

Projektarbeit

Software-defined Networking mit Openflow

Mücahit Sagiroglu

Matrikelnummer: 1228852

James Belmonte

Matrikelnummer: 1340604

Naghmeh Ghavidel Rostami

Matrikelnummer: 1249307

Tung Trinh

Matrikelnummer: 1320718

Vorgelegt am: 10. Februar 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.

J. Belmonte

James Belmonte

Mücahit Sagiroglu

Mücahit Sagiroglu

Naghmeh Ghavidel

Naghmeh Ghavidel

Tung Trinh

Tung Trinh

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vii
Listings	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
Abstract	x
1. Software-defined Networking	1
1.1. Motivation	9
1.2. Problemstellung	9
1.3. Aufbau der Arbeit	10
2. Projekt	11
2.1. Projektziel	11
2.2. Vorgehen	11
2.3. Festlegen von Meilensteinen	12
2.4. Verwendete Werkzeuge	13
3. Durchführung des Projektes	22
3.1. Netzwerkplan	22
3.2. Aufbau des Netzwerkgerüstes in Mininet	24
3.3. Verschlüsselung der Netzwerkverbindung zwischen den Lokationen	28
3.4. Auswahl des Service-Providers	31
3.5. Einrichtung des NAT-Firewalls	34
3.6. Implementierung der Webproxy-Funktion	37
3.7. Aufbau eines zentralen Topologie-Viewers und einer Monitoring-Lösung	39
3.8. Realisierung einer Quality of Service Funktion	44
3.9. Priorisierung der Datenübertragung über API	49
3.10. Analyse weiterer Netzwerkfunktionen	52
4. Diskussion der Ergebnisse	61
4.1. Analyse der Ergebnisse	61
4.2. Kritische Betrachtung	62

Inhaltsverzeichnis

5. Fazit	64
5.1. Zukunftsaussichten	65
Literaturverzeichnis	66
A. Anhang	72

Abbildungsverzeichnis

1.1.	SDN Architektur	1
1.2.	SDN Architektur	3
1.3.	SDN Architektur	5
2.1.	Zeitplan des Projektes	12
2.2.	Erstellung eines Standardnetzwerkes mit Mininet	16
2.3.	Webbenutzeroberfläche vom Floodlight-Controller	18
2.4.	Ausführung von Floodlight über den Linux-Terminal	21
2.5.	Mininet Controller Verbindung und Ping-Test	21
3.1.	Standortvernetzung mit der Any-to-Any Topologie	22
3.2.	Netzwerkplan aller Lokationen	23
3.3.	Netzwerk-Klasse zur Topologie Erstellung	24
3.4.	Erstellung und Verbindung von Router und Switch	25
3.5.	Erstellung und Verbindung von Hosts und Switch	25
3.6.	Verbindung und Konfigurierung der Router	26
3.7.	Erstellung eines RemoteController's	26
3.8.	Erstellung des Mininet-Objektes	27
3.9.	Ausführung und Testen vom Mininet-Skript	27
3.10.	Aufstellen der GRE-Tunnel	29
3.11.	Wandlung der Pakete bei IPSEC over GRE	29
3.12.	Konfiguration der Routen	30
3.13.	Erstellung der States für die Ver- und Entschlüsselung	30
3.14.	Erstellung der Policies für die Ver- und Entschlüsselung	31
3.15.	Verschlüsselter Verkehr zwischen Standort Frankfurt und Berlin	31
3.16.	VirtualBox NAT-Adapter	34
3.17.	Einbindung und Konfigurierung des NAT-Adapters	35
3.18.	Anfrage von H1 wird über Public IP des Routers durchgeführt	36
3.19.	Topologie des Netzwerkes auf der Webbenutzeroberfläche von Floodlight	39
3.20.	Hinzufügen der Switch IP für s1	40
3.21.	Definition der Switch für Nagios	42
3.22.	Definition der Services für die Switch	42
3.23.	Webbenutzeroberfläche von Nagios Core	43
3.24.	Ausgabe der QoS und Queue der Switches aller Lokationen	46
3.25.	Sprachanruf zwischen Berlin und Frankfurt	47
3.26.	Ausgabe der Flows von s1	47

Abbildungsverzeichnis

3.27. UDP-Pakete während dem Sprachanruf	48
3.28. Flows für die Priorisierung und die Drosselung	50
3.29. Abfrage der Daten für den Dateittransfer	51
3.30. Übermittlung der Datei über SSH	51
3.31. Statische IP-Adressenverwaltung	54
3.32. Dynamische IP-Adressenverwaltung	54
3.33. DHCP-Konfiguration für alle Standorte	55
3.34. Datenverkehr zwischen h1 und h11	56
3.35. Wireshark-Aufnahme von Switch s1	56
3.36. Kommunikation zwischen DHCP-Client und DHCP-Server	57
3.37. Wireshark-Aufnahme vom gekürzten DHCP Prozess	58
3.38. Kommunikation zwischen DHCP-Client und DHCP-Server	58
3.39. DHCP-Konfiguration für alle Standorte	59
3.40. Im DHCP ACK Protokoll werden die DNS Informationen vermittelt	60
3.41. Terminalausgabe von h1	60
5.1. Die Topologie zeigt, dass h0 in Frankfurt existiert	65

Tabellenverzeichnis

3.1. Vergabe von IPv4-Adressen im Netzwerk	23
3.2. DSL-Angebote verschiedener Internet-Service-Provider	32

Listings

A.1. Das in Python geschrieben Mininet-Skript	72
A.2. Das in Python geschrieben SSH-Transfer-Skript	86

Abkürzungsverzeichnis

- ADSL** Asymmetric Digital Subscriber Line
- API** application programming interface
- bzw.** beziehungsweise
- CLI** Command Line Interface
- DHCP** Dynamic Host Configuration Protocol
- DNS** Domain Name System
- ESP** Encapsulating Security Payload
- HTTP** Hypertext Transfer Protocol
- HTTPS** Hypertext Transfer Protocol Secure
- ISP** Internet Service Provider
- LAN** Local Area Network
- MTU** Maximum Transmission Unit
- NAT** Network Address Translation
- OF** OpenFlow
- OSI-Modell** Open Systems Interconnection model
- SDN** Software Defined Network
- SDSL** Symmetric Digital Subscriber Line
- usw.** und so weiter
- VPN** Virtual Private Network
- WAN** Wide Area Network

Abstract

Verfasst von: Tung

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, Netzwerkbetreibern 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 [14].

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 [22, S. 114–115].

1. Software-defined Networking

Im folgenden Abschnitt werden die jeweiligen Einleitungen jedes Mitgliedes vorgestellt. Sie dienen als separate Einleitungen zum Projektbericht.

Einleitung von James

Gegenwärtig gibt es im Bereich der Verwaltung von Computernetzwerken viele neue komplexe Anforderungen und notwendige Konfigurationen, die berücksichtigt werden müssen. Der Datenaustausch innerhalb eines Netzwerkes ist um ein Vielfaches gestiegen, somit steigt die Auslastung, welches ein Netzwerksystem aushalten muss. Bei einem traditionellen Netzwerk würde das heißen, dass ein Netzwerkadministrator alle Netzwerkkomponenten wie Router, Switches und Firewalls etc. manuell konfigurieren müsste, um allen entsprechenden Anforderungen zu verwirklichen. Ferner müssen Netzwerkadministratoren viel Zeit in die Konfiguration legen, um alles korrekt zu implementieren.

Software Defined Networking bietet hierzu eine Alternativmöglichkeit zur Verwaltung einer Netzwerkumgebung. Im Gegensatz zu traditionellen Netzwerken trennt SDN die Kontrollsicht und die Datenschicht, und ermöglicht dadurch die Kontrolle des Netwerkes über das Netz. Im Mittelpunkt des Netzwerkes befindet sich ein SDN-Controller, der zur Konfiguration von allen Netzwerkkomponenten genutzt wird [2]. Die SDN-Architektur ist auf drei Ebenen aufgeteilt und wird anhand von Abbildung 1.1 nochmals visuell dargestellt. Die Anwendungsschicht enthält Applikationen für SDN wie Firewall und Loadbalancer und wird mithilfe der REST API bereitgestellt [6]. Die Kontrollsicht enthält den SDN-Controller, worüber das gesamte Netzwerk gesteuert wird. Die Infrastruktursicht enthält die Netzwerkkomponenten wie Switches und Router und sind mit dem SDN-Controller verbunden, um die eingestellten Anforderungen vom Controller durchzusetzen. Die Architektur enthält mehrere Schnittstellen, sowohl eine Northbound API zwischen Anwendungsschicht und Kontrollsicht als auch eine Soutbound API zwischen

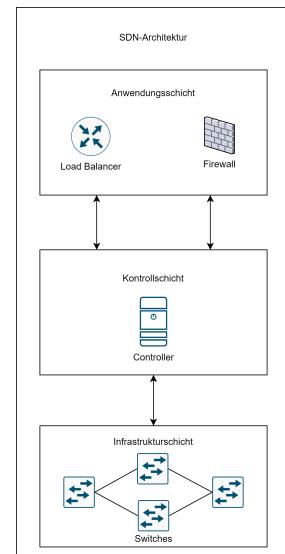


Abbildung 1.1.: SDN Architektur

1. Software-defined Networking

Kontrollsicht und Infrastruktursicht. Die Datenübertragung beim Southbound API erfolgt mit dem OpenFlow (OF) Protokoll. Bei der Weiterleitung eines Datenpakets wird die Weiterleitung auf der Datenschicht von einem Switch oder einem Router aufgenommen. Der SDN-Controller, der sich auf der Kontrollsicht befindet, entscheidet, wie das Datenpaket weitergeleitet wird [6]. Dadurch können verschiedene Netzwerkfunktionen implementiert werden, die von den Switches und Routern umgesetzt werden müssen. Die Kommunikation zwischen dem SDN-Controller und den Switches in der Infrastruktursicht wird durch Openflow realisiert. Durch die Änderung des flow tables im Switch, kann der Controller das Verhalten des Switches beeinflussen und so einstellen, dass die Instruktionen des Controllers umgesetzt werden [6]. Im Gegensatz zu der traditionellen Weise die Netzwerkkomponenten manuell zu konfigurieren, kann durch die Trennung von Kontrollsicht und Datenschicht der Controller genutzt werden, um alle Konfigurationen von Komponenten im Netzwerk umzusetzen [40]. Zudem kann durch das zentrale Management des Netzwerkes und das der SDN-Controller programmierbar ist, ein Administrator effizienter, flexibler und agiler Handeln [6]. Besonders im Bereich Quality of Service muss ein Netzwerk agiler und flexibler als in der Vergangenheit sein. Somit kann Quality of Service mit SDN gewährleistet und einfacher umgesetzt werden [60]. Logischerweise kann auch argumentiert werden, dass durch das zentrale Management über das Netz geringere Betriebskosten auftreten, da die Konfigurationsänderungen effizienter umgesetzt werden können. Jedoch ist ein erwähnenswerter Nachteil, dass beim Ausfall eines SDN-Controllers in einem Netzwerk das gesamte Netzwerk ausfällt. Dies könnte durch eine Denial of Service attack ausgelöst werden. Somit könnte die Möglichkeit bestehen, mehrere Ausweichcontroller für solche Ereignisse vorzubereiten.

Einleitung von Mücahit

Software-defined Networking beschreibt einen agilen Ansatz zur Verwaltung und Administrierung von Computernetzwerken aus einer zentralen Stelle. Dabei muss nur an der zentralen Stelle eine Änderung vorgenommen werden, um Änderungen an mehrere Netzwerkkomponenten beziehungsweise -bereichen vorzunehmen. Ein sogenannter Controller stellt eine zentrale Stelle dar und steuert den ihm zugehörigen Netzwerkabschnitt. Switches und Routern leiten Pakete nach Regeln beziehungsweise Tabellen weiter, wo üblicherweise für eine Änderung der Regeln jedes Gerät einzeln angesprochen werden muss. Durch die Software im Controller werden Änderungen angenommen und auf die Netzwerkkomponenten übertragen. Diese Vorgehensweise durch Software-defined Networking erlaubt eine dynamische Anpassung des Computernetzwerkes [2, S. 1–2].

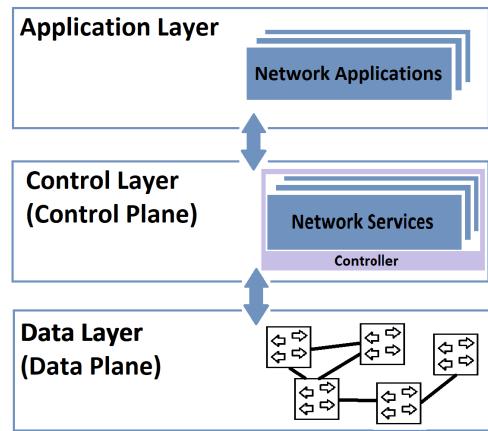


Abbildung 1.2.: SDN Architektur

Durch das Hinzufügen eines Controllers wird die sogenannte Control Plane vom Switch und Router entbunden. Dadurch verbleiben der Switch und der Router in der Data Plane, wo sie weiterhin für die Paketweiterleitung zuständig bleiben. Der Controller hingegen ist nun für die Entscheidungen verantwortlich, wie mit einem Paket verfahren werden soll. Aus der Entkopplung der Control Plane von der Data Plane ergibt sich im Ganzen die sogenannte Application Layer, die Data Plane und dazwischen die Control Plane, was nun Änderungen leichter zulässt (siehe Abbildung 1.2). Programme können über die application programming interface (API) mit dem Controller kommunizieren und ihm Anweisungen über Pakete oder Netzwerkbereiche geben. Der Controller wiederum wendet die getroffenen Entscheidungen an den zugehörigen Netzwerkkomponenten an [5, S. 2]. Des Weiteren kann über die API verschiedene Netzwerkleistungen implementiert werden. Darunter zählen neben der Kontrolle des Paketflusses beispielsweise Implementierungen bezüglich der Sicherheit, der Quality of Service (QoS), der Zugriffskontrolle und weitere Leistungen, die für ein Netzwerk wichtig sind [5, S. 8–9].

Bei klassischen Switches werden anhand eingehender Pakete MAC-Adressen mit dem dazugehörigen Ausgangsport in einer Tabelle hinterlegt. Fehlt diese Information, wird ein Paket auf allen verfügbaren Ports ausgegeben. Hierbei würde ein Switch keine Auslastungen außerhalb seines Bereiches kennen. Aus diesem Grund würde der Switch das Paket auf die für das Ziel vorgesehene Strecke einordnen, die er vorher per Address Resolution Protocol Anfrage (ARP) in seinem Cache abgelegt hat. Jedoch hat der Controller einen Überblick auf das ganze Netzwerk, das von ihm verwaltet wird, weshalb er eine performantere Entscheidung treffen kann, wohin das Paket am besten weitergeleitet werden sollte, um beispielsweise Überlastungen zu vermeiden [2, S. 1–2].

1. Software-defined Networking

Über ein im Vergleich zu Hypertext Transfer Protocol (HTTP) junges Protokoll namens OpenFlow kommuniziert der Controller mit bestimmten Netzwerkkomponenten wie beispielsweise ein OpenFlow Switch, um diese zu steuern. Es gibt zwei Arten von OpenFlow Switches: OpenFlow-only und OpenFlow-enabled Switches. OpenFlow-enabled Switches sind klassische Switches, die zusätzlich OpenFlow fähig sind. OpenFlow-only Switches haben keine zusätzlichen Module eingebaut, auf die Sie zurückgreifen können und müssen deswegen an einem Controller gebunden sein, der dann beispielsweise entscheidet, wohin eingehende Pakete weitergeleitet werden sollen. Dafür sendet der Switch ein Paket oder ein Teil eines Paketes an den Controller und wartet auf einen Befehl, wie er sich zu verhalten hat. Falls der Switch vorher einen Eintrag über das Paket besitzt, greift er auf diese zurück. Wenn überhaupt kein Eintrag vorhanden ist, wird das Paket nach den Einstellungen der Switch entweder verworfen, an allen Ports ausgegeben oder an den Controller gesendet. Die Fähigkeit, bestimmte Befehle auf Pakete anzuwenden, die auf einer Übereinstimmung basieren, zeichnet Software-defined Networking aus [5, S. 9–10].

Der Controller stellt einen sogenannten Single Point of Failure dar. Das bedeutet, wenn der Controller ausfällt, fallen alle vom Controller abhängigen Netzwerkkomponenten ebenfalls aus. So würde beispielsweise bei einer Denial-of-Service-Attacke durch das Überfluten des Controllers ein Zustand erfolgen, bei dem der Controller an Bandbreite, Speicher und Rechenleistung verlieren und im schlimmsten Fall auch lahmgelegt werden kann. Das ist eines der schlimmsten Szenarien und könnte durch das Hinzufügen eines zweiten Controllers kompensiert werden [30, S. 3].

Einleitung von Naghmeh

Kommunikationsnetzwerke werden immer größer und komplexer. Traditionelle Infrastrukturen und Netzwerksysteme können kaum eine Lösung bieten, um die heutigen Netzwerkanforderungen angemessen zu erfüllen. Dies hat zu einem anderen Ansatz für die Netzwerksystemarchitektur geführt, der als Software defined Networking bekannt ist. SDN-Ansätze wurden bereits Mitte der 1990er Jahre eingeführt, sind aber erst seit einigen Jahren ein etablierter Industriestandard geworden. Viele Netzwerkarchitekturen und -systeme haben SDN eingeführt, und Anbieter entscheiden sich für SDN als eine bessere Alternative zu festen und unflexiblen Protokollstapeln. SDN ist eine moderne Netzwerkarchitektur, die die Netzwerksteuerung von Datenübertragungsgeräten entkoppelt und die Netzwerkprogrammierung unterstützt [18].

SDN trennt die Netzarchitekturen in drei verschiedene Ebenen: Daten-, Kontroll- und Anwendungsebene. Die Datenebene umfasst alle Routing-Geräte, die Weiterleitungsregeln speichern, um den Datenverkehr zu verarbeiten. Die Kontrollebene besteht aus einem oder mehreren Controllern. Der Controller ist dafür verantwortlich, den Datenverkehr zu überprüfen, Entscheidungen zu treffen und die Netzwerkkonfiguration zu ändern. Der Controller kann auch die Ressourcen optimieren und die Fehlerbehebungsverfahren implementieren. Die Anwendungsebene gruppiert Anwendungen und verarbeitet die Daten für den Controller. SDN definiert auch Schnittstellen für die Kommunikation zwischen Ebenen: Anwendungs- und Kontrollebene kommunizieren über die Northbound API, und Daten- und Kontrollebenen verwenden die Southbound-API [56].

Die SDN-Architektur hängt stark von der Effizienz der Kontrollebene ab, auf der sich der SDN-Controller befindet. Um die Kontrollebene möglichst effizient zu gestalten, hat die Auswahl des Controllers eine große Bedeutung. Der Controller soll sowohl weniger Zeit benötigen, um Entscheidungen zu treffen und Entscheidungen an die Datenebene weitergeben, als auch die Herausforderungen des modernen Netzwerkverkehrs bewältigen[56].

Das von SDN eingeführte modulare Konzept und die moderne Schichtenstruktur ermöglichen jeder Schicht, unabhängig voneinander zu innovieren, was den Herstellern von Netzwerkgeräten neue Möglichkeiten eröffnet, moderne Netzwerkdienste und -anwendungen zu entwickeln. Netzwerkadministratoren können die Netzwerkleistung und das Netzwerkverhalten in Echtzeit überwachen. Sie können auch Entscheidungen über die Bereitstellung von Netzwerkdiensten oder Änderungen und Konfiguration der Topologie von ihrem Arbeitsplatz aus treffen und diese durchführen [21].

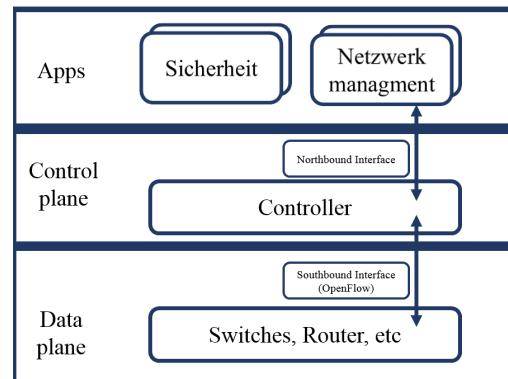


Abbildung 1.3.: SDN Architektur

1. Software-defined Networking

SDN eignet sich auch ideal für die Entwicklung von Mechanismen zur Bewältigung von Sicherheitsproblemen, aber dazu müssen die Administratoren die Controller für die Ausführung bestimmter Aufgaben erweitern. Diese Art von Mechanismus kann auf der Kontrollebene oder als eine Reihe von Teilen auf der Anwendungs- und Kontrollebene ausgeführt werden [44].

Die wichtigsten Funktionen, die SDN für Computernetzwerke bietet, sind die Möglichkeiten, das Netzwerk zu programmieren, es flexibler und einfacher zu verwalten. Diese Fähigkeit spielt eine wichtige Rolle bei der Reduzierung des Gesamtsystemkapitals und der Verwaltungskosten sowie bei der Verbesserung von Leistung, Zuverlässigkeit und Servicequalität. Die ständige Nachfrage nach Neukonfiguration bestehender Netzwerke aufgrund von Bandbreite und neuen Technologien (Hard- und Software) ist sehr anspruchsvoll und komplex. Mit der SDN-Technologie wird dieser Prozess im Vergleich zu herkömmlichen Netzwerken vereinfacht[21].

Einleitung von Tung

Derzeit gibt es viele Definitionen von SDN, aber laut Open Networking Foundation (ONF), ist SDN definiert als: „Software-Defined Networking ist eine aufstrebende Architektur, die dynamisch, verwaltbar, kostengünstig und anpassungsfähig ist, wodurch sie sich ideal für die hohe Bandbreite und Dynamik heutiger Anwendungen eignet. Diese Architektur entkoppelt die Netzwerksteuerungs- und Weiterleitungsfunktionen, wodurch die Netzwerksteuerung direkt programmierbar und die zugrunde liegende Infrastruktur für Anwendungen und Netzwerkdienste abstrahiert werden kann.“[51] Diese Definition kann sehr allgemein und verwirrend sein. Um zu verstehen, was SDN ist, erinnern wir uns zunächst ein wenig an die traditionelle Netzwerkarchitektur.

Andreas Donner beschreibt das herkömmliche Netzwerk: Konventionelle Netzwerke bestehen aus Routern und Switches, die mit proprietärer, herstellerspezifischer Firmware betrieben werden. Die Datenpakete werden von den Komponenten gemäß den Vorgaben der Software weitergeleitet. Die Netzwerkgeräte besitzen intern spezielle Hardware, die für die Weiterleitung der Pakete verantwortlich ist. Die Steuerung der Hardware übernimmt die Software und Kontrollebene des Betriebssystems, das ebenfalls auf dem Gerät integriert ist. [13] Es bedeutet, jedes Gerät im Netzwerk verfügt sowohl eine logische Rolle in der Steuerleitung als auch die Weiterleitung von Datenpaketen. Im traditionellen Netzwerk muss der Administrator bei der Konfiguration eines Mehrkomponentennetzwerks jedes Gerät manuell konfigurieren, und die Geräte sind in Bezug auf die Verwaltung nicht miteinander verbunden. Diese sind besonders schwierig zu konfigurieren und zu bedienen. Die Geräte sind völlig unabhängig, sodass die Konfiguration an jedem Gerät nur manuell nacheinander geändert werden kann.

Die SDN-Architektur hat drei Ebenen, die über Northbound- und Southbound-Anwendungsprogrammierschnittstellen kommunizieren. Die Ebenen umfassen:

- Application Plane – SDN-Anwendungen kommunizieren Verhalten und benötigte Ressourcen mit dem SDN-Controller.
- Control Plane – Verwaltet Richtlinien und Verkehrsfluss. Der zentralisierte Controller verwaltet das Verhalten der Datenebene.
- Data Plane – Besteht aus den physischen Switches im Netzwerk.[4]

Mit der obigen Architektur bietet SDN verschiedene Möglichkeiten. Die Control Plane kann direkt programmiert werden. Das Netzwerk wird durch Änderungen auf der Control Plane schnell angepasst und geändert. Das Netzwerk wird zentral verwaltet, da die Steuerung auf der Control Plane zentralisiert ist. Die Konfigurationen der Data Plane können auf der Application Plane programmiert und an die unteren Schichten kommuniziert werden.

Netzwerkgeräte haben nur die Funktion, Daten weiterzuleiten, und der Routing-Teil wurde auf ein anderes Gerät übertragen, das als Controller für das gesamte Netzwerk fungiert und als SDN-Controller bezeichnet wird. Es enthält alle Routing-Algorithmen,

1. Software-defined Networking

Safety-, Security- und Load-Balancing-Lösungen. Bei der Konfiguration des gesamten Netzwerks muss der Administrator nur die Algorithmen auf diesem Gerät mit Software schreiben und ändern, alle Netzwerkgeräte werden synchron verwaltet. Wenn Benutzer Parameter oder Anforderungen für das Netzwerk ändern möchten, ändern sie diese einfach in der Verwaltungssoftware des SDN-Controllers. Dies ist völlig anders als herkömmliche Netzwerktechnologien [63, S. 37–38].

Mit SDN kann der Administrator des Netzwerks alle Switching-Regeln des Netzwerks nach Bedarf ändern. Administratoren können bestimmte Pakettypen mit einem bestimmten Maß an Kontrolle und Sicherheit priorisieren, depriorisieren oder sogar blockieren. Dies ist besonders nützlich in Cloud-Computing-Architekturen, da es Administratoren ermöglicht, den Datenverkehr flexibler und effizienter zu verwalten, wenn es mehrere Dienstmandanten gibt. Im Wesentlichen ermöglicht dies Administratoren, Switches effizienter zu nutzen und mehr Kontrolle über den Netzwerkverkehr zu haben als je zuvor. [20]

Weitere Vorteile von SDN sind, dass es Verwaltung und Einblick in die Komponenten und Konfiguration des Netzwerks bietet. Administratoren müssen nur mit einem einzigen zentralen Controller interagieren, um Richtlinien an verbundene Switches im Netzwerk zu verteilen, anstatt mehrere Geräte einzeln konfigurieren zu müssen. Diese Fähigkeit ist auch in Bezug auf die Sicherheit ein großer Vorteil, da der Controller den Datenverkehr überwachen und Sicherheitsrichtlinien zentral, synchron und einfach implementieren kann. Wenn der Controller beispielsweise verdächtigen Datenverkehr sieht, kann er das Paket sofort umleiten oder verwerfen, ohne es an einen anderen Handler weiterzuleiten.[23]

1.1. Motivation

Verfasst von: James

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.

1.2. Problemstellung

Verfasst von: James

Innerhalb des Informatikprojekts muss sich folgendes Szenario vorgestellt werden:

Ein Unternehmen plane eine Netzwerkkommunikation zwischen vier Standorten mittels Software-Defined Networking Funktionen. Die Hauptverwaltung befindet 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

1. Software-defined Networking

sowohl eine graphische Darstellung der Netzwerkstruktur durch einen Topologieweiter 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.

1.3. Aufbau der Arbeit

Verfasst von: James

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

Verfasst von: Tung

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

Verfasst von: Tung

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

2. Projekt

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

Verfasst von: Tung, Naghmeh, James, Mücahit

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:

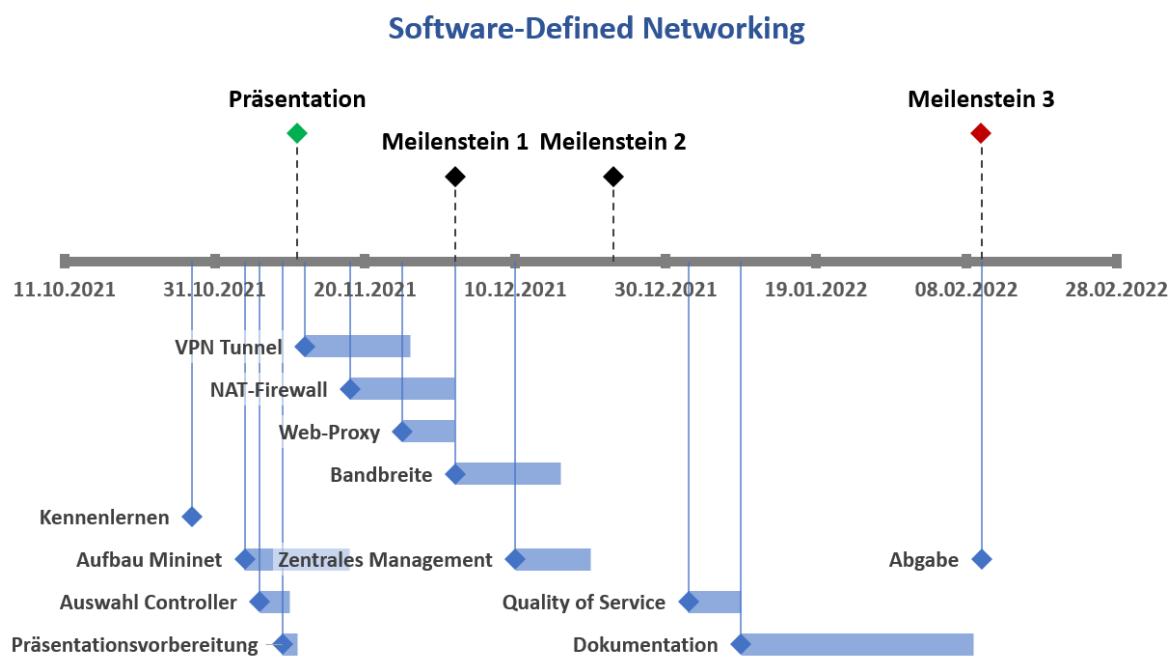


Abbildung 2.1.: Zeitplan des Projektes

Meilenstein 1

- Erstellung eines Netzwerkplans für das gesamte Netzwerk

2. Projekt

- 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

Verfasst von: Naghmeh

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. Projekt

2.4.1. Mininet

Verfasst von: Tung

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 [43].

2.4.1.1. Einführung

Verfasst von: Tung

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 [28, S. 139]. 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[28, S. 141].

2.4.1.2. Funktionalität

Verfasst von: Tung

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 [43].

2.4.1.3. Nachteile

Verfasst von: Tung

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 [69].

2.4.1.4. Komponenten

Verfasst von: Tung, Naghmeh, James, Mücahit

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-Namespace 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.

2. Projekt

- **Controller:** Ein Controller ist in der Mininet-Simulation ein Knoten, der einen OpenFlow-Controller darstellt. Mininet bietet die Möglichkeit einen internen oder externer Controller zu benutzen. Für den externen Controller wird die IPv4-Adresse und der Port benötigt.

2.4.1.5. Installation

Verfasst von: Tung

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 [42]:

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
```

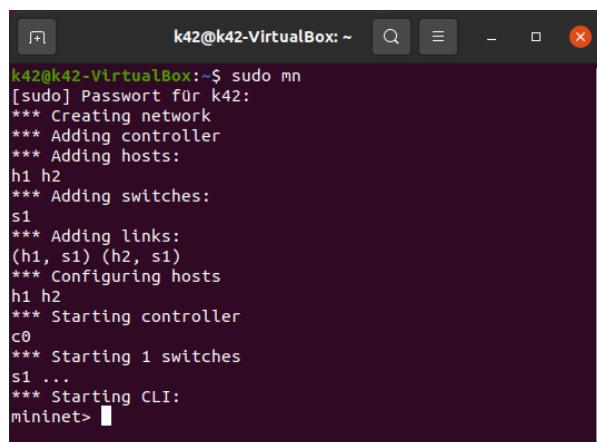
3. Mit install.sh die Installation starten

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

2.4.1.6. Aufbau

Verfasst von: Tung

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:~$ 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. Projekt

2.4.2. Floodlight

Verfasst von: Mücahit, Tung

Floodlight ist ein sogenannter SDN-Controller in der Control Plane. Dieser kommuniziert mit der Data Plane über ein Kommunikationsprotokoll namens OpenFlow und verwaltet diesen [54, S. 161].

2.4.2.1. Einführung

Verfasst von: Mücahit, Tung

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 sollten alle Projektziele der Projektarbeit erreichbar sein [61].

Verfasst von: Mücahit

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 Module geben dem Entwickler einen guten Start zur Entwicklung von Netzwerkfunktionen.

2.4.2.2. Funktionalität

Verfasst von: Mücahit

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 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 [45].

2. Projekt

Auf der Webbenutzeroberfläche sind Informationen zu dem vom Controller gesteuerten Netzwerk einsehbar. Dazu gehört die Anzahl der Switches, Hosts und Links sowie die Anzeige 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 [25].

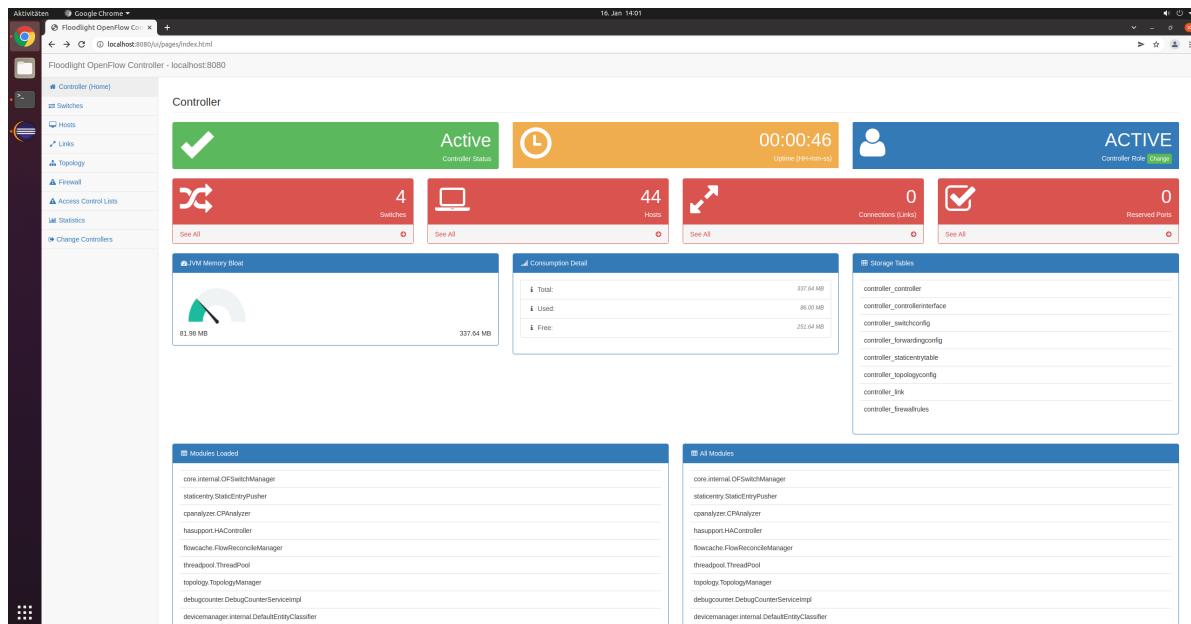


Abbildung 2.3.: Webbenutzeroberfläche vom Floodlight-Controller

2.4.2.3. Nachteil

Verfasst von: Mücahit

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 [9].

2.4.2.4. Komponenten

Verfasst von: Mücahit

Mit der Installation von Floodlight kommen sogenannte Module zum Einsatz. Die meisten der Module sind bereits aktiviert und bewältigen bestimmte Netzwerkaufgaben. Einer der Module ist der Learning Switch, welcher für die Speicherung der Routen zu den

2. Projekt

Hosts zuständig ist. Wenn ein Host einen anderen Host im gleichen Netzwerk erreichen will und der Switch die Route nicht kennt, wird das Paket als erstes an alle Netzwerkteilnehmern geschickt. Wenn der Zielhost antwortet, speichert der Switch die MAC-Adresse mit der jeweiligen Route in einer Tabelle ab. Wenn erneut ein Paket zum gleichen Empfänger will, wird über die Tabelle der Ausgangs-Port gelesen und das Paket darüber weitergeleitet [78]. Weitere Beispielmodule wären der Load Balancer, der für einen Ausgleich des Datenverkehrs im gesamten Netzwerk sorgt [24]. Über die REST-API stellt Floodlight die Netzwerktopologie über die Webbenutzeroberfläche grafisch dar. Es existieren noch weitere Module, wobei auch eigene programmiert werden können. Darauf kann das Netzwerk dynamischer gestaltet werden [26].

2.4.2.5. Installation

Verfasst von: Mücahit

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 [77].

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 2.4)

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

Verfasst von: James

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, 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 ***Next*** klicken. Von ***Select root directory*** den ***Browser*** und das 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 [77].

2.4.2.6. Aufbau

Verfasst von: Mücahit

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

2. Projekt

```

k42@k42-VirtualBox:~/mininet/custom$ 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 unsecure 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 unsecure 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 'deserializeEthPacketIn
ns' 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.l.LinkDiscoveryManager] Link latency history set to 10 LLDP data points
2022-01-31 20:43:21.706 INFO [n.f.l.l.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 map 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=tr
ue, 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.f.s.StatisticsCollector] Statistics collection disabled
2022-01-31 20:43:21.718 INFO [n.f.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}
2022-01-31 20:43:21.741 INFO [o.s.s.l.SyncManager] [1] Updating sync configuration ClusterConfig [allNodes={1=Node [hostname=192.168.56.1, port=6642, n
odeId=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, keyStorePassw
ord is set]

```

Abbildung 2.4.: Ausführung von Floodlight über den Linux-Terminal

2.4.3. Ergebnis

Verfasst von: Tung

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$ 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
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

Verfasst von: James

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

Verfasst von: Tung, Naghmeh, James, Mücahit

Die topologische Struktur des Netzwerks, die in Mininet erstellt wird, ist in Abbildung 3.2 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.

Darüber hinaus wurde für den Netzwerkplan die Standleitung in Abbildung 3.1 dargestellt. Dabei wurde eine Any-to-Any Topologie für die Vernetzung ausgewählt. Diese Topologie bietet ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und Fehlertoleranz, was jedoch mit einem hohen Preis verbunden sein kann.

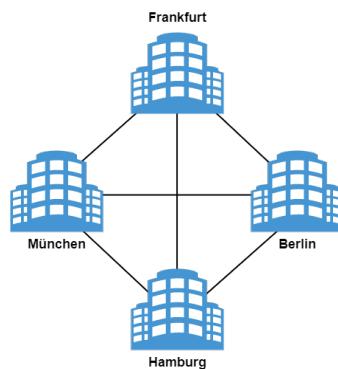


Abbildung 3.1.: Standortvernetzung mit der Any-to-Any Topologie

3. Durchführung des Projektes

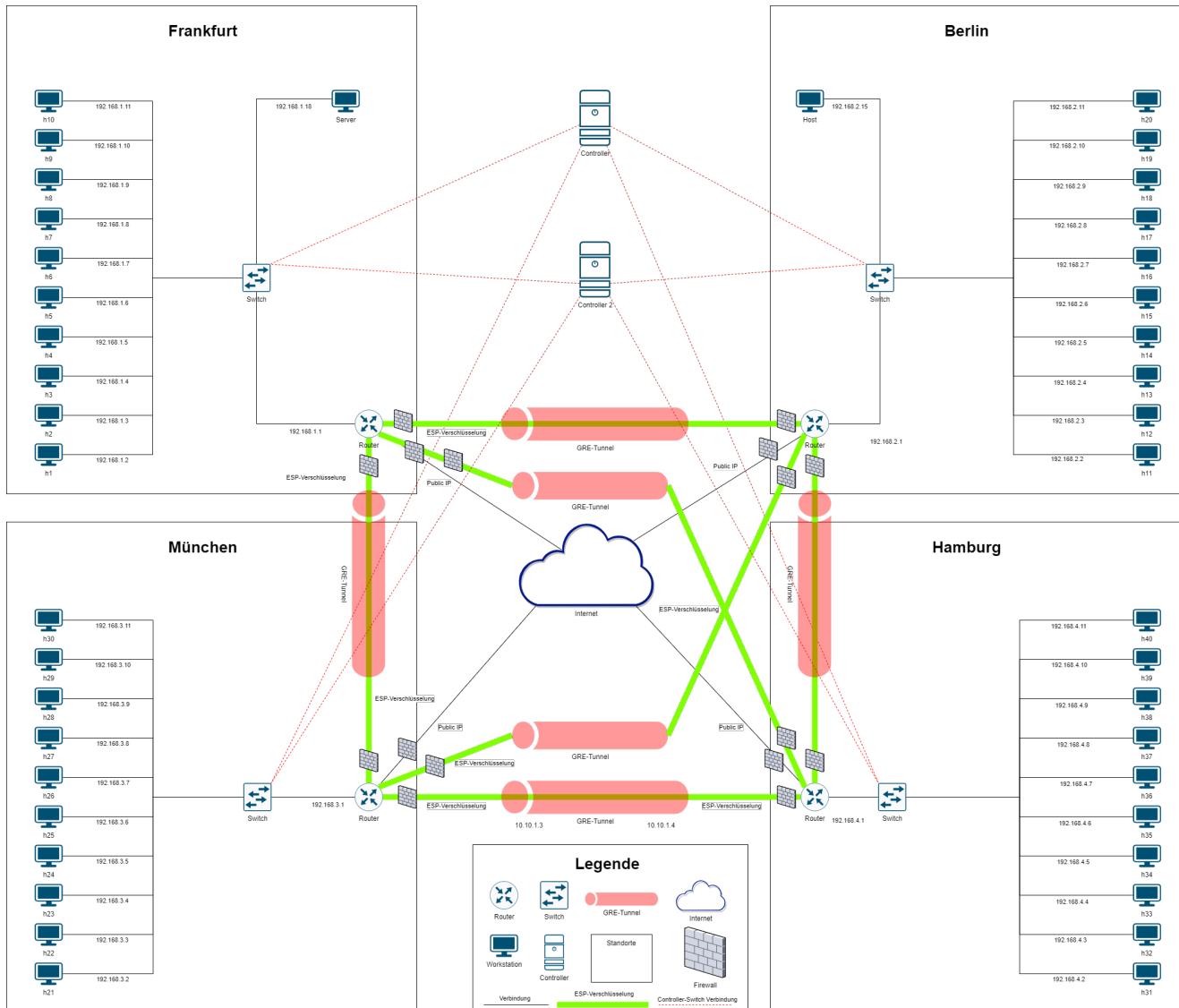


Abbildung 3.2.: Netzwerkplan aller Lokationen

Tabelle 3.1.: Vergabe von IPv4-Adressen im Netzwerk

Standort	Frankfurt	Berlin	München	Hamburg
Subnetz	192.168.1.0/24	192.168.2.0/24	192.168.3.0/24	192.168.4.0/24
Netzwerkmaske	255.255.255.0	255.255.255.0	255.255.255.0	255.255.255.0
Broadcast	192.168.1.255	192.168.2.255	192.168.3.255	192.168.4.255
Router	192.168.1.1	192.168.2.1	192.168.3.1	192.168.4.1
Switch	192.168.1.20	192.168.2.20	192.168.3.20	192.168.4.20
erster Host	192.168.1.2	192.168.2.2	192.168.3.2	192.168.4.2
letzter Host	192.168.1.254	192.168.2.254	192.168.3.254	192.168.4.254

3. Durchführung des Projektes

3.2. Aufbau des Netzwerkgerüstes in Mininet

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

3.2.1. Durchführung

Verfasst von: Tung

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.

3.2.2. Aufbau der Topologie

Verfasst von: Tung, Mücahit

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 3.3). 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 3.3.: Netzwerk-Klasse zur Topologie Erstellung

3. Durchführung des Projektes

Im nächsten Teil der Klasse Netzwerk werden die Komponenten des Netzwerks implementiert. 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 3.4).

```
# Erstellen der 4 Router, welche jeweils eine Site darstellen
for r in range(4):
    router = self.addNode(
        '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 3.4.: Erstellung und Verbindung von Router und Switch

Danach folgt noch eine Schleife, bei der insgesamt n Hosts erstellt und mit dem Switch verbunden werden (siehe Abbildung 3.5). Die Hosts erhalten für den jeweiligen privaten-IP-Bereich eine IP, eine MAC-Adresse und die IP des jeweiligen Routers als Standard-Route zugewiesen.

```
# 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' % (r+1, h))
    self.addLink(host, switch)
```

Abbildung 3.5.: Erstellung und Verbindung von Hosts und Switch

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

3. Durchführung des Projektes

Megabit gesetzt, wobei dies die geforderte SDSL-Leitung im Kapitel 3.8 darstellen soll (siehe Abbildung 3.6).

```
# 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 3.6.: Verbindung und Konfigurierung der Router

3.2.3. Controller Implementierung

Verfasst von: Tung, Mücahit

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 3.7). 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 [19].

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

Abbildung 3.7.: 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** dem Mininet-Konstruktor übergeben wird (siehe Abbildung 3.8). Der Open vSwitch und TCLink 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 [74].

3. Durchführung des Projektes

```
# 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 3.8.: Erstellung des Mininet-Objektes

3.2.4. Ergebnis

Verfasst von: Tung

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 3.9).

```
k42@k42-VirtualBox: ~/mininet/custom
*** Creating network
*** Adding controller
*** Adding hosts:
h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
*** Adding switches:
s1 s2 s3 s4
*** Adding links:
(h1, s1) (h2, s1) (h3, s1) (h4, s1) (h5, s1) (h6, s1) (h7, s1) (h8, s1) (h9, s1) (h10, s1) (h11, s2) (h12, s2) (h13, s2) (h14, s2) (h15, s2) (h16, s2) (h17, s2) (h18, s2) (h19, s2) (h20, s2) (h21, s3) (h22, s3) (h23, s3) (h24, s3) (h25, s3) (h26, s3) (h27, s3) (h28, s3) (h29, s3) (h30, s3) (h31, s4) (h32, s4) (h33, s4) (h34, s4) (h35, s4) (h36, s4) (h37, s4) (h38, s4) (h39, s4) (h40, s4) (r1, r2) (20.00Mbit) (20.00Mbit) (r1, r2) (20.00Mbit) (r1, r3) (20.00Mbit) (r1, r4) (20.00Mbit) (r2, r3) (20.00Mbit) (r2, r4) (20.00Mbit) (r3, r4)
*** Configuring hosts
h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
*** Starting controller
c0
*** Starting 4 switches
s1 s2 s3 s4 ...
*** Waiting for switches to connect
s1 s2 s3 s4 ...
*** Starting CLI:
mininet> pingall
*** ping: testing ping reachability
h1 -> h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h2 -> h1 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h3 -> h1 h2 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h4 -> h1 h2 h3 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h5 -> h1 h2 h3 h4 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h6 -> h1 h2 h3 h4 h5 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h7 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h8 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h9 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h10 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h11 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h12 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h13 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h14 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h15 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h16 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h17 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h18 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h19 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h20 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h21 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h22 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h23 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h24 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h25 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h26 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h27 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h28 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h29 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h30 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h31 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h32 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h33 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h34 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h35 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h36 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h37 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h38 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h39 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
h40 -> h1 h2 h3 h4 h5 h6 h7 h8 h9 h10 h11 h12 h13 h14 h15 h16 h17 h18 h19 h20 h21 h22 h23 h24 h25 h26 h27 h28 h29 h30 h31 h32 h33 h34 h35 h36 h37 h38 h39 h40 r1 r2 r3 r4
*** Results: 0% dropped (1892/1892 received)
```

Abbildung 3.9.: Ausführung und Testen vom Mininet-Skript

3. Durchführung des Projektes

3.3. Verschlüsselung der Netzwerkverbindung zwischen den Lokationen

Verfasst von: Mücahit

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.

3.3.1. Vorüberlegung

Verfasst von: Mücahit

Der Tunnel wird zwischen den Routern r1-r4 entstehen und für eine sichere Verbindung zwischen den Netzwerken der Lokationen sorgen. Deshalb wird eine ***Site-to-Site-VPN*** Verbindung zwischen allen Lokationen eingerichtet [52]. 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 [16].

3.3.2. Durchführung

Verfasst von: Mücahit

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 3.10). 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 Simulierung des Internets zwischen den Lokationen [65].

3. Durchführung des Projektes

```
# 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 3.10.: 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 der Router-Schnittstelle entspricht [15] (siehe Abbildung 3.11). Daraus folgt, dass nun Pakete, die die Maximum Transmission Unit (MTU) erreichen, jetzt eine geringere Länge annehmen müssen, da der neue Payload größer ist, weil dieser 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 [10].

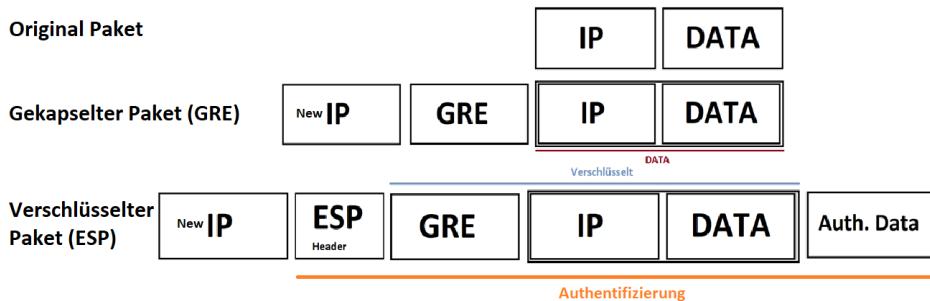


Abbildung 3.11.: Wandlung der Pakete bei IPSEC over GRE

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 [8] (siehe Abbildung 3.12). 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.

3. Durchführung des Projektes

```
# Add routing for reaching networks that aren't directly connected through 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 3.12.: 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 mit dem Encapsulating Security Payload (ESP) Protokoll genutzt. 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 [29]. Jeder Router bekommt zwei Regeln für jeweils einen anderen Router. Eine Regel ist für die Entschlüsselung bei eingehenden Paketen und die andere Regel für die Verschlüsselung bei abgehenden Paketen (siehe Abbildung 3.13).

```
# 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 3.13.: 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. Auf Abbildung 3.11 kann der Wandel von der ursprünglichen Paketstruktur auf die verschlüsselte Paketstruktur nachvollzogen werden. Es wird für eingehende und ausgehende Pakete jeweils 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 welchen 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 3.14). Es wird nicht die Tunnel-IP, sondern die Router-IP angegeben [64].

3. Durchführung des Projektes

```
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 3.14.: Erstellung der Policies für die Ver- und Entschlüsselung

3.3.3. Ergebnis

Verfasst von: Mücahit

Durch die Erstellung der Tunnel und die 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 [32]. Zwischen den Lokationen war vorher der gesamte Datenverkehr ersichtlich, wohingegen jetzt alles verschlüsselt ist (siehe Abbildung 3.15).

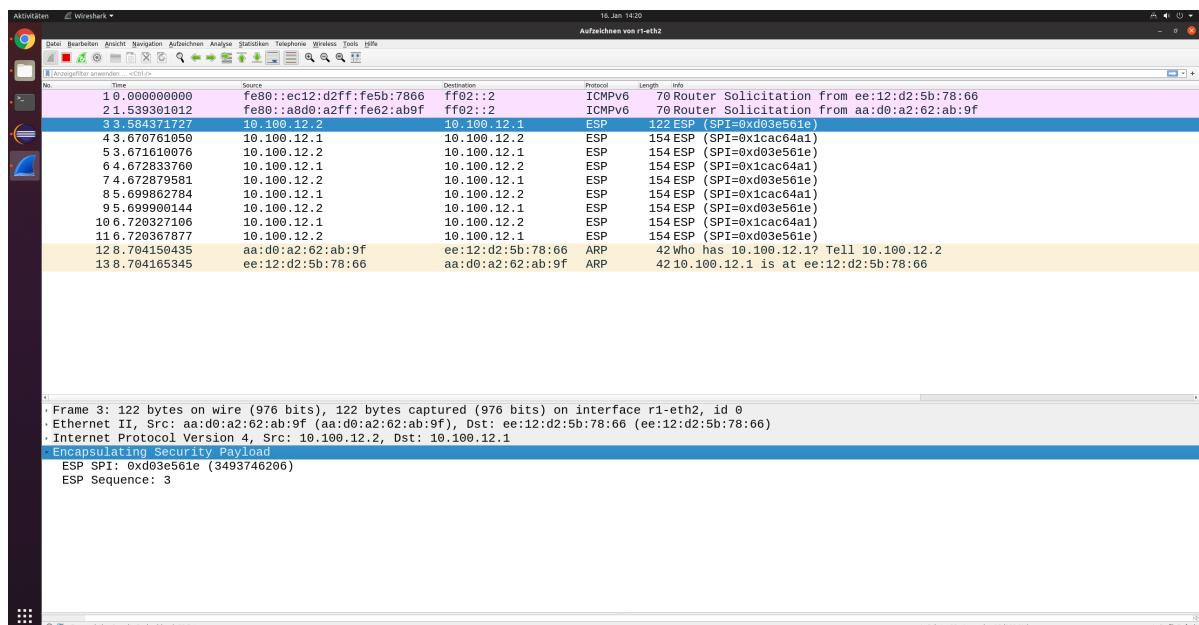


Abbildung 3.15.: Verschlüsselter Verkehr zwischen Standort Frankfurt und Berlin

3.4. Auswahl des Service-Providers

Verfasst von: Tung, Naghme, James, Mücahit

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 Aspekte betrachtet werden.

3. Durchführung des Projektes

Im Folgenden sind in einer Tabelle die Internet-Service-Provider O2, Vodafone, 1&1 und Telekom mit verschiedenen Bandbreiten und den dazugehörigen Nettopreisen aufgelistet [50] [72] [1] [68] (siehe Tabelle 3.2). Die Angebote sind aktuell und aus den originalen Webseiten der Provider entnommen.

Tabelle 3.2.: DSL-Angebote verschiedener Internet-Service-Provider

Anbieter	Tarife	Download in Mbit/s (min/normal/max)	Upload in Mbit/s (min/normal/max)	Monatl. Preis (Netto, 24 Monate)
Telekom	Company Start 16	6,3 / 9,5 / 16	0,7 / 1,5 / 2,4	37 Euro
	Company Start 50	27,9 / 47 / 50	2,7 / 9,4 / 10	42 Euro
	Company Start 100	54 / 83,8 / 100	20 / 33,4 / 40	47 Euro
	Company Start 250	175 / 200 / 250	20 / 35 / 40	57 Euro
	Company Start 500	400 / 500 / 500	80 / 100 / 100	70 Euro
	Company Start 1000	700 / 850 / 1000	200 / 200 / 200	100 Euro
	DSL 16	6,6 / 11 / 16	0,128 / 0,983 / 1	20 Euro
	DSL 50	16,7 / 44 / 50	1,6 / 9,6 / 10	22,5 Euro
	DSL 100	54 / 88,6 / 100	20 / 36,9 / 40	25 Euro
1&1	DSL 250	175 / 200 / 250	20 / 35 / 40	30 Euro
	Glasfaser 500	431 / 250 / 480	215 / 225 / 240	200 Euro
	Glasfaser 1.000	860 / 900 / 1000	430 / 450 / 500	350 Euro
	Plus 16 Regio DSL	6 / 9,5 / 16	0,7 / 0,9 / 1	20 Euro
	Plus 50 Regio DSL	28 / 38 / 50	2,7 / 7,5 / 10	22,5 Euro
	Plus 100 Regio DSL	54 / 87 / 100	20 / 37 / 40	25 Euro
O2	Plus 250 Regio DSL	175 / 210 / 250	20 / 37 / 40	30 Euro
	MyOffice S	0,3 / 8 / 10	0,3 / 1,5 / 2	25 Euro
	MyOffice M	3 / 38 / 50	0,7 / 8 / 10	27,5 Euro
	MyOffice L	50 / 83 / 100	10 / 33 / 40	30 Euro
	MyOffice XL	105 / 200 / 250	12 / 33 / 40	35 Euro

3. Durchführung des Projektes

Die notwendige Bandbreite für den Download und Upload wurde in der Gruppe abgestimmt. Vorher wurden kleine Tests zur Belegung und Stärkung der Argumente für die Abstimmung gemacht. Bei der Abstimmung wurde pro Arbeitsplatz mindestens 10 Megabit als Download und 5 Megabit als Upload für einen flüssigen Arbeitsrhythmus als notwendig gesehen. Demnach sind bei zehn Arbeitsplätzen ein Upload von mindestens 50 Megabit und ein Download von mindestens 100 Megabit nötig. Nach dem Preisleistungsverhältnis ist der Telekom Company Start 500 [67] Angebot mit einer garantierteren Uploadrate von mindestens 80 Megabit und einer garantierteren Downloadrate von mindestens 400 Megabit die beste Wahl. Zusätzlich besitzt die Telekom jahrelange Erfahrung und beweist dadurch gute Qualitäten, welches die Entscheidung für das Produkt noch einmal gestärkt hat.

Neben einer DSL-Leitung benötigen die Lokationen eine Standleitung. Eine Standleitung ist sicherer als das Internet, weil der Datenverkehr über eine private Leitung verläuft. Es ist im Rahmen des Möglichen, dass bei der Leitung physikalisch von außen Pakete abgefangen werden können. Standleitungen sind meistens symmetrisch ausgelegt und besitzen die gleiche Uploadrate wie die Downloadrate. Die Preise für Standleitungen gibt es bei Service-Providern erst nach einer Anfrage mit der Angabe der Adressen der Lokationen. Demnach ist eine genauere Preisangabe nicht möglich. Die Kosten für eine Standleitung aller vier Lokationen würde nach Recherchen bei einer symmetrischen Geschwindigkeit von 100 Megabit ungefähr zwischen 500 und 1100 Euro liegen. Die Spanne zwischen den Preisen ist groß, da Preise sich selbst von Gebäude zu Gebäude ändern. Infolgedessen ist für einen genaueren Preis eine Anfrage unabdingbar [46].

3.5. Einrichtung des NAT-Firewalls

Verfasst von: Mücahit, Naghmeh

Durch die Network Address Translation (NAT) Firewall Funktion werden private IPv4-Adressen beziehungsweise Geräte geheim gehalten. Es wird durch die Netzwerkadressenübersetzung keine Informationen über die privaten IPv4-Adressen ins World Wide Web geschickt. Dazu wird der IPv4-Header von IP-Paketen aus dem privaten Netzwerkbereich auf die öffentliche IPv4-Adresse verändert. Hinter jeder öffentlichen IPv4-Adresse können mehrere Tausende Geräte stehen und auf das Internet zugreifen, jedoch ist die Anzahl der IPv4-Adressen durch den eigenen Aufbau begrenzt [33]. Für die vier Lokationen würde der Internet-Service-Provider vier öffentliche IPv4-Adressen vergeben. Die Adressen werden vom Internet-Service-Provider in bestimmten Zeitintervallen immer wieder neu vergeben, welches ebenfalls zu einer gewissen Sicherheit beiträgt.

3.5.1. Vorüberlegung

Verfasst von: Mücahit, Naghmeh

Die NAT-Firewall Funktion muss am Router einer Lokation implementiert werden, da alle Hosts über ihn Anfragen ins Internet verschicken werden. Dazu sollte jede Anfrage ins World Wide Web mit der öffentlichen IPv4-Adresse des Routers durchgeführt werden. Zusätzlich sollte der Router beziehungsweise die Hosts den Domain Name System (DNS) Server konfiguriert bekommen, damit die Hosts nicht nur über die IP-Adressen aufs Internet zugreifen.

3.5.2. Durchführung

Verfasst von: Mücahit, Naghmeh

Um den Hosts der Lokationen den Internetzugang zu ermöglichen, muss zuerst den Routern der Zugang zum Internet möglich sein. Dafür wurde in VirtualBox die vier Netzwerk-Adapter für die vier vorgesehenen Lokationen aktiviert und als NAT konfiguriert (siehe Abbildung 3.16). Die vier Schnittstellen wurden jeweils an die Router r1, r2, r3 und r4 per ***Intf(„Schnittstellenbezeichnung“, node=Router-Objekt)*** Befehl zugewiesen. Die Schnittstellenbezeichnung kann vorher mit dem Befehl ***ifconfig -a*** angezeigt werden. Die Router-Objekte werden vorher per ***variabel = net.getNodeByName('Router-Bezeichnung')*** Befehl instanziert. Jeder Router

Adapter 5: Intel PRO/1000 MT Desktop (NAT)
Adapter 6: Intel PRO/1000 MT Desktop (NAT)
Adapter 7: Intel PRO/1000 MT Desktop (NAT)
Adapter 8: Intel PRO/1000 MT Desktop (NAT)

Abbildung 3.16.: VirtualBox NAT-Adapter

3. Durchführung des Projektes

bekommt eine individuelle Schnittstelle zugewiesen. Die Router führen anschließend den `info(net['Router-Bezeichnung'].cmd("dhclient Schnittstellenbezeichnung"))` Befehl aus, um eine IPv4-Adresse des VirtualBox NAT-Services zu erhalten (siehe Abbildung 3.17). Der IPv4-Adressenbereich, der vom NAT-Service vergeben wird, liegt bei **10.0.X.X/24** und ändert sich je nach virtueller Maschine [71] [41].

```
r1 = net.getNodeByName('r1')
Intf('enp0s16', node=r1)
info(net['r1'].cmd("dhclient enp0s16"))
info(net['r1'].cmd("sudo iptables -t nat -A POSTROUTING -o enp0s16 -j MASQUERADE"))
```

Abbildung 3.17.: Einbindung und Konfigurierung des
NAT-Adapters

Da nun eine Internetverbindung für alle Router besteht, muss der Domain Name System Server auf dem Ubuntu-Host festgelegt werden, damit die Hosts nicht nur per IPv4 auf das Internet zugreifen können. Eine Möglichkeit besteht darin, die Datei `/etc/resolv.conf` per Admin-Rechte zu bearbeiten und dort den Domain Name System Server festzulegen. Es kann der Domain Name Server von Google mit der IPv4 **8.8.8.8** und/oder **8.8.4.4** eingetragen werden. Ein Nachteil bei dieser Variante ist, dass nach jedem Neustart des Betriebssystems dieser Vorgang erneut durchgeführt werden muss, da der Eintrag nur temporär bis zum Ausschalten des Betriebssystems erhalten bleibt. Um dem entgegenzuwirken wurde das Paket Resolvconf per `sudo apt install resolvconf` installiert [70]. Dadurch wurden neue Dateien in der Konfigurationsebene von Ubuntu erstellt, wodurch ein permanenter Eintrag des DNS-Servers möglich war. Dafür wurde die IPv4 des DNS Server in die Datei `/etc/resolvconf/resolv.conf.d/head` eingetragen und gespeichert. Anschließend wurde der Netzwerkmanager per `sudo systemctl restart network-manager` Befehl neu gestartet, um die Einstellungen zu übernehmen. Jetzt ist es den Routern möglich, das Internet auch per Domainnamen zu erreichen [31].

Die Default-Route der Hosts ist der jeweilige Router in der Lokation. Wenn ein Host eine Website aufruft, schickt er eine Anfrage an und über den Router. Im Moment wird die Anfrage beim Router fallengelassen, da der Router noch keine Regeln bezüglich solcher Anfragen besitzt. Die Regel wird über das im Ubuntu vorhandene Programm `iptables` eingetragen, welches den Linux-Kernel umkonfiguriert [59]. Dazu wird auf allen Routern der Befehl `sudo iptables -t nat -A POSTROUTING -o Schnittstellenbezeichnung -j MASQUERADE` ausgeführt. Der Befehl vergibt jedem eingehenden Paket als Quelladresse die IPv4-Adresse der NAT-Schnittstelle des Routers [53] (siehe Abbildung 3.16). Es wird **MASQUERADE** genutzt, weil zum Zeitpunkt der Ausführung des Befehls die IPv4-Adresse der Schnittstelle unbekannt sein beziehungsweise sich ändern kann. Bei einer statischen IPv4-Adresse der NAT-Schnittstelle würde statt MASQUERADE direkt die IP eingegeben werden [58].

3. Durchführung des Projektes

3.5.3. Ergebnis

Verfasst von: Mücahit, Naghmeh

Zusammenfassend wurde die NAT-Firewall-Funktion an allen Lokationen konfiguriert. Den Hosts ist es nun möglich, Anfragen ins Internet zu versenden. Der Router führt die Anfragen mit der von VirtualBox zur Verfügung gestellten Schnittstelle aus und gibt dem Host die Antwort zurück (siehe Abbildung 3.18).

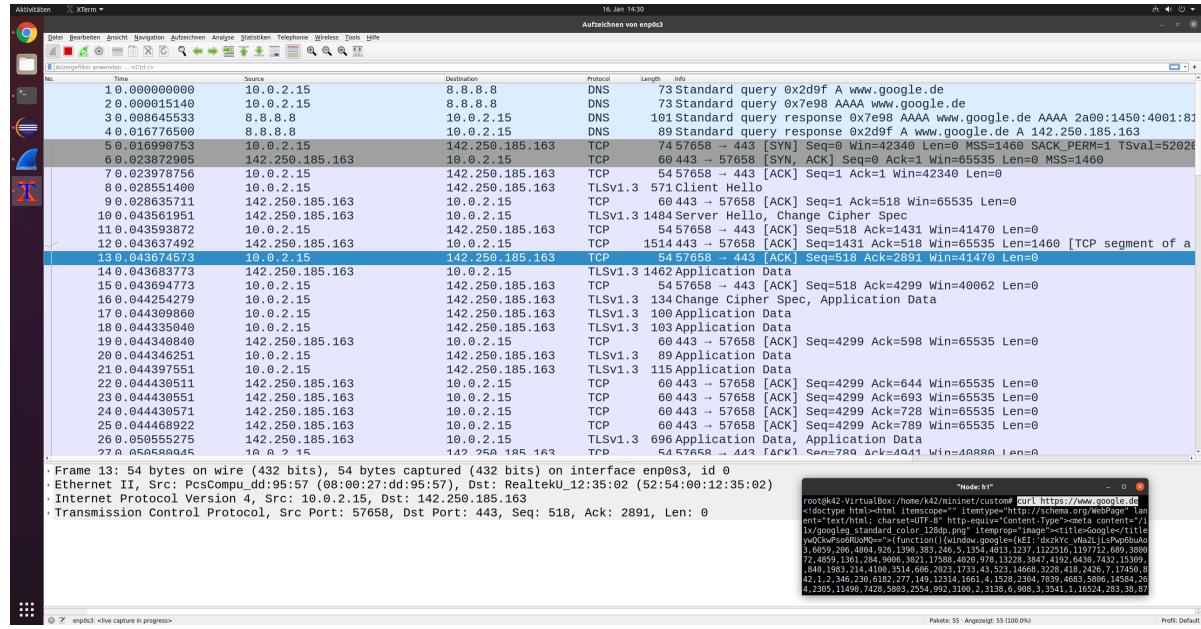


Abbildung 3.18.: Anfrage von H1 wird über Public IP des Routers durchgeführt

Ein Problem bei der Durchführung war, dass die Netzwerkschnittstellen beim Beenden von Mininet auch für Ubuntu nicht mehr verfügbar waren. Deshalb musste immer wieder die virtuelle Maschine beziehungsweise Ubuntu neu gestartet werden, wenn Mininet beendet wurde. Um dem entgegenzuwirken, wurde der Befehl **ip link set Schnittstellenbezeichnung netns 1** im Mininet-Script kurz vor dem Beenden eingefügt, damit die Schnittstelle erneut für Ubuntu verfügbar war.

3.6. Implementierung der Webproxy-Funktion

Verfasst von: Tung, Naghmeh, James, Mücahit

Der Proxy übernimmt jede Hypertext Transfer Protocol (HTTP) und Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) Anfrage der Hosts, führt sie selber durch und leitet die Antwort dem ursprünglichen Host wieder zurück. Der Vorteil hierbei ist, dass der WebProxy-Server für eine Sicherheit in allen Schichten des OSI-Modells sorgen kann. Es müssen lediglich an dem Web-Proxy-Server Einstellungen bezüglich gewünschter Inhalte, IP-Adressen oder MAC-Adressen vorgenommen werden. Damit ist die Sicherheit für alle Geräte gewährleistet, die über den Web-Proxy-Server Anfragen verschicken. Des Weiteren wäre die Bandbreite weniger ausgelastet, da der Web-Proxy-Server jede neue Antwort in seinem Cache speichert. Bei gleicher Anfrage in einem benutzerdefinierten Zeitintervall wird die Antwort aus dem Cache statt durch erneute Anfrage ins Internet ausgegeben [57].

3.6.1. Vorüberlegung

Verfasst von: Tung, Naghmeh, James, Mücahit

Für eine Webproxy-Funktion muss in allen Lokationen ein Webproxy-Server eingerichtet werden. Hosts müssen ohne vorherige Konfiguration, Anfragen über den Proxy versenden können, wenn sie neu zu dem Netzwerk hinzukommen. Dem Host ist nicht bewusst, dass seine Anfragen über einen Proxy laufen. Anfragen würden über den Switch an den Webproxy weitergeleitet werden. Dieser führt die Anfrage durch und gibt dem Host die Antwort zurück. Die Umleitung sollte durch den Controller konfiguriert werden.

3.6.2. Durchführung

Verfasst von: Tung, Naghmeh, James, Mücahit

Um die Webproxy-Funktion zu realisieren, wurde in allen Lokationen jeweils ein weiterer Host in Mininet konfiguriert. Es wurde allen eine IPv4-Adresse im jeweiligen privaten Netzwerkadressenbereich vergeben und mit dem dazugehörigen Switch verbunden. Diese Hosts sollen nun als Webproxy-Server dienen. Es wurde zunächst per **Xterm** **Proxybezeichnung** Befehl ein externes Terminal gestartet und die Internetverbindung durch das Aufrufen einer beliebigen Website als funktionsfähig getestet. Dazu wurde das Kommandozeilenprogramm **cURL** verwendet, welcher vorher per **sudo apt install curl** installiert werden muss. Als Nächstes sollte eine weitere Schnittstelle des Webproxy-Servers mit einer Schnittstelle von VirtualBox verbunden werden. Dieser sollte dann als Bridge zwischen zwei VirtualBox-Maschinen genutzt werden. Auf der zweiten VirtualBox-Maschine sollte das Programm Squid installiert werden. Im Gesamtbild sollte eine Anfrage eines Hosts über den Proxy-Server-Host auf eine andere VirtualBox-Maschine weitergeleitet, dort durchgeführt und die Antwort anschließend zurückgeleitet

3. Durchführung des Projektes

werden. Leider scheiterte dieser Versuch, da bei der Haupt-VirtualBox-Maschine der Promiscuous-Modus des Netzwerkbrückenadapters auf deny eingestellt war. Dadurch kam keine Verbindung zwischen den zwei VirtualBox-Maschinen zustande. Aus diesem Grund wurde ein alternativer Proxy-Skript aus Github benutzt, um die Webproxy-Funktionalität direkt auf dem Host beziehungsweise Server einzurichten. Dazu wurde per Xterm ein Host-Terminal gestartet und das Skript ausgeführt. Dieser nimmt nur HTTP Anfragen entgegen, führt sie selber durch und gibt für einen bestimmtes Zeitintervall die Antworten aus dem Cache zurück. Hier ist noch mal zu verdeutlichen, dass das Python-Skript für keine umfangreiche Web-Proxy-Funktionalität ausgelegt ist, jedoch dieser aus Testzwecken benutzt wurde. Als Nächstes wurden alle Pakete, die beim Switch eingehen und einen Ziel-Port als 80 besitzen, an den Proxy weitergeleitet. Hierfür wurde über den Controller die entsprechenden Flows als Match eingetragen, die dazugehörigen Actions implementiert und dem Switch die Anweisungen geschrieben. Dadurch bekommt der Webproxy-Server die Anfragen der Hosts, ohne dass die Geräte umkonfiguriert werden müssen. Der Proxy nimmt die Anfrage entgegen, 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. Die Antwort des Proxys könnte ebenfalls per Controller modifiziert und an das jeweilige Gerät weitergeleitet werden. Jedoch fehlte die Information des Absenders aus dem Internet zu dem Zeitpunkt, an dem die Antwort vom Proxy an den Host geschickt wurde.

3.6.3. Ergebnis

Verfasst von: Tung, Naghmeh, James, Mücahit

Resultierend war es nicht möglich, die Webproxy-Funktion zu implementieren. Alternativ könnte eine transparente Web-Proxy-Funktion an dem Router der jeweiligen Lokationen eingerichtet werden. Dieser führt die Anfragen selber durch, speichert und sendet die Antwort an den jeweiligen Host zurück. Auch das Eintragen des Proxyservers an den jeweiligen Hosts, die mit dem Switch verbunden sind, würde sich als funktionsfähig erweisen. Diese Art wird direkter Proxy genannt und trägt viel Aufwand mit sich [62].

3. Durchführung des Projektes

3.7. Aufbau eines zentralen Topologie-Viewers und einer Monitoring-Lösung

3.7.1. Topologie

Verfasst von: Mücahit

Die Topologie unseres Netzwerkes kann auf dem Web User Interface des Floodlight-Controllers eingesehen werden. Ein mit der Standardinstallation geliefertes Floodlight-Modul stellt die Information der Topologie in einer Weboberfläche zur Verfügung. Zum Einsehen der Topologie muss auf einem Webbrower die Benutzeroberfläche des Controllers über den Link `http://<controller-ip>:8080/ui/index.html` aufgerufen werden [26]. Anschließend wird auf dem linken Reiter die Option Topology angeklickt, wodurch die Topologie angezeigt wird (siehe Abbildung 3.19). Durch die Benutzung einer VirtualBox werden vier getrennte Topologien angezeigt. Die Verbindungen zwischen den Routern werden bei der Visualisierung vom Controller ignoriert. Dies schränkt jedoch nicht die Funktionsweise des Netzwerkes ein. Bei der Nutzung vier getrennter VirtualBox-Maschinen, würde die Topologie korrekt dargestellt werden.

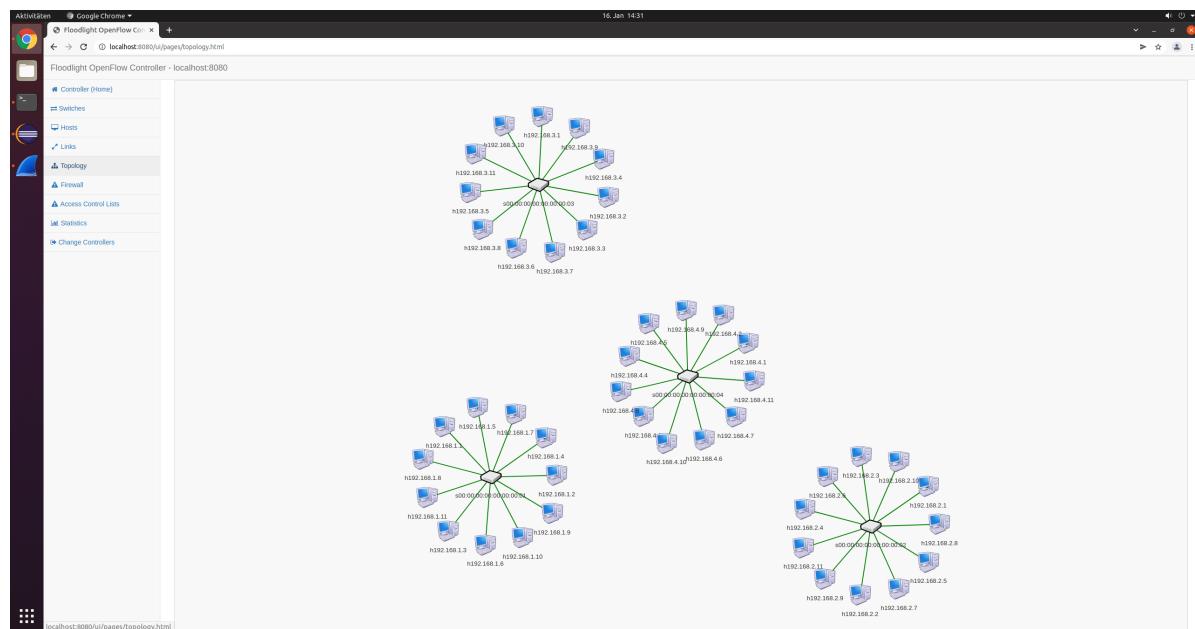


Abbildung 3.19.: Topologie des Netzwerkes auf der Webbenutzeroberfläche von Floodlight

3. Durchführung des Projektes

3.7.2. Monitoring-Lösung

Verfasst von: Mücahit

Für das zentrale Monitoring wird Nagios Core zum Einsatz kommen. Es kann auf einer großen Anzahl an Umgebungen installiert werden. Die Software bietet eine Weboberfläche, die von allen Netzwerkteilnehmern erreicht werden kann. Dabei können die Verfügbarkeit, Geschwindigkeit und Dienste der Netzwerkkomponenten überprüft werden. Bei entstehenden Fehlern können Administratoren benachrichtigt werden, um die Fehler zu beheben. Bei großen Netzwerken spielt dies eine wichtige Rolle, da die Verfügbarkeit bei kritischen Anwendungen von großer Bedeutung ist [48].

Zunächst wird Nagios Core auf der VirtualBox-Maschine installiert, wo auch Mininet und Floodlight laufen. Bis jetzt lief Floodlight auf dem localhost, also der **127.0.0.1** IP, welches nun geändert werden muss, damit die Netzwerkteilnehmer auf die Floodlight REST-API, im Moment wichtiger auf den Nagios Core Dienst, zugreifen können. Dafür werden im Mininet-Skript Befehle eingefügt, um den Switches 1-4 eine IP-Adresse zuzuweisen (siehe Abbildung 3.20). Ebenfalls wird die Default-Route als **192.168.1.1** hinzugefügt, da Nagios Core auf der IP **192.168.1.20** laufen wird. Der Controller wurde ebenfalls konfiguriert auf dieser IP zu laufen. Nagios Core und der Controller sind nun von allen Netzwerkteilnehmern erreichbar.

```
os.system("sudo ip addr add 192.168.1.20/24 dev s1")
os.system("sudo ip link set s1 up")
```

Abbildung 3.20.: Hinzufügen der Switch IP für s1

Die Installation von Nagios Core findet auf der Haupt-VirtualBox-Maschine statt und wird Schritt für Schritt erklärt. Die Befehle sollten nacheinander im Linux-Terminal ausgeführt werden.

1. Das Betriebssystem auf den neuesten Stand bringen

```
$ sudo apt update & & upgrade -y
```

2. Alle benötigten Abhängigkeiten installieren

```
$ sudo apt install -y build-essential apache2 php openssl perl makephp-gd libgd-dev libapache2-mod-php libperl-dev libssl-dev daemonwget apache2-utils unzip
```

3. Nagios Benutzer und Gruppe hinzufügen

```
$ sudo useradd nagios
$ sudo groupadd nagcmd
$ sudo usermod -a -G nagcmd nagios
$ sudo usermod -a -G nagcmd www-data
```

3. Durchführung des Projektes

4. Nagios in einen beliebigen Ordner herunterladen

```
$ wget https://assets.nagios.com/downloads/nagioscore/releases/nagios-4.4.5.tar.gz
```

5. Die Datei extrahieren und in den Ordner wechseln

```
$ tar -zxvf /tmp/nagios-4.4.5.tar.gz  
$ cd /nagios-4.4.5/
```

6. Nagios einstellen (hierbei wird der Benutzer und die Gruppe angegeben)

```
$ sudo ./configure --with-nagios-group=nagios --with-command-group=nagcmd  
--with-apache-conf=/etc/apache2/sites-enabled/
```

7. Die Dateien vorbereiten und installieren

```
$ sudo make all  
$ sudo make install  
$ sudo make install-init  
$ sudo make install-config  
$ sudo make install-commandmode
```

8. Optional: Kontaktdaten in die contacts.cfg einfügen, um Notifications zu erhalten

```
$ sudo gedit /usr/local/nagios/etc/objects/contacts.cfg
```

9. Webinterface installieren und Module aktivieren

```
$ sudo make install-webconf  
$ sudo a2enmod cgi
```

10. Nagios-Benutzer erstellen

```
$ sudo htpasswd -c /usr/local/nagios/etc/htpasswd.users nagiosadmin
```

11. Webserver neustarten

```
$ sudo systemctl restart apache2
```

12. Optional: Nagios Plugins herunterladen und installieren

```
$ wget https://nagios-plugins.org/download/nagios-plugins-2.3.3.tar.gz  
$ tar -zxvf /tmp/nagios-plugins-2.3.3.tar.gz  
$ cd /nagios-plugins-2.3.3/  
$ sudo ./configure --with-nagios-user=nagios --with-nagios-group=nagios  
$ sudo make  
$ sudo make install
```

3. Durchführung des Projektes

13. Nagios bei Systemstart starten und Nagios ausführen

```
$ sudo systemctl enable nagios  
$ sudo systemctl start nagios
```

Mit all den Schritten wurde Nagios Core inklusive der Plugins installiert [27]. Der Webserver von Nagios läuft nach Neustart des Dienstes auf den IP-Adressen der Switches. Dazu muss die IP inklusive des Pfades `/nagios` aufgerufen werden. Dort sind momentan nur Informationen über das von Nagios ausgeführte System enthalten. Die Netzwerkkomponenten müssen manuell in Nagios eingefügt werden. Bevor das funktioniert, muss für die Switches eine Einstellung in der `nagios.cfg` vorgenommen werden. Dort muss die Raute vor dem `cfg_file=/usr/local/nagios/etc/objects/switch.cfg` Befehl entfernt werden, damit die `switch.cfg` in Nagios mitübernommen wird. Nun werden in der `switch.cfg` alle Switches mit der Bezeichnung, deren IP und der zugehörigen Gruppe aufgelistet (siehe Abbildung 3.21). Danach können sogenannte Services für die Überwachung der Verfügbarkeit, der Geschwindigkeit und weitere Informationen hinzugefügt werden (siehe Abbildung 3.22). Anschließend muss der Nagios Dienst neu gestartet werden. Um Fehler zu vermeiden, sollte per `sudo /usr/local/nagios/bin/nagios -v /usr/local/nagios/etc/nagios.cfg` Befehl überprüft werden, ob Unstimmigkeiten bei den geänderten Konfigurationen existieren [11].

```
# Define the switch that we'll be monitoring  
  
define host {  
  
    use          generic-switch ; Inherit default values from a template  
    host_name   S1-FRA          ; The name we're giving to this switch  
    alias       S1-Frankfurt    ; A longer name associated with the switch  
    address     192.168.1.20    ; IP address of the switch  
    hostgroups  switches        ; Host groups this switch is associated with  
}
```

Abbildung 3.21.: Definition der Switch für Nagios

```
# Create a service to PING to switch  
  
define service {  
  
    use          generic-service ; Inherit values from a template  
    host_name   S1-FRA,S2-BER,S3-HAM,S4-MUN ; The name of the host the service is associated with  
    service_description PING ; The service description  
    check_command  check_ping!200.0,20%!600.0,60% ; The command used to monitor the service  
    check_interval 5 ; Check the service every 5 minutes under normal conditions  
    retry_interval 1 ; Re-check the service every minute until its state is determined  
}
```

Abbildung 3.22.: Definition der Services für die Switch

Nachdem alle Netzwerkeinheiten und -komponenten hinzugefügt und die gewünschten Services eingestellt worden sind, werden alle Informationen auf der Webbenutzeroberfläche angezeigt (siehe Abbildung 3.23). Unter dem Reiter "Hosts" kann die Verfügbarkeit aller Teilnehmer anhand verschiedener Zustände angezeigt werden. Ein Host kann

3. Durchführung des Projektes

den Zustand **Up**, **Down**, **Unreachable** und **Pending** haben, welche auch mit Farben visualisiert werden. Unter Services werden alle Teilnehmer mit den konfigurierten Services angezeigt. Die Services haben ebenfalls Zustände. Dazu gehört unter anderem **Ok**, **Warning**, **Unknown**, **Critical** und **Pending**, die ebenfalls mit Farben visualisiert werden. Bei Host Groups werden die Teilnehmer gruppiert und die Informationen zusammengefasst angezeigt. Des Weiteren können viele weitere Einstellungen bezüglich der Benachrichtigungen und der Services über die Webbenutzeroberfläche vorgenommen werden. Dazu klickt man auf einen Teilnehmer und kann auf dem rechten Abschnitt sogenannte **Host Commands** nutzen. Beispielsweise können Kommentare zu Hosts oder Services verfasst werden, damit andere Nutzer bestimmte Vorgänge nachvollziehen können. Zusammenfassend kann über Nagios das gesamte Netzwerk zentral überwacht werden.

The screenshot displays the Nagios Core web interface. On the left, a sidebar navigation menu includes General, Current Network Status, Host Status Totals, Service Status Totals, Host Status Details, Service Status Details, Host Groups, Services, and Configuration. The main content area shows a table titled "Service Status Details For All Hosts". The table has columns for Host, Service, Status, Last Check, Duration, Attempts, and Status Information. The table lists various hosts (HOST-BERLIN, HOST-BERLIN, HOST-HAMBURG, HOST-MÜNCHEN, SERVER-FRA) and their associated services (HTTP, SSH, PING, Disk, Swap, CPU Load, Total Processes). Most entries show "OK" status, while some like "Disk" and "Swap" show "CRITICAL" status. The "Status Information" column contains detailed log messages for each entry. A status bar at the bottom right indicates "Results 1 - 300 of 334 Matching Services".

Abbildung 3.23.: Webbenutzeroberfläche von Nagios Core

3. Durchführung des Projektes

3.8. Realisierung einer Quality of Service Funktion

Verfasst von: Mücahit

Die Quality of Service Funktion gewährleistet die Fähigkeit des Netzwerkes, Anwendungen und Datenverkehr selbst bei begrenzter Netzwerkkapazität zuverlässig mit hoher Priorität auszuführen [66]. Das Netzwerkes muss für alle Audio- und Video-Konferenzen innerhalb der Lokationen genügend Bandbreite zur Verfügung stellen. Die Verbindung zwischen den Lokationen besteht aus einer Standleitung mit einer Geschwindigkeit von 20 Megabit.

3.8.1. Vorüberlegung

Verfasst von: Mücahit

Pakete, die für die Audio- und Videokonferenzen verantwortlich sind, müssen an dem Switch über den Controller priorisiert werden. Durch die Priorisierung sollen bei einer Auslastung des Netzwerkes die Audio- und Videokonferenzen stabil und flüssig laufen. Nach einer ausgiebigen Recherche kam der Entschluss, UDP Pakete zu priorisieren, da die meisten Videokonferenzprogramme wie beispielsweise Skype und Zoom diese verwenden. Zusätzlich muss getestet werden, wie viel Megabit pro Host eine ausreichende Bandbreite darstellen [12].

An dem Port der Switch, der zum Router der Lokationen führt, werden zwei sogenannte Queues erstellt. Eine Queue wird für die Audio- und Videokonferenzen und die andere Queue für den restlichen Datenverkehr verwendet. Dabei erhalten die Queues Eigenschaften wie der minimalen und/oder maximalen Bandbreite zur Gewährleistung der Quality of Service [3, S. 952]. Nach der Konfiguration sollte gezeigt werden, ob Pakete tatsächlich über die Queue verlaufen.

3.8.2. Durchführung

Verfasst von: Mücahit

Auf allen vier Switches wird zuerst der Befehl `sudo ovs-vsctl set port Router-Port qos=@newqos -- --id=@newqos create qos type=linux-htb other-config:max-rate=20000000 queues:0=@newqueue0 queues:1=@newqueue1 -- --id=@newqueue0 create queue other-config:max-rate=20000000 -- --id=@newqueue1 create queue other-config:min-rate=7000000 other-config:max-rate=20000000` mit der Angabe der Bezeichnung für den Port zum Router ausgeführt. Das Ganze geschieht im Ubuntu-Terminal während Mininet ausgeführt wird. Dabei wird auf dem Switch die Quality of Service und genau zwei Queues konfiguriert, die sich anhand der ID unterscheiden. Die allgemeine Bandbreite des Ports wird auf **20 Megabit**, die **Queue 0** auf **maximal 20 Megabit** und die **Queue 1** auf **minimal sieben und maximal 20 Megabit** gesetzt. Die minimale Bandbreite für die Priorisierung wurde

3. Durchführung des Projektes

anhand eines Selbst-Tests mit Zoom und der Information des Ressourcenmonitors von Windows festgelegt. Dabei wurde mit Video- und Audioübertragungen eine Uploadrate zwischen **500-900 Kilobit** pro Sekunde gemessen. Daraus resultierend wurden für zehn Arbeitsplätze die Geschwindigkeit auf Minimum sieben Megabit eingestellt.

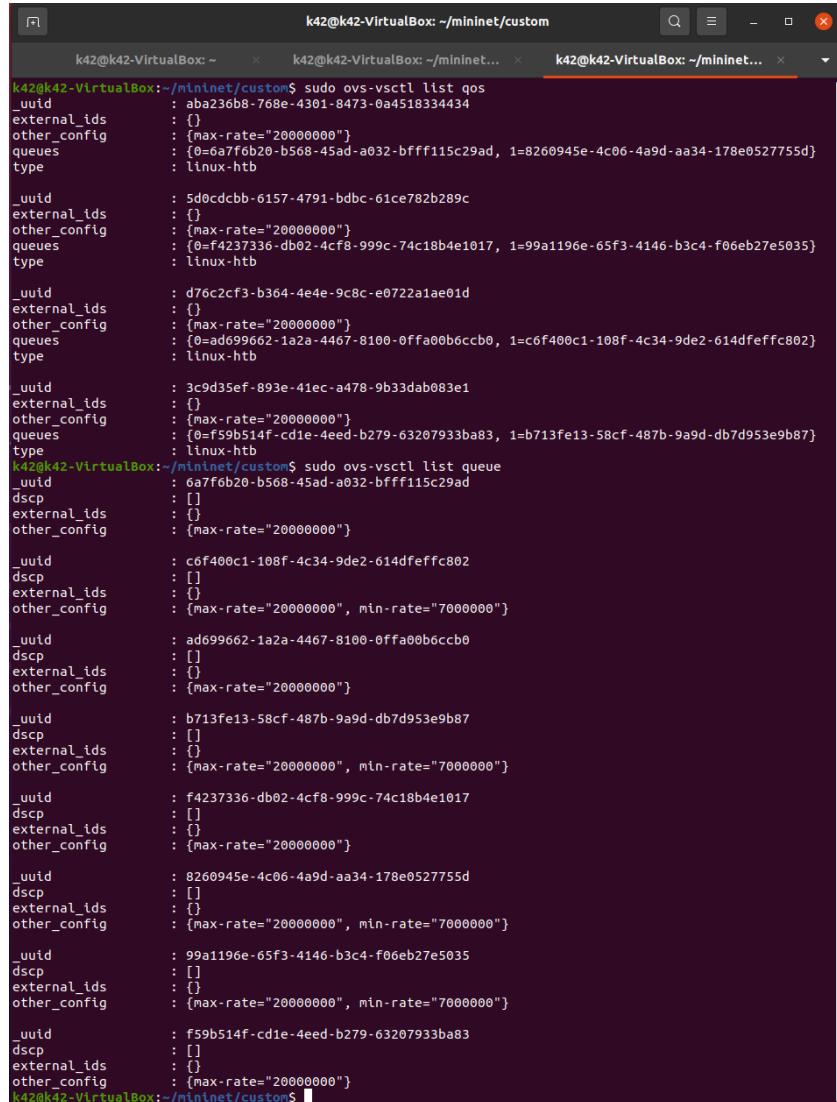
Der Datenverkehr wird über den Open vSwitch konfiguriert [75]. Der Verkehr soll entweder auf die **Queue 0** oder **Queue 1** weitergeleitet werden. So erhält der Verkehr die Eigenschaften dieser Queue bezüglicher der festgelegten Raten. Dazu wird über das Mininet-Skript im Ubuntu-Terminal für alle Switches der Befehl **sudo ovs-ofctl add-flow Switch-Bezeichnung priority=1000, actions=set_queue:0, normal** ausgeführt. Der Befehl leitet jedes Paket an die Queue 0. Somit wäre jeglicher Datenverkehr auf maximal 20 Megabit begrenzt. Als Nächstes werden nur die UDP-Pakete mit dem angegebenen Adressenbereich mit dem Befehl **sudo ovs-ofctl add-flow Switch-Bezeichnung priority=65535, udp, nw_src=192.168.0.0/16, nw_dst=192.168.0.0/16, actions=set_queue:1, normal** bei allen Switches auf die Queue 1 weitergeleitet. Damit hätten die UDP-Pakete eine minimale Bandbreite von sieben und eine maximale Bandbreite von 20 Megabit. Bei den Bedingungen wurde zusätzlich die Priorität eingegeben. Desto höher die Priorität gesetzt wird, desto höher ist die Priorität des Flows und auch somit die Wichtigkeit. Bei der Bedingung für die Quality of Service wird die Priorität auf das Maximum, nämlich **65535**, gestellt. Beim restlichen Datenverkehr kann dieser beliebig größer null gewählt werden. Zusätzlich wird am Ende jeder Bedingung der Flow auf normal gesetzt. Dieser bedeutet, dass das Paket wie gewöhnlich im Layer zwei weiterverarbeitet wird.

3.8.3. Ergebnis

Verfasst von: Mücahit

Die Quality of Service und Queue Einstellungen können über die Befehle **sudo ovs-vsctl list qos** und **sudo ovs-vsctl list queue** angezeigt werden (siehe Abbildung 3.24). Mit dem Befehl **sudo ovs-ofctl dump-flows switchbezeichnung** können die Flows des jeweiligen Switches ausgegeben werden. Dort werden unteranderem die Flows für die Quality of Service und den restlichen Datenverkehr angezeigt.

3. Durchführung des Projektes



```
k42@k42-VirtualBox:~/mininet/custom$ sudo ovs-vsctl list qos
_uuid          : aba236b8-768e-4301-8473-0a4518334434
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000"}]
queues         : [{0=a7fb620-b568-45ad-a932-bfff115c29ad, 1=8260945e-4c06-4a9d-aa34-178e0527755d}]
type           : linux-htb

_uuid          : 5d0cdccb-6157-4791-bdbc-61ce782b289c
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000"}]
queues         : [{0=f4237336-db02-4cf8-999c-74c18b4e1017, 1=99a1196e-65f3-4146-b3c4-f06eb27e5035}]
type           : linux-htb

_uuid          : d76c2cf3-b364-4e4e-9c8c-e0722a1ae01d
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000"}]
queues         : [{0=ad99662-1a2a-4467-8100-0ffa00b6ccb0, 1=c6f400c1-108f-4c34-9de2-614dfefffc802}]
type           : linux-htb

_uuid          : 3c9d35ef-893e-41ec-a478-9b33dab083e1
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000"}]
queues         : [{0=f59b514f-cd1e-4eed-b279-63207933ba83, 1=b713fe13-58cf-487b-9a9d-db7d953e9b87}]
type           : linux-htb

k42@k42-VirtualBox:~/mininet/custom$ sudo ovs-vsctl list queue
_uuid          : 6a7fb620-b568-45ad-a032-bfff115c29ad
_dscp          : []
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000"}]

_uuid          : c6f400c1-108f-4c34-9de2-614dfefffc802
_dscp          : []
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000", min-rate="7000000"}]

_uuid          : ad99662-1a2a-4467-8100-0ffa00b6ccb0
_dscp          : []
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000"}]

_uuid          : b713fe13-58cf-487b-9a9d-db7d953e9b87
_dscp          : []
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000", min-rate="7000000"}]

_uuid          : f4237336-db02-4cf8-999c-74c18b4e1017
_dscp          : []
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000"}]

_uuid          : 8260945e-4c06-4a9d-aa34-178e0527755d
_dscp          : []
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000", min-rate="7000000"}]

_uuid          : 99a1196e-65f3-4146-b3c4-f06eb27e5035
_dscp          : []
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000", min-rate="7000000"}]

_uuid          : f59b514f-cd1e-4eed-b279-63207933ba83
_dscp          : []
external_ids   : []
other_config   : [{"max-rate="20000000"}]

k42@k42-VirtualBox:~/mininet/custom$
```

Abbildung 3.24.: Ausgabe der QoS und Queue der Switches aller Lokationen

Für den Test wurden zwei weitere VirtualBox-Maschinen mit Ubuntu aufgestellt. Eine Maschine stellt den Server in der Lokation Frankfurt dar. Die andere Maschine stellt einen Host in der Berliner Lokation dar. Beide Maschinen wurden mit der Haupt-VirtualBox-Maschine über eine interne Schnittstelle verbunden. Der Frankfurter Server besitzt die IP **192.168.1.18**, während der Berliner Host die IP **192.168.2.15** besitzt. Dies wurde per Netplan eingerichtet, welcher per **sudo apt install netplan.io** Befehl auf beiden Systemen installiert worden ist. Danach wurden in den Konfigurationsdateien im Dateipfad **/etc/netplan/** die dementsprechende IP-Adresse, das Gateway der Lokation eingegeben und dhcp auf false gestellt. Anschließend wurden die Einstellungen mit dem Befehl **sudo netplan apply** übernommen. Nach den Schritten besteht zwischen dem Host in Berlin und dem Server in Frankfurt über die Haupt-VirtualBox-Maschine eine Verbindung.

3. Durchführung des Projektes

Um nun die Quality of Service und Queue Konfiguration zu testen, wurde auf dem Server in Frankfurt der Prosody *Extensible Messaging and Presence Protocol* (XMPP) Server installiert und konfiguriert. Dazu wurde der Befehl **sudo apt-get install prosody** im Terminal eingegeben. Anschließend wurde der Server anhand der Datei im Pfad **/etc/prosody/prosody.cfg.lua** konfiguriert und mit dem Befehl **sudo systemctl restart prosody-service** neu gestartet. Nun läuft in der Frankfurter Lokation ein XMPP-Server. Des Weiteren wurde auf dem Server in Frankfurt und auf dem Host in Berlin der XMPP-Client Pidgin mit dem Befehl **sudo apt install pidgin** installiert. Es wurde danach über Prosody zwei XMPP-Benutzer mit dem Befehl **sudo prosodyctl adduser user1@192.168.1.18** und **sudo prosodyctl adduser user2@192.168.1.18** mit der Eingabe eines Passwortes erstellt. Mit dem Pidgin-Client wurden in beiden Lokationen die Nutzer eingeloggt, die sich zusätzlich gegenseitig zu den Kontakten hinzugefügt haben. Nun waren die Nutzer gegenseitig für einander sichtbar. Jetzt kann per Rechtsklick ein Sprachanruf gestartet und getätigt werden (siehe Abbildung 3.25). Während dem Anruf kann per **sudo ovs-ofctl dump-flows s1** Befehl erkannt werden, dass die Anzahl der Pakete für die vorher eingefügte UDP-Bedingung stetig steigen (siehe Abbildung 3.26). Per Wireshark können die zwischen den Standorten übermittelten UDP-Pakete betrachtet werden (siehe Abbildung 3.27). Damit wurde gezeigt, dass die UDP-Pakete des Sprachanrufes über die gesetzte Bedingung auf die Queue 1 weitergeleitet werden. Somit erhalten alle Pakete eine minimale Geschwindigkeit von sieben Megabit.

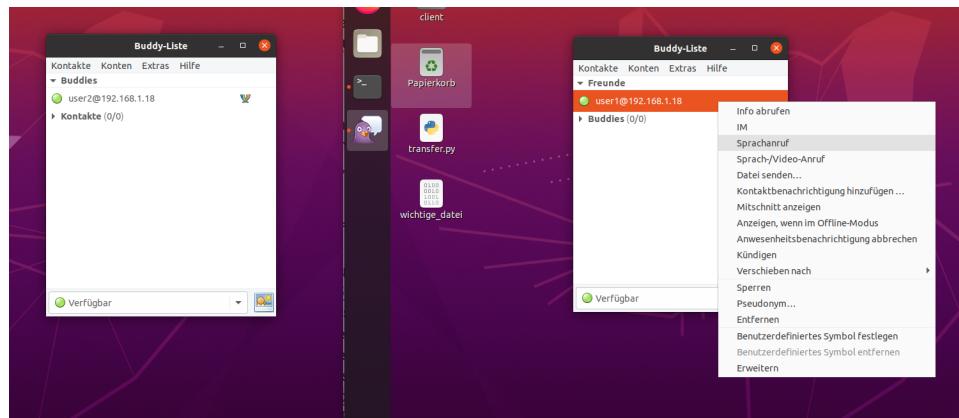


Abbildung 3.25.: Sprachanruf zwischen Berlin und Frankfurt

A screenshot of a terminal window titled 'k42@k42-VirtualBox: ~/mininet/custom'. The window displays the command 'sudo ovs-ofctl dump-flows s1' followed by its output. The output shows two flow entries: one with a duration of 278.397s and another with a duration of 278.408s. Both flows have priority 65535, are using UDP, and are directed from source IP 192.168.0.0/16 to destination IP 192.168.0.0/16. The actions for both flows are 'set_queue:1,NORMAL'. The terminal prompt 'k42@k42-VirtualBox: ~/mininet/custom\$' is visible at the bottom.

Abbildung 3.26.: Ausgabe der Flows von s1

3. Durchführung des Projektes

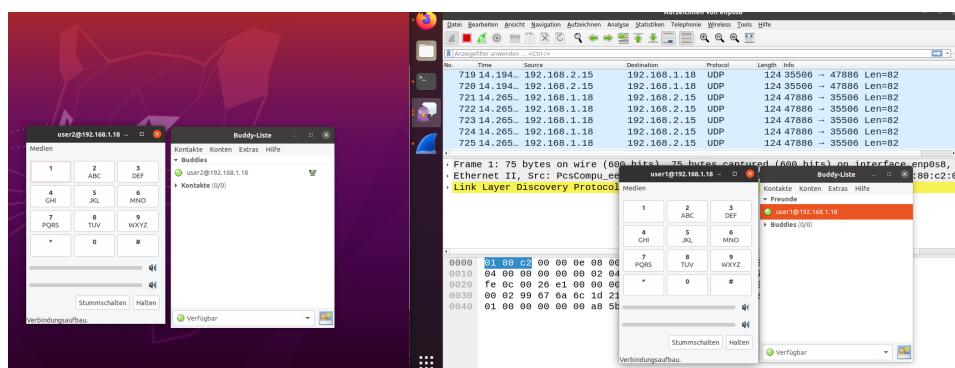


Abbildung 3.27.: UDP-Pakete während dem Sprachanruf

3.9. Priorisierung der Datenübertragung über API

3.9.1. Vorüberlegung

Verfasst von: Mücahit

Anhand des Schlüsselwortes **priority** soll der Flow einer Datenübertragung zwischen der Lokation Berlin und Frankfurt priorisiert werden. Allen anderen Flows werden auf der Strecke eine geringere Priorität zugewiesen, sodass die Datenübertragung bevorzugt wird. Falls die gleiche Priorität bei zwei Flows existiert, wird der Flow mit der genaueren Bedingung verwendet [76]. Die Datenübertragung soll über einem in der Zentrale eingerichteten **Secure-Shell** (SSH) Server laufen. Dazu wird auf dem Host in Berlin ein **SSH-Client** benötigt. Bei der Übertragung nutzt SSH üblicherweise den **Port 22** über dem **Transport Control Protocol** (TCP). Mit dieser Information wird die Bedingung für die Priorisierung des Flows festgelegt. Die Übertragung und die Priorisierung werden versucht, in einem ausführbaren Python-Skript zu realisieren, bei der die Angabe der IPv4-Adresse des Hosts in Berlin und des Hosts in der Zentrale als Parameter nötig werden. Es könnte die IPv4-Adresse der Quelle und des Ziels auch automatisch vom Skript durch das System ermittelt werden. Das Skript sollte folgende Schritte beinhalten:

1. IP-Quelle und Ziel eingeben und einlesen (später -> automatisieren)
2. Voraussichtlichen Flow über API priorisieren. Restlichen Datenverkehr drosseln
3. Übertragung per SSH starten
4. Bei Erfolg Priorisierung und Drosslung wieder aufheben
5. Bei Fehler Fehlermeldung ausgeben

Der Controller, genauer der OpenFlow-Server und der Restserver laufen unter der IP-Adresse **192.168.1.20** und kann von jedem Host erreicht werden. Dies ist wichtig, da die Priorisierung von außen durchgeführt wird. Ansonsten kann der Controller, wenn dieser auf **localhost** läuft, nicht erreicht werden.

3. Durchführung des Projektes

3.9.2. Durchführung

Verfasst von: Mücahit

Die Durchführung erfolgt mit den im vorherigen Kapitel aufgestellten VirtualBox Maschinen. Auf dem Server in Frankfurt wurde per ***sudo apt install openssh-server*** Befehl der SSH-Server installiert. Dieser wurde eingesetzt, auf der IP des Servers zu laufen. Dafür wurde per ***sudo nano /etc/ssh/sshd_config*** Befehl in der Konfigurationsdatei des SSH-Servers die IP-Adresse geändert und die Publickeyauthentication ausgeschaltet. Anschließend wurde der SSH-Server-Dienst mit dem Befehl ***sudo systemctl restart ssh*** neu gestartet, um die Einstellungen zu übernehmen. Auf dem Berliner Host wurde per ***dd if=/dev/zero of=wichtige_datei bs=50MB count=1*** Befehl eine Dummy-Datei für die Übertragung auf dem Schreibtisch erstellt.

Der Server betreibt einen SSH-Server und der Host einen SSH-Client, womit wichtige Dateien übertragen werden. Dafür wurde auf dem Host ein Python-Skript erstellt, welcher näher erläutert wird. Vorher muss per ***sudo pip install paramiko scp*** Befehl die benötigten Python-Module für die SSH-Verbindung installiert werden. Die Installation geschieht mit pip dem Paketverwaltungsprogramm von Python. Das Skript holt sich automatisch die IP-Adresse des Senders anhand der ***get_IP-Methode*** und speichert diese in eine Variable. Anschließend wird die Angabe der Informationen zur Übermittlung verlangt. Dazu gehört der Dateipfad, die IP-Adresse des Empfängers, den Servernamen, das Serverpasswort und den Pfad, wohin die Datei im Ziel gespeichert werden soll (siehe Abbildung 3.29). Danach wird ein Objekt als Rest-Client zur Übermittlung der Prioritätensetzung erstellt. Dieser bekommt die ***192.168.1.20*** als IP-Adresse des Controllers gesetzt. Jetzt werden die Flows zur Priorisierung erstellt. Dabei werden jeweils drei gleiche Flows auf den Switch in der Berliner Lokation mit der ID 2 und auf den Switch in der Frankfurter Lokation mit der ID 1 zugewiesen. Die zwei Flows priorisieren TCP-Pakete mit dem Port 22 und der angegebenen Quell- und Zieladresse. Beide Flows decken eingehende und ausgehende Pakete ab und bekommen ***32768*** als die maximale Priorität gesetzt. Der dritte Flow drosselt den restlichen Verkehr. Hierbei wird nur der Ethernettyp auf IPv4, die Priorität auf ***100*** und die Queue auf 2 gesetzt (siehe Abbildung 3.28). Die Queue

```
# Priorisierung und Drosselung
prio1_dst={
    "switch": "00:00:00:00:00:00:00:01",
    "name": "prio1_dst",
    "priority": "32768",
    "eth_type": "0x0800",
    "ip_proto": "6",
    "tcp_dst": "22",
    "ipv4_dst": destination_ip,
    "ipv4_src": source_ip,
    "active": "true",
    "actions": "output=normal"
}

prio1_src={
    "switch": "00:00:00:00:00:00:00:01",
    "name": "prio1_src",
    "priority": "32768",
    "eth_type": "0x0800",
    "ip_proto": "6",
    "tcp_src": "22",
    "ipv4_dst": source_ip,
    "ipv4_src": destination_ip,
    "active": "true",
    "actions": "output=normal"
}

dros1={
    "switch": "00:00:00:00:00:00:00:01",
    "name": "dros1",
    "priority": "1050",
    "eth_type": "0x0800",
    "active": "true",
    "actions": "set_queue=2,output=normal"
}
```

Abbildung 3.28.: Flows für die Priorisierung und die Drosselung

welcher näher erläutert wird. Vorher muss per ***sudo pip install paramiko scp*** Befehl die benötigten Python-Module für die SSH-Verbindung installiert werden. Die Installation geschieht mit pip dem Paketverwaltungsprogramm von Python. Das Skript holt sich automatisch die IP-Adresse des Senders anhand der ***get_IP-Methode*** und speichert diese in eine Variable. Anschließend wird die Angabe der Informationen zur Übermittlung verlangt. Dazu gehört der Dateipfad, die IP-Adresse des Empfängers, den Servernamen, das Serverpasswort und den Pfad, wohin die Datei im Ziel gespeichert werden soll (siehe Abbildung 3.29). Danach wird ein Objekt als Rest-Client zur Übermittlung der Prioritätensetzung erstellt. Dieser bekommt die ***192.168.1.20*** als IP-Adresse des Controllers gesetzt. Jetzt werden die Flows zur Priorisierung erstellt. Dabei werden jeweils drei gleiche Flows auf den Switch in der Berliner Lokation mit der ID 2 und auf den Switch in der Frankfurter Lokation mit der ID 1 zugewiesen. Die zwei Flows priorisieren TCP-Pakete mit dem Port 22 und der angegebenen Quell- und Zieladresse. Beide Flows decken eingehende und ausgehende Pakete ab und bekommen ***32768*** als die maximale Priorität gesetzt. Der dritte Flow drosselt den restlichen Verkehr. Hierbei wird nur der Ethernettyp auf IPv4, die Priorität auf ***100*** und die Queue auf 2 gesetzt (siehe Abbildung 3.28). Die Queue

3. Durchführung des Projektes

2 wurde vorher mit Maximal 2 Megabit eingestellt. Auch ist die Priorität im Vergleich zu der Datenübertragung deutlich gering und wird an nächster Stelle bearbeitet. Die Flows werden nun mit der **Set-Methode** dem Controller über die REST-API übertragen, der diese dann an die Switches zuweist. Nachdem die Priorisierung abgeschlossen ist, wird im nächsten Schritt die Datei per SSH übertragen. Dazu wird im Skript die vom Benutzer vorher gefragten Informationen zur Datenübertragung benutzt, um eine SSH-Verbindung aufzubauen, um die Datei zu senden (siehe Abbildung 3.30). Nachdem die Übertragung beendet wurde, wird mit der **Remove-Methode** alle Priorisierungen von den Switches über die REST-API entfernt.

```
# Abfrage welche Datei übermittel werden soll
valid = False
while not valid:
    file_path = str(input(
        "Pfad der Datei zum Transfer eingeben (Beispiel:/home/username/Schreibtisch/file)\n"))
    valid = check_file(file_path)

# IP des Empfängers ermitteln
valid = False
while not valid:
    destination_ip = str(
        input("IPv4-Adresse des Ziels eingeben(Beispiel:192.168.1.1)\n"))
    valid = check_ip(destination_ip)

# Name des Empfängers ermitteln
destination_host_name = str(input('Hostname für die IP %s eingeben\n' % destination_ip))

# Password des Empfängers ermitteln
destination_pass = str(input('Passwort für Host %s eingeben\n' % destination_host_name))

# Wohin soll gesendet werden
file_path_remote = str(input(
    "Pfad, wohin Datei bei Remote gespeichert (Beispiel:/home/username/Schreibtisch/file)\n"))
```

Abbildung 3.29.: Abfrage der Daten für den Dateitransfer

```
# SSHClient zur Übermittlung
def createSSHClient(server, port, user, password):
    client=paramiko.SSHClient()
    client.load_system_host_keys()
    client.set_missing_host_key_policy(paramiko.AutoAddPolicy())
    client.connect(server, port, user, password)
    return client

ssh=createSSHClient(server=destination_ip, port=22,
                    user=destination_host_name, password=destination_pass)
scp=SCPClient(ssh.get_transport())

scp.put(file_path, remote_path=file_path_remote,
        recursive=False, preserve_times=False)
```

Abbildung 3.30.: Übermittlung der Datei über SSH

3.9.3. Ergebnis

Verfasst von: Mücahit

Über das Python-Skript ist es nun möglich eine Datei priorisiert auf einen Server an der Zentrale zu senden. Das Skript enthält einige Überprüfungen, um beispielsweise zu schauen, ob die eingegebene IP-Adresse und der Dateipfad gültig sind.

3. Durchführung des Projektes

3.10. Analyse weiterer Netzwerkfunktionen

3.10.1. Hub

Verfasst von: Naghmeh

Repeater arbeiten auf der Ebene 1 des OSI-Modells. Seine Aufgabe ist es, das Signal über dasselbe Netz zu regenerieren, bevor es zu schwach oder beschädigt wird, um die Länge von Signalübertragung im selben Netzwerk zu verlängern. Ein Hub ist im Grunde ein Multiport-Repeater. Ein Hub verbindet mehrere Geräte in einem Netzwerk. Hubs können keine Daten filtern, daher werden Pakete an alle verbundenen Geräte gesendet. Darüber hinaus verfügen sie nicht über die Intelligenz, um den besten Pfad für Pakete zu finden, was zu Ineffizienz und Verschwendungen führt [17].

Beim Layer-1-Switching geht es im Wesentlichen um unintelligente Geräte wie Hubs und Repeater. SDN-Switches können so angepasst werden, dass sie sich wie Hubs oder Repeater verhalten. Da Hubs und Repeater keine Informationen speichern können, können Controller bei der Layer-1-Switching keine Datenflüsse weiterleiten. In diesem Fall, jedes Mal, wenn ein Paket ankommt, wird es an den Controller weitergeleitet, der dann entscheidet, alle mit ihm verbundenen Hosts zu überfluten. Dies braucht Zeit, um herauszufinden, wohin das Paket gehen soll, was die Gesamtleistung des Netzes beeinträchtigt [55]. Aus diesem Grund wurde keinen Hub oder Repeater in das untersuchende Netzwerk verwendet.

3.10.2. Bridge

Verfasst von: Naghmeh

Eine Bridge in einem Computernetzwerk ist eine Art von Netzwerkgerät, das dazu dient, ein Netzwerk in Abschnitte zu unterteilen. Die Bridges sind dann erforderlich, wenn jedoch Frames von einem physikalischen Netzwerk zu einem anderen weitergeleitet werden sollen. Eine Bridge hat nur zwei Anschlüsse und arbeitet auf Schicht 2 im OSI-Modell, der Datenverbindungsschicht [7].

Das Funktionsprinzip einer Bridge besteht darin, dass sie die Daten abhängig von der MAC-Zieladresse blockiert oder weiterleitet, und diese Adresse wird in jeden Datenrahmen. Eine Bridge verwendet eine Datenbank, um zu bestimmen, wohin der Datenrahmen übertragen werden sollen [17].

3. Durchführung des Projektes

3.10.3. Layer-2-Switch

Verfasst von: Naghmeh

Layer-2-Switch sind ähnlich wie Bridge. Sie verbinden Netze auf Schicht 2 und arbeiten als Brücken, indem sie Tabellen für die Übertragung von Rahmen zwischen Netzen erstellen. Der Zweck der Layer-2-Switch ist es, Daten auf der Grundlage von Flusstabellen einträgen weiterzuleiten [17].

Im Falle der Layer-2-Switching, Der Controller ist dafür verantwortlich, den physikalischen Elementen mitzuteilen, wie sie eingehende Datenpakete behandeln sollen. Er ist auch dafür verantwortlich, Datenströme in die Datenstromtabelle des Switches zu schieben. Der Switch ist in der Lage zu lernen, wie Pakete zu behandeln sind, die am Eingangsanschluss ankommen und den Ausgangsanschluss verlassen. Immer wenn ein Paket zum ersten Mal am Eingangsport des Switches ankommt, wird es an den Controller weitergeleitet. Nach dem Empfang eines Pakets, bestimmt der Controller, was damit zu tun ist und ob es weitergeleitet werden soll [55].

In dieser Simulation wurden, wie bereits erwähnt, die Open vSwitches verwendet. Open vSwitch ist ein virtueller Mehrschicht-Switch. Er verwendet virtuelle Netzwerkbrücken und Flussregeln, um Pakete zwischen Hosts weiterzuleiten. Er verhält sich wie ein physischer Switch. Ähnlich wie ein herkömmlicher Switch verwaltet OVS Informationen über angeschlossene Geräte wie z. B. die MAC-Adresse [73]. Obwohl er nicht nur die Aufgaben von Layer-2-Switch, sondern auch die Aufgaben von Layer-3-Switch durchführen kann, waren für diese Simulation die Funktionalitäten des Layer-2 Switches ausreichend. Deswegen wurden die 4 Switches als Layer-2-Switch betrachtet.

3.10.4. Layer-3-Switch

Verfasst von: James

Da Switching schneller als Routing ist, werden in LANS fast nur mit Switches gearbeitet und an zentralen Stellen Router genutzt, um das Internet zu erreichen. Im Netzwerkplan wurde an jeder Lokation nur ein Switch benötigt, dieser musste nicht VLAN fähig sein. Ein Layer-3-Switch ist beispielsweise ein VLAN-fähiger Switch, der grundlegende Routingfunktionalität bietet und auf Ebene 3 des OSI-Modells arbeitet, die Vermittlungsschicht. Das heißt, ein Layer-3-Switch arbeitet mit IP-Adressen und hat mit der Vermittlung von Paketen zu tun. Innerhalb unseres Projekts entschied man sich keine Layer-3-Switches zu nutzen, da die Funktionalitäten des Layer-2-Switches ausgereicht haben [7].

3. Durchführung des Projektes

3.10.5. Dynamic Host Configuration Protocol

3.10.5.1. Vorüberlegung

Verfasst von: James

DHCP ist ein Dienst, der an das Netzwerk angeschlossene Geräte mit einer Netzwerkkonfiguration versorgt. Falls ein Gerät eine Konfiguration benötigt, wird dies mithilfe vom DHCP Server konfiguriert, dieser kann beispielsweise im Router des Netzwerks sein. Mithilfe von Mininet konnte eine DHCP Konfiguration realisiert werden. Bis zu diesem Punkt wurde die IP-Adressverwaltung ohne DHCP realisiert. Das heißt, jeder Host musste manuell eine IP-Adresse zugewiesen bekommen. Diese manuelle Konfiguration wurde durch eine for-Schleife im Skript (siehe Abbildung 3.31) durchgeführt [7].

```
67      # Erstellen der 40 Host's (10 pro Site) mit anschließender Verlinkung
68      for h in range(10):
69          name = ((r)*10)+(h+1)
70          host = self.addHost(name='h%s' % (name), ip='192.168.%s.%s/24' % (r+1, h+2),
71                               defaultRoute='via 192.168.%s.1' % (r+1), mac='00:00:00:00:00:s0' % (r+1,
72                               self.addLink(host, switch)
```

Abbildung 3.31.: Statische IP-Adressenverwaltung

Bei aktivierten DHCP in Mininet verwaltet der DHCP-Server IP-Adressen ohne manuellen Eingriff des Administrators und weist jedem Host eine IP-Adresse zu. Somit wurde die Funktion der for-Schleife umgeändert, sodass jeder Host von Beginn an die IP-Adresse **0.0.0.0** zugewiesen bekommt. Dadurch wird dem Host keine IP-Adresse manuell zugeordnet. Die IP-Adressverwaltung wird vom DHCP-Server übernommen (siehe Abbildung 3.32).

```
69      # Erstellen der 40 Host's (10 pro Site) mit anschließender Verlinkung
70      for h in range(10):
71          name = ((r)*10)+(h+1)
72          host = self.addHost(name='h%s' % (name), ip='0.0.0.0', #% (r+1, h+2),
73                               defaultRoute='via 192.168.%s.1' % (r+1), mac='00:00:00:00:00:s0' % (r+1,
74                               self.addLink(host, switch)
```

Abbildung 3.32.: Dynamische IP-Adressenverwaltung

3. Durchführung des Projektes

3.10.5.2. Durchführung

Verfasst von: James

Um ein DHCP Server im Netzwerk zu realisieren, muss als erstes der DHCP Server auf die VM installiert werden. Dies wird mit dem Befehl ***sudo apt-get install isc.dhcp-server*** durchgeführt. Als zweites muss im Mininet-Skript die Zeile ***os.system("service isc-dhcp-server restart")*** ergänzt werden, um den DHCP-Server neu zu starten. Anschließend wird der DHCP server konfiguriert. Dies erfolgt in der ***dhcpd.conf*** Datei, die sich im Pfad ***/etc/dhcp*** befindet (siehe Abbildung 3.33). In dieser Datei werden die von den DHCP-Clients benötigten Netzwerkkonfigurationsinformationen gespeichert. Da das Netzwerk aus vier Subnetzen besteht, die mit dem DHCP-Server verbunden sein sollen, müssen vier Subnetze in der ***dhcpd.conf*** Datei definiert werden. Diese Subnetze benötigen folgende Parameter: ***subnet***, ***netmask***, ***range***, ***option routers***, ***default-lease-time***, ***max-lease-time*** und ***INTERFACES***. Wie in der Tabelle des Netzwerkplans vorgezeigt (siehe Tabelle 3.1), hat jede Lokation eine festgelegte Subnetz IP (***subnet***), Netzwerkmaske (***netmask***) und Router IP (***option routers***) und wird hier definiert. Um allen Hosts in den jeweiligen Subnetzen dynamisch Adressen zuzuweisen, muss innerhalb der Subnetz-Deklaration ein Bereich definiert werden (***range***). Anschließend wird definiert, an welches Netzwerkgerät der DHCP-Server verbunden werden soll (***INTERFACES***). Es kann auch die Gültigkeitsdauer definiert werden, die angibt wie lange einem Host die IP-Adresse zu Verfügung steht. Normalerweise reichen die Voreinstellungen aus, können aber mit ***default-lease-time*** und ***max-lease-time*** erhöhen oder herabsetzen, je nach Notwendigkeit. Anhand dieser Informationen, kann für jeden Standort ein Subnetz definiert werden [38].

3.10.5.3. Ergebnis

Verfasst von: James

Nachdem das Mininet Skript ausgeführt wird, kann mit Wireshark geprüft werden, ob ein DHCP-Server richtig implementiert wurde. Aus der folgenden Abbildung 3.34 ist ersichtlich, dass die Pakete zwischen h1 (192.168.1.2) und h11 (192.168.2.2) übertragen werden.

```
subnet 192.168.1.0 netmask 255.255.255.0 {
    range 192.168.1.2 192.168.1.254;
    option routers 192.168.1.1;
    INTERFACES="r1-eth0";
}
subnet 192.168.2.0 netmask 255.255.255.0 {
    range 192.168.2.2 192.168.2.254;
    option routers 192.168.2.1;
    INTERFACES="r2-eth0";
}
subnet 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 {
    range 192.168.3.2 192.168.3.254;
    option routers 192.168.3.1;
    INTERFACES="r3-eth0";
}
subnet 192.168.4.0 netmask 255.255.255.0 {
    range 192.168.4.2 192.168.4.254;
    option routers 192.168.4.1;
    INTERFACES="r4-eth0";
}
```

Abbildung 3.33.: DHCP-Konfiguration für alle Standorte

3. Durchführung des Projektes

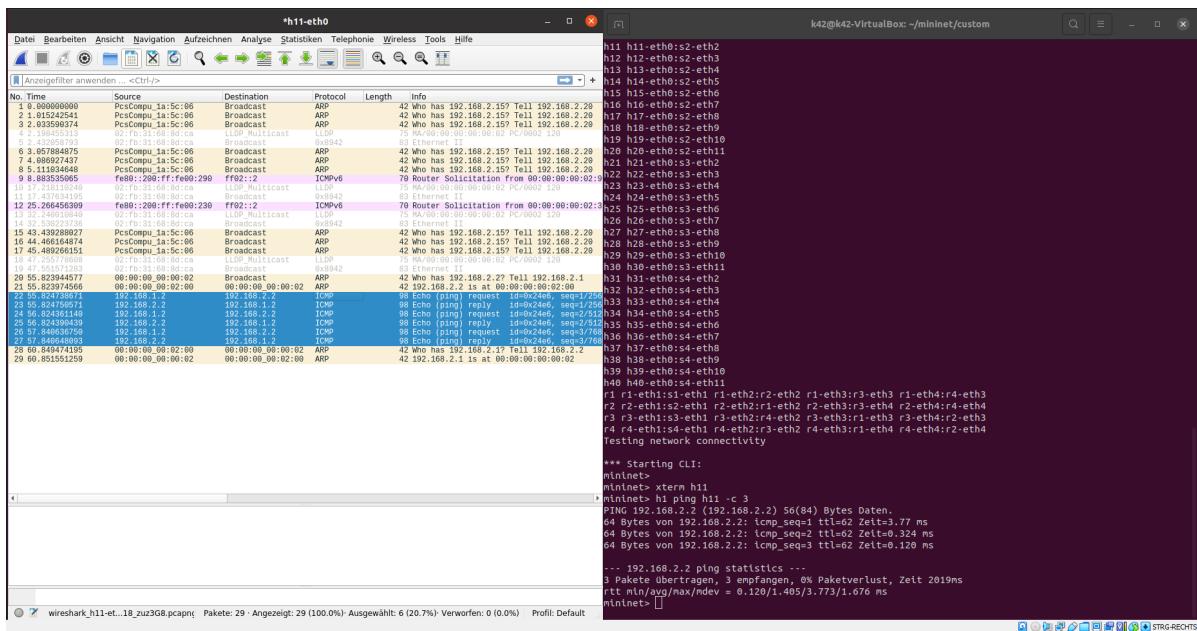


Abbildung 3.34.: Datenverkehr zwischen h1 und h11

Um die Netzwerkkonfiguration vom DHCP-Server zu betrachten, muss Wireshark vor Mininet gestartet und beim Ausführen des Mininet Skripts eine Switch betrachtet werden. In diesem Beispiel wird die Lokation Frankfurt betrachtet (siehe Abbildung 3.35).

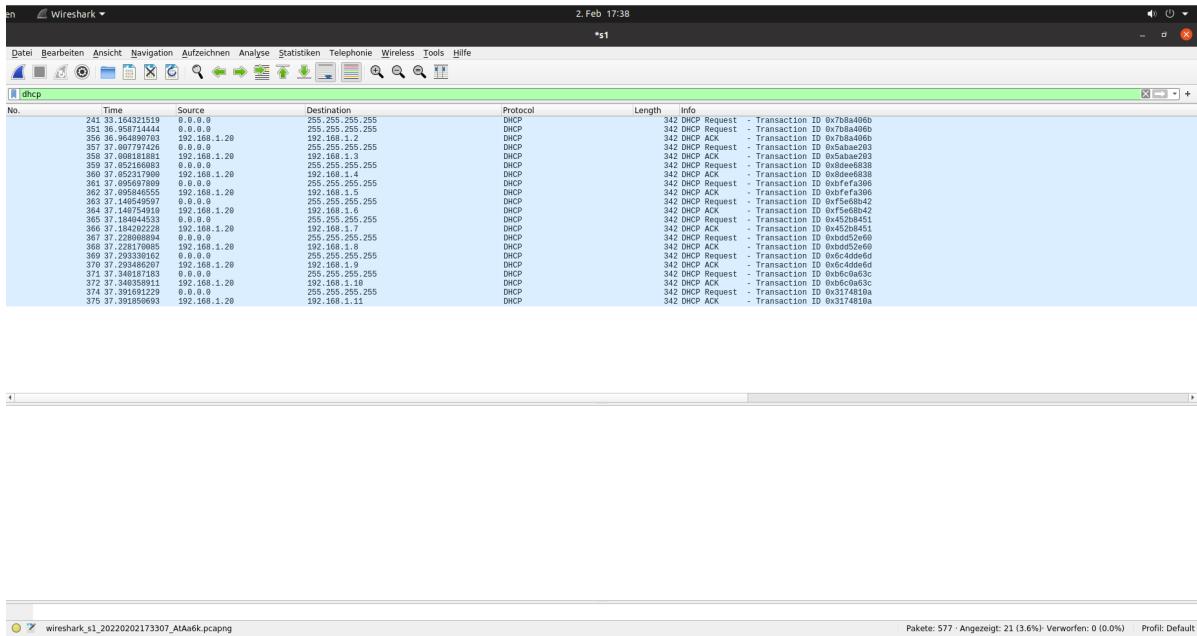


Abbildung 3.35.: Wireshark-Aufnahme von Switch s1

3. Durchführung des Projektes

Anhand von Abbildung 3.38 sind die gewöhnlichen Schritte vom DHCP Prozess zu erkennen. Als erstes schickt ein Client einen **Broadcast** an einem erreichbaren Server (**DHCP Discover**). Die Absender-IP-Adresse ist **0.0.0.0** und die Zieladresse ist **255.255.255.255**. Der voreingestellte DHCP-Server empfängt den **Broadcast** und antwortet (**DHCP Offer**). Diese Antwort wird an die angebotene IP-Adresse (**192.168.1.2**) gesendet (**Unicast**). Der Client nimmt per Broadcast (**255.255.255.255**) das Angebot an (**DHCP Request**). Der Server akzeptiert die Adressanfrage an (**ACK**) und speichert im Adresspool die IP als vergeben ab [7].

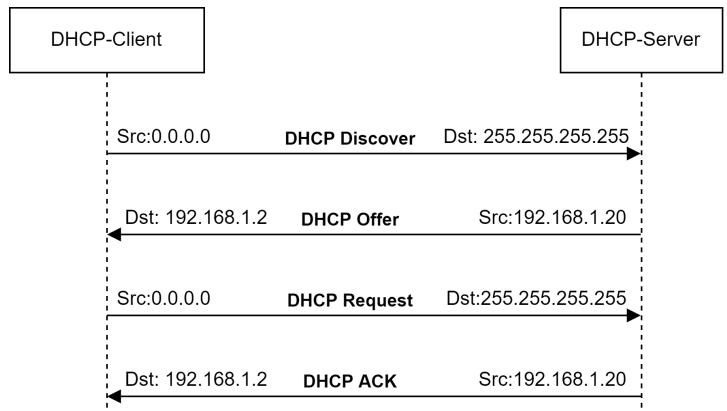


Abbildung 3.36.: Kommunikation zwischen DHCP-Client und DHCP-Server

3. Durchführung des Projektes

Die übermittelten Informationen vom DHCP Prozess werden im Pfad `/var/lib/dhcp/` gespeichert. Die Datei `dhcpd.leases` ist eine DHCP client Datenbank, die eine Reihe von lease Deklarationen enthält. Wenn ein lease erworben, erneuert oder freigegeben wird, kann man dies in der Datei einsehen [39]. In der Datei `dhclient.leases` werden alle gültigen leases gespeichert[34]. Somit kann der Schritt **DHCP Discover** bei einem wiederholten Durchlauf innerhalb der Lease-Time übersprungen werden, da der Client seine IP-Adresse schon erhalten hat [49] (siehe Abbildung 3.37).

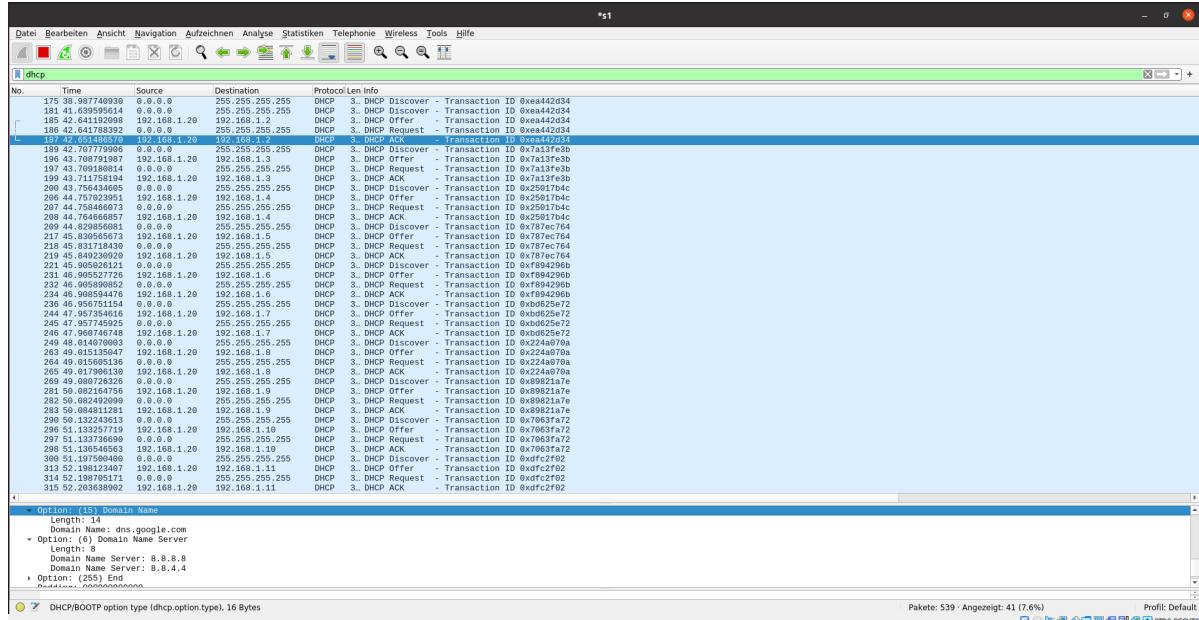


Abbildung 3.37.: Wireshark-Aufnahme vom gekürzten DHCP Prozess

Falls die Protokolle **DHCP Discover** und **DHCP Offer** nicht übersprungen werden sollen, können die zuständigen Dateien `dhcpd.leases` und `dhclient.leases` gelöscht werden. Diese werden beim nächsten Durchlauf neu erstellt.

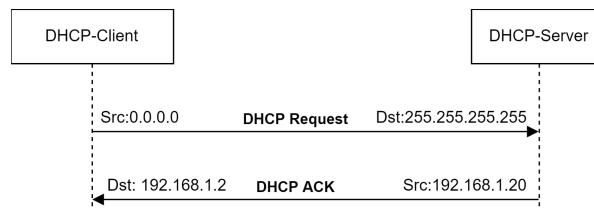


Abbildung 3.38.: Kommunikation zwischen DHCP-Client und DHCP-Server

3. Durchführung des Projektes

3.10.6. Domain Name System

3.10.6.1. Vorüberlegung

Verfasst von: James

Durch das DNS-Protokoll werden Domainnamen zu IP-Adressen umgewandelt [7]. Dies wurde bei der Einrichtung des NAT-Firewalls manuell implementiert, sodass Hosts die Möglichkeit haben, nicht nur per IPv4 auf das Internet zugreifen zu können. Es wurde die IP-Adresse des DNS-Servers in die Datei **/etc/resolvconf/resolv.conf/head** eingetragen und gespeichert. Zudem kann mithilfe des implementierten DHCP Servers und dem dhclient auch ein Ergebnis erzielt werden.

3.10.6.2. Durchführung

Verfasst von: James

Es werden innerhalb der **dhcpd.conf** Datei im Pfad **/etc/dhcp/** zwei Zeilen in jedem Subnetz hinzugefügt. Mit **option domain-name-servers 8.8.8.8, 8.8.4.4;** wird der verfügbare DNS Server für den Client definiert. Durch **option domain-name "dns.google.com";** wird der Domänenamen angegeben, der zur Auflösung von Hostnamen verwendet werden soll [38] (siehe 3.39). Es kann auch der dhclient genutzt werden, um einen DNS Server zu definieren [37]. Im Pfad **/etc/dhcp/** befindet sich die dhclient.conf Datei, die mit prepend domain-name-servers 8.8.8.8 ergänzt werden muss [35].

```
subnet 192.168.1.0 netmask 255.255.255.0 {
    range 192.168.1.2 192.168.1.254;
    option domain-name-servers 8.8.8.8, 8.8.4.4;
    | option domain-name "dns.google.com";
    option routers 192.168.1.1;
    | INTERFACES="r1-eth1";
}
subnet 192.168.2.0 netmask 255.255.255.0 {
    range 192.168.2.2 192.168.2.254;
    option domain-name-servers 8.8.8.8, 8.8.4.4;
    option domain-name "dns.google.com";
    option routers 192.168.2.1;
    | INTERFACES="r2-eth1";
}
subnet 192.168.3.0 netmask 255.255.255.0 {
    range 192.168.3.2 192.168.3.254;
    option domain-name-servers 8.8.8.8, 8.8.4.4;
    option domain-name "dns.google.com";
    option routers 192.168.3.1;
    | INTERFACES="r3-eth1";
}
subnet 192.168.4.0 netmask 255.255.255.0 {
    range 192.168.4.2 192.168.4.254;
    option domain-name-servers 8.8.8.8, 8.8.4.4;
    option domain-name "dns.google.com";
    option routers 192.168.4.1;
    | INTERFACES="r4-eth1";
}
```

Abbildung 3.39.: DHCP-Konfiguration für alle Standorte

3. Durchführung des Projektes

3.10.6.3. Ergebnis

Verfasst von: James

Die Übermittlung des Domain Namens und des Servers kann beobachtet werden, indem die DHCP Protokolle in Wireshark betrachtet werden [47](siehe Abbildung 3.40).

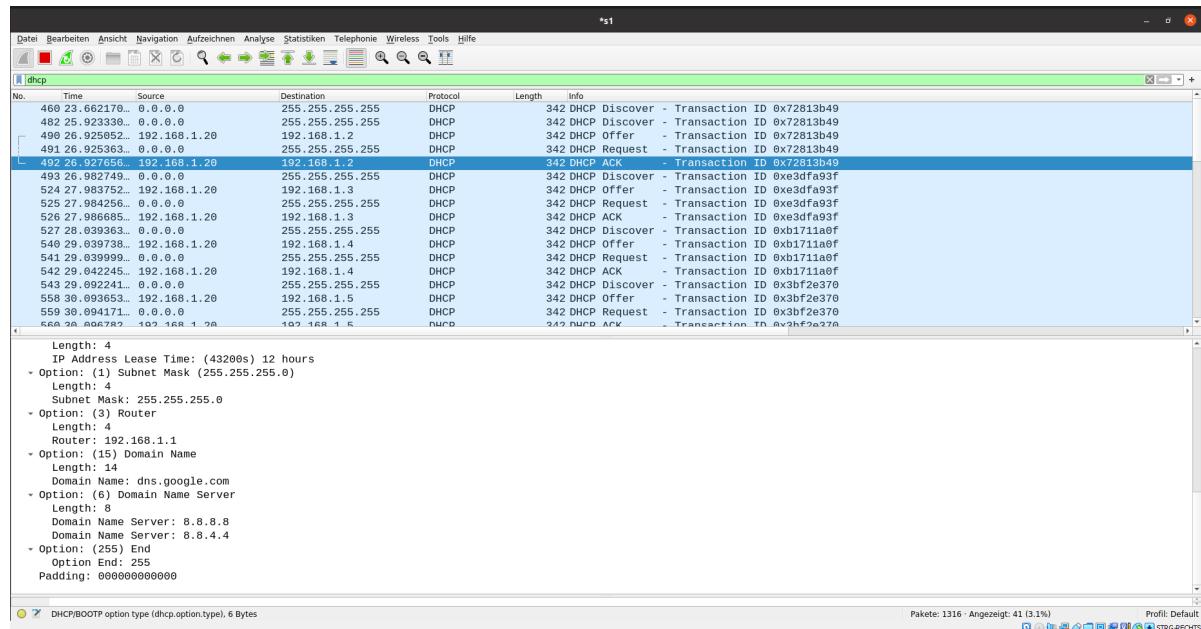


Abbildung 3.40.: Im DHCP ACK Protokoll werden die DNS Informationen vermittelt

Nachdem Mininet gestartet wurde, kann mithilfe von `systemd-resolve --status` der genutzte DNS Server betrachtet werden [36](Siehe Abb. 3.41).

```
root@k42-VirtualBox:/home/k42/mininet/custom# systemd-resolve --status
Global
  LLMNR setting: no
  MulticastDNS setting: no
  DNSOverTLS setting: no
    DNSSEC setting: no
    DNSSEC supported: no
  Current DNS Server: 8.8.8.8
    DNS Servers: 8.8.8.8
      192.168.0.1
      8.8.4.4
  DNS Domain: dns.google.com
  DNSSEC NTA: 10.in-addr.arpa
    16.172.in-addr.arpa
    168.192.in-addr.arpa
    17.172.in-addr.arpa
    18.172.in-addr.arpa
    19.172.in-addr.arpa
    20.172.in-addr.arpa
    21.172.in-addr.arpa
    22.172.in-addr.arpa
    23.172.in-addr.arpa
    24.172.in-addr.arpa
    25.172.in-addr.arpa
```

Abbildung 3.41.: Terminalausgabe von h1

4. Diskussion der Ergebnisse

Verfasst von: James

Am Anfang des Projektberichtes wurde von einer “dramatischen Zunahme der Netzwerkkomplexität” gesprochen, wobei eine traditionelle Vorgehensweise der Netzwerkadministration ineffizient sei. Mithilfe des Konzepts SDN, sollte eine effizientere Methode der Netzwerkadministration realisiert werden. Durch die Lösung der Problemstellungen konnten diese zugrunde gelegte Behauptung bestätigt werden. Beispielsweise mussten vier Lokationen realisiert werden, also wurde zu Beginn eine Lokation mit den gewünschten Funktionen erstellt. Anschließend wurden Kopien dieser Lokation für alle weiteren Lokationen genutzt. Durch die Strategie eine kleinstmögliche Umgebung mit den gewünschten Kriterien zu konstruieren, erleichterte es die Vorgehensweise auf Ergebnisse zu kommen. Mininet und der Floodlight Controller ermutigten diese Vorgehensweise, da die Anpassungen leicht umsetzbar waren. Während der Durchführung der Problemstellungen wurde auch festgestellt, dass viele manuelle Einrichtungen mithilfe von SDN automatisiert werden konnten. Die erforschten Ergebnisse werden hier nochmals zusammengefasst und die automatisierten Netzwerkfunktionen durch SDN mit den manuellen Vorgehensweisen verglichen. Anschließend wird kritisch reflektiert, was in der Durchführung mithilfe von SDN nicht reibungslos funktioniert hat.

4.1. Analyse der Ergebnisse

Verfasst von: James

Bei der Verschlüsselung der Netzwerkverbindung zwischen den einzelnen Lokationen konnte über Mininet zwischen den Routern von jedem Standort die VPN Verbindung hergestellt werden. Anstatt eine manuelle Verschlüsselung an jedem Router einzurichten, konnte zentralisiert über Mininet ein Ergebnis erzielt werden. Um private IP-Adressen auf öffentliche IP-Adressen abilden zu lassen, musste ein NAT eingerichtet werden. Normalerweise wird dies mit der firewalling software *iptables* umgesetzt. Mit *iptables* werden Regeln definiert die für das Filtern und Modifizieren von Paketen zuständig sind. Diese manuelle Einrichtung des NAT-Firewalls an einem Router konnte mithilfe von Mininet übersprungen werden und automatisiert im Skript ergänzt werden. Somit regelt Mininet die Anbindung von einem privaten Netz über **NAT** an das Internet bei jedem Standort. Der Aufbau eines zentralen Topologie-Viewers des Netzwerkes konnte mit dem standardinstallierten Floodlight-Modul dargestellt werden. Indem die Benutzeroberfläche des Controllers in einem Webbrower aufgerufen wird und auf den Reiter **Topology**

4. Diskussion der Ergebnisse

klickt, wird eine Topologie dargestellt. Die Erstellung der Topologie vom Controller ist nur möglich, da der Controller die verbundenen Links von den Hosts und den Switches erkennt. Die Realisierung einer zentralen Monitoring Lösung konnte durch eine Konfigurationsänderung in Mininet erstellt werden. Dadurch hatte jeder Netzwerkteilnehmer auf Nagios Core und dem Floodlight Controller Zugriff bekommen. Anstatt manuell bei jedem Netzwerkteilnehmer dies einzustellen zu müssen, konnte durch eine Ergänzung des Mininet Skripts die Konfiguration automatisch für alle Hosts eingestellt werden. Eine QoS Funktion innerhalb eines Netzwerkes ohne SDN zu realisieren, ist sehr aufwendig und enthält viele Beschränkungen. Mit SDN kann wegen der zentralisierten Struktur eine Queueliste erstellt werden, die bestimmten Datenverkehr selbst bei begrenzter Netzwerkkapazität priorisiert. Diese Idee wurde mit zwei verschiedenen **Queues** nachgeahmt. Audio- und Videokonferenzen wurden in einer **Queue** definiert und der restliche Datenverkehr in einer anderen. Umgesetzt wurde es im Mininet Skript. Zudem konnte durch eine weitere Ergänzung des Skripts eine Priorisierung der Datenübertragung hergestellt werden. Bei einer Datenübertragung zwischen Berlin und Frankfurt sollte der Datenaustausch priorisiert und alle parallel dazu laufenden Datenübertragungen gedrosselt werden. Indem ein SSH Client in Berlin und ein SSH Server in Frankfurt eingerichtet wird, konnte mithilfe eines Python Skripts auf dem Host die gewünschte Prioritätensetzung ins Netzwerk implementiert werden. Die Realisierung eines DHCP-Servers sowohl eines DNS-Dienstes konnte für jede Lokation durch SDN einfach konfiguriert werden. Somit kann durch Änderung des Mininet Skripts und der **dhcpd.conf** sowie **dhcclient.conf** Datei ein DHCP Server und DNS-Dienst realisiert werden. Dies erspart die Zeit an jeder Lokation eine manuelle Konfiguration durchzuführen und kann in einer Weise implementiert werden, dass beim Ausführen des Mininet Skripts die Dienste für alle Hosts konfiguriert werden.

Bei einer Änderung der vorgelegten Anforderungen, wie beispielsweise eine **Quality of Service Funktion** von einer anderen Datenübertragung, kann dies durch SDN und mithilfe des Mininet Skript leicht verändert werden. Somit müsste ein Administrator nicht alle Schnittstellen umprogrammieren, sondern kann effizienter in einem automatisierten Schritt das Netzwerk ändern.

4.2. Kritische Betrachtung

Verfasst von: James

Obwohl SDN viele Vorteile hat, war der Einstieg in das Thema sehr zeitaufwendig. Viele Installationsanleitungen haben auf Anhieb nicht funktioniert und mussten individuell mit Alternativen Möglichkeiten angepasst werden. Vorkonfigurierte VMs mit Mininet und einem Floodlight Controller haben nicht funktioniert, somit musste selbstständig eine VM konstruiert werden. Zudem war die Vorstellung des Netzwerkes zu Beginn anders als das am Ende erstellte Ergebnis, da SDN viele Funktionalitäten und Alternativmöglichkeiten besitzt. Dadurch kann eine Art der Entscheidungslähmung entstehen,

4. Diskussion der Ergebnisse

da die Optionen und Einstellungen sehr vielfältig sind. Da der Floodlight Controller in SDN an zentraler Stelle steht, müssen alle Konfigurationen korrekt eingestellt werden. Es muss logischerweise der Controller konstant im Hintergrund laufen und wenn der Controller ausfällt, fällt das gesamte System aus. Das heißt, der Controller muss fehlersicher und mit allen Lokationen verbunden sein. Der Floodlight Controller befindet sich im Netzwerkplan am Standort Frankfurt, jedoch sollte in der Theorie ein zweiter Controller an einer anderen Lokation existieren, der beim Ausfall des Frankfurter Controllers einspringt.

5. Fazit

Verfasst von: James, Naghmeh

Auf Grundlage einer umfassenden Recherche, die Durchführung von neun definierten Aufgabenstellungen sowie ein daraus resultierendes Ergebnis sind neue Erkenntnisse über das Konzept SDN für die Gruppenmitglieder gewonnen worden. Ziel dieses Projektes war es nicht nur die Aufgaben zu lösen, sondern verstehen zu können, warum das Konzept SDN die Zukunft von Netzwerkadministration sein könnte.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass durch SDN eine dynamischere Administration möglich ist. Beispielsweise zeigt die Realisierung einer *QoS* Funktion, dass Benutzern bei bestimmten Anwendungen mehr Bandbreite zur Verfügung steht, da eine agile Verwaltung des Datenverkehrs durch SDN ermöglicht wird. Zudem verändert sich durch SDN die Art der Netzwerkkonfiguration. Normalerweise müsste ein Netzwerkadministrator für das Hinzufügen eines Gerätes in einem Netzwerk mehrere Schritte absolvieren, wie die manuelle Konfiguration von Switches und Routern etc.. Mit SDN ist diese Konfiguration programmierbar, sodass viele Konfigurationsschritte automatisiert oder übersprungen werden können. Ebenfalls wichtig ist, dass durch die zentrale Verwaltung des Netzes über den Floodlight Controller eine einfache Einstellung eines Topologie-Viewers ermöglicht wird und dadurch keine weiteren Tools benötigt werden. Aus dem Ergebnis der Priorisierung der Datenübertragung von Berlin nach Frankfurt geht hervor, dass eine Priorisierung der Datenübertragung von einer anderen Lokation nach Frankfurt durch einfache Änderungen auch realisierbar sei. Kleinere Änderungen an der programmierten Konfiguration könnten ausreichen, um ein gleiches Ergebnis zu erzielen. Des Weiteren konnte bei der Einrichtung des NAT-Firewalls sowie bei der *VPN* Einrichtung die verringerte Komplexität der Implementierung nachvollziehbar werden. Aus Wissen von vorherigen Modulen war die Einstellung des NAT-Firewalls auf zwei Host-Maschinen zeitaufwendiger und komplexer als die Realisierung im Projekt. Insbesondere ist die Skalierbarkeit des Netzwerkes effizienter umsetzbar, da automatisierte Voreinstellungen angepasst werden können, um die gewünschte Infrastruktur aufzubauen. Zudem verdeutlichen die Ergebnisse bei der Einstellung vom DHCP Prozess sowie des DNS-Dienstes die vereinfachte Erweiterung von Netzwerkfunktionen. Nach Recherche zeigte sich, dass der Floodlight Controller DHCP unterstützt und umsetzbar ist. Damit konnte ein DHCP Server bei allen Lokationen implementiert werden und die individuelle Konfiguration an jedem Standort musste nicht durchgeführt werden. Innerhalb der Konfiguration des DHCP Servers konnte eine Alternativmöglichkeit für einen DNS-Dienst gefunden werden, der mithilfe von DHCP alle Clients mit einem DNS-Dienst ausstattet. Durch zusätzliche Einstellungen konnte dies realisiert werden.

5.1. Zukunftsaussichten

Verfasst von: James

Ein wesentlicher Vorteil von SDN ist die vereinfachte Skalierbarkeit des Netzwerkes. Das Netzwerkergebnis vom Projekt beinhaltet mehrere verschiedene Netzwerkfunktionalitäten und wenn beispielsweise neue Anforderungen verlangt werden, wie an einem Standort weitere Hosts zu konfigurieren, könnte durch SDN dieses Problem einfach gelöst werden. Folgendes Szenario wird angenommen: Das Unternehmen hat einen neuen Mitarbeiter in Frankfurt eingestellt. Der Netzwerkadministrator muss das Netzwerk neu konfigurieren, um einen weiteren Mitarbeiter an das Netz zu bringen.

Mithilfe von Mininet ist dies leicht umsetzbar. Während Mininet läuft müssen folgende Konfigurationen eingestellt werden: Mit `py net.addHost(name='h0', ip='0.0.0.0', defaultRouter='via 192.168.1.1')` wird ein neuer Host erstellt. Nun benötigt der neue Host **h0** eine Verbindung zur Switch s1, eine IP-Adresse, einen Broadcast, einen Default Route, einen neuen Port an der Switch s1 und eine loopback Adresse. In Mininet wird der Befehl `py net.addLink(h0, s1)` zur Verbindung von s1 und h0 ausgeführt. Als nächstes bekommt **h0** die IP-Adresse **192.168.1.35/24** mit dem Befehl `h0 ip addr add 192.168.1.35/24 dev h0-eth0`. Der Broadcast wird mit `h0 ifconfig h0-eth0 broadcast 192.168.1.255` gesetzt und die Default Route auf **192.168.1.1** eingerichtet mit `h0 ip route add default via 192.168.1.1`. Anschließend wird mit `h0 ifconfig lo 127.0.0.1` eine loopback Adresse eingestellt. In einem neuen Terminal kann mit `sudo ovs-ofctl dump-ports s1` alle angeschlossenen Ports an der Switch betrachtet werden. Dadurch ist zu erkennen, dass noch kein Port für h0 existiert. Mit `sudo ovs-vsctl add-port s1 s1-eth13` wird ein neuer Port hergestellt und somit entsteht eine Verbindung vom Netz zur neu erstellten Host h0. Jetzt besitzt die Host h0 die gleiche Funktionalitäten wie alle anderen Hosts im Netzwerk. Abbildung 5.1 zeigt, dass die Topologie von Frankfurt den Host h0 berücksichtigt.

Das Potenzial welches SDN bietet, ist durch den Umfang dieses Projektes noch nicht komplett ausgeschöpft. Dies zeigt insbesondere das letzte gegebene Beispiel, welches die in Software Defined Networking liegenden Stärken verdeutlicht.

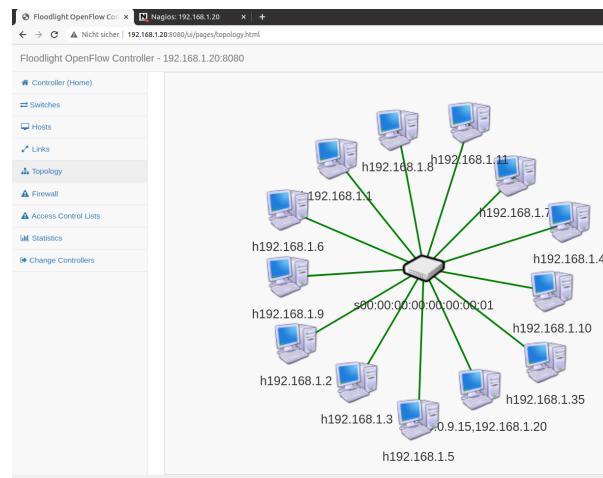


Abbildung 5.1.: Die Topologie zeigt, dass h0 in Frankfurt existiert

Literaturverzeichnis

- [1] 1und1. *Internet- und DSL-Tarife*. URL: <https://dsl.1und1.de/business> (besucht am 15.01.2022).
- [2] Konstantin Agouros. *Software Defined Networking*. Walter de Gruyter, 2017. ISBN: 978-3-11-044984-6.
- [3] Dalia A.Hamid Ammar D.Jasim. „Enhancing the Performance of OpenFlow Network by Using QoS“. In: *International Journal of Scientific and Engineering Research* (Mai 2016). DOI: ISSN2229-5518.
- [4] AVI. *Software Defined Networking*. URL: <https://avinetworks.com/glossary/software-defined-networking/> (besucht am 16.12.2021).
- [5] Siamak Azodolmolky. *Software Defined Networking with OpenFlow*. Packt Publishing, 2013. ISBN: 978-1-84969-872-6.
- [6] Sumit Badotra. „A Review Paper on Software Defined Networking“. In: *International Journal of Advanced Computer Research* 8 (März 2017).
- [7] Christian Baun. „Grundlagen der Computervernetzung“. In: *Computer Networks/-Computernetze*. Springer, 2019, S. 15–33.
- [8] Ismail Baydan. *Add Route In Linux*. 2021. URL: <https://linuxtect.com/ip-route-add-add-route-in-linux/> (besucht am 04.01.2022).
- [9] Michael Bredel. *OpenFlow Controller*. URL: <https://www.admin-magazine.com/Articles/Floodlight-Welcome-to-the-World-of-Software-Defined-Networking> (besucht am 24.12.2021).
- [10] Dor Cohen. *MTU and MSS: What you need to know*. 2017. URL: <https://www.imperva.com/blog/mtu-mss-explained/> (besucht am 07.12.2021).
- [11] Nagios Core. *Monitoring Routers and Switches*. URL: <https://assets.nagios.com/downloads/nagioscore/docs/nagioscore/4/en/monitoring-routers.html> (besucht am 27.01.2022).
- [12] Sudi David. *Importance of QoS*. 2021. URL: <https://www.section.io/engineering-education/understanding-quality-of-service/> (besucht am 23.01.2021).
- [13] Andreas Donner. *Was ist Software-Defined Networking*. 2018. URL: <https://www.ip-insider.de/was-ist-software-defined-networking-sdn-a-657442/> (besucht am 16.12.2021).

- [14] Bob Emmerson. *The Case for SDN*. 2012. URL: <https://www.nojitter.com/case-sdn> (besucht am 16.12.2021).
- [15] firewall.cx. *UNDERSTANDING VPN IPSEC TUNNEL MODE AND IPSEC TRANSPORT MODE – WHAT'S THE DIFFERENCE?* URL: <https://www.firewall.cx/networking-topics/protocols/870-ipsec-modes.html> (besucht am 05.12.2021).
- [16] Firewall.cx. *Configuring site to site ipsec vpn tunnel between cisco routers*. URL: <https://www.firewall.cx/cisco-technical-knowledgebase/cisco-routers/867-cisco-router-site-to-site-ipsec-vpn.html> (besucht am 05.12.2021).
- [17] GeeksforGeeks. *Network Devices (Hub, Repeater, Bridge, Switch, Router, Gateways and Router)*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/network-devices-hub-repeater-bridge-switch-router-gateways/> (besucht am 24.12.2021).
- [18] Alexander Gelberger, Niv Yemini und Ran Giladi. „Performance analysis of software-defined networking (SDN)“. In: *2013 IEEE 21st International Symposium on Modelling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. IEEE. 2013, S. 389–393.
- [19] Grotto. *Working with the Mininet VM*. URL: <https://www.grotto-networking.com/SDNfun.html> (besucht am 11.12.2022).
- [20] John Hales. *SDN and Cloud Computing*. URL: <http://novacontext.com/sdn-and-cloud-computing/> (besucht am 16.12.2021).
- [21] Muhamad Hasan u.a. „SDN Mininet Emulator Benchmarking and Result Analysis“. In: *2020 2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES)*. IEEE. 2020, S. 355–360.
- [22] Nick Feamster Hyojoon Kim. „Improving Network Management with Software Defined Networking“. In: *IEEE Communications Magazine* (2013).
- [23] ingrammicro. *7 Advantages of Software Defined Networking*. 2021. URL: <https://imaginext.grammicro.com/data-center/7-advantages-of-software-defined-networking> (besucht am 16.12.2021).
- [24] Ryan Izard. *Floodlight Controller Load Balancer*. URL: <https://floodlight.atlassian.net/wiki/spaces/floodlightcontroller/pages/1343617/Load%5C+Balancer> (besucht am 26.12.2021).
- [25] Ryan Izard. *How to Collect Switch Statistics (and Compute Bandwidth Utilization)*. 2019. URL: <https://floodlight.atlassian.net/wiki/spaces/floodlightcontroller/pages/21856267/How+to+Collect+Switch+Statistics+and+Compute+Bandwidth+Utilization> (besucht am 13.12.2021).
- [26] Ryan Izard. *Web GUI*. URL: <https://floodlight.atlassian.net/wiki/spaces/floodlightcontroller/pages/40403023/Web+GUI> (besucht am 28.12.2021).
- [27] jolson. *Nagios Core - Installing Nagios Core From Source*. URL: <https://support.nagios.com/kb/article.php?id=96> (besucht am 29.01.2022).

- [28] Navtej Ghuman Karamjeet Kaur Japinder Singh. „Mininet as Software Defined Networking Testing Platform“. In: *International Conference on Communication, Computing & Systems* (2014).
- [29] Michael Kerrisk. *ip-xfrm(8) — Linux manual page*. 2021. URL: <https://man7.org/linux/man-pages/man8/ip-xfrm.8.html> (besucht am 06.01.2022).
- [30] Rahamatullah Khondoker. *SDN and NFV Security - Security Analysis of Software-Defined Networking and Network Function Virtualization*. Springer, 2018. ISBN: 978-3-319-71760-9.
- [31] Aaron Kili. *How to set permanent DNS Nameservers in Ubuntu and Debian*. 2021. URL: <https://www.tecmint.com/set-permanent-dns-nameservers-in-ubuntu-debian/> (besucht am 15.01.2022).
- [32] Elektronik Kompendium. *ESP - Encapsulating Security Payload*. URL: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/1410261.htm> (besucht am 09.01.2022).
- [33] Elektronik Kompendium. *NAT-Network Address Translation*. URL: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/0812111.htm> (besucht am 10.01.2022).
- [34] Ted Lemon. *Linux man page - dhclient.conf(5)*. URL: <https://linux.die.net/man/5/dhclientleases> (besucht am 25.01.2022).
- [35] Ted Lemon. *Linux man page - dhclient.conf(5)*. URL: <https://linux.die.net/man/5/dhclient.conf> (besucht am 28.01.2022).
- [36] Ted Lemon. *Linux man page - dhclient.conf(5)*. URL: <https://wiki.ubuntuusers.de/systemd/systemd-resolved/> (besucht am 28.01.2022).
- [37] Ted Lemon. *Linux man page - dhclient.conf(8)*. URL: <https://linux.die.net/man/8/dhclient> (besucht am 28.01.2022).
- [38] Ted Lemon. *Linux man page - dhcpd.conf(5)*. URL: <https://linux.die.net/man/5/dhcpd.conf> (besucht am 22.01.2022).
- [39] Ted Lemon. *Linux man page - dhcpd.conf(8)*. URL: <https://linux.die.net/man/8/dhcpd> (besucht am 23.01.2022).
- [40] Donner Andreas Luber Stefan. *Was ist Software Defined Networking*. URL: <https://www.ip-insider.de/was-ist-software-defined-networking-sdn-a-657442/> (besucht am 01.11.2021).
- [41] Microsoft. *Design virtual networks with NAT gateway*. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/virtual-network/nat-gateway/nat-gateway-resource> (besucht am 11.01.2022).
- [42] Mininet. *Mininet Download*. 2021. URL: <http://mininet.org/download/> (besucht am 05.12.2021).
- [43] Mininet. *Mininet Overview*. 2021. URL: <http://mininet.org/overview/> (besucht am 05.12.2021).

- [44] Laura Victoria Morales, Andres Felipe Murillo und Sandra Julieta Rueda. „Extending the floodlight controller“. In: *2015 IEEE 14th International Symposium on Network Computing and Applications*. IEEE. 2015, S. 126–133.
- [45] Sergey Morzhov, Igor Alekseev und Mikhail Nikitinskiy. „Firewall application for Floodlight SDN controller“. In: *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2016, S. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491821.
- [46] MPC. *Standleitung Preise*. URL: <https://www.mpcservice.com/standleitung/standleitung-preise/> (besucht am 15.01.2022).
- [47] Sameena Naaz und Firdos Badroo. „Investigating DHCP and DNS Protocols Using Wireshark“. In: *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)* 18 (Juni 2016), S. 2278–661. DOI: 10.9790/0661-1803020108.
- [48] Nagios. *Server Monitoring with Nagios*. URL: <https://www.nagios.com/solutions/server-monitoring/> (besucht am 28.01.2022).
- [49] Nokia. *TRIPLE PLAY RELEASE 21.2.R1*. URL: https://documentation.nokia.com/cgi-bin/dbaccessfilename.cgi/3HE17164AAAATQZZA01%5C_V1%5C_7450%5C%20ESS%5C%207750%5C%20SR%5C%20and%5C%20VSR%5C%20Triple%5C%20Play%5C%20Service%5C%20Delivery%5C%20Architecture%5C%20Guide%5C%2021.2.R1.pdf (besucht am 25.01.2022).
- [50] o2. *Internet- und DSL-Tarife*. URL: <https://www.o2business.de/festnetz-internet/dsl-business/> (besucht am 15.01.2022).
- [51] ONF. *Software-Defined Networking (SDN) Definition*. URL: <https://opennetworking.org/sdn-definition/> (besucht am 16.12.2021).
- [52] paloalto. *What is a Site-to-Site VPN?* URL: <https://www.paloaltonetworks.com/cyberpedia/what-is-a-site-to-site-vpn> (besucht am 30.11.2021).
- [53] Keerthi PS. *Iptables nat masquerade – How we do it?* 2019. URL: <https://bobcares.com/blog/iptables-nat-masquerade/> (besucht am 22.01.2022).
- [54] Sangeetha Elango Raphael Eweka. „IMPLEMENTATION OF ADDRESS LEARNING/PACKET FORWARDING, FIREWALL AND LOAD BALANCING IN FLOODLIGHT CONTROLLER FOR SDN NETWORK MANAGEMENT“. In: (2015). URL: <https://www.ftms.edu.my/journals/pdf/IJISE/Apr2015/160-170.pdf> (besucht am 17.12.2021).
- [55] Abhishek Rastogi und Abdul Bais. „Comparative analysis of software defined networking (SDN) controllers — In terms of traffic handling capabilities“. In: *2016 19th International Multi-Topic Conference (INMIC)*. 2016, S. 1–6. DOI: 10.1109/INMIC.2016.7840116.
- [56] Abhishek Rastogi und Abdul Bais. „Comparative analysis of software defined networking (SDN) controllers—In terms of traffic handling capabilities“. In: *2016 19th International Multi-Topic Conference (INMIC)*. IEEE. 2016, S. 1–6.

- [57] ProSec Security redefined. *Proxy Server*. URL: <https://www.prosec-networks.com/blog/proxy-server/> (besucht am 26.01.2022).
- [58] Karl Rupp. *NAT- Network Address Translation*. URL: https://www.karlrupp.net/en/computer/nat_tutorial (besucht am 23.01.2022).
- [59] Rusty Russel. *iptables*. URL: <https://linux.die.net/man/8/iptables> (besucht am 17.01.2022).
- [60] Ola Salman u. a. „QoS guarantee over hybrid SDN/non-SDN networks“. In: *2017 8th International Conference on the Network of the Future (NOF)*. 2017, S. 141–143. DOI: 10.1109/NOF.2017.8251237.
- [61] Ola Salman u. a. „SDN controllers: A comparative study“. In: *2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. 2016, S. 1–6. DOI: 10.1109/MELCON.2016.7495430.
- [62] Networx Security. *Web Proxy*. URL: <https://www.networxsecurity.org/de/mitgliederbereich/glossary/w/web-proxies.html> (besucht am 01.02.2022).
- [63] Sakir Sezer u. a. „Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks“. In: *IEEE Communications Magazine* 51.7 (2013), S. 36–43. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6553676.
- [64] Blu Smurf. *XFRM—A Kernel Implementation Framework of IPsec Protocol*. 2019. URL: <https://programmer.ink/think/xfrm-a-kernel-implementation-framework-of-ipsec-protocol.html> (besucht am 08.01.2022).
- [65] sonicwall. *Working with the Mininet VM*. URL: <https://www.sonicwall.com/support/knowledge-base/how-can-i-configure-nat-over-vpn-in-a-site-to-site-vpn/170515155805172/> (besucht am 04.12.2021).
- [66] TechTarget. *quality of service(QoS)*. URL: <https://www.techtarget.com/searchunifiedcommunications/definition/QoS-Quality-of-Service> (besucht am 24.01.2022).
- [67] Telekom. *Company Start 500 (Festnetz)*. URL: <https://geschaeftskunden.telekom.de/hilfe-und-service/hilfe-themen/downloads/produktinformationsblaetter/company-start-500> (besucht am 15.01.2022).
- [68] Telekom. *Internet- und DSL-Tarife*. URL: <https://geschaeftskunden.telekom.de/internet-dsl/tarife/festnetz-internet-dsl> (besucht am 15.01.2022).
- [69] Bob Lantz u.a. *Introduction to Mininet*. 2021. URL: <https://github.com/mininet/mininet/wiki/Introduction-to-Mininet> (besucht am 08.12.2021).
- [70] Ubuntuusers. *resolvconf*. URL: <https://wiki.ubuntuusers.de/resolvconf/> (besucht am 11.01.2022).
- [71] VirtualBox. *Network Address Translation*. URL: <https://www.virtualbox.org/manual/ch06.html> (besucht am 11.01.2022).
- [72] Vodafone. *Internet- und DSL-Tarife*. URL: <https://zuhauseplus.vodafone.de/business/dsl/> (besucht am 15.01.2022).

Literaturverzeichnis

- [73] Open vSwitch. *Production Quality, Multilayer Open Virtual Switch*. URL: <https://www.openvswitch.org/> (besucht am 26.12.2021).
- [74] Open vSwitch. *Quality of Service (QoS)*. URL: <https://docs.openvswitch.org/en/latest/faq/qos/> (besucht am 12.12.2022).
- [75] Open vSwitch. *Quality of Service (QoS)*. URL: <https://docs.openvswitch.org/en/latest/faq/qos/> (besucht am 20.01.2022).
- [76] Open vSwitch. *Using OpenFlow*. URL: <https://docs.openvswitch.org/en/latest/faq/openflow/> (besucht am 21.01.2022).
- [77] Qing Wang. *Floodlight Controller Installation Guide*. URL: <https://floodlight.atlassian.net/wiki/spaces/floodlightcontroller/pages/1343544/Installation+Guide> (besucht am 20.11.2021).
- [78] Github Wiki. *Openflow Tutorial*. URL: <https://github-wiki-see.page/m/mininet/openflow-tutorial/wiki/Create-a-Learning-Switch> (besucht am 27.12.2021).

A. Anhang

```
1 from mininet.topo import Topo
2 from mininet.net import Mininet
3 from mininet.util import dumpNodeConnections, quietRun
4 from mininet.log import setLogLevel, info, info, error, debug,
5     output, warn
6 from mininet.node import Controller, RemoteController,
7     OVSSwitch
8 from mininet.link import TCLink, Intf
9 from mininet.cli import CLI
10 from mininet.node import Node, Switch
11 import time, re, os
12
13 class Router(Node):
14     def config(self, **params):
15         super(Router, self).config(**params)
16         self.cmd('sysctl net.ipv4.ip_forward=1')
17
18     def terminate(self):
19         self.cmd('sysctl net.ipv4.ip_forward=0')
20         super(Router, self).terminate()
21
22 def checkIntf(intf):
23     "Make sure intf exists and is not configured."
24     config = quietRun('ifconfig %s 2>/dev/null' % intf, shell=True)
25     if not config:
26         error('Error: ', intf, 'does not exist!\n')
27         exit(1)
28     ips = re.findall(r'\d+\.\d+\.\d+\.\d+', config)
29     if ips:
30         error('Error: ', intf, 'has an IP address, '
31               'and is probably in use!\n')
32         exit(1)
```

A. Anhang

```
32 class Netzwerk(Topo):
33     def build(self, **_opts):
34
35         defaultIP = '192.168.%s.1/24'
36
37         routers = []
38
39         for r in range(4):
40             router = self.addNode('r%s' % (r+1),
41                                   cls=Router, ip=defaultIP % (r
42                                         +1),
43                                         mac='00:00:00:00:00:0%s' % (r
44                                         +1)
45                                         )
46
47             routers.append(router)
48
49             switch = self.addSwitch('s%s' % (r+1))
50
51             for h in range(10):
52                 name = ((r)*10)+(h+1)
53                 host = self.addHost(name='h%s' % (name),
54                                   ip='0.0.0.0',
55                                   defaultRoute='via 192.168.%s.1' % (r+1),
56                                   mac='00:00:00:00:0%s:0%s' % (r+1, h)
57                                         )
58                 self.addLink(host, switch)
59
60             self.addLink(routers[0],
61                         routers[1],
62                         intfName1='r1-eth2',
63                         intfName2='r2-eth2',
64                         params1={'ip': '10.100.12.1/24'},
65                         params2={'ip': '10.100.12.2/24'},
66                         bw=20
67                         )
68             self.addLink(routers[2],
69                         routers[3],
70                         intfName1='r3-eth2',
71                         intfName2='r4-eth2',
```

A. Anhang

```
72     params1={'ip': '10.100.34.3/24'},  
73     params2={'ip': '10.100.34.4/24'},  
74     bw=20  
75     )  
76     self.addLink(routers[0],  
77                   routers[2],  
78                   intfName1='r1-eth3',  
79                   intfName2='r3-eth3',  
80                   params1={'ip': '10.100.13.1/24'},  
81                   params2={'ip': '10.100.13.3/24'},  
82                   bw=20  
83     )  
84     self.addLink(routers[0],  
85                   routers[3],  
86                   intfName1='r1-eth4',  
87                   intfName2='r4-eth3',  
88                   params1={'ip': '10.100.14.1/24'},  
89                   params2={'ip': '10.100.14.4/24'},  
90                   bw=20  
91     )  
92     self.addLink(routers[1],  
93                   routers[2],  
94                   intfName1='r2-eth3',  
95                   intfName2='r3-eth4',  
96                   params1={'ip': '10.100.23.2/24'},  
97                   params2={'ip': '10.100.23.3/24'},  
98                   bw=20  
99     )  
100    self.addLink(routers[1],  
101                  routers[3],  
102                  intfName1='r2-eth4',  
103                  intfName2='r4-eth4',  
104                  params1={'ip': '10.100.24.2/24'},  
105                  params2={'ip': '10.100.24.4/24'},  
106                  bw=20  
107     )  
108  
109 def Main():  
110     topo = Netzwerk()  
111  
112     os.system("sudo ovs-vsctl add-br s1")  
113     os.system("sudo ovs-vsctl add-br s2")  
114     os.system("sudo ovs-vsctl add-br s3")  
115     os.system("sudo ovs-vsctl add-br s4")
```

A. Anhang

```
116     os.system("sudo ip addr add 192.168.1.20/24 dev s1")
117     os.system("sudo ip link set s1 up")
118     os.system("sudo ip addr add 192.168.2.20/24 dev s2")
119     os.system("sudo ip link set s2 up")
120     os.system("sudo ip addr add 192.168.3.20/24 dev s3")
121     os.system("sudo ip link set s3 up")
122     os.system("sudo ip addr add 192.168.4.20/24 dev s4")
123     os.system("sudo ip link set s4 up")
124
125     os.system("sudo ip route add default via 192.168.1.1")
126
127 c0 = RemoteController('c0', controller=RemoteController,
128                      ip="192.168.1.20", port=6653)
129
130 net = Mininet(topo=topo, controller=c0,
131                 link=TCLink, switch=OVSSwitch, waitConnected=
132                 True)
133
134 info(net['r1'].cmd(
135     "ip tunnel add gre12 mode gre local 10.100.12.1 remote
136         10.100.12.2 ttl 255"))
137 info(net['r1'].cmd("ip link set gre12 up"))
138 info(net['r1'].cmd("ip addr add 10.10.12.1/24 dev gre12"))
139
140 info(net['r1'].cmd(
141     "ip tunnel add gre13 mode gre local 10.100.13.1 remote
142         10.100.13.3 ttl 255"))
143 info(net['r1'].cmd("ip link set gre13 up"))
144 info(net['r1'].cmd("ip addr add 10.10.13.1/24 dev gre13"))
145
146 info(net['r1'].cmd(
147     "ip tunnel add gre14 mode gre local 10.100.14.1 remote
148         10.100.14.4 ttl 255"))
149 info(net['r1'].cmd("ip link set gre14 up"))
150 info(net['r1'].cmd("ip addr add 10.10.14.1/24 dev gre14"))
151
152 info(net['r2'].cmd(
153     "ip tunnel add gre21 mode gre local 10.100.12.2 remote
154         10.100.12.1 ttl 255"))
155 info(net['r2'].cmd("ip link set gre21 up"))
156 info(net['r2'].cmd("ip addr add 10.10.12.2/24 dev gre21"))
```

A. Anhang

```
154     "ip tunnel add gre23 mode gre local 10.100.23.2 remote  
155         10.100.23.3 ttl 255"))  
156     info(net['r2'].cmd("ip link set gre23 up"))  
157     info(net['r2'].cmd("ip addr add 10.10.23.2/24 dev gre23"))  
158  
159     info(net['r2'].cmd(  
160         "ip tunnel add gre24 mode gre local 10.100.24.2 remote  
161             10.100.24.4 ttl 255"))  
162     info(net['r2'].cmd("ip link set gre24 up"))  
163     info(net['r2'].cmd("ip addr add 10.10.24.2/24 dev gre24"))  
164  
165     info(net['r3'].cmd(  
166         "ip tunnel add gre31 mode gre local 10.100.13.3 remote  
167             10.100.13.1 ttl 255"))  
168     info(net['r3'].cmd("ip link set gre31 up"))  
169     info(net['r3'].cmd("ip addr add 10.10.13.3/24 dev gre31"))  
170  
171     info(net['r3'].cmd(  
172         "ip tunnel add gre32 mode gre local 10.100.23.3 remote  
173             10.100.23.2 ttl 255"))  
174     info(net['r3'].cmd("ip link set gre32 up"))  
175     info(net['r3'].cmd("ip addr add 10.10.23.3/24 dev gre32"))  
176  
177     info(net['r3'].cmd(  
178         "ip tunnel add gre34 mode gre local 10.100.34.3 remote  
179             10.100.34.4 ttl 255"))  
180     info(net['r3'].cmd("ip link set gre34 up"))  
181     info(net['r3'].cmd("ip addr add 10.10.34.3/24 dev gre34"))  
182  
183     info(net['r4'].cmd(  
184         "ip tunnel add gre41 mode gre local 10.100.14.4 remote  
185             10.100.14.1 ttl 255"))  
186     info(net['r4'].cmd("ip link set gre41 up"))  
187     info(net['r4'].cmd("ip addr add 10.10.14.4/24 dev gre41"))  
188  
189     info(net['r4'].cmd(  
190         "ip tunnel add gre42 mode gre local 10.100.24.4 remote  
191             10.100.24.2 ttl 255"))  
192     info(net['r4'].cmd("ip link set gre42 up"))  
193     info(net['r4'].cmd("ip addr add 10.10.24.4/24 dev gre42"))  
194  
195     info(net['r4'].cmd(  
196         "ip tunnel add gre43 mode gre local 10.100.34.4 remote  
197             10.100.34.3 ttl 255"))
```

A. Anhang

```
190 info(net['r4'].cmd("ip link set gre43 up"))
191 info(net['r4'].cmd("ip addr add 10.10.34.4/24 dev gre43"))
192
193 info(net['r1'].cmd("ip route add 192.168.2.0/24 via
194     10.10.12.2 dev gre12"))
195 info(net['r2'].cmd("ip route add 192.168.1.0/24 via
196     10.10.12.1 dev gre21"))
197
198 info(net['r1'].cmd("ip route add 192.168.3.0/24 via
199     10.10.13.1 dev gre13"))
200 info(net['r3'].cmd("ip route add 192.168.1.0/24 via
201     10.10.13.3 dev gre31"))
202
203 info(net['r1'].cmd("ip route add 192.168.4.0/24 via
204     10.10.14.1 dev gre14"))
205 info(net['r4'].cmd("ip route add 192.168.1.0/24 via
206     10.10.14.4 dev gre41"))
207
208 info(net['r2'].cmd("ip route add 192.168.3.0/24 via
209     10.10.23.2 dev gre23"))
210 info(net['r3'].cmd("ip route add 192.168.2.0/24 via
211     10.10.23.3 dev gre32"))
212
213 info(net['r2'].cmd("ip route add 192.168.4.0/24 via
214     10.10.24.2 dev gre24"))
215 info(net['r4'].cmd("ip route add 192.168.2.0/24 via
216     10.10.24.4 dev gre42"))
217
218 info(net['r1'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.12.1 dst
219     10.100.12.2 proto esp spi " +
spi12 + " enc 'cbc(aes)' " + key12 + "
mode transport"))
```

A. Anhang

```

220 info(net['r1'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.12.2 dst
221           10.100.12.1 proto esp spi " +
222           spi1 + " enc 'cbc(aes)' " + key1 + "
223           mode transport"))
224
225 info(net['r2'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.12.1 dst
226           10.100.12.2 proto esp spi " +
227           spi2 + " enc 'cbc(aes)' " + key2 + "
228           mode transport"))
229
230 info(net['r2'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.12.2 dst
231           10.100.12.1 proto esp spi " +
232           spi2 + " enc 'cbc(aes)' " + key2 + "
233           mode transport"))
234
235 info(net['r1'].cmd(
236           "ip xfrm policy add dir out src 10.100.12.1 dst
237           10.100.12.2 tmpl proto esp mode transport"))
238
239 info(net['r1'].cmd(
240           "ip xfrm policy add dir in src 10.100.12.2 dst
241           10.100.12.1 tmpl proto esp mode transport"))
242
243 info(net['r2'].cmd(
244           "ip xfrm policy add dir out src 10.100.12.2 dst
245           10.100.12.1 tmpl proto esp mode transport"))
246
247 info(net['r2'].cmd(
248           "ip xfrm policy add dir in src 10.100.12.1 dst
249           10.100.12.2 tmpl proto esp mode transport"))
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
679
680
681
682
683
684
685
686
687
687
688
689
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
729
730
731
732
733
734
735
736
737
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1096
1097
1098
1099
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1296
1297
1298
1299
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2077
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2087
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2094
2095
2096
2097
2098
2099
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2168
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2177
2178
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2187
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2194
2195
2196
2197
2198
2199
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2209
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2239
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2249
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2277
2278
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2287
2288
2289
2290
2291
2292
2293
2294
2294
2295
2296
2297
2298
2299
2299
2300
2301
2302
2303
2304
2305
2306
2307
2308
2309
2309
2310
2311
2312
2313
2314
2315
2316
2317
2318
2318
2319
2320
2321
2322
2323
2324
2325
2326
2327
2328
2329
2329
2330
2331
2332
2333
2334
2335
2336
2337
2338
2339
2339
2340
2341
2342
2343
2344
2345
2346
2347
2348
2348
2349
2350
2351
2352
2353
2354
2355
2356
2357
2358
2359
2359
2360
2361
2362
2363
2364
2365
2366
2367
2368
2368
2369
2370
2371
2372
2373
2374
2375
2376
2377
2377
2378
2379
2380
2381
2382
2383
2384
2385
2386
2387
2387
2388
2389
2390
2391
2392
2393
2394
2394
2395
2396
2397
2398
2399
2399
2400
2401
2402
2403
2404
2405
2406
2407
2408
2409
2409
2410
2411
2412
2413
2414
2415
2416
2417
2418
2418
2419
2420
2421
2422
2423
2424
2425
2426
2427
2428
2429
2429
2430
2431
2432
2433
2434
2435
2436
2437
2438
2438
2439
2440
2441
2442
2443
2444
2445
2446
2447
2448
2448
2449
2450
2451
2452
2453
2454
2455
2456
2457
2458
2459
2459
2460
2461
2462
2463
2464
2465
2466
2467
2468
2468
2469
2470
2471
2472
2473
2474
2475
2476
2477
2477
2478
2479
2480
2481
2482
2483
2484
2485
2486
2487
2487
2488
2489
2490
2491
2492
2493
2494
2494
2495
2496
2497
2498
2499
2499
2500
2501
2502
2503
2504
2505
2506
2507
2508
2509
2509
2510
2511
2512
2513
2514
2515
2516
2517
2518
2518
2519
2520
2521
2522
2523
2524
2525
2526
2527
2528
2529
2529
2530
2531
2532
2533
2534
2535
2536
2537
2538
2538
2539
2540
2541
2542
2543
2544
2545
2546
2547
2548
2548
2549
2550
2551
2552
2553
2554
2555
2556
2557
2558
2559
2559
2560
2561
2562
2563
2564
2565
2566
256
```

A. Anhang

```
250 info(net['r3'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.13.1 dst  
251           10.100.13.3 proto esp spi " +  
252           spi13 + " enc 'cbc(aes)' " + key13 + "  
253           mode transport"))  
254 info(net['r3'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.13.3 dst  
255           10.100.13.1 proto esp spi " +  
256           spi31 + " enc 'cbc(aes)' " + key31 + "  
257           mode transport"))  
258 info(net['r1'].cmd(  
259           "ip xfrm policy add dir out src 10.100.13.1 dst  
260           10.100.13.3 tmpl proto esp mode transport"))  
261 info(net['r1'].cmd(  
262           "ip xfrm policy add dir in src 10.100.13.3 dst  
263           10.100.13.1 tmpl proto esp mode transport"))  
264 info(net['r3'].cmd(  
265           "ip xfrm policy add dir out src 10.100.13.3 dst  
266           10.100.13.1 tmpl proto esp mode transport"))  
267 info(net['r3'].cmd(  
268           "ip xfrm policy add dir in src 10.100.13.1 dst  
269           10.100.13.3 tmpl proto esp mode transport"))  
270  
271 key14 = "0x8527ef297dc35bed418d635ef15 \  
272 e219feaf5f5597699b6271534697bfd940c9"  
273 key41 = "0x69091e7f7c1c162c7c6b44fb8e3 \  
274 89e113eb77746c1d6a2d73074e9609a991179"  
275 spi14 = "0x19de2473"  
276 spi41 = "0x65cb9866"  
277  
278 info(net['r1'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.14.1 dst  
279           10.100.14.4 proto esp spi " +  
280           spi14 + " enc 'cbc(aes)' " + key14 + "  
281           mode transport"))  
282 info(net['r1'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.14.4 dst  
283           10.100.14.1 proto esp spi " +  
284           spi41 + " enc 'cbc(aes)' " + key41 + "  
285           mode transport"))  
286  
287 info(net['r4'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.14.1 dst  
288           10.100.14.4 proto esp spi " +  
289           spi14 + " enc 'cbc(aes)' " + key14 + "  
290           mode transport"))
```

A. Anhang

```
279 info(net['r4'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.14.4 dst  
280           10.100.14.1 proto esp spi " +  
281           spi41 + " enc 'cbc(aes)' " + key41 + "  
282           mode transport"))  
283  
284 info(net['r1'].cmd(  
285           "ip xfrm policy add dir out src 10.100.14.1 dst  
286           10.100.14.4 tmpl proto esp mode transport"))  
287 info(net['r1'].cmd(  
288           "ip xfrm policy add dir in src 10.100.14.4 dst  
289           10.100.14.1 tmpl proto esp mode transport"))  
290  
291  
292 key23 = "0xe6709e851cc4f247729bb592147\"  
293 663ab4e4fe26cced514120e92aaaf3034061f8"  
294 key32 = "0xc765d3e9382d7012963fc2c0d66\"  
295 e20724ba2de74928e6c9f08c0250d6ac5f823"  
296 spi23 = "0x18d7e3e4"  
297 spi32 = "0x93e5489f"  
298  
299 info(net['r2'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.23.2 dst  
300           10.100.23.3 proto esp spi " +  
301           spi23 + " enc 'cbc(aes)' " + key23 + "  
302           mode transport"))  
303 info(net['r2'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.23.3 dst  
304           10.100.23.2 proto esp spi " +  
305           spi32 + " enc 'cbc(aes)' " + key32 + "  
306           mode transport"))  
307 info(net['r3'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.23.2 dst  
308           10.100.23.3 proto esp spi " +  
309           spi23 + " enc 'cbc(aes)' " + key23 + "  
310           mode transport"))  
311 info(net['r3'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.23.3 dst  
312           10.100.23.2 proto esp spi " +  
313           spi32 + " enc 'cbc(aes)' " + key32 + "  
314           mode transport"))
```

```

309 info (net['r2'].cmd(
310     "ip xfrm policy add dir out src 10.100.23.2 dst
311         10.100.23.3 tmpl proto esp mode transport"))
312 info (net['r2'].cmd(
313     "ip xfrm policy add dir in src 10.100.23.3 dst
314         10.100.23.2 tmpl proto esp mode transport"))
315
316 info (net['r3'].cmd(
317     "ip xfrm policy add dir out src 10.100.23.3 dst
318         10.100.23.2 tmpl proto esp mode transport"))
319 key24 = "0xd2851d694a952d4e14b1eda4ee20 \
320 04e94f601e7422e47c1872ad6d333b7e1d37"
321 key42 = "0xcb7698938b9393686afde8b29e2c \
322 1e620b99f1fe2435c24709a9ffccfea050f6"
323 spi24 = "0x7d99d7e8"
324 spi42 = "0x508ef1f2"
325
326 info (net['r2'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.24.2 dst
327         10.100.24.4 proto esp spi " +
328             spi24 + " enc 'cbc(aes)' " + key24 + "
329                 mode transport"))
330 info (net['r2'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.24.4 dst
331         10.100.24.2 proto esp spi " +
332             spi42 + " enc 'cbc(aes)' " + key42 + "
333                 mode transport"))
334
335 info (net['r4'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.24.2 dst
336         10.100.24.4 proto esp spi " +
337             spi24 + " enc 'cbc(aes)' " + key24 + "
338                 mode transport"))
339 info (net['r2'].cmd(
340     "ip xfrm policy add dir out src 10.100.24.2 dst
341         10.100.24.4 tmpl proto esp mode transport"))
342 info (net['r2'].cmd(

```

```

339         "ip xfrm policy add dir in src 10.100.24.4 dst
340             10.100.24.2 tmpl proto esp mode transport"))
341     info (net['r4'].cmd(
342         "ip xfrm policy add dir out src 10.100.24.4 dst
343             10.100.24.2 tmpl proto esp mode transport"))
344     info (net['r4'].cmd(
345         "ip xfrm policy add dir in src 10.100.24.2 dst
346             10.100.24.4 tmpl proto esp mode transport"))
347
348     key34 = "0xa5036e96c1ee40de3cb7ebc6a455f\
349             a816053b6106a352634da87e67b1137c058"
350     key43 = "0x4e2ea7cb3ec6d11704d2a85b7f7db\
351             3518ddcf970ff54502ff8ea6be653c6b456"
352     spi34 = "0x7302a4a9"
353     spi43 = "0xc70a7221"
354
355     info (net['r3'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.34.3 dst
356             10.100.34.4 proto esp spi " +
357                 spi34 + " enc 'cbc(aes)' " + key34 + "
358                     mode transport"))
359     info (net['r3'].cmd("ip xfrm state add src 10.100.34.4 dst
360             10.100.34.3 proto esp spi " +
361                 spi43 + " enc 'cbc(aes)' " + key43 + "
362                     mode transport"))
363
364     info (net['r3'].cmd(
365         "ip xfrm policy add dir out src 10.100.34.3 dst
366             10.100.34.4 tmpl proto esp mode transport"))
367     info (net['r4'].cmd(
368

```

```

369     "ip xfrm policy add dir out src 10.100.34.4 dst
370         10.100.34.3 tmpl proto esp mode transport"))
370 info (net['r4'].cmd(
371     "ip xfrm policy add dir in src 10.100.34.3 dst
372         10.100.34.4 tmpl proto esp mode transport"))
372
373 info ('*** Routing Table on Router:\n')
374 info (net['r1'].cmd('route'))
375 info (net['r2'].cmd('route'))
376 info (net['r3'].cmd('route'))
377 info (net['r4'].cmd('route'))
378
379 checkIntf('enp0s9')
380 s1 = net.getNodeByName('s1')
381 _intf = Intf('enp0s9', node=s1)
382
383 checkIntf('enp0s10')
384 s2 = net.getNodeByName('s2')
385 _intf = Intf('enp0s10', node=s2)
386
387 net.start()
388
389 print("Dumping host connections")
390 dumpNodeConnections(net.hosts)
391 print("Testing network connectivity")
392
393 r1 = net.getNodeByName('r1')
394 Intf('enp0s16', node=r1)
395 info (net['r1'].cmd("dhclient enp0s16"))
396 info (net['r1'].cmd("sudo iptables -t nat -A POSTROUTING -o
397             enp0s16 -j MASQUERADE"))
398
398 r2 = net.getNodeByName('r2')
399 Intf('enp0s17', node=r2)
400 info (net['r2'].cmd("dhclient enp0s17"))
401 info (net['r2'].cmd("sudo iptables -t nat -A POSTROUTING -o
402             enp0s17 -j MASQUERADE"))
403
403 r3 = net.getNodeByName('r3')
404 Intf('enp0s18', node=r3)
405 info (net['r3'].cmd("dhclient enp0s18"))
406 info (net['r3'].cmd("sudo iptables -t nat -A POSTROUTING -o
407             enp0s18 -j MASQUERADE"))

```

A. Anhang

```

408     r4 = net.getNodeByName('r4')
409     Intf('enp0s19', node=r4)
410     info(net['r4'].cmd("dhclient enp0s19"))
411     info(net['r4'].cmd("sudo iptables -t nat -A POSTROUTING -o
412         enp0s19 -j MASQUERADE"))
413
414     os.system("service isc-dhcp-server restart")
415
416     for i in range(40):
417         host = net.getNodeByName('h%s' % (i+1))
418         host.cmd("dhclient h%s-eth0" % (i+1))
419
420         os.system("sudo ovs-ofctl add-flow s1 priority=1000,actions
421             =set_queue:0,normal")
422         os.system("sudo ovs-ofctl add-flow s2 priority=1000,actions
423             =set_queue:0,normal")
424         os.system("sudo ovs-ofctl add-flow s3 priority=1000,actions
425             =set_queue:0,normal")
426         os.system("sudo ovs-ofctl add-flow s4 priority=1000,actions
427             =set_queue:0,normal")
428
429     CLI(net)
430
431     info(net['r1'].cmd("ip link set enp0s16 netns 1"))
432     info(net['r2'].cmd("ip link set enp0s17 netns 1"))
433     info(net['r3'].cmd("ip link set enp0s18 netns 1"))
434     info(net['r4'].cmd("ip link set enp0s19 netns 1"))
435
436     os.system("sudo ip addr del 192.168.1.20/24 dev s1")
437     os.system("sudo ip addr del 192.168.2.20/24 dev s2")
438     os.system("sudo ip addr del 192.168.3.20/24 dev s3")

```

```
439     os.system("sudo ip addr del 192.168.4.20/24 dev s4")
440
441     net.stop()
442
443     os.system("sudo mn -c")
444
445
446 if __name__ == '__main__':
447     setLogLevel('info')
448     Main()
```

Listing A.1: Das in Python geschrieben Mininet-Skript

```

1 import socket
2 import ipaddress
3 import http.client
4 import json
5 import time
6 import paramiko
7 from scp import SCPClient
8
9 class StaticEntryPusher(object):
10
11     def __init__(self, server):
12         self.server = server
13
14     def get(self, data):
15         ret = self.rest_call({}, 'GET')
16         return json.loads(ret[2])
17
18     def set(self, data):
19         ret = self.rest_call(data, 'POST')
20         return ret[0] == 200
21
22     def remove(self, data):
23         ret = self.rest_call(data, 'DELETE')
24         return ret[0] == 200
25
26     def rest_call(self, data, action):
27         path = '/wm/staticentrypusher/json'
28         headers = {
29             'Content-type': 'application/json',
30             'Accept': 'application/json',
31         }
32         body = json.dumps(data)
33         conn = http.client.HTTPConnection(self.server, 8080)
34         conn.request(action, path, body, headers)
35         response = conn.getresponse()
36         ret = (response.status, response.reason, response.read())
37         print(ret)
38         conn.close()
39         return ret
40
41     def check_file(path):
42         try:

```

```

43     f = open(path)
44     return True
45 except FileNotFoundError:
46     print("Solch eine Datei ist nicht vorhanden!")
47     return False
48 finally:
49     try:
50         f.close()
51     except UnboundLocalError:
52         pass
53
54 def check_ip(address):
55     try:
56         ip = IPAddress.ip_address(address)
57         print("Die IP-Adresse {} ist gueltig.".format(address))
58         return True
59     except ValueError:
60         print("Die IP-Adresse {} ist nicht gueltig.".format(
61             address))
62         return False
63
64 def get_ip():
65     s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
66     s.settimeout(0)
67     try:
68         s.connect(( '192.168.2.1' , 1))
69         IP = s.getsockname() [0]
70     except Exception:
71         IP = '127.0.0.1'
72     finally:
73         s.close()
74     return IP
75
76 source_ip = get_ip()
77
78 valid = False
79 while not valid:
80     file_path = str(input(
81         "Pfad der Datei zum Transfer eingeben (Beispiel:/home/
82             username/Schreibtisch/file)\n"))
83     valid = check_file(file_path)
84

```

```

85 destination_ip = str(
86     input("IPv4-Adresse des Ziels eingeben (Beispiel
87         :192.168.1.1)\n"))
88 valid = check_ip(destination_ip)
89
90 destination_host_name = str(input('Hostname fuer die IP %s
91         eingeben\n' % destination_ip))
92
93 destination_pass = str(input('Passwort fuer Host %s eingeben\n'
94         '%s destination_host_name'))
95
96 pusher=StaticEntryPusher('192.168.1.20')
97
98 prio1_dst={
99     'switch': "00:00:00:00:00:00:00:01",
100    "name": "prio1_dst",
101    "priority": "32768",
102        "eth_type": "0x0800",
103        "ip_proto": "6",
104        "tcp_dst": "22",
105        "ipv4_dst": destination_ip,
106        "ipv4_src": source_ip,
107        "active": "true",
108        "actions": "output=normal"
109    }
110
111 prio1_src={
112     'switch': "00:00:00:00:00:00:00:01",
113    "name": "prio1_src",
114    "priority": "32768",
115        "eth_type": "0x0800",
116        "ip_proto": "6",
117        "tcp_src": "22",
118        "ipv4_dst": source_ip,
119        "ipv4_src": destination_ip,
120        "active": "true",
121        "actions": "output=normal"
122    }
123
124 dros1={
```

```

125     'switch': "00:00:00:00:00:00:00:00:01",
126     "name": "dros1",
127     "priority": "1050",
128     "eth_type": "0x0800",
129     "active": "true",
130     "actions": "set_queue=2,output=normal"
131 }
132
133 prio2_dst={
134     'switch': "00:00:00:00:00:00:00:00:02",
135     "name": "prio2_dst",
136     "priority": "32768",
137     "eth_type": "0x0800",
138     "ip_proto": "6",
139     "tcp_dst": "22",
140     "ipv4_dst": destination_ip,
141     "ipv4_src": source_ip,
142     "active": "true",
143     "actions": "output=normal"
144 }
145
146 prio2_src={
147     'switch': "00:00:00:00:00:00:00:00:02",
148     "name": "prio2_src",
149     "priority": "32768",
150     "eth_type": "0x0800",
151     "ip_proto": "6",
152     "tcp_src": "22",
153     "ipv4_dst": source_ip,
154     "ipv4_src": destination_ip,
155     "active": "true",
156     "actions": "output=normal"
157 }
158
159 dros2={
160     'switch': "00:00:00:00:00:00:00:00:02",
161     "name": "dros2",
162     "priority": "1050",
163     "eth_type": "0x0800",
164     "active": "true",
165     "actions": "set_queue=2,output=normal"
166 }
167
168 pusher.set(prio1_dst)

```

A. Anhang

```
169 pusher.set(prio1_src)
170 pusher.set(dros1)
171 pusher.set(prio2_dst)
172 pusher.set(prio2_src)
173 pusher.set(dros2)
174
175 def createSSHClient(server, port, user, password):
176     client=paramiko.SSHClient()
177     client.load_system_host_keys()
178     client.set_missing_host_key_policy(paramiko.AutoAddPolicy())
179     client.connect(server, port, user, password)
180     return client
181
182 ssh=createSSHClient(server=destination_ip, port=22,
183                      user=destination_host_name, password=
184                      destination_pass)
185 scp=SCPClient(ssh.get_transport())
186 scp.put(file_path, remote_path=file_path_remote,
187          recursive=False, preserve_times=False)
```

Listing A.2: Das in Python geschrieben SSH-Transfer-Skript