung für größere komplexere Projekte => tendenziell interessanter für große Organisationen

Limitierungen weil Nischenprodukt

- Kein try catch error handling - Kein eingebautes rollback - Aktuell können keine Skripte aufgrund bestehender Infrastruktur automatisch erstellt werden, zumindest Terraform selbst bietet (noch!) nicht die Option

## 2.2.6 Terraform Grundprinzipien

## 3 Aufbau und Untersuchung

Beschreibung der HW- und SW-Realisierung

### 3.1 High-level Aufbau der Infrastruktur des Versuchsobjekts

Beispiel Text

### 3.2 Zu analysierende Aspekte und Eigenschaften

### 3.3 Konkreter Aufbau in Microsoft Azure

### 3.4 Konkreter Aufbau in Amazon AWS

### 3.5 Konkreter Aufbau in Google Cloud Platform

### 3.6 Literaturverweise

Verweise im Text: [1] und [Gun04].

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Bewertung Azure

### 4.2 Bewertung AWS

### 4.3 Bewertung GCP

### 4.4 Resultate und Vergleichsmatrix

„Neuigkeiten“ Messergebnisse

# 5 Schluss

Ergebnis-Bewertung, Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Gewonnenen Erkenntnisse

5.2 Zusammenfassung der Arbeit

5.3 Mögliche weitere untersuchenswerte Aspekte

5.4 Aktuelle und zukünftige Entwicklungen

# A Kapitel im Anhang

Alles was den Hauptteil unnötig vergrößert hätte, z. B. HW-/SW-Dokumentationen, Bedienungsanleitungen, Code-Listings, Diagramme



# Literaturverzeichnis

- [1] Thomas Nonnenmacher, LaTeX Grundlagen - Setzen einer wissenschaftlichen Arbeit Skript, 2008, <http://www.stz-softwaretechnik.de>; (*Bei STZ Internetseite unter Publikationen - Skripte*) [V. 2.0 26.02.08]
- [Gun04] Karsten Günther, LaTeX2 — Das umfassende Handbuch, Galileo Computing, 2004, <http://www.galileocomputing.de/katalog/buecher/titel/gp/titelID-768>; 1. Auflage