

## Projektarbeit

# Software-defined Networking mit Openflow

Mücahit Sagioglu

Matrikelnummer: 1228852

James Belmonte

Matrikelnummer: 1340604

Naghmeh Ghavidel Rostami

Matrikelnummer: 1249307

Tung Trinh

Matrikelnummer:

Vorgelegt am: 27. Januar 2022

Dozent: Maurizio Petrozziello

Modul 25: Informatik Projekt

Software-defined Networking mit Openflow

Wintersemester 2021/2022

# Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erklären wir, dass wir die vorliegende Arbeit eigenständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet sowie die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen/Gedanken als solche kenntlich gemacht haben. Diese Arbeit wurde noch keiner anderen Prüfungskommission in dieser oder einer ähnlichen Form vorgelegt. Sie wurde bisher auch nicht veröffentlicht.

Hiermit stimmen wir zu, dass die vorliegende Arbeit von der Prüferin/ dem Prüfer in elektronischer Form mit entsprechender Software auf Plagiate überprüft wird.

X

James Belmonte

X

Mücahit Sagioglu

X

Naghmeh Ghavidel

X

Tung Trinh

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
Listings	vii
1 Abstract	1
1.1 Software-defined Networking . . . . .	1
1.2 Motivation . . . . .	2
1.3 Problemstellung . . . . .	3
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
2 Projekt	5
2.1 Projektziel . . . . .	5
2.2 Vorgehen . . . . .	5
2.3 Festlegen von Meilensteinen . . . . .	6
2.4 Verwendete Werkzeuge . . . . .	7
3 Durchführung des Projektes	16
3.1 Netzwerkplan . . . . .	16
3.2 Aufbau des Netzwerkgerüsts in Mininet . . . . .	16
3.3 Verschlüsselung der Netzwerkverbindung zwischen den Lokationen . . . . .	20
3.4 Auswahl des Service-Providers . . . . .	24
3.5 Einrichtung des NAT-Firewalls . . . . .	25
3.6 Implementierung der Webproxy-Funktion . . . . .	27
3.7 Aufbau eines zentralen Topologie-Viewers und einer Monitoring-Lösung . . . . .	29
3.8 Realisierung einer Quality of Service Funktion . . . . .	29
3.9 Priorisierung der Datenübertragung über API . . . . .	29
3.10 Analyse weiterer Netzwerkfunktionen . . . . .	29
4 Zusammenfassung	30
4.1 Analyse der Ergebnisse . . . . .	30
4.2 Kritische Betrachtung . . . . .	30
5 Fazit	31
5.1 Zukunftsaussichten . . . . .	31

## *Inhaltsverzeichnis*

6	Kapitel 1	32
7	Kapitel 2	33
7.1	Unterkapitel 1 . . . . .	33
7.2	Unterkapitel 2 . . . . .	34

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Zeitplan des Projektes . . . . .	6
2.2	Erstellung eines Standardnetzwerkes mit Mininet . . . . .	10
2.3	Webbenutzeroberfläche vom Floodlight-Controller . . . . .	12
2.4	Ausführung von Floodlight über den Linux-Terminal . . . . .	14
2.5	Mininet Controller Verbindung und Ping-Test . . . . .	15
3.1	Netzwerkplan aller Lokationen . . . . .	17
3.2	Netzwerk-Klasse zur Topologie Erstellung . . . . .	18
3.3	Erstellung und Verbindung von Router und Switch . . . . .	19
3.4	Erstellung und Verbindung von Hosts und Switch . . . . .	19
3.5	Verbindung und Konfigurierung der Router . . . . .	19
3.6	Erstellung eines RemoteController's . . . . .	20
3.7	Erstellung des Mininet-Objektes . . . . .	20
3.8	Ausführung und Testen vom Mininet-Skript . . . . .	21
3.9	Aufstellen der GRE-Tunnel . . . . .	22
3.10	Konfiguration der Routen . . . . .	23
3.11	Erstellung der States für die Ver- und Entschlüsselung . . . . .	23
3.12	Erstellung der Policies für die Ver- und Entschlüsselung . . . . .	24
3.13	Verschlüsselter Verkehr zwischen Standort Frankfurt und Berlin . . . . .	24
7.1	Beziehungen von Klassen und Interfaces [ <b>jtpinterface</b> ] . . . . .	33

# Tabellenverzeichnis

3.1	DSL-Angebote verschiedener Internet-Service-Provider . . . . .	26
7.1	Eigenschaften von Vector, PriorityQueue und HashSet . . . . .	34
7.2	Eigenschaften der Python Datenstrukturen [ <b>listuple</b> ] . . . . .	34

# Listings

7.1 Deklaration eines Interfaces . . . . .	33
--	----

# 1 Abstract

Der vorliegende Projektbericht dient als Dokumentation des Informatikprojekts „Software-Defined Network mit OpenFlow“ an der Frankfurt University of Applied Sciences im Bachelorstudiengang Informatik im Wintersemester 2021/2022.

Das Aufkommen des Internets hat eine Revolution in der Informationstechnologie geschaffen. Durch eine neue Art der Kommunikation kann der Mensch auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene effizienter und effektiver Informationen weitervermitteln. Dies bildet die Grundlage für die heutige Wissensökonomie.

Die traditionelle Netzwerkarchitektur ist jedoch seit einem halben Jahrhundert unverändert geblieben und wird für die Geschäftsanforderungen von Unternehmen, Netzbetreibern und Endbenutzern zunehmend ungeeignet. Gegenwärtig werden die Geschäftsanforderungen von Unternehmen immer komplexer und die Anwendungsvielfalt der Endbenutzer nimmt zu, was zu unterschiedlichen Anforderungen der Benutzer an Verbindungsnetzwerke führt. Das Netzwerk muss auf sich schnell ändernde Parameter von Latenz, Bandbreite, Routing, Sicherheit und so weiter (usw.) entsprechend den Anforderungen der Anwendungen reagieren [**case**].

In den letzten Jahren hat die dramatische Zunahme der Netzwerkkomplexität Schwierigkeiten bei der traditionellen Netzwerkadministration mit sich gebracht. Das Konfigurieren von Computernetzwerksystemen unter Verwendung vordefinierter Richtlinien, das Rekonfigurieren von Netzwerken, um auf Änderungen zu reagieren, die Fehlerkorrektur und der Lastausgleich sind zu gewaltigen Aufgaben geworden. Wenn die Parameter des Netzwerks neu konfiguriert wurden, musste jedes Gerät manuell vollständig neu konfiguriert werden, anstatt einfach nur den Teil der Steuerungsebene zu ändern (vgl. Kim/Feamster 2013: 114f). Dies führte zu einem revolutionären Wandel in der Netzwerktechnologie durch die Zentralisierung der Netzwerkadministration. Seitdem wurde das Konzept des Software-Defined Network (SDN) geboren [**improve**].

## 1.1 Software-defined Networking

asd



### 1.1.1 Einleitung von James

asddsa

### 1.1.2 Einleitung von Naghmeh

asddsa

### 1.1.3 Einleitung von Tung

asddsa

### 1.1.4 Einleitung von Mücahit

asddsa

## 1.2 Motivation

Das Modul “Informatik Projekt” wird im 5. Semester des Bachelorstudiengangs Informatik durchgeführt. Nach erfolgreichem Abschluss des Moduls sollten Studierende gewisse Kompetenzen erlernt haben, wie beispielsweise den Software-Engineering Prozess planen und durchführen, als auch auf einem vertieften Niveau gemeinsam programmieren zu können. Außerdem sollten Studierende fähig sein, gemeinsam ein Team zu bilden und einen selbsterstellten Zeitplan einzuhalten sowie auf einem technisch hohen Niveau zu kommunizieren, um als Team auf Ergebnisse zu kommen. Falls unerwartete Komplikationen sowohl technischer als auch sozialer Art entstehen, sollte als Team diese Hürde überwunden werden. Infolgedessen entstand dieser Projektbericht, der als Projektergebnis und als Dokumentation dient, um die erlernten Kompetenzen widerzuspiegeln.

Durch das Thema “Software-Defined Networking mit Openflow” konnte Freizeit mit Studium verbunden werden, da viele selbsterlernte Kenntnisse und Vorkenntnisse aus anderen Modulen praktisch angewendet werden konnten. Zugleich dient die Dokumentation durch ausführliche Erklärungen und Abbildungen auch als Tutorial, dass den Einstieg in das Thema SDN durch Praxis vereinfachen soll.

## 1.3 Problemstellung

Innerhalb des Informatikprojekts muss sich folgendes Szenario vorgestellt werden:

Ein Unternehmen plane eine Netzwerkkommunikation zwischen vier Standorten mittels Software-Defined Networking Funktionen. Die Hauptverwaltung befinde sich in Frankfurt am Main, die drei weiteren Niederlassungen seien in München, Berlin, Hamburg. Zudem sollte jede Lokation einen Asymmetric Digital Subscriber Line Zugang (ADSL) zum Internet haben.

Darüber hinaus müssen im Netzwerk bestimmte Funktionen und Aufgaben realisiert werden. Es solle nicht nur für jede Lokation jeweils ein privater IP-Adressenbereich genutzt werden, sondern auch ein Netzwerkplan vom gesamten Netzwerk erstellt werden. Außerdem solle jede Kommunikation zwischen den einzelnen Lokationen über eine Virtual Private Network Verbindung (VPN) laufen, somit sei der gesamte Datenverkehr über das Internet und zwischen den Lokationen verschlüsselt. Anschließend müsse ein Service-Provider gefunden werden, der die gewünschte Konfiguration und Anforderungen realisiere. Jedoch sollen der Preis und die benötigte Bandbreite nicht nur für den Internetzugang, sondern auch für die Wide Area Network-Verbindungen (WAN) beachtet und verglichen werden. Ebenfalls solle durch SDN sowohl eine Network Address Translation-Firewall-Funktion (NAT) als auch eine Webproxy-Funktion in allen Lokationen implementiert werden. Ergänzend dazu solle mithilfe des SDN-Controllers sowohl eine graphische Darstellung der Netzwerkstruktur durch einen Topologieviewer realisiert werden als auch eine Monitoring-Lösung. Zudem müsse eine Quality of Service-Funktion implementiert werden, die genügend Bandbreite für Audio beziehungsweise (bzw.) Video-Konferenzen habe, auch wenn diese über die WAN-Verbindung mit Symmetric Digital Subscriber Line (SDSL) 20 Megabit begrenzt sei. Anschließend wird ein weiteres Szenario beschrieben:

“Für eine Spezialanwendung muss eine Software in Berlin wichtige Daten an einem Server in der Zentrale senden, dazu kann diese Software über die API mit dem Controller kommunizieren und diesem dies mitteilen. Dadurch wird der Controller nun alle Knoten auf diesem Weg durchs Netzwerk anweisen, diesen Flow zu priorisieren und alle anderen Datenströme zu drosseln.” Schließlich sollen die Netzwerkfunktionen Hub (Repeater), Bridge, Layer-2-Switch, Layer-3-Switch, Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) und Domain Name System (DNS) analysiert und realisiert werden.

In Kapitel 3 wird für die Implementierungen der Netzwerk Funktionalitäten Screenshots von Mininet in VirtualBox gezeigt, die als Nachweis der einzelnen Funktionalitäten dienen sollen.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 dieser Projektarbeit wird über das generelle Vorgehen in dem Projekt geschrieben. Nach einer kurzen Vorstellung unseres Projektziels, wird das konkrete Vorgehen innerhalb der Gruppe erläutert. Weiterhin wird sowohl über die Festlegung der Meilensteine, als auch über die genutzten Werkzeuge eingegangen. In Kapitel 3 wird die Projektdurchführung erklärt und in den Unterkapiteln werden die erreichten Ergebnisse vorgestellt, die auch die einzelnen Thematiken der jeweiligen Funktionalitäten ergänzen. Anschließend dient Kapitel 4 mit einer kurzen Analyse aller Ergebnisse, als auch eine kritische Betrachtung der Projektanforderung, als Auswertung und Selbstreflektion, was im Rahmen der Projektarbeit nicht funktionierte und umgesetzt werden konnte, in Bezug auf Netzwerkanforderungen, sowie intern zwischen allen Gruppenmitgliedern. Kapitel 5 bildet mit dem Fazit einen Ausblick in die mögliche Zukunft für SDN.

## 2 Projekt

### 2.1 Projektziel

Ziel des Projekts war es, ein Netzwerk für ein Unternehmen mit vier Lokationen aufzubauen. Dabei war es besonders wichtig, dass das gesamte Netzwerk mit SDN Funktionen realisiert wurde.

Ein stabiles Netzwerk vom ersten Tag an wird die Grundlage für den Erfolg von Unternehmen sein. Damit Unternehmen gut funktionieren, muss auch das Netzwerksystem gut funktionieren. Das Netzwerk arbeitet mit der richtigen Kapazität und bringt Effizienz. Die Aufgabe war es, ein gutes stabiles Netzwerk aufzubauen, dass zu 100 Prozent bei Datenverkehr funktionierte und unerwartete Sicherheitsprobleme vermeidete.

Das Netzwerksystem musste eng verwaltet und überwacht werden. Zudem musste es leicht unterstützt werden, um Probleme auf die effektivste Weise behandeln und beheben zu können. Es war zwingend erforderlich, dass das Netzwerksystem sicher und verschlüsselt war. Denn Unternehmensdaten sind das Wichtigste. Bei der Netzwerksicherheit ging es auch um den Schutz von Unternehmensressourcen. Je nach Verwendungszweck und Anzahl der Nutzer sollten genügend Bandbreite zur Verfügung gestellt werden.

Im Laufe des Projektberichtes werden die erfolgreichen sowie erfolglosen Ergebnisse des Projekts dokumentiert und dargestellt. Am Ende des Projektes wird ein lauffähiges Produkt entstehen, dass alle benötigten Funktionalitäten erfüllt.

### 2.2 Vorgehen

Angemessene Aufgabenverteilung im Kollektiv, brachte viele Vorteile für die Arbeitssituation und den Teammitgliedern. Die Nutzung der maximalen Kapazität jedes Teammitglieds war ein effektiver Weg, um die Arbeitseffizienz zu verbessern.

Um die Wünsche und Fähigkeiten jedes einzelnen Mitglieds zu verstehen, wurden Gespräche und Diskussionen frühzeitig durchgeführt. Die Zuweisung von Aufgaben, die der Produktivität jeder Person entsprachen, half den Mitgliedern, effektiver und mit einem angenehmeren Geist zu arbeiten. Den Mitgliedern wurden bestimmte Aufgaben mit

Fristen zugewiesen. Es wurde jede Woche ein permanentes Treffen über Discord gehalten. Spontane Treffen konnten mit dem höchsten Geist und der höchsten Konzentration ebenfalls durchgeführt werden.

Die Analyse von Aufgabenzuweisungen war wichtig, um zu verstehen, was getan werden muss und welche Tools notwendig seien. Der Wissensaustausch half den Mitgliedern, sich Wissen sofort anzueignen und effektiv zu nutzen. Nach einer erfolgreichen Analyse begann unser Team mit der Ausarbeitung eines Plans. Die Arbeit wurde vom Projektleiter aufgeteilt und kontrolliert.

### 2.3 Festlegen von Meilensteinen

In dem ersten Treffen der Gruppe wurde entschieden, drei zentrale Meilensteine zu definieren (siehe Abbildung 2.1). Grund dafür sei, einen klaren Faden in der Projektarbeit zu konstruieren, um mit der Menge an Informationen strukturiert umgehen zu können. Die Meilensteine wurden mithilfe der Aufgabenstellungen konkretisiert:

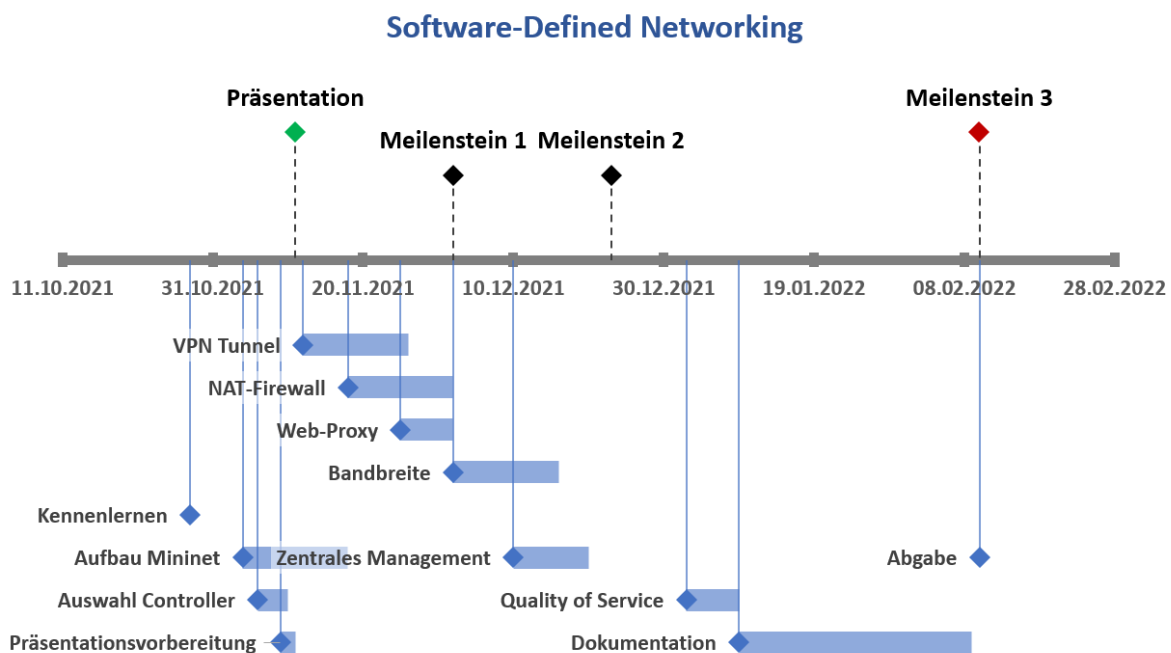


Abbildung 2.1: Zeitplan des Projektes

#### Meilenstein 1

- Erstellung eines Netzwerkplans für das gesamte Netzwerk
- Kommunikation zwischen Lokationen soll über eine VPN Verbindung realisiert werden

- Produktauswahl bei einem ISP zur Realisierung des Netzwerkes
- Implementierung einer NAT-Firewall-Funktion in allen Lokationen
- Deadline: 02.12.2021

### Meilenstein 2

- Implementierung einer Webproxy-Funktion für den Internet-Zugang in den einzelnen Lokationen
- Implementierung eines Topologie-Viewers und einer Monitoring-Lösung
- Implementierung einer Quality of Service Funktion für Audio- und Videokonferenzen
- Deadline: 23.12.2021

### Meilenstein 3

- Priorisierung von einem Datenflow mithilfe des Controllers
- Analyse und Umsetzung der Netzwerkfunktionen von Hub, Bridge, Layer-2-Switch, Layer-3-Switch, DHCP und DNS
- Deadline: 10.02.2022

Durch gängige IT-Projektmanagementmethoden, wie beispielsweise die Scrum-Methode, konnten frühzeitig Ergebnisse erzielt werden. Infolgedessen gab es am Ende der Projektarbeit mehr Zeit, um über Kleinigkeiten zu reflektieren.

## 2.4 Verwendete Werkzeuge

Im Folgenden werden die für die Implementierung und Evaluierung verwendeten Hardware- und Softwareumgebungen kurz beschrieben.

Dieses Projekt wurde auf VirtualBox Oracle VM Version 6.1 durchgeführt. Unter der Verwaltung von VirtualBox wurde Mininet-Emulator Version 2.3 und Floodlight Controller Version 1.2 installiert. Zur Ausführung von Programmen zur Evaluation wurde außerdem Python3 installiert. Weitere Programme sind auch installiert und sie werden im Ablauf von Kapitel 3 bekannt gegeben und ausführlicher erklärt.

### 2.4.1 Mininet

Der Mininet-Emulator implementiert die Verbindung zwischen Switches und Controllern. Diese ermöglicht es Entwicklern, die an der Erstellung und dem Testen von Controller-Ressourcen interessiert sind, Mininet zur Durchführung ihrer Simulationen zu nutzen.

### 2.4.1.1 Einführung

Mininet ist ein Netzwerk Emulator, mit der Netzwerke simuliert werden können. Bei Mininet handelt es sich um eine kostenlose Open-Source-Software, die die virtuelle Maschine und dem Controller die Recherche in SDN und OpenFlow ermöglicht. Mininet ermöglicht eine sehr groß angelegte Topologie, wodurch ein Netzwerk von Hosts, Switches, virtuellen Links und einem Controller erstellt wird. Das Ausführen von Tests mit den Komponenten ist unkompliziert und kann über Python-Schnittstelle erledigt werden. Benutzer können ihre eigene Netzwerktopologie-Struktur nach ihren eigenen Bedürfnissen aufbauen.

### 2.4.1.2 Funktionalität

Mininet:

- stellt ein einfaches Netzwerk Testbed dar, welches aber auch gleichzeitig günstig ist. Da der OpenFlow Switch in Mininet alle Eigenschaften wie ein echter OpenFlow Switch hat, ist die Anwendung von einem Netzwerkemulator mit Mininet praktisch sinnvoll.
- ermöglicht das Debuggen und Ausführen von Tests größerer Netzwerke mithilfe von Command Line Interface (CLI).
- unterstützt das Einrichten beliebiger benutzerdefinierter Diagramme. Die Anwendungen im Mininet können im echten Netzwerk realisiert werden, ohne dass der Code geändert werden muss.
- bietet eine benutzerfreundliche und erweiterbare Python-API.
- ermöglicht mehreren gleichzeitigen Entwicklern, unabhängig voneinander an derselben Topologie zu arbeiten.
- ermöglicht komplexe Topologietests, ohne dass ein physisches Netzwerk verkabelt werden muss.

### 2.4.1.3 Nachteile

Aktuell ist Mininet nur unter Linux lauffähig. Nutzer eines anderen Betriebssystems müssen auf Linux entweder durch Simulierung oder Installation zurückgreifen. Zudem könnte der Sourcecode effizienter und sauberer implementiert werden.

Mininet schreibt Ihren OpenFlow-Controller nicht für Benutzer. Wenn Benutzer benutzerdefiniertes Routing- oder Schaltverhalten benötigen, müssen Benutzer einen Controller mit den erforderlichen Funktionen finden oder entwickeln.

Standardmäßig ist Mininet-Netzwerk von Local Area Network (LAN) und vom Internet isoliert - das ist normalerweise eine gute Sache! Benutzer können jedoch das NAT-Objekt und/oder die Option `-nat` verwenden, um Ihr Mininet-Netzwerk über Network Address Translation mit Ihrem LAN zu verbinden. Benutzer können Ihrem Mininet-Netzwerk auch eine echte (oder virtuelle) Hardware-Schnittstelle hinzufügen (siehe Beispiele/hwintf.py für Details).

Standardmäßig teilen sich alle Mininet-Hosts das Host-Dateisystem und den PID-Speicherplatz. Das bedeutet, dass Benutzer möglicherweise vorsichtig sein müssen, wenn sie Daemons ausführen, die eine Konfiguration in `/etc` erfordern, und Benutzer müssen darauf achten, dass sie nicht versehentlich die falschen Prozesse beenden.

Im Gegensatz zu einem Simulator hat Mininet keine starke Vorstellung von virtueller Zeit. dies bedeutet, dass Timing-Messungen auf Echtzeit basieren und dass Ergebnisse schneller als Echtzeit (z. B. 100-Gbit/s-Netzwerke) nicht einfach emuliert werden können.

### 2.4.1.4 Komponenten

Ein Mininet-Netzwerk besteht aus den folgenden Komponenten:

- **Link:** Links sind virtuelle Ethernets, die zwei virtuelle Schnittstellen verbinden. Jeder Link verhält sich für das gesamte System wie ein echter funktionsfähiger Ethernet-Anschluss. Die Datenrate jedes Links wird von Linux Traffic Control (TC) festgelegt.
- **Hosts:** Ein emulierter Host ist eine Reihe von Prozessen auf Benutzerebene, die in einen Netzwerk-Namespaces verlagert wird. Netzwerk-Namespaces bieten Prozessgruppen privaten Besitz von Schnittstellen, Ports und Routing-Tabellen.
- **Switch:** Mininet verwendet Open vSwitches, die im Kernelmodus ausgeführt werden, um Pakete zwischen verschiedenen virtuellen Netzwerkschnittstellen auszutauschen. Open vSwitches sind OpenFlow-fähig und bieten die gleiche Semantik für das Senden von Paketen wie einen realen Switch.
- **Controller:** Ein Controller ist in der Mininet-Simulation ein Knoten, der einen OpenFlow-Controller darstellt. Mininet bietet die Möglichkeit einen internen oder externen Controller zu benutzen. Für den externen Controller wird die IPv4-Adresse und der Port benötigt.

### 2.4.1.5 Installation

Mininet kann auf verschiedene Weisen installiert werden. In unserer Arbeit wurde die Option: Native Installation from Source ausgewählt. Die Installation wird Schritt für Schritt aufgeführt:



1. Git wird über das Linux-Terminal installiert

```
$ sudo apt-get install git
```

2. Über das git Kommando wird die aktuellste Version von Mininet installiert

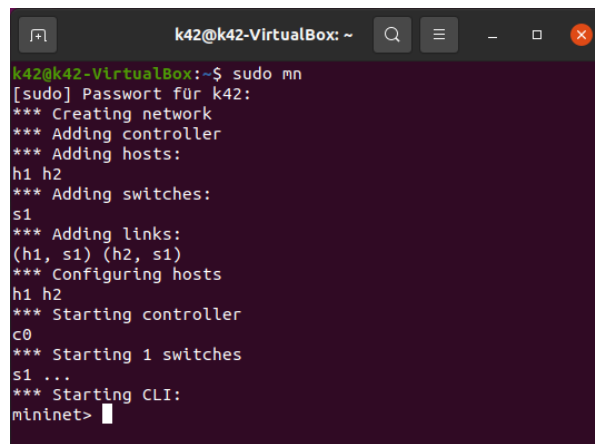
```
$ git clone git://github.com/mininet/mininet
```

3. Mit install.sh die Installation starten

```
$ sudo mininet/util/install.sh -a
```

### 2.4.1.6 Aufbau

Durch die Eingabe von dem Befehl **sudo mn** wird ein Standardnetzwerk mit zwei Hosts, einer Switch und einem Controller gestartet (siehe Abbildung 2.2).



```
k42@k42-VirtualBox: ~  
k42@k42-VirtualBox:~$ sudo mn  
[sudo] Passwort für k42:  
*** Creating network  
*** Adding controller  
*** Adding hosts:  
h1 h2  
*** Adding switches:  
s1  
*** Adding links:  
(h1, s1) (h2, s1)  
*** Configuring hosts  
h1 h2  
*** Starting controller  
c0  
*** Starting 1 switches  
s1 ...  
*** Starting CLI:  
mininet>
```

Abbildung 2.2: Erstellung eines Standardnetzwerkes mit Mininet

### 2.4.2 Floodlight

Floodlight ist ein sogenannter Controller zur Steuerung einer oder mehreren programmierbaren Switches. Die Kommunikation zwischen Switch und Controller erfolgt über ein Kommunikationsprotokoll namens OpenFlow. Die Kontrolle der Switches erfolgt entweder durch Programmierung oder einer vom Controller zur Verfügung gestellten und benutzerfreundlichen Schnittstelle.

### 2.4.2.1 Einführung

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl unterschiedlicher SDN-Controller entwickelt. Aus diesem Grund gibt es mittlerweile eine riesige Auswahl an SDN-Controllern für die breit gefächerten Einsatzzwecke, wo unter anderem OpenDaylight, Ryu, POX, NOX und Floodlight dazugehören. Mit allen Controllern sind alle Projektziele der Projektarbeit erzielbar.

Floodlight wurde als Controller ausgewählt, da einige Punkte und das daraus resultierende Gesamtprodukt die Gruppe überzeugen konnte. Dazu gehört unter anderem die einfache und gut beschriebene Installation. Die moderne Webbenutzeroberfläche und die verständliche, gut dokumentierte REST-API sind sehr benutzerfreundlich und leicht zu verstehen. Daraus resultiert auch die Option, die REST-API über ein Python-Skript zu benutzen. Die Einbindung des Floodlight-Controllers in Eclipse ermöglicht die Implementierung, Untersuchung und das Debuggen verschiedenster Controller-Funktionen. Die gute Dokumentation des in Java geschriebenen Controllers und einige mit der Installation mitgelieferten Beispielanwendungen geben einem Entwickler einen guten Start zur Entwicklung von Netzwerkfunktionen.

### 2.4.2.2 Funktionalität

Die Funktionalitäten des Floodlight-Controllers unterscheiden sich anhand der Ausführung und der Implementierung. Funktionen können über die Webbenutzeroberfläche per Eingabe ausgeführt werden (siehe Abbildung 2.3). Das Einstellen der Switch-Firewall und der Access Control List sind zwei dieser Funktionen. Nach Aktivierung der Firewall werden alle Pakete, die nicht in der Liste eingetragen sind, fallen gelassen. Die Access Control List arbeitet ähnlich wie die Firewall, wohingegen nur eine Liste mit erwünschten und nicht erwünschten Quellen existiert. Die Quellen werden anhand der Paket-Informationen angegeben. Bei einem Treffer wird die Quelle je nach Einstellung zugelassen oder verweigert. Folglich verweigert die Firewall jegliche Verbindung nach Aktivierung, wohingegen die Access Control List nur bestimmte Zugriffe auf ein Netzwerk zulässt oder ablehnt. Auf der Webbenutzeroberfläche sind Informationen zu dem vom Controller gesteuerten Netzwerk einsehbar. Dazu gehört die Anzahl der Switches, Hosts und Links sowie der verbrauchten Ressourcen des Controllers und der Netzwerktopologie. Die Statistikfunktion des Controllers kann auf der Benutzeroberfläche aktiviert werden. Dieser dient zur ausführlichen Weiterverarbeitung und der Anzeige der vom Controller gesammelten Statistik. Dazu gehören die Flow, meter, queue, aggregate, table und port Statistiken. Die Sammlung benutzerdefinierter Statistiken sind ebenfalls möglich und müssen vom Entwickler nachimplementiert werden. Über die REST-API können sogenannte Flows eingetragen werden, die zur Steuerung des Netzwerkes beitragen. Dabei können Datenpakete modifiziert, zwischengespeichert und umgeleitet werden.

## 2 Projekt

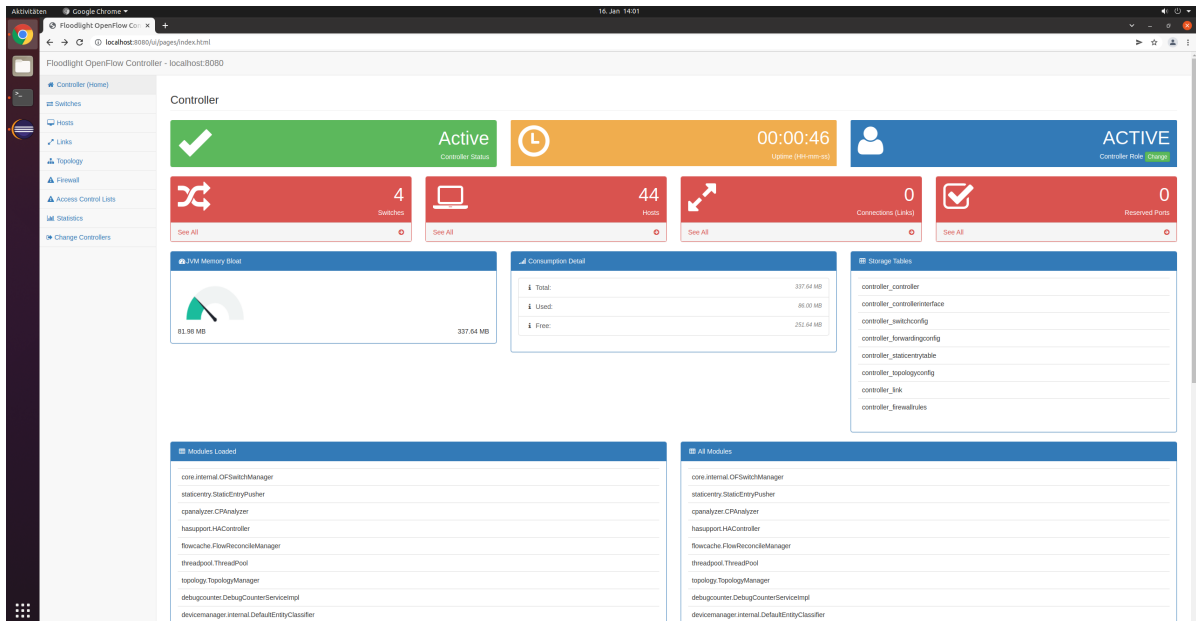


Abbildung 2.3: Webbenutzeroberfläche vom Floodlight-Controller

### 2.4.2.3 Nachteil

Das ganze Netzwerk ist betroffen, wenn Floodlight ausfällt oder nicht erreichbar ist. Dieser Single Point of Failure gilt für alle Controller und stellt ein Risiko für Netzwerke, die eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit fordern. Die Wartung und Konfiguration eines Controllers für komplexe Netzwerkstrukturen erfordern viele geschulte Angestellte.

### 2.4.2.4 Komponenten

Mit der Installation von Floodlight kommen sogenannte Module zum Einsatz. Die meisten der Module sind bereits aktiviert und stellen bestimmte Funktionen zur Verfügung. Einer davon ist die Learning Switch, welcher für die Speicherung der Routen zu den Hosts zuständig ist. Wenn ein Host einen anderen Host im gleichen Netzwerk erreichen will und der Switch die Route nicht kennt, wird ein Broadcast ausgeführt, der die Anfrage auf allen Ports ausgibt. Wenn der Host antwortet, speichert der Switch die MAC-Adresse des jeweiligen Hosts ab und muss somit keinen Broadcast durchführen. Weitere Beispielmodule wären der Load Balancer und der Topology Manager. Der Load Balancer sorgt für einen Ausgleich des Datenverkehrs im gesamten Netzwerk. Der Topology Manager stellt die Netzwerktopologie über die Webbenutzeroberfläche grafisch dar. Es existieren noch weitere Module, wobei auch eigene programmiert werden können.

### 2.4.2.5 Installation

Die Installation des Floodlight-Controllers kann auf den Betriebssystemen Linux, Mac oder Windows erfolgen. Es wird das Java Development Kit 8, Maven, Git, build-essential und das Python Development Paket benötigt. Da Floodlight in Java geschrieben wurde, wird auch zur Ausführung Java verwendet. Maven wird zum sogenannten Builden benutzt, bei dem die Software Floodlight aus mehreren Dateien zusammengestellt wird. Das Python Development Paket wird zur Ausführung und Git zum Herunterladen von Floodlight vorausgesetzt. Build-essential werden zum Kompilieren einiger Software verwendet. Im Folgenden wird die Installation auf Linux Schritt für Schritt erklärt. Befehle müssen im Linux-Terminal zeilenweise eingegeben werden.

1. Alle benötigten Abhängigkeiten installieren.

```
$ sudo apt-get install build-essential git maven python-dev openjdk-8-jdk
```

2. Java Compiler als Alternative festlegen. Befehl eingeben und JDK 8 Auswählen.

```
$ sudo update-alternatives --config javac
```

3. Programmcode per Github herunterladen und aktualisieren

```
$ git clone git://github.com/floodlight/
```

```
$ floodlight.git
```

```
$ cd floodlight
```

```
$ git submodule init
```

```
$ git submodule update
```

4. Floodlight Ordnerrechte zuweisen und Builden

```
$ cd ..
```

```
$ sudo chown -hR Benutzername:Gruppenname floodlight/
```

```
$ cd floodlight/
```

```
$ mvn package -DskipTests
```

5. Floodlight im Terminal ausführen (siehe Abbildung)

```
$ java -jar target/floodlight.jar
```

Es besteht die Möglichkeit, den Floodlight Controller mithilfe von Eclipse zu starten, somit muss Floodlight nicht im Terminal ausgeführt werden. Außerdem ist Floodlight durch die Entwicklungsumgebung Eclipse leichter auszuführen und eine Bearbeitung ist übersichtlicher. Zudem hat man eine schnelle Übersicht vom kompletten Controller, da alle Klassen in einem Eclipse Ordner einzusehen sind. Mit `sudo mvn package -Declipse` werden mehrere Dateien erstellt. Mit den neu erstellten Dateien kann ein neues Eclipse Projekt importiert werden. Anschließend wird Eclipse gestartet und eine neue Arbeitsumgebung erstellt. **File -> import -> General -> Existing Projects into**

**Workspace** und auf **Next** klicken. Von **Select root directory** auf **Browser** klicken und Verzeichnis das Floodlight enthält auswählen. Das Projekt mit **finish** ausführen und damit sollte Floodlight auf Eclipse importiert sein.

Um Floodlight auf Eclipse auszuführen, wählt man **run configuration** aus, rechts klickt auf **java application** und **new**. Anschließend wird die neue Java Application **FloodlightLaunch** genannt, es nutzt das Projekt Floodlight und **net.floodlight.controller.core.Main** in der Main-Klasse. Nachdem dies konfiguriert wurde, kann das Programm in Eclipse ausgeführt werden.

#### 2.4.2.6 Aufbau

Nach erfolgreicher Installation und Ausführung von Floodlight läuft der Controller standardmäßig auf Port 6653. Im Terminal werden alle informativen Ereignisse ausgegeben. Um den Controller zu stoppen, wird die Tastenkombination Steuerung und C gleichzeitig gedrückt (siehe Abbildung 2.4).

```

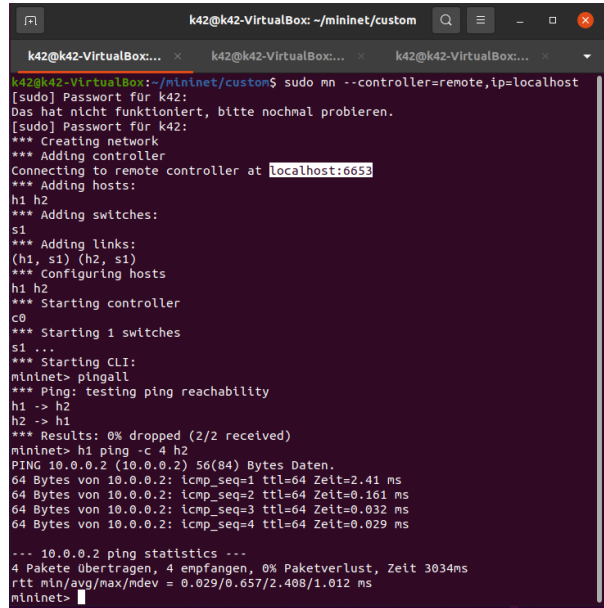
k42@k42-VirtualBox: ~/Floodlight/floodlight
k42@k42-VirtualBox: ~/mininet/custom x k42@k42-VirtualBox: ~/mininet/custom x k42@k42-VirtualBox: ~/Floodlight/floodlight x
k42@k42-VirtualBox: ~/Floodlight/floodlight$ java -jar target/floodlight.jar
2022-01-31 20:43:21.406 INFO [n.f.c.m.FloodlightModuleLoader] Loading modules from src/main/resources/floodlightdefault.properties
2022-01-31 20:43:21.503 WARN [n.f.r.RestApiServer] HTTPS disabled; HTTPS will not be used to connect to the REST API.
2022-01-31 20:43:21.504 WARN [n.f.r.RestApiServer] HTTP enabled; Allowing insecure access to REST API on port 8080.
2022-01-31 20:43:21.504 WARN [n.f.r.RestApiServer] CORS access control allow ALL origins: true
2022-01-31 20:43:21.636 WARN [n.f.c.i.OFSwitchManager] SSL disabled. Using insecure connections between Floodlight and switches.
2022-01-31 20:43:21.636 INFO [n.f.c.i.OFSwitchManager] Clear switch flow tables on initial handshake as master: TRUE
2022-01-31 20:43:21.636 INFO [n.f.c.i.OFSwitchManager] Clear switch flow tables on each transition to master: TRUE
2022-01-31 20:43:21.636 INFO [n.f.c.i.OFSwitchManager] Setup default rules for all tables on switch connect: true
2022-01-31 20:43:21.641 INFO [n.f.c.i.OFSwitchManager] Setting 0x1 as the default max tables to receive table-miss flow
2022-01-31 20:43:21.672 INFO [n.f.c.i.OFSwitchManager] OpenFlow version OF_15 will be advertised to switches. Supported fallback versions [OF_10, OF_11, OF_12, OF_13, OF_14, OF_15]
2022-01-31 20:43:21.676 INFO [n.f.c.i.OFSwitchManager] Listening for OpenFlow switches on [192.168.1.20]:6653
2022-01-31 20:43:21.677 INFO [n.f.c.i.OFSwitchManager] OpenFlow socket config: 1 boss thread(s), 16 worker thread(s), 60000 ms TCP connection timeout, max 1000 connection backlog, 4194304 byte TCP send buffer size
2022-01-31 20:43:21.678 INFO [n.f.c.i.Controller] ControllerId set to 1
2022-01-31 20:43:21.678 INFO [n.f.c.i.Controller] Shutdown when controller transitions to STANDBY HA role: true
2022-01-31 20:43:21.678 WARN [n.f.c.i.Controller] Controller will automatically deserialize all Ethernet packet-in messages. Set 'deserializeEthPackets' to 'FALSE' if this feature is not required or when benchmarking core performance
2022-01-31 20:43:21.678 INFO [n.f.c.i.Controller] Controller role set to ACTIVE
2022-01-31 20:43:21.706 INFO [n.f.l.i.LinkDiscoveryManager] Link latency history set to 10 LLDP data points
2022-01-31 20:43:21.706 INFO [n.f.l.i.LinkDiscoveryManager] Latency update threshold set to +/-0.5 (50.0%) of rolling historical average
2022-01-31 20:43:21.709 INFO [n.f.t.TopologyManager] Path metrics set to LATENCY
2022-01-31 20:43:21.709 INFO [n.f.t.TopologyManager] Will compute a max of 3 paths upon topology updates
2022-01-31 20:43:21.717 INFO [n.f.f.Forwarding] Default hard timeout not configured. Using 0.
2022-01-31 20:43:21.717 INFO [n.f.f.Forwarding] Default idle timeout set to 5.
2022-01-31 20:43:21.717 INFO [n.f.f.Forwarding] Default table ID not configured. Using 0x0.
2022-01-31 20:43:21.717 INFO [n.f.f.Forwarding] Default priority not configured. Using 1.
2022-01-31 20:43:21.717 INFO [n.f.f.Forwarding] Default flags will be set to SEND_FLOW_REM false.
2022-01-31 20:43:21.717 INFO [n.f.f.Forwarding] Default flow matches set to: IN_PORT=true, VLAN=true, MAC=true, IP=true, FLAG=true, TPPT=true
2022-01-31 20:43:21.717 INFO [n.f.f.Forwarding] Default detailed flow matches set to: SRC_MAC=true, DST_MAC=true, SRC_IP=true, DST_IP=true, SRC_TPPT=true, DST_TPPT=true
2022-01-31 20:43:21.717 INFO [n.f.f.Forwarding] Not flooding ARP packets. ARP flows will be inserted for known destinations
2022-01-31 20:43:21.717 INFO [n.f.f.Forwarding] Flows will be removed on link/port down events
2022-01-31 20:43:21.718 INFO [n.s.StatisticsCollector] Statistics collection disabled
2022-01-31 20:43:21.718 INFO [n.s.StatisticsCollector] Port statistics collection interval set to 10s
2022-01-31 20:43:21.719 INFO [n.f.h.HAController] Configuration parameters: {serverPort=192.168.1.20:4242, nodeId=1} 1
2022-01-31 20:43:21.741 INFO [o.s.s.i.SyncManager] [1] Updating sync configuration ClusterConfig [allNodes={1=Node [hostname=192.168.56.1, port=6642, nodeId=1, domainId=1], 2=Node [hostname=192.168.56.1, port=6643, nodeId=2, domainId=1], 3=Node [hostname=192.168.56.1, port=6644, nodeId=3, domainId=1], 4=Node [hostname=192.168.56.1, port=6645, nodeId=4, domainId=1]}, authScheme=CHALLENGE_RESPONSE, keyStorePath=/etc/floodlight/myKey.jceks, keyStorePasswd is set]

```

Abbildung 2.4: Ausführung von Floodlight über den Linux-Terminal

## 2.4.3 Ergebnis

Nach der Ausführung von Floodlight, wurde dieser mit einer OpenFlow-fähigen Switch verbunden. Der Switch wurde mit Mininet mit der Angabe des Controllers simuliert. Die Konsole zeigt die erfolgreiche Verbindung mit dem Controller. Die Konnektivität im Netzwerk kann mit dem Befehl *pingall* überprüft werden. Die Konnektivität zwischen Host 1 und Host 2 wird durch den Befehl *h1 ping h2* getestet. Durch Wireshark kann der ausgelöste Datenverkehr betrachtet werden (siehe Abbildung 2.5).



```

k42@k42-VirtualBox: ~/mininet/custom
k42@k42-VirtualBox:~/mininet/custom$ sudo mn --controller=remote,ip=localhost
[sudo] Passwort für k42:
Das hat nicht funktioniert, bitte nochmal probieren.
[sudo] Passwort für k42:
*** Creating network
*** Adding controller
Connecting to remote controller at localhost:6653
*** Adding hosts:
h1 h2
*** Adding switches:
s1
*** Adding links:
(h1, s1) (h2, s1)
*** Configuring hosts
h1 h2
*** Starting controller
c0
*** Starting 1 switches
s1 ...
*** Starting CLI:
mininet> pingall
*** Ping: testing ping reachability
h1 -> h2
h2 -> h1
*** Results: 0% dropped (2/2 received)
mininet> h1 ping -c 4 h2
PING 10.0.0.2 (10.0.0.2) 56(84) Bytes Daten:
64 Bytes von 10.0.0.2: icmp_seq=1 ttl=64 Zeit=2.41 ms
64 Bytes von 10.0.0.2: icmp_seq=2 ttl=64 Zeit=0.161 ms
64 Bytes von 10.0.0.2: icmp_seq=3 ttl=64 Zeit=0.032 ms
64 Bytes von 10.0.0.2: icmp_seq=4 ttl=64 Zeit=0.029 ms

--- 10.0.0.2 ping statistics ---
4 Pakete übertragen, 4 empfangen, 0% Paketverlust, Zeit 3034ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.029/0.657/2.408/1.012 ms
mininet>

```

Abbildung 2.5: Mininet Controller Verbindung und Ping-Test

## 3 Durchführung des Projektes

Die in Kapitel 1.3 dargestellten Problemstellungen werden in diesem Kapitel behandelt und realisiert. Mit den im vorherigen Kapitel erläuterten Werkzeugen wird dieses Projekt umgesetzt. Durch Abbildungen, Code Ausschnitte und Erläuterungen soll die Dokumentation die Vorgehensweise und Überlegungen der Gruppe wiedergeben.

### 3.1 Netzwerkplan

Die topologische Struktur des Netzwerks, die in Mininet erstellt wird, ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Das Netzwerkdiagramm enthält 40 Hosts, 4 Switches, 4 Router und einen Controller. Der Floodlight-Controller hat einen globalen Überblick über die physikalische Topologie. Die 4 Switches sind mit dem Controller verbunden. Zehn Hosts in den jeweiligen Lokationen sind mit einem Switch verbunden. Um die Hosts in jeder Lokation mit dem Internet und mit anderen Lokationen zu verbinden, wird ein Router benötigt. Durch die grüne Linie und den Tunnel wird gezeigt, dass die Kommunikation zwischen Lokationen verschlüsselt sind. Ebenfalls sind alle Router der Lokationen mit dem Internet verbunden, welches durch eine Cloud visualisiert wird.

### 3.2 Aufbau des Netzwerkgerüsts in Mininet

In diesem Abschnitt wird die beschriebene Topologie unter Verwendung von Mininet simuliert und erklärt.

#### 3.2.1 Durchführung

In der Main-Funktion werden die Komponenten eines Netzwerks deklariert und aufgerufen. Das sind eine Topologie, ein Controller mit zugewiesenem Port und ein Mininet Objekt mit der deklarierten Topologie. Anschließend wurde für unsere Router Routing-Regeln und Informationen gegeben.

### 3 Durchführung des Projektes

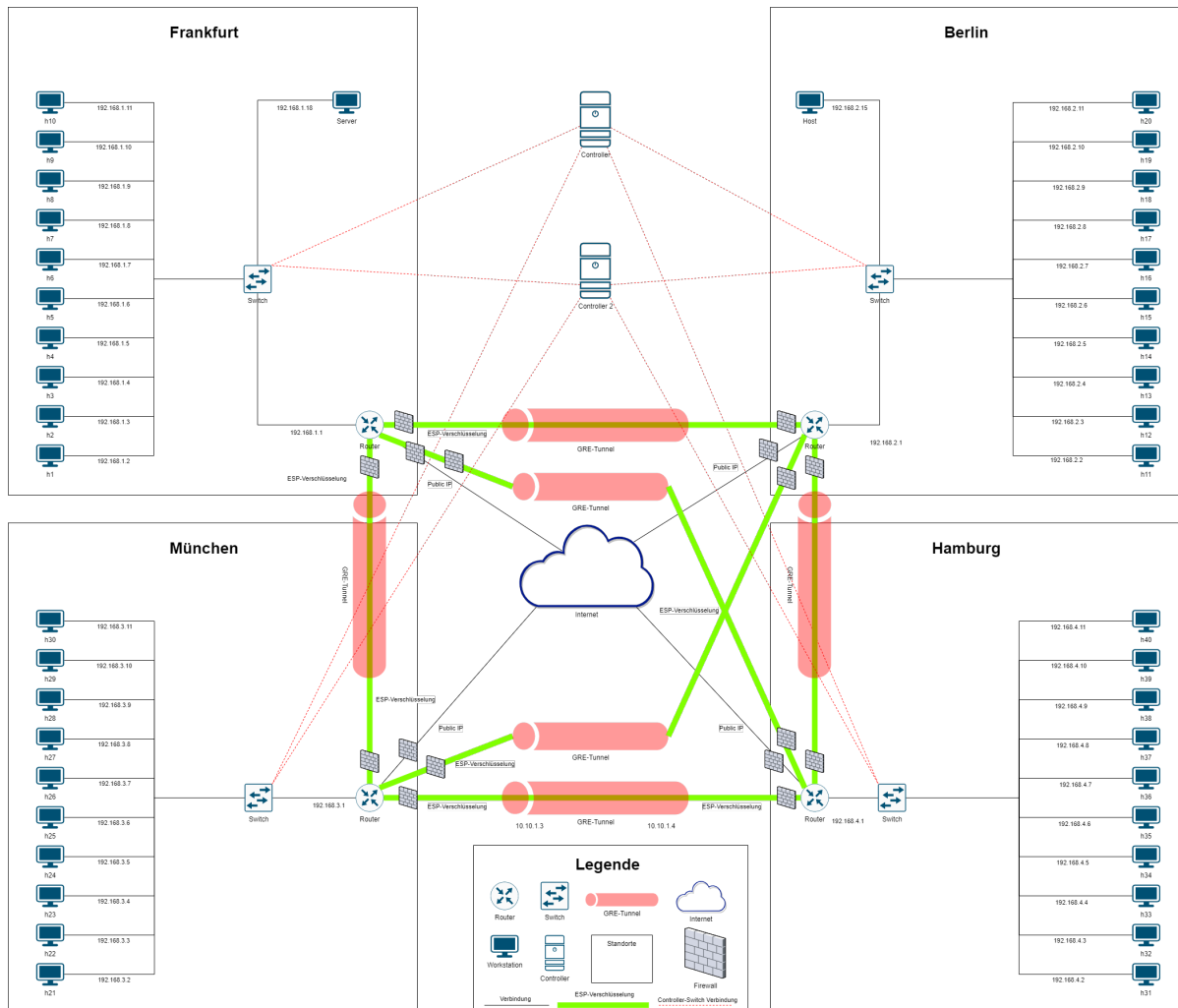


Abbildung 3.1: Netzwerkplan aller Lokationen



## 3.2.2 Aufbau der Topologie

Die Klasse `Netzwerk` bildet die Netzwerktopologie. Diese befindet sich in der Main-Funktion des Mininet-Skripts. Das Mininet-Skript besteht aus einer Main-Funktion. Die Main-Funktion enthält eine definierte Klasse `Netzwerk()`. Mithilfe dieser Klasse wird das Netzwerk beziehungsweise eine Topologie erstellt (siehe Abbildung 3.2). Die Klasse übernimmt ein `Topo`-Objekt an dem er mit der in ihm definierten `build()` Methode die Konfiguration des Netzwerkes vornimmt. In der `build()` Methode wird zuerst ein String definiert, der den privaten-IP-Bereich der vier Lokationen enthält. Der `defaultIP` String bleibt in unvollständiger Form `192.168.%s.1/24`. Somit kann er später durch passende Stellen ersetzt und genutzt werden. Lediglich ist hier im dritten Block ein Platzhalter eingesetzt der beim Erstellen der Router in einer Schleife durch die Zahl der Iteration ersetzt wird. Zunächst wird ein leeres Array/Liste unter dem Namen `Routers` deklariert. Dies wird dann später genutzt und mit den Router-Objekten gefüllt. Später für die Verlinkung der Router mit dem jeweiligen Switch wird die Liste aufgerufen. Für größere Anzahl von Router ist die Bedeutung der Liste sehr praktisch.

```
# Hier implementieren wir unseren Netzwerkplan (Topologie)
class Netzwerk(Topo):
    def build(self, n=10, **_opts):

        # IP adresse für die Router r1-r4
        defaultIP = '192.168.%s.1/24'

        # Leere Liste. Gebraucht für später
        routers = []
```

Abbildung 3.2: Netzwerk-Klasse zur Topologie Erstellung

Im nächsten Teil der Klasse `Netzwerk`, werden die Komponenten des Netzwerks implementieren. Dies ist mit Hilfe einer Schleife mit 4 Durchläufen ausgeführt worden. Jeder Durchlauf entspricht einer Lokation, der jeweils einen Switch, einen Router und zehn Hosts erstellt. Dabei wird bei jeder Iteration erst ein Router-Objekt mit der Methode `self.addNode()` erstellt, bei dem der Name, der private IP-Adressen-Bereich, die MAC-Adresse und der benutzerdefinierte Parameter für die Konfiguration, dass der Router IP-Forwarding aktiviert bekommt, übergeben. Danach wird der Router der vorher erstellten Liste eingefügt. Mit der Methode `self.addSwitch()` wird ein Switch erstellt der einen Namen erhält. Anschließend wird mit der Methode `self.addLink()` eine Verbindung zwischen dem Router und der Switch erstellt. Dabei wird auch die Netzwerkschnittstelle des Routers benannt und der private-IP-Adressenbereich vergeben (siehe Abbildung 3.3).

Danach folgt noch eine Schleife, bei der insgesamt `n` Hosts erstellt und mit dem Switch verbunden werden (siehe Abbildung 3.4). Die Hosts erhalten für den jeweiligen privaten-IP-Bereich eine IP, eine MAC-Adresse und die IP des jeweiligen Routers als Standard-Route zugewiesen.

Nachdem für alle Lokationen der Rumpf erstellt worden ist, werden die Verbindungen zwischen den Routern mit dem Befehl `self.addLink()` hergestellt. Dabei wird jeder

### 3 Durchführung des Projektes

```
# Erstellen der 4 Router, welche jeweils eine Site darstellen
for r in range(4):
    router = self.addHost(
        'r%s' % (r+1), cls=Router, ip=defaultIP % (r+1), mac='00:00:00:00:00:0%s' % (r+1))
    routers.append(router)

# Erstellen der 4 Switch's für die vier Sites
switch = self.addSwitch('s%s' % (r+1))

# Erstellen der Verlinkung zwischen dem Router und der Switch pro Site
self.addLink(switch, router, intfName2='r%s-eth1' % (r+1),
    params2={'ip': defaultIP % (r+1)})
```

Abbildung 3.3: Erstellung und Verbindung von Router und Switch

```
# Erstellen der 40 Host's (10 pro Site) mit anschließender Verlinkung
for h in range(n):
    name = ((r)*10)+(h+1)
    host = self.addHost(name='h%s' % (name), ip='192.168.%s.%s/24' % (r+1, h+2),
        defaultRoute='via 192.168.%s.1' % (r+1), mac='00:00:00:00:00:0%s:0' % (r+1, h))
    self.addLink(host, switch)
```

Abbildung 3.4: Erstellung und Verbindung von Hosts und Switch

Router mit allen anderen Routern verbunden. Dieser Vorgang wird das Internet simulieren, worauf ebenfalls der Tunnel und die Verschlüsselung implementiert wird. Dabei wird der Netzwerkschnittstellen-Name für beide Router und die jeweilige öffentliche-IP-Adresse definiert. Zusätzlich wird per **bw=20** Befehl die Bandbreite der Leitung auf 20 Megabit gesetzt, wobei dies die geforderte SDSL-Leitung im Kapitel 3.8 darstellen soll (siehe Abbildung 3.5).

```
# Hinzufügen von Interfaces für die Router und Verlinkung der Router untereinander
# Das stellt unser "Internet" da
self.addLink(routers[0],
    routers[1],
    intfName1='r1-eth2',
    intfName2='r2-eth2',
    params1={'ip': '10.100.12.1/24'},
    params2={'ip': '10.100.12.2/24'},
    bw=20
)
```

Abbildung 3.5: Verbindung und Konfigurierung der Router

### 3.2.3 Controller Implementierung

Nach der Erstellung der Topologie geht es weiter bei der Main-Funktion. Es wird ein **RemoteController-Objekt** erstellt, der einen Namen, die Konfiguration, um was für ein Controller es sich handelt, die IP-Adresse und den Port, wo er zu erreichen ist, bekommt (siehe Abbildung 3.6). Hier ist wichtig zu erwähnen, dass der Controller auf Ubuntu läuft und zurzeit per **localhost** zu erreichen ist. Der Controller könnte auf einer anderen VirtualBox-Maschine laufen und per **internes Netzwerk** verbunden werden. Ebenfalls kann der Controller auf dem Hostsystem laufen und per **Host-Only-Adapter** in Mininet eingebunden werden.

```
# We create our controller and define the properties
c0 = RemoteController('c0', controller=RemoteController,
                      ip='localhost', port=6653)
```

Abbildung 3.6: Erstellung eines RemoteController's

Anschließend wird ein Mininet-Objekt erstellt, bei dem die erstellte Topologie, der erstellte Controller, ein **TCLink-Objekt** für die Einstellung der Bandbreite der Netzwerkadapter und ein **OVSKernelSwitch-Objekt** für die Erstellung der Switches als **Open vSwitches** (siehe Abbildung 3.7). Diese werden später verwendet, um den Quality of Service zu implementieren. Dabei werden per **ovs-vsctl-Befehle** Queues an den Ports der Switches erstellt und die Priorisierung der Pakete vorgenommen.

```
# Initialize a Mininet with our topo object, a controller, the link and switch-version
net = Mininet(topo=topo, controller=c0,
              link=TCLink, switch=OVSKernelSwitch)
```

Abbildung 3.7: Erstellung des Mininet-Objektes

### 3.2.4 Ergebnis

Wenn das Mininet Skript ausgeführt wird, ist eine Topologie mit 40 Hosts über 4 Switches und 4 Routers zu sehen. Durch **pingall** kann es festgestellt werden, dass alles richtig funktioniert hat (siehe Abbildung 3.8).

## 3.3 Verschlüsselung der Netzwerkverbindung zwischen den Lokationen

Zwischen den vier Lokationen soll ein Tunnel über das Internet konfiguriert werden. Dieser wird auch Virtual Private Network (VPN) genannt. Der gesamte Datenverkehr durch den Tunnel soll verschlüsselt und für unbeteiligte nicht einsehbar sein.

### 3 Durchführung des Projektes

[illegible]

Abbildung 3.8: Ausführung und Testen vom Mininet-Skript

### 3.3.1 Vorüberlegung

Der Tunnel wird zwischen den Routern r1-r4 entstehen und für eine Verbindung der Netzwerke der Lokationen sorgen. Damit soll eine **Site-to-Site-VPN** Verbindung zwischen allen Lokationen hergestellt werden. Dieser zeichnet sich durch die Verschlüsselung ab den Schnittstellen, also den Routern der Lokationen, aus. Zudem werden aus dem privaten Netzwerk eingehende Pakete an den Routern verschlüsselt und weiterverschickt. Der Router an der Ziellokation wird das Paket entschlüsseln und an die Zieladresse weiterleiten. Die Methode, die implementiert werden soll, heißt **IPSEC over GRE** und soll alle angestellten Vorüberlegungen ermöglichen.

### 3.3.2 Durchführung

Für die Durchführung folgt in der Main-Funktion des Mininet-Skripts die Einrichtung der Tunnel zwischen den Routern beziehungsweise den Lokationen. Dafür baut jeder Router mit jedem Router einen GRE-Tunnel auf, für den der Befehl **ip tunnel add Tunnel-Name mode gre local Schnittstelle-Router-Lokation-A remote Schnittstelle-Router-Lokation-B ttl 255** bei jedem Router über die Mininet-Methode **info(net['Router-Name'].cmd(Befehl))** ausgegeben und ausgeführt wird (siehe Abbildung 3.9). Nachdem die Verbindung definiert wurde, wird der Tunnel-Adapter per **ip link set Tunnel-Name up** hochgefahren. Anschließend wird dem Tunnel Adapter mit dem Befehl **ip addr add Tunnel-IP dev Tunnel-Name** die Tunnel IP vergeben. Hier ist wichtig, dass der IP-Adressbereich zwischen zwei Lokationen im selben Bereich liegt. Hier erfolgt das gleiche Prinzip wie bei der Erstellung und Simulation des Internets zwischen den Lokationen.

```
# Setting up GRE-Tunnels between the routers
info(net['r1'].cmd(
    "ip tunnel add gre12 mode gre local 10.100.12.1 remote 10.100.12.2 ttl 255"))
info(net['r1'].cmd("ip link set gre12 up"))
info(net['r1'].cmd("ip addr add 10.10.12.1/24 dev gre12"))

info(net['r1'].cmd(
    "ip tunnel add gre13 mode gre local 10.100.13.1 remote 10.100.13.3 ttl 255"))
info(net['r1'].cmd("ip link set gre13 up"))
info(net['r1'].cmd("ip addr add 10.10.13.1/24 dev gre13"))

info(net['r1'].cmd(
    "ip tunnel add gre14 mode gre local 10.100.14.1 remote 10.100.14.4 ttl 255"))
info(net['r1'].cmd("ip link set gre14 up"))
info(net['r1'].cmd("ip addr add 10.10.14.1/24 dev gre14"))
```

Abbildung 3.9: Aufstellen der GRE-Tunnel

Nachdem der Tunnel aufgesetzt worden ist, sind alle Pakete, die durch den Tunnel versendet werden, nun als Payload eines neuen Paketes, wo der neue IP-Header der IP des Tunnels entspricht. Daraus folgt, dass nun Pakete, die die Maximum Transmission Unit (MTU) erreichen, jetzt eine geringere Länge annehmen müssen, da der neue Payload aus

dem ursprünglichen Payload und IP-Header besteht. Wenn der Fall eintritt, schickt der Router eine Aufforderung an den Absender zurück, das Paket kleiner zu gestalten.

Im nächsten Schritt wird die Route zum jeweils anderen Subnetzwerkadressenbereich per *ip route add IP-anderen-Lokation via IP-Adapter dev Adapter-Name* Befehl in die Routing-Tabelle eingefügt (siehe Abbildung 3.10). Da es sich hierbei um eine Simulation handelt, sollten alle Lokationen einen jeweils anderen privaten Adressenbereich besitzen. Bei Überschneidungen könnte es zu Problemen führen. Bei einer echten Umgebung mit echten öffentlichen IP-Adressen könnten dieselben privaten IP-Adressen für verschiedene Lokationen genutzt werden. Dies wird in der Realität üblicherweise so gemacht.

```
# Add routing for reaching networks that aren't directly connected trough GRE-Tunnel
# route from r1 to r2 and r2 to r1
info(net['r1'].cmd("ip route add 192.168.2.0/24 via 10.10.12.2 dev gre12"))
info(net['r2'].cmd("ip route add 192.168.1.0/24 via 10.10.12.1 dev gre21"))
```

Abbildung 3.10: Konfiguration der Routen

Der Tunnel von und zu den Lokationen ist nun aufgesetzt. Als Nächstes sollen alle Pakete aus dem privaten IP-Adressenbereich bei der Übermittlung durch den Router verschlüsselt und weitergeleitet werden. Dazu sollen alle Pakete von außen entschlüsselt und zum Zielort weitergeleitet werden. Für diese Methode wird die Verschlüsselung und Entschlüsselung über IPSEC im Transport-Modus benutzt. Dafür wird zuerst der Befehl *ip xfrm state add src IP-Adresse-des-Routers dst IP-Adresse-des-Ziel-Routers proto esp Security-Parameter-Index-Key enc 'cbc(aes)' 256bit-Key mode transport* ausgeführt, um Regeln für die Ver- und Entschlüsselung auf dem Router einzufügen. Jeder Router bekommt zwei Regeln für jeweils einen anderen Router. Eine Regel ist für die Entschlüsselung bei ankommenden Paketen und die andere Regel für die Verschlüsselung bei abgehenden Paketen (siehe Abbildung 3.11).

```
# Setting up ipsec in Transport mode
info(net['r1'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.12.1 dst 10.100.12.2 proto esp spi " +
    spi12 + " enc 'cbc(aes)' " + key12 + " mode transport"))
info(net['r1'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.12.2 dst 10.100.12.1 proto esp spi " +
    spi21 + " enc 'cbc(aes)' " + key21 + " mode transport"))
```

Abbildung 3.11: Erstellung der States für die Ver- und Entschlüsselung

Der Befehl legt für Pakete mit bestimmter IP-Quelladresse, IP-Zieladresse, einem Security-Parameter-Index Key (SPI) und einer 256 Bit Verschlüsselung fest, bei einer Übereinstimmung das Paket zu verschlüsseln oder zu entschlüsseln. Aus diesem Grund wird für eingehende Pakete und für ausgehende Pakete eine Regel festgelegt. Der Unterschied ist, dass die IP-Ziel- und Quelladresse, der Security-Parameter-Index-Key und die 256 Bit Verschlüsselung verschieden sind. Durch die States wurden die Ver- und Entschlüsselungen auf den Routern installiert. Die Keys und SPI's wurden zufällig gewählt.

Nun muss den Routern angewiesen werden, auf welchem Datenverkehr die installierten States angewandt werden sollen. Dies geschieht über Policies. Dort wird über den *ip xfrm policy add dir out src IP-Adresse-des-Routers dst IP-Adresse-des-Ziel-*

***Routers tmpl proto esp mode transport*** Befehl die Anweisung erteilt, dass auf den IP-Ziel- und Quelladressen die Ver- und Entschlüsselung stattfinden soll. Dabei muss der Befehl zweimal eingegeben werden, wobei die IP-Adressen vertauscht werden (siehe Abbildung 3.12). Es wird nicht die Tunnel-IP, sondern die Router-IP angegeben.

```
info(net['r1']).cmd(
    "ip xfrm policy add dir out src 10.100.12.1 dst 10.100.12.2 tmpl proto esp mode transport")
info(net['r1']).cmd(
    "ip xfrm policy add dir in src 10.100.12.2 dst 10.100.12.1 tmpl proto esp mode transport")
```

Abbildung 3.12: Erstellung der Policies für die Ver- und Entschlüsselung

#### 3.3.3 Ergebnis

Durch die Erstellung der Tunnel und der Verschlüsselung der Pakete wurde die komplette Kommunikation zwischen den Lokationen sicherer. Dazu gehört unter anderem die Authentifizierung des Kommunikationspartners und der Verhinderung unautorisierter Veränderungen von Paketen. Zwischen den Lokationen war vorher der gesamte Datenverkehr ersichtlich, wohingegen jetzt alles verschlüsselt ist (siehe Abbildung 3.13).

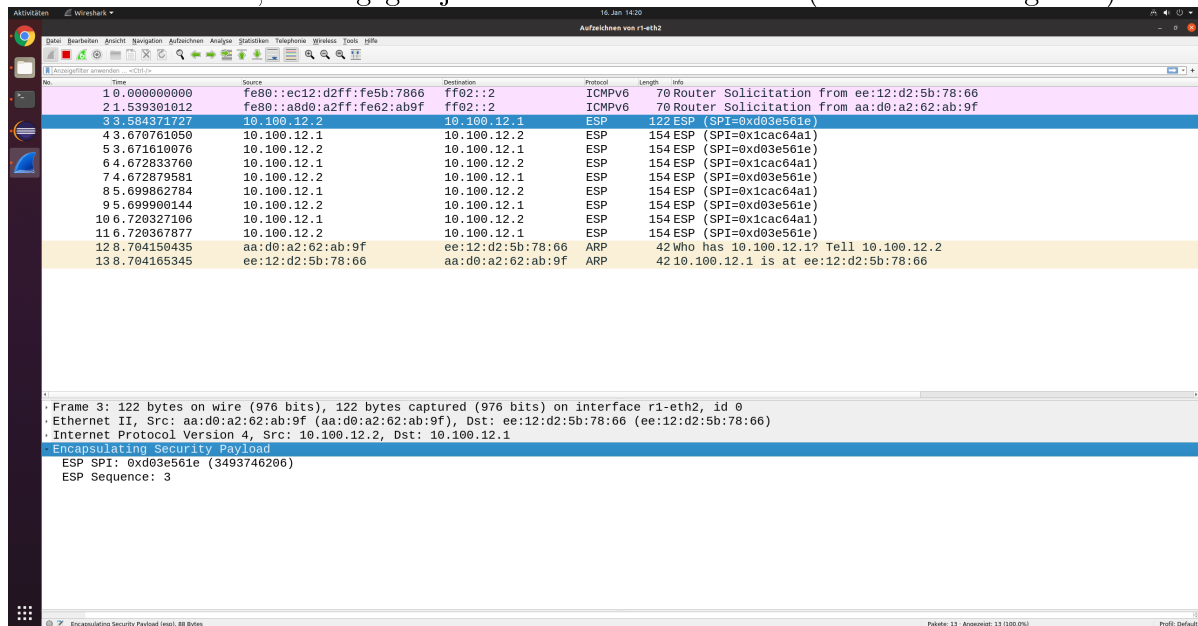


Abbildung 3.13: Verschlüsselter Verkehr zwischen Standort Frankfurt und Berlin

#### 3.4 Auswahl des Service-Providers

Alle Lokationen sind über einen Tunnel durch das Internet miteinander verbunden. Deswegen benötigen alle Lokationen eine DSL-Verbindung mit der richtigen Konfiguration

zur Realisierung. Der Preis und die Bandbreite der DSL-Leitung zählen bei der Auswahl als primäre Faktoren. Zusätzlich können weitere Leistungen betrachtet werden. Im Folgenden sind in einer Tabelle die Internet-Service-Provider O2, Vodafone, 1&1 und Telekom mit verschiedenen Bandbreiten und den dazugehörigen Nettopreisen aufgelistet. Die Angebote sind aktuell und aus den originalen Webseiten der Provider entnommen worden.

## 3.5 Einrichtung des NAT-Firewalls

Für die Aufgabe vier wird verlangt, dass wir auf dem Router die NAT-Firewall Funktion implementieren, sodass jede Anfrage ins World-Wide-Web mit der öffentlichen-IP-Adresse des Routers und nicht mit der privaten-IP-Adresse durchgeführt wird. Wichtig ist zu wissen, dass dies zum Verstecken der privaten-IP-Adressen beziehungsweise der Geräte führt und damit auch keine Informationen über die Geräte ins World-Wide-Web geschickt werden, welches zu einer noch größeren Sicherheit führt. Hinter jeder öffentlichen-IP-Adresse können mehrere tausende Geräte stehen und das Internet erreichen. Des Weiteren ist die Anzahl der IPv4-Adressen durch den eigenen Aufbau begrenzt. Für unsere vier Lokationen würden wir vier öffentliche-IP-Adressen über unseren Internet-Service-Provider zugeteilt bekommen. Diese wird vom Internet-Service-Provider in bestimmten Zeitintervallen immer wieder neu vergeben, welches ebenfalls zu einer gewissen Sicherheit beiträgt. Um überhaupt den Hosts der Lokationen den Internetzugang zu ermöglichen, müssen wir den Routern erst einmal den Zugang ermöglichen. Dafür haben wir in Virtualbox alle vier verfügbaren Netzwerk-Schnittstellen aktiviert und ans NAT des realen Hosts angeschlossen. Danach haben wir die vier Schnittstellen an die Router r1, r2, r3 und r4 per „`Intf('Schnittstellen-Name', node=Router-Objekt)`“ Mininet-Befehl zugewiesen. Ein Problem welches bei diesem Schritt aufgetreten ist, war das die Netzwerkschnittstellen beim Beenden von Mininet auch für Ubuntu nicht mehr verfügbar waren. Deshalb mussten wir immer die virtuelle Maschine beziehungsweise Ubuntu neustarten, wenn wir Mininet beendet hatten, um Mininet wieder ausführen zu können, da sonst der Befehle „`Int(...)`“ die Netzwerkschnittstelle nicht findet und ein Fehler zurückgibt. Um dies zu beheben wird beim Beenden von Mininet den Befehl „`ip link set Schnittstellen-Name netns 1`“ für jeden Router und seiner zugewiesenen Netzwerkschnittstelle ausgeführt. Hier vll weitererklären Anschließend haben wir den „`info(net['Router-Name'].cmd("dhclient Schnittstellen-Name"))`“ Mininet-Befehl für jeden Router ausgeführt, um den Routern eine Öffentliche-IP-Adresse des Virtualbox Nat-Services zuzuweisen. Hier ist es wichtig zu verstehen, dass die Öffentliche-IP von Virtualbox nur simuliert wird und dies nicht die Öffentliche-IP des realen Hosts ist. In unserem Fall haben die Router jeweils die Öffentliche-IP [10.0.2.15; 10.0.3.15; 10.0.4.15; 10.0.5.15] zugewiesen bekommen. Da nun eine Internetverbindung für alle Router besteht, müssen wir ebenfalls den DNS-Server definieren, damit die Hosts nicht nur per IPv4 ins Internet zugreifen können. Eine Möglichkeit bestand darin die Datei `/etc/resolv.conf` per Admin-Rechte zu bearbeiten und dort die IPv4 des Nameservers auf ein



### 3 Durchführung des Projektes

Tabelle 3.1: DSL-Angebote verschiedener Internet-Service-Provider

Anbieter	Tarife	Download in Mbit/s (min/normal/max)	Upload in Mbit/s (min/normal/max)	Monate: Preis (Netto)
Telekom	Company Start 16	6,3 / 9,5 / 16	0,7 / 1,5 / 2,4	0-24: 37 Euro
	Company Start 50	27,9 / 47 / 50	2,7 / 9,4 / 10	0-24: 42 Euro
	Company Start 100	54 / 83,8 / 100	20 / 33,4 / 40	0-24: 47 Euro
	Company Start 250	175/ 200 / 250	20 / 35 / 40	0-24: 57 Euro
	Company Start 500	400 / 500/ 500	80/ 100/ 100	0-24: 70 Euro
1&1	Company Start 1000	700/ 850 / 1000	200 / 200 / 200	0-24: 100 Euro
	DSL 16	6,6 / 11 / 16	0,128 / 0,983 / 1	0-12: 10 Euro 13-24: 30 Euro
	DSL 50	16,7/ 44 / 50	1,6 / 9,6 / 10	0-12: 10 Euro 13-24: 35 Euro
	DSL 100	54 / 88,6 / 100	20 / 36,9 / 40	0-12: 10 Euro 13-24: 40 Euro
	DSL 250	175/ 200/ 250	20 / 35 / 40	0-12: 10 Euro 13-24: 50 Euro
	Glasfaser 500	431/ 250/ 480	215/ 225/ 240	0-12: 99 Euro 13-24: 300 Euro
	Glasfaser 1.000	860/ 900/ 1000	430/ 450/ 500	0-12: 200 Euro 13-24: 500 Euro
Vodafone	Plus 16 Regio DSL	6 / 9,5 / 16	0,7 / 0,9 / 1	0-6 : 0 Euro 7-12: 20 Euro 13-24: 30 Euro
	Plus 50 Regio DSL	28 / 38 / 50	2,7 / 7,5 / 10	0-6 : 0 Euro 7-12: 20 Euro 13-24: 35 Euro
	Plus 100 Regio DSL	54 / 87/ 100	20 / 37 / 40	0-6 : 0 Euro 7-12: 20 Euro 13-24: 40 Euro
	Plus 250 Regio DSL	175/ 210/ 250	20/ 37/ 40	0-6 : 0 Euro 7-12: 20 Euro 13-24: 50 Euro
O2	MyOffice S	0,3/ 8 / 10	0,3 / 1,5 / 2	0-12: 20 Euro 13-24: 30 Euro
	MyOffice M	3/ 38 / 50	0,7 / 8 / 10	0-12: 20 Euro 13-24: 35 Euro
	MyOffice L	50/ 83/ 100	10 / 33/ 40	0-12: 20 Euro 13-24: 40 Euro
	MyOffice XL	105/ 200 / 250 26	12/ 33 / 40	0-12: 20 Euro 13-24: 50 Euro

beliebiges wie etwa von Google 8.8.8.8 und 8.8.4.4 zu ändern. Jedoch wird bei dieser Variante nach jedem Neustart der Nameserver auf die IPv4-Adresse 127.0.0.53 gesetzt, welches wir bei jedem Neustart des Betriebssystems immer wieder neusetzen müssen. Um dem entgegenzuwirken haben wir das Paket Resolvconf per „sudo apt install resolvconf“ installiert und in die Datei „/etc/resolvconf/resolv.conf.d/head“ den gewünschten Nameserver, in unserem Fall 8.8.8.8 und 8.8.4.4, gesetzt und gespeichert, welches für ein permanenten Eintrag des Nameservers sorgt. Nach diesem Schritt war es den Routern möglich das Internet auch per Domain-Namen zu erreichen. Der Default-Route der Hosts ist der jeweilige Router in der Lokation. Wenn jetzt ein Host eine Website aufruft, schickt er eine Anfrage an den Router, der die Anfrage für den Host mit seiner öffentlichen-IP der Virtualboxmaschine durchführt und dem Host die Antwort zurückgibt. Damit genau dies gewährleistet haben wir auf allen Routern den Befehl „sudo iptables -t nat -A POSTROUTING -o Netzwerkschnittstellen-Name -j MASQUERADE“ ausgeführt. Dabei nutzen wir das Tool iptables, welches das Linux-Kernel konfigurieren kann. Der Befehl schreibt in die Tabelle „nat“, dass alle Pakete, die an der Netzwerkschnittstelle weitergeroutet werden, die eigene IPv4-Adresse dieser Netzwerkschnittstelle als Quelladresse erhält. Es wird im Befehl MASQUERADE benutzt, weil zum Zeitpunkt der Ausführung des Befehls die IPv4-Adresse der Schnittstelle unbekannt sein kann beziehungsweise sich ändern kann. Würden der Router eine statische IPv4-Adresse besitzen, so würden wir statt MASQUERADE direkt die IPv4-Adresse angeben. Genau dieser Schritt hat ermöglicht, dass die Router eine NAT-Firewall Funktion haben, sodass die Hosts in den Lokationen mit der öffentlichen-IPv4-Adresse des Routers beziehungsweise die der von Virtualbox ins Internet gehen können.

## 3.6 Implementierung der Webproxy-Funktion

Bei der Aufgabe fünf muss ein Web-Proxy-Server in allen Lokationen eingerichtet werden, sodass der Web-Proxy jede http- oder https-Anfrage (request) aller Geräte im gleichen Subnetz selbst durchführt und die Antwort (response) dem Anfrager zurückschickt. Der Vorteil hierbei ist, dass der Web-Proxy-Server für eine Sicherheit in allen Schichten des OSI-Modells sorgen kann. Es muss lediglich nur an dem Web-Proxy-Server Einstellungen bezüglich gewünschter Inhalte, IP-Adressen oder MAC-Adressen vorgenommen werden, um die Sicherheit für alle Geräte, die über den Web-Proxy-Server eine Anfrage (request) machen, zu gewährleisten. Des Weiteren wäre die Bandbreite weniger Ausgelastet, da der Web-Proxy-Server jede neue Antwort (response) in seinem Cache speichert und bei erneuter Anfrage (response), die Antwort aus seinem Cache, statt durch erneute Abfrage aus dem World-Wide-Web, ausgibt. Um den Web-Proxy-Server zu realisieren haben wir einen Host in Mininet erstellt, ihm den Namen p1, eine IPv4-Adresse im privaten Netzwerkbereich vergeben und ihn mit dem Switch (Mininet-Switch) verbunden. Dies haben wir zuerst für eine Lokation implementiert, da die Funktionalität noch unbekannt ist. Auf dem Web-Proxy-Server haben wir per „Xterm p1“ Befehl einen Terminal auf P1 gestartet und die Internetverbindung durch aufrufen einer Website mit dem Befehl „curl

www.google.de“ als funktionsfähig getestet. Als nächstes wollten wir eine Schnittstelle des Web-Proxy-Servers mit einer Schnittstelle des Ubuntu-Betriebssystems beziehungsweise der Virtualbox-Maschine verbinden und den Web-Proxy-Server p1 als eine Schnittstellenverbindung und nicht als Server benutzen. Anschließend hatten wir vor einen Squid-Proxy-Server auf der Ubuntu-VM laufen zu lassen, um die Web-Proxy-Funktion zu realisieren. Wichtig ist, dass dies der Realität fern ist und der Web-Proxy-Server eine Software selber laufen lassen würden und nicht als Schnittstelle zu anderen Servern dient. Zu unserem bedauern konnten wir den in Mininet erstellten Host p1 nicht mit einer Schnittstelle des Ubuntu-Vms verbinden, weil nur die Schnittstellen der Switches für den VM sichtbar sind. Aus diesem Grund haben wir einen alternativen http-Proxy-Script aus Github benutzt, um die Web-Proxy-Funktionalität auf p1 per Python-Script einzurichten. Der http-Proxy-Python-Script nimmt nur Anfragen entgegen und führt Sie selber durch und gibt für einen bestimmten Zeitintervall http-Seiten-Daten aus dem Cache zurück. Hier ist nochmal zu verdeutlichen, dass der Python-Script für keine umfangreiche Web-Proxy-Funktionalität ausgelegt ist, jedoch wir diesen aus Testzwecken benutzt haben. Als nächstes haben wir alle Pakete, die beim Switch aus den Workstation-Ports eingehen und einen Ziel-Port als 80 haben, an den Proxy weitergeleitet. Hierfür haben wir über den Controller einen Match und die dazugehörigen Actions-Liste implementiert und dem Switch die Anweisungen geschrieben (Flow-modification). Dadurch haben wir bewirkt, dass der Web-Proxy-Server die Anfragen bekommt, ohne dass die Geräte an dem Switch davon wissen. Der Proxy nimmt die Anfrage entgegen und führt sie selber durch und gibt die Antwort an das jeweilige Gerät weiter. Hier tritt das Problem auf, dass das Gerät eine Antwort von der Website erwartet, jedoch die Antwort vom Proxy geschickt bekommt. Wir könnten hier die erhaltene Antwort ebenfalls per Switch modifizieren und an das jeweilige Gerät weiterschicken. Leider fehlt dazu die Information des Absenders im World-Wide-Web zu dem Zeitpunkt an dem die Antwort von dem Web-Proxy an das Gerät geschickt wird. Resultierend war es uns nicht möglich einen Web-Proxy zu simulieren. Alternativ könnte man eine transparente Web-Proxy-Funktion an dem Router der jeweiligen Lokationen einrichten, der die Anfragen selber durchführt, verfolgt, speichert und die Antwort an das jeweilige Gerät sendet. Auch das Eintragen der Proxy-Server an den jeweiligen Geräten, die mit dem Switch verbunden sind, würde sich als funktionsfähig erweisen.

- 3.7 Aufbau eines zentralen Topologie-Viewers und einer Monitoring-Lösung
- 3.8 Realisierung einer Quality of Service Funktion
- 3.9 Priorisierung der Datenübertragung über API
- 3.10 Analyse weiterer Netzwerkfunktionen

## 4 Zusammenfassung

Analyse der Ergebnisse Kritische Betrachtung Hier erwähnen welche Teile der Aufgaben nicht geklappt haben, wie beispielsweise Aufgabe 5 Webproxy

### 4.1 Analyse der Ergebnisse

### 4.2 Kritische Betrachtung

## 5 Fazit

Eventuell als Überpunkt zu Gesamtergebnis? Was ist der finale Stand des Projekts?  
Inwiefern wurden die Ziele erreicht?

### 5.1 Zukunftsaussichten

Inwiefern können die Ergebnisse des Projekts weiter genutzt werden?

# 6 Kapitel 1

Hier kommt Kapitel 1. Aufzählungen gehen so:

- Aufzählung 1
- Aufzählung 2
- Aufzählung 3
- ...

Hier kann der Text weitergehen.

## 7 Kapitel 2

Hier steht Kapitel 2. Hier kommt ein Listing:

```
1 public interface Interface1 extends Interface2 , Interface3 {  
2     ...  
3     public int methode(int zahl1 , int zahl2);  
4     ...  
5 }
```

Listing 7.1: Deklaration eines Interfaces

Hier geht der Text weiter. Und so bindet man ein Figure ein(Bild im Ordner Bilder zu finden):



Abbildung 7.1: Beziehungen von Klassen und Interfaces  
`[jtpinterface]`

Hier kann der Text weitergehen.

### 7.1 Unterkapitel 1

Hier ist ein Unterkapitel (Section). Hier paar Aufzählungen:

- `public boolean add(E e)`
- `public boolean remove(Object element)`



- public int size()
- public boolean contains(Object element)
- public boolean isEmpty()

Text geht weiter..... Hier kommt eine Tabelle:

Tabelle 7.1: Eigenschaften von Vector, PriorityQueue und HashSet

Eigenschaften	Vector	PriorityQueue	HashSet
Doppelte Einträge erlaubt:	Ja	Ja	Nein
Reihenfolge:	Ja	Ja	Nein
Veränderbar:	Ja	Nein	Ja
Thread-Safe:	Ja	Nein	Nein

## 7.2 Unterkapitel 2

Hier geht der Text weiter. Noch eine Tabelle:

Tabelle 7.2: Eigenschaften der Python Datenstrukturen  
[listuple]

Eigenschaften	List	Tuple	Set	Dict
Doppelte Einträge erlaubt:	Ja	Ja	Nein	Keine doppelten Keys
Reihenfolge:	Ja	Ja	Nein	Ja
Veränderbar:	Ja	Nein	Ja	Ja
Thread-Safe:	Ja	Ja	Ja	Ja