



hochschule mannheim

**Analyse der Netzwerkkommunikation in  
Industrie 4.0 Umgebungen und Erweiterung  
einer protoypischen Security Testumgebung  
zur Darstellung von Bedrohungsfaktoren**

Philipp Minges

Bachelor-Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science (B.Sc.)

Studiengang Informatik

Fakultät für Informatik

Hochschule Mannheim

15.07.2018

Betreuer

Prof. Sachar Paulus, Hochschule Mannheim

Prof. Dr. M. Hauske, Hochschule Mannheim

**Minges, Philipp:**

Analyse der Netzwerkkommunikation in Industrie 4.0 Umgebungen und Erweiterung einer prototypischen Security Testumgebung zur Darstellung von Bedrohungsfaktoren / Philipp Minges. –

Bachelor-Thesis, Mannheim: Hochschule Mannheim, 2018. 95 Seiten.

**Minges, Philipp:**

TODO - Title EN / Philipp Minges. –

Bachelor Thesis, Mannheim: University of Applied Sciences Mannheim, 2018. 95 pages.

## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich bin damit einverstanden, dass meine Arbeit veröffentlicht wird, d. h. dass die Arbeit elektronisch gespeichert, in andere Formate konvertiert, auf den Servern der Hochschule Mannheim öffentlich zugänglich gemacht und über das Internet verbreitet werden darf.

Mannheim, 15.07.2018

Philipp Minges



# Abstract

## ***Analyse der Netzwerkkommunikation in Industrie 4.0 Umgebungen und Erweiterung einer prototypischen Security Testumgebung zur Darstellung von Bedrohungsfaktoren***

Nach der Einführung des Begriffs „Industrie 4.0“ im Jahr 2011 und dem gleichzeitigen Start der 4. industriellen Revolution werden Kommunikationsnetze in der Industrie immer mehr zur Automatisierung der Produktion von Gütern oder zum unternehmensinternen sowie -externen Datenaustausch genutzt. Um diese Echtzeitkommunikation oder auch Möglichkeiten der Fernwartung zu gewährleisten, werden immer mehr Anlagen mit Netzwerkzugängen ausgestattet. Die Kommunikation der Industrie 4.0 Netze und Systeme findet unternehmensübergreifend über einen unsicheren Kanal statt und kann somit ohne bereitgestellte Sicherheitsmaßnahmen genauso angegriffen werden, wie herkömmliche Heim- oder Büronetzwerke. Das Ziel dieser Arbeit ist es zum einen, die Netzwerkkommunikation zwischen Industrie 4.0 Komponenten anhand aktueller Standards zu analysieren, mögliche Angriffsvektoren darzustellen und deren Eintrittswahrscheinlichkeit sowie Schaden zu bewerten. Zum anderen wird ein vorhandenes Industrie 4.0 Security Testsystem anhand der gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der Netzwerksicherheit zu Lehr- und Testzwecken prototypisch erweitert. TODO - neu

***TODO - Title EN***

TODO - Abstract EN



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Historie . . . . .	5
2.2	aktueller Stand der Technik . . . . .	8
2.3	Industrie 4.0 . . . . .	9
2.3.1	Automatisierungspyramide . . . . .	10
2.3.2	Kommunikation in der Industrie 4.0 . . . . .	11
2.3.3	Internet of Things/Industrial Internet of Things . . . . .	14
2.4	Normen und Standards . . . . .	14
2.4.1	TCP/IP Referenzmodell . . . . .	15
2.4.2	Industrie 4.0 Referenzarchitekturen . . . . .	16
2.4.3	Protokollstandards . . . . .	20
2.5	Anforderungen an Industrie 4.0 Umgebungen . . . . .	23
2.5.1	Grundprinzipien der sicheren Kommunikation . . . . .	24
2.5.2	Anforderungen der Referenzmodelle . . . . .	25
2.5.3	Security by Design . . . . .	26
2.6	Testsystem . . . . .	26
2.6.1	Architektur . . . . .	27
2.6.2	Komponenten . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Analyse</b>	<b>29</b>
3.1	Bedrohungen . . . . .	29
3.2	Integrationsansätze . . . . .	31
3.2.1	Konsolidierung der Netzwerkkommunikation . . . . .	31
3.2.2	Gatewaykommunikation . . . . .	31
3.3	Netzzugangsschicht . . . . .	32
3.3.1	physikalischer Zugang . . . . .	32
3.3.2	Topologie . . . . .	33
3.3.3	Virtual Local Area Network (VLAN) . . . . .	33
3.3.4	Address Resolution Protocol (ARP) . . . . .	33
3.3.5	vertikale Integration bestehender Komponenten . . . . .	34
3.4	Internetschicht . . . . .	34
3.4.1	Quality of Service (QoS) . . . . .	34

3.4.2	IPsec . . . . .	35
3.5	Transportschicht . . . . .	36
3.5.1	Transmission Control Protocol (TCP) . . . . .	36
3.5.2	User Datagram Protocol (UDP) . . . . .	40
3.6	Anwendungsschicht . . . . .	40
3.6.1	Domain Name System (DNS) . . . . .	41
3.6.2	Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) . . . . .	47
3.6.3	Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) . . . . .	49
3.6.4	Message Queue Telemetry Transport (MQTT)/Constrained Application Protocol (CoAP) . . . . .	55
3.7	Schutzmaßnahmen . . . . .	55
3.7.1	allgemeine Schutzmaßnahmen . . . . .	55
3.7.2	TODO . . . . .	55
3.7.3	TODO . . . . .	55
3.7.4	Defense in Depth . . . . .	55
3.8	Zwischenfazit . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Anwendungsszenarien</b>	<b>59</b>
4.1	OPC UA Kommunikation . . . . .	59
4.2	Man in the Middle (MitM) . . . . .	60
4.3	Manipulation von ungesichertem Netzwerkverkehr . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Konzept</b>	<b>61</b>
5.1	Verteilungssicht . . . . .	62
5.1.1	Industriernetzwerk . . . . .	64
5.1.2	Monitoring-Netzwerk . . . . .	64
5.1.3	Containernetzwerk . . . . .	65
5.2	Bausteinsicht . . . . .	65
5.2.1	Router . . . . .	66
5.2.2	DHCP Server/DNS Server . . . . .	67
5.2.3	CoAP Client/CoAP Server . . . . .	68
5.2.4	Rogue DHCP Server . . . . .	69
5.2.5	CoAP Manipulationssystem . . . . .	70
5.2.6	Docker Service . . . . .	71
5.3	Laufzeitsicht . . . . .	71
5.3.1	Routing . . . . .	71
5.3.2	DHCP . . . . .	71
5.3.3	DNS . . . . .	72
5.3.4	Kommunikation CoAP Client und Server . . . . .	73
5.3.5	Manipulation des Netzwerkverkehrs . . . . .	75
5.4	Anpassungen . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Umsetzung</b>	<b>79</b>
6.1	Softwarewahl . . . . .	80



6.2	Integration . . . . .	81
6.2.1	Netzwerkverwaltung . . . . .	81
6.2.2	CoAP Server . . . . .	84
6.3	Implementierung . . . . .	84
6.3.1	OPC UA Secure Channel . . . . .	85
6.3.2	CoAP Monitoringsystem . . . . .	85
6.3.3	CoAP Manipulationssystem . . . . .	86
6.4	Quellcode . . . . .	86
6.5	Dokumentation . . . . .	87
<b>7</b>	<b>Validierung</b>	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>Fazit</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick</b>	<b>95</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
	<b>Quellcodeverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
	<b>Literatur</b>	<b>xix</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

Mit der heutigen, immer weiter fortschreitenden Vernetzung von Geräten aus Unternehmensinfrastrukturen und Heimnetzen über das Internet, erfährt die Industrie und deren Wertschöpfung einen strukturellen Wandel. Im Gegensatz zur Industrie 3.0, in der die Kommunikation der Geräte nur innerhalb einer Produktionsstätte oder eines Unternehmens stattgefunden hat, erstreckt sich die Kommunikation in Industrie 4.0 Umgebungen über die Unternehmensgrenzen hinweg. Es werden Konzepte zur Einbindung aller Komponenten eines Firmenprozesses, welcher z. B. Produktion, Service- Instandhaltungsaufgaben beinhaltet, realisiert. Diese Systeme kommunizieren miteinander und nutzen dafür immer häufiger eine Ethernet Netzwerkwerkstruktur. Dies setzt die Produktionsanlagen sowie die genutzten Softwaresysteme den gleichen potentiellen Gefahren durch Viren, Würmer oder Trojaner aus, wie reguläre Büro- oder Heim-PC.

Viele Kritische Infrastrukturen (KRITIS), wie Produktionsanlagen zur Energie- und Wasserversorgung nutzen automatisierte Prozesssteuerungssysteme, Industrie PC (IPC), speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systeme zur Steuerung der Abläufe in den Produktionsanlagen zwischen verteilten Systemen. Die ständige Verfügbarkeit und Überwachung dieser Dienste ist für eine funktionierende Infrastruktur essentiell. Systeme der KRITIS können nicht angehalten werden, um Sicherheitsupdates und einen anschließenden Systemneustart durchzuführen. Bei vielen dieser Prozesssteuerungssystemen wurde der Aspekt der IT-Sicherheit nicht berücksichtigt, da eine Vernetzung der Systeme im heutigen Ausmaß nicht vorgesehen war. Die Systeme bieten keine Möglichkeit der Verschlüsselung des Datenverkehrs oder der Authentifizierung der Benutzer.

Die Sicherheit der Produktionsanlagen und deren Netzwerkkommunikation spielt für ein Unternehmen im Industrie 4.0 Umfeld mit Hinblick auf Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Authentizität eine essentielle Rolle. Sollte es durch Angriffe möglich sein, die Produktion zu sabotieren oder Anlagen und Systeme zu manipulieren, so können die Folgen schwerwiegend sein. Es kann zu Produktionsausfällen kommen und es können Vertragsstrafen drohen. Ein bekannter Angriff wurde im Jahr 2016 auf das Netz des deutschen Bundestages durchgeführt. Dort wurde ein Zusammenbruch der getroffenen Sicherheitsmaßnahmen erreicht. Es wurden über mehrere Monate unbemerkt sensible Daten entwendet. [TODO - Quelle]

TODO - Kleinere Losgrößen -> von Einzelmaschine zu Fabrik TODO - mehr -> leitfaden-it-security-i40.pdf - Einleitung TODO - Stuxnet, Duqu -> auf Produktionsanlagen zugegriffen

Die beschriebenen Probleme bei der Umsetzung einer sicheren Kommunikation im Industrie 4.0 Umfeld sowie die dargestellten, erfolgreich durchgeführten Angriffe auf bestehende Infrastrukturen bieten mir einen Anlass, den aktuellen Stand der IT-Sicherheit beim Datenaustausch in einer heterogenen Industrie 4.0 Umgebung zu analysieren und mögliche Risiken aufzuzeigen.

Um das erwünschte Ergebnis zu erhalten, muss im ersten Schritt eine Literaturanalyse durchgeführt werden. Mit Hilfe dieser werden die Grundlagen zur Analyse der Kommunikation geschaffen.

Anschließend wird die Sicherheitsanalyse der Netzwerkkommunikation in Industrie 4.0 Umgebungen durchgeführt. Diese beinhaltet die Analyse des Kommunikationsstacks der Netzwerkebene und der verwendeten Protokolle sowie Standards.

Zuletzt werden die Ergebnisse der Analyse durch eine prototypische Implementierung und Erweiterung eines vorhandenen Industrie 4.0 Security Testsystems dargestellt und validiert.

TODO ref. W.A. Halang 2016 und Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016b und Schleupner 2016 und Lass Sander 2014

TODO - Um die Komplexität zu reduzieren, wird eine umfassende Modularisierung, eine breite Standardisierung und eine durchgängige Digitalisierung benötigt. Diese Anforderungen sind nicht neu, sie sind auch nicht revolutionär sondern die Folge einer permanenten Weiterentwicklung. Diese Evolution ist ein langjähriger Prozess, der schon lange begonnen hat und es existieren bereits Lösungen für viele der nachfolgend skizzierten Anforderungen, die unter anderem auch die zentralen

Grundbausteine für Industrie 4.0 sind. (ref. OPC UA - Wegbereiter der Industrie 4.0)

TODO - Umschreiben



## Kapitel 2

# Grundlagen

### 2.1 Historie

Seit dem Beginn des Industriezeitalters um 1800, welches mit der Mechanisierung (Industrie 1.0) startete, befindet sich die Industrie in einem stetigen Wandel. Sie entwickelte sich um 1900 durch die Massenproduktion zur Industrie 2.0 und in den 1970er Jahren durch die Automatisierung zur Industrie 3.0. Die Einteilung der Industriezeitalter ist durch tiefgreifende Veränderungen im technologischen Fortschritt möglich, welche auch als industrielle Revolution bezeichnet werden. Aktuell befinden wir uns in der Phase der 4. industriellen Revolution.

Die 1. industrielle Revolution fand mit der Erfindung der Dampfmaschine statt. Sie ermöglichte es Eisenbahnen und Dampfschiffe sowie verschiedene Maschinen im Kohleabbau oder in Textilfabriken anzutreiben und trug massiv zur Industrialisierung und der Entstehung der Industrie 1.0 bei. Nach und nach wurden immer mehr Produktionsanlagen errichtet und somit Arbeitsplätze in Infrastruktur, Textilfabriken, Häuserbau, Kohleabbau und anderen Bereichen geschaffen.

Die Erforschung der Elektrizität im 19. Jahrhundert war der Auslöser der 2. industriellen Revolution. Nachdem ab 1830 die Gesetze der Elektrotechnik bekannt waren, fand die Elektrizität eine breite Anwendung in der Industrie und im Alltag. Im Jahr 1913 führte Henry Ford das Fließband in der Automobilbranche ein. Im Zuge dessen musste jeder Arbeiter nur noch einen Arbeitsschritt erledigen, welches einerseits die Produktion wesentlich beschleunigte und eine Massenproduktion ermöglichte und andererseits eine hohe Spezialisierung der einzelnen Arbeitskräfte für ihre bestimmte Aufgabe erforderte. Außerdem wurde es durch die Luftfahrt

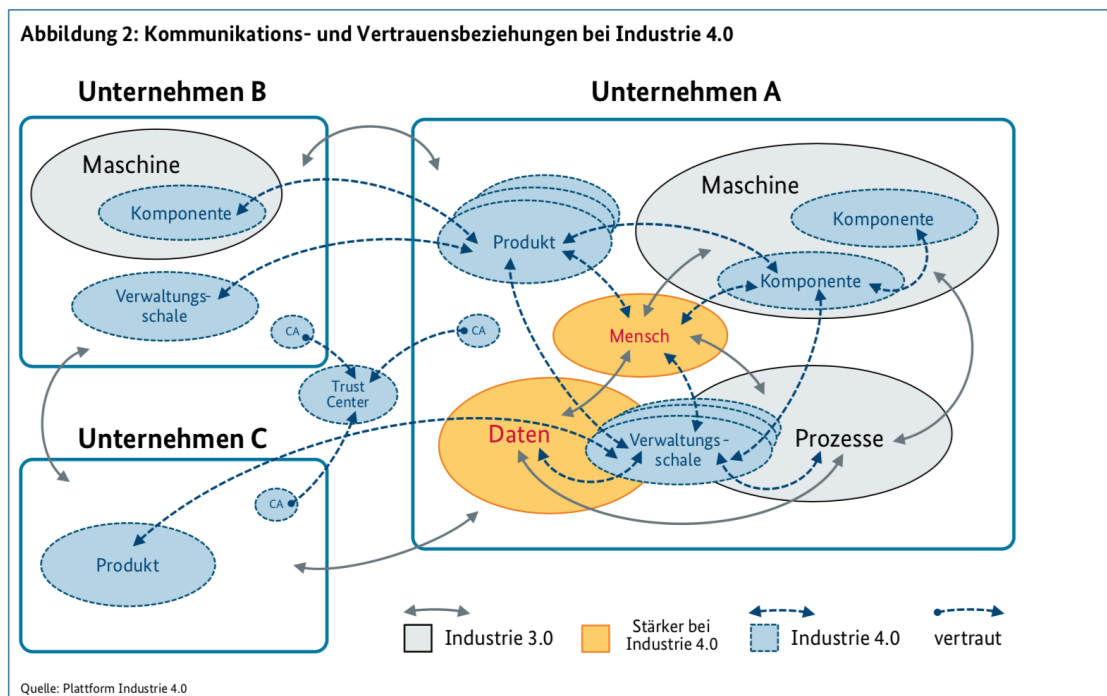
möglich Produkte wie Autos, Kleidung und Lebensmittel über Kontinente hinweg immer schneller zu transportieren und zu handeln.

Die 3. industrielle Revolution fand in den 1970er Jahren statt. Sie ist durch eine sukzessive (Teil-) Automatisierung der Prozesse und durch den Einzug der IT in die Industrie- und Verbraucherwelt geprägt. In den 1940er Jahren wurden die ersten Rechenmaschinen und programmierbare Steuerungen in Unternehmen eingesetzt. In den 1970er Jahren zog der Computer auch in den Privatbereich ein, wurde zunehmend beliebter und schaffte einen neuen Industriezweig. Der Fertigungsprozess in Fabriken wurde mehr und mehr von Maschinen übernommen. Durch den zunehmenden Einsatz von IT in Unternehmen entstand immer mehr Kommunikation zwischen Menschen und Maschinen. Diese Kommunikation und die anfallenden Daten wurden jedoch nur unternehmensintern verarbeitet. Es gab nur wenige Schnittstellen nach außen.

Das Ende des 20. Jahrhunderts gilt als der Beginn der 4. industriellen Revolution. Das Kennzeichen dieser Phase ist die zunehmende Digitalisierung. Mit ihr geht die technische Vernetzung physischer Gegenstände, dem Internet of Things (IoT), einher. Mehr und mehr Geräte oder Gegenstände besitzen die Möglichkeit aktiv durch Datenaustausch oder passiv z. B. mit Hilfe eines Bar- oder QR-Codes mit der digitalen Welt zu kommunizieren und somit eine fortschreitende Automatisierung sowie Individualisierung zu ermöglichen.

Im Gegensatz zur Industrie 3.0 sollen Maschinen autonom, auch über Unternehmensgrenzen hinweg, miteinander kommunizieren können um gesamte Geschäftsprozesse zu übernehmen. Dies setzt eine Öffnung der Unternehmen nach außen voraus und erzeugt durch die ständige Kommunikation eine große Menge an Daten, welche den Anforderungen der IT-Sicherheit gerecht werden müssen, um Verbraucher und Unternehmen zu schützen. In Abbildung 2.1 werden die Kommunikationsbeziehungen in der Industrie 4.0 und die Öffnung der Unternehmen nach Außen dargestellt.





**Abbildung 2.1:** Kommunikationsbeziehungen in einer Industrie 4.0 Umgebung - TODO ref. sichere Unternehmensübergreifende Kommunikation

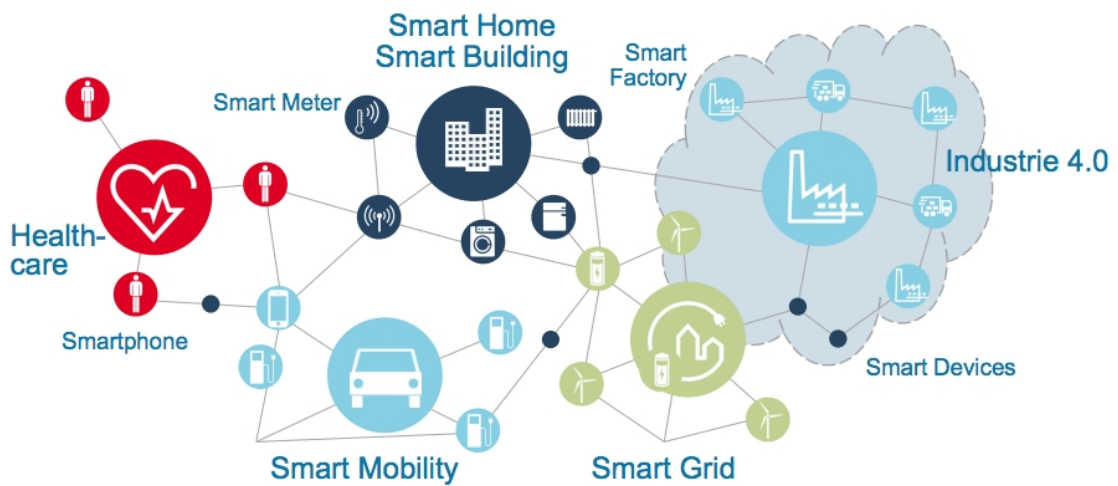
### 2.2 aktueller Stand der Technik

Der Prozess der vierten industriellen Revolution ist ein stetiger, nicht abgeschlossener Prozess. Aktuell werden die ersten Smart Factories der Industrie errichtet und erste smarte Einkaufsmöglichkeiten, wie Amazon Go und TODO - siehe Trumpf, für den Endverbraucher geschaffen. Diese Fabriken und Filialen stellen die ersten ihrer Art dar und dienen als Prototypen. Das Ziel des Wandels in der Strukturierung und Organisation der Produktion in Unternehmen ist eine immer weitere Automatisierung der Prozessabwicklung bis hin zu autonom arbeitenden Fabriken. Für kritische Infrastrukturen, wie z. B. im Energie-, Wasser-, Transport- und Gesundheitssektor existiert diese Verbindung bereits.

Die Umsetzung dieser Innovationen basiert hauptsächlich auf dem Fortschritt der Informationstechnik (IT) und dem Einzug der Internet-Technologien in die Industrie. Diese Entwicklung macht es möglich immer schneller Informationen auszutauschen, größere Datenmengen zu analysieren und diese zu verarbeiten. In der Industrie entstehen dadurch u. a. die folgenden Chancen:

- Die Kommunikationsinfrastruktur wird in Zukunft in Produktionssystemen so preiswert sein, dass sie sinnvoll für Konfiguration, Service, Diagnose, Bedienung und Wartung genutzt werden kann.
- Die Produktionssysteme werden mehr und mehr mit einem Netz verbunden, erhalten dort eine digitale Identität, werden somit such- und analysierbar und besitzen die Möglichkeit Daten über sich selbst zu veröffentlichen.
- Maschinen und Anlagen speichern ihre Zustände in ihrer digitalen Identität im Netz. Diese Zustände sind aktuell, aktualisierbar und zunehmend vollständig. Sind im Netzwerk viele solcher Identitäten vorhanden, können die Daten effizient abgerufen und ausgetauscht werden.
- Softwaredienste werden über das Netz verknüpft werden und können somit automatisiert individuelle Aufgaben durch die direkte Kommunikation der Systeme erledigen. Eine solche individuelle Wertschöpfung war bisher nur unwirtschaftlich oder gar nicht möglich.

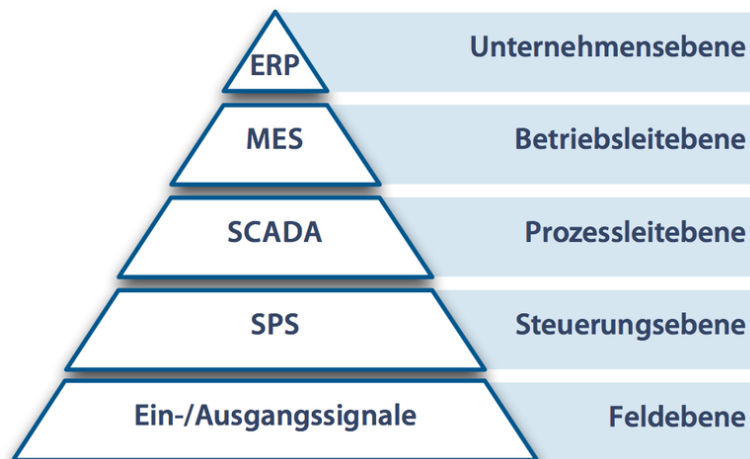
Diese Veränderungen im Wertschöpfungsprozess und die ständige Kommunikation der Systeme bereiten jedoch auch Probleme. Es entstehen große Mengen an Daten, welche u. a. über einen unsicheren Kanal verbreitet werden sollen. Des weiteren sind viele vorhandene Produktionsanlagen nicht für diese Form von vermaschter



**Abbildung 2.2:** Das Internet der Dinge - Plattform Industrie 4.0 2016

### 2.3.1 Automatisierungspyramide

TODO - Zusammenfassen mit Industrie 4.0 -> Automatisierungspyramide ist Bestandteil. Fertig. Die Automatisierungspyramide stellt die beteiligten Systeme und Softwarekomponenten eines automatisierten Prozesses systematisch dar. Diese beginnen, ausgehend vom Kundenauftrag und der betriebswirtschaftlichen Planung der Produktion auf der Unternehmensebene im Enterprise Resource Planning (ERP) System. Die Ergebnisse der Planung werden an das Manufacturing Execution System (MES) übergeben, welches die verschiedenen Fertigungs- oder Logistikaufträge generiert. Die Aufträge werden anschließend auf der Prozessleit- (SCADA), Steuerungs- (SPS) und Feldebene (Ein-/Ausgangssignale) bearbeitet.



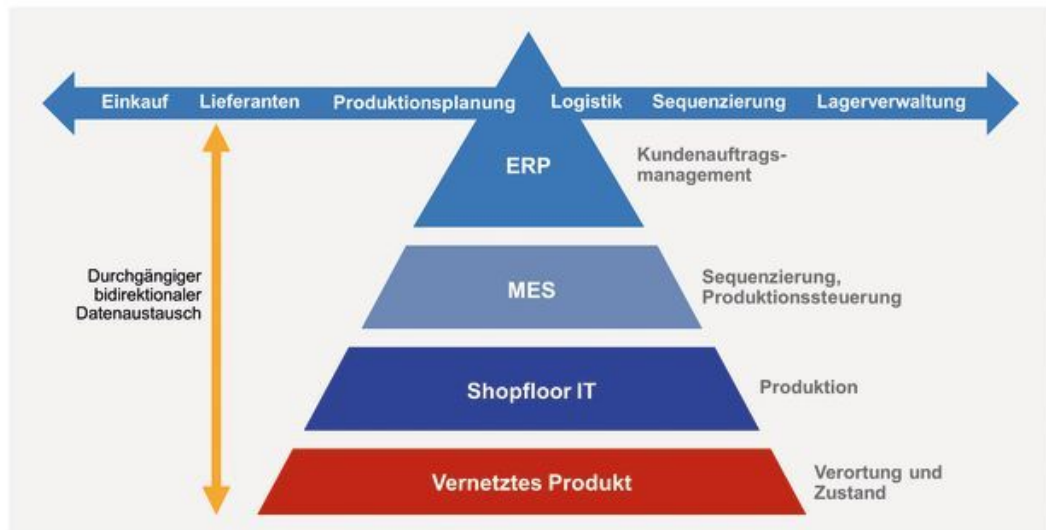
**Abbildung 2.3:** Automatisierungspyramide - TODO ref. Langmann,2004

Während die oberen Schichten der Pyramide (ERP und MES) durch Standardkomponenten bzw. -software der IT realisiert werden, zählen die unteren Schichten (Prozessleit- bis Feldebene) zur Automatisierung, welche die Steuerung und Kontrolle der technischen Anlagen übernimmt. Diese werden auch als Shop-Floor-Ebene bezeichnet. Sie sind durch spezielle Hard- und Softwarelösungen umgesetzt. Die Kommunikation dieser Systeme ist u. a. für spezielle Anwendungsfälle wie harte Echtzeitkommunikation mit Verzögerungen  $<1\text{ms}$  ausgelegt. Die Integration von Sicherheitsmaßnahmen bei der Kommunikation dieser Systeme stellt oft eine große Herausforderung dar.

### **2.3.2 Kommunikation in der Industrie 4.0**

Für Unternehmen bedeutet dies einen Wechsel von einer linearen Prozesskette hin zu einem vermaschten Netzwerk, in dem jede Komponente mit dem gesamten Netzwerk kommunizieren kann. Dies beinhaltet die Vernetzung der Komponenten auf horizontaler und vertikaler Ebene. Die vertikale Ebene stellt die technischen Komponenten dar und wird durch die Automatisierungspyramide beschrieben. Die horizontale Ebene beschreibt die wirtschaftlichen Geschäfts- bzw. Produktionsprozesse und besteht u. a. aus: Einkauf, Lieferanten, Produktionsplanung, Logistik, Sequenzierung und Lagerverwaltung. Das Ziel ist die Vernetzung aller Beteiligten.

### Horizontale und vertikale Integration



**Abbildung 2.4:** horizontale und vertikale Integration - TODO ref. HP Industry-of-things siehe bookmark

### **Kommunikationsstrukturen**

TODO

**End2End** Die Komponenten der Industrie 4.0 Umgebung kommunizieren über einen direkten Kanal miteinander. Dies setzt voraus, dass sich beide Teilnehmer in einem Netzwerk befinden, welches die benötigten Dienste wie z. B. Internet Protocol (IP) und DNS zur Kommunikation bereitstellt. Des weiteren müssen beide Systeme diese Dienste und Protokolle unterstützen.

**Gateways** Um existierende Systeme, welche selbst nicht Industrie 4.0 konform kommunizieren oder zu wenig Rechenleistung besitzen, in die Industrie 4.0 Welt zu integrieren, werden Industrie 4.0 Gateways genutzt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Systeme hinter den Gateways nicht als Industrie 4.0 Komponenten entwickelt wurden und somit auch keine oder nur wenige dieser Eigenschaften besitzen. Des Weiteren ist es möglich, dass die Kommunikation aus Leistungsgründen oder besonderer Anforderungen über optimierte, proprietäre Protokolle stattfindet. Die Gateways müssen auf die Systeme und deren Protokolle individuell konfiguriert werden, um die Funktionalitäten im Industrie 4.0 Netz bereitstellen zu können, und die Kommunikation zu schützen.

**Publish-Subscribe** Das Publish-Subscribe Modell bietet die Möglichkeit Informationen an mehrere Teilnehmer zu verteilen. Hierbei melden sich die Empfänger beim Verteiler an und wählen aus, über welche Nachrichtentypen sie informiert werden möchten. Diese Verteildienste nutzen zur besseren Skalierung und Reduzierung der Netzlast häufig Datagramme wie UDP. Durch die Nutzung von Datagrammen geht jedoch die Fehlertoleranz verloren. Somit muss entweder dafür gesorgt werden, dass eine sehr zuverlässige Netzwerkinfrastruktur vorhanden ist und hohe Bandbreitenreserven geschaffen werden, um die Dienstgüte (QoS) sicherzustellen oder dieses Modell nur für fehlertolerante Kommunikation wie z. B. Audio- und Video-Anwendungen oder Businessprozesse zu nutzen.

TODO - Netzlast bei

**Kommunikation mit Netzwerk als Partner** Zeitkritische Automatisierungsanwendungen verlangen besondere Netzwerkeigenschaften. Sie können auf Latenz oder

Jitter angewiesen sein. Um diese Eigenschaften sicherzustellen, ist es sinnvoll in diese Netze eine Industrie 4.0 Schnittstelle zu integrieren. Somit ist es den Teilnehmern möglich, über die Verwaltungsschale sicherzustellen, dass das Netzwerk die erforderlichen Anforderungen bereitstellt. Plattform Industrie 4.0 2017

TODO - Bilder -> sichere-kommunikation-i40 TODO - mehr Analyse.

### 2.3.3 Internet of Things/Industrial Internet of Things

IoT beschreibt ein verbraucherorientiertes Konzept für die Nutzung von digitalisierten und vernetzten Systemen. Hierbei werden die physischen Systeme virtuell abgebildet. Dies wird genutzt, um die Effektivität der Systeme zu verbessern und intelligente Services zu nutzen. Das Industrial Internet of Things (IIoT) beschreibt den Gebrauch von IoT-Technologien im industriellen Raum.

Das IoT ist ein wesentlicher Bestandteil der Industrie 4.0, welche Netzwerke aus Systemen, Daten und Dienstleistungen herstellt, in denen diese Komponenten miteinander kommunizieren. Für die Kommunikation haben sich, je nach Anforderungen, verschiedene Protokolle, wie z.B. Hypertext Transfer Protocol (HTTP), CoAP, Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP) und MQTT, etabliert. Jedes dieser Protokolle besitzt für spezifische Anforderungen wie Skalierbarkeit, vorhandene Ressourcen, Echtzeitkommunikation oder Sicherheit Vor- und Nachteile.

TODO - IIoT

## 2.4 Normen und Standards

Im Gegensatz zur Industrie 3.0, in welcher Daten auf lokaler Ebene oder zwischen einzelnen internen Unternehmensebenen ausgetauscht wurden, stellt der Datenaustausch und Informationsfluss im vermaschten Industrie 4.0 Netzwerk einen wesentlichen Bestandteil dar. Aktuell gibt es zwei Architekturmodelle zur Umsetzung von Industrie 4.0 Umgebungen. Diese setzen sich aus dem von der Plattform Industrie 4.0 entwickelten Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) und der Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) der Industrial Internet Consortium (IIC) zusammen. Beide Modelle verfolgen verschiedene Integrationsansätze.



Des Weiteren findet die Kommunikation in der Industrie 4.0 nicht mehr über einzelne, vorgegebene Schnittstellen statt, sondern direkt von den Produktionssystemen, also den unteren Ebenen der Automatisierungspyramide. Um dies zu ermöglichen, ist es notwendig, eine einheitliche Kommunikation durch Normen und Standards herzustellen, um eine unternehmensübergreifende Kommunikation dieser Shop-Floor IT zu ermöglichen.

### **2.4.1 TCP/IP Referenzmodell**

Unternehmensübergreifende Kommunikation in Industrie 4.0 Umgebungen findet im wesentlichen über IP-Netze statt. Diese basieren auf dem TCP/IP Referenzmodell, welches ein Schichtenmodell ist und die vier Schichten der Internetprotokollfamilie beschreibt. Sie setzen sich aus Application-, Transport-, Internet- und Link-Layer zusammen. Die Schichten des TCP/IP Referenzmodells überlagern sich mit den Schichten des ISO/OSI Referenzmodells.

#### ***Application Layer***

Die Anwendungsschicht ist für die Übertragung der Nutzdaten zwischen verschiedenen Anwendungen zuständig. Dabei kann es sich um entfernte Anwendungen handeln. Diese sollen sich für den Benutzer verhalten, als würden sie lokal ausgeführt werden.

TODO - Prozess- und Businesslogik

#### ***Transport Layer***

Die Transportschicht sorgt für die Kommunikation zwischen Prozessen. Die Transportschicht nutzt Ports um verschiedene Dienste zu adressieren. Sie beeinflusst, ob es sich um eine zuverlässige Verbindung ( TCP ) oder nicht ( UDP ) handelt.

TODO - End2End Security

### ***Internet Layer***

Die Internetschicht wird genutzt, um Daten von einem Teilnehmer im Netzwerk zum anderen zu übertragen. Die Endpunkte im Netzwerk werden durch IP Adressen beschrieben.

### ***Link Layer***

Der Bitübertragungsschicht beschreibt die Topologie des Netzwerks. Sie stellt die physikalische Verbindung der Netzwerkteilnehmer zur Verfügung.

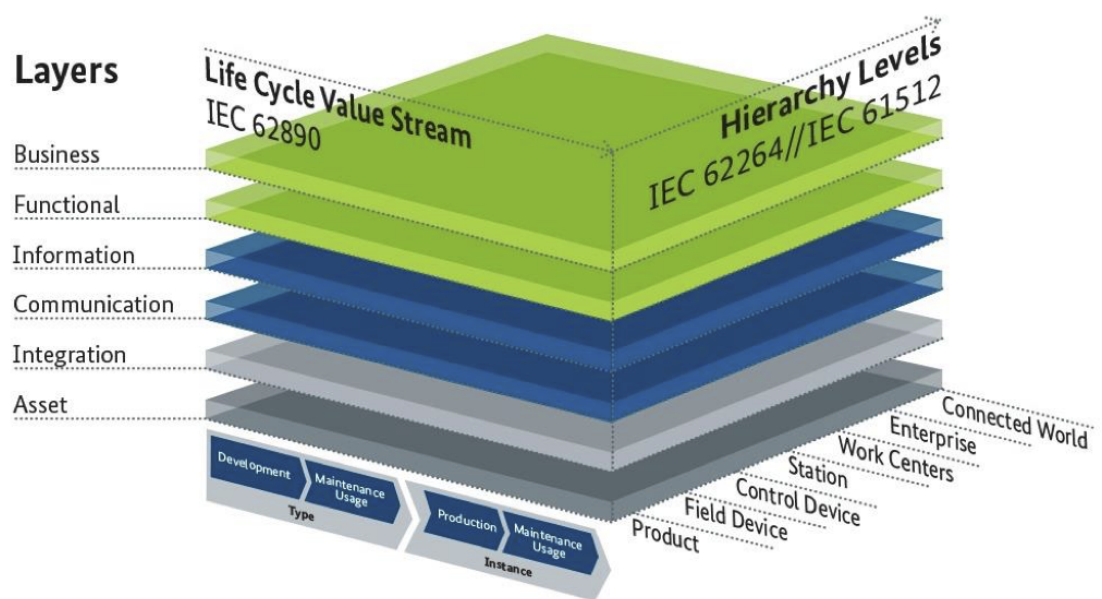
TODO - Bild Internetprotokollfamilie TODO - Mit Bild nur kurz erklären und referenzieren, Überschriften entfernen.

## **2.4.2 Industrie 4.0 Referenzarchitekturen**

### ***RAMI4.0***

Um eine flächendeckende Vernetzung zu ermöglichen, muss eine einheitliche Kommunikation geschaffen werden. Die RAMI4.0 ist eine dreidimensionale Darstellung aller Teilnehmer einer Industrie 4.0 Umgebung und stellt ein Modell einer Service Oriented Architecture (SOA) dar. Sie soll eine Verwaltungsschale für Teilnehmer bilden, um eine standardisierte Kommunikation und einfache Inbetriebnahme neuer Komponenten ermöglichen. Plattform Industrie 4.0 2016 Die Achsen des RAMI4.0 bestehen aus:

- Achse 1 - Die Hierarchie zeigt die Anlagen, Maschinen sowie das Endprodukt, welche miteinander Vernetzt sind. In diesem Netzwerk werden Funktionen bereitgestellt und Daten ausgetauscht.
- Achse 2 - Die Architektur beschreibt - TODO
- Achse 3 - Der Produktlebenszyklus wird im Gegensatz zur Industrie 3.0 in das Netzwerk mit eingebunden. Der gesamte Prozess der Produktion, Wartung bis hin zur Verschrottung soll digital erfasst werden.



**Abbildung 2.5:** RAMI 4.0 - Plattform Industrie 4.0 2016

Nach dem RAMI4.0 stellt der Communication Layer das Bindeglied zwischen dem Integration Layer, welcher Eigenschaften der physischen Welt für Computersysteme erreichbar macht, und dem Information Layer, welcher die Funktionsbezogenen Daten beinhaltet, dar (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016a). Jeder Teilnehmer der Architektur wird als Asset bezeichnet und besitzt seine eigene Verwaltungsschale, welche als Schnittstelle zum Austausch von Informationen dient. Die Verwaltungsschale ist der Übergang zwischen der physischen zur digitalen Welt.

TODO - Kommunikation beschreiben - Assets, Verwaltungsschale  
TODO - genauer auf die einzelnen Komponenten eingehen! - Assets, Architektur, Komponenten, Verwaltungsschale  
TODO - Architektur wichtig SOA beschreiben -> Angriffsvektoren  
TODO - siehe DIN 91345  
TODO - Anforderungen an diese Komponenten unterschiedlich

### **IIRA**

Das IIC veröffentlichte im Jahr 2015 die IIRA. Sie beschreibt eine standardbasierte, offene Referenzarchitektur für IIoT, welches auf dem Industrial Internet Architecture Framework (IIAF) basiert. Das IIAF unterstützt die Unternehmen bei der Entwicklung, Dokumentation, Kommunikation und Bereitstellung von Systemen im IIoT Bereich Industrial Internet Consortium 2017. Die Beschreibung der Architektur findet mit einem hohen Maß an Abstraktion statt, um das breite Feld der verschiedenen Industrielösungen abdecken zu können und standardisierte Vorgehensweisen zu ermöglichen. Das IIAF folgt der Vorgehensweise des ISO/IEC/IEEE Standard 42010:2011<sup>1</sup>. Die Anforderungen beinhalten niedrige Latenzen und Schwankungen, einen hohen Durchsatz, Skalierbarkeit, Ausfallsicherheit, Datensicherheit und QoS.

Die IIRA ist das Ergebnis der Anwendung des IIAF auf die IIoT Systeme eines Unternehmens. Sie beschreibt bekannte Risiken beim Betrieb von IIoT Systemen in verschiedensten Industriebereichen und Klassifiziert diese mit ihren zugehörigen Stakeholdern in Viewpoints. Anschließend dient die Referenzarchitektur der Beschreibung, Analyse und Behebung dieser Bedenken/Risiken in den einzelnen

---

<sup>1</sup>ISO/IEC/IEEE Standard 42010:2011 - Systems and Software Engineering—Architecture Description

Viewpoints. Abbildung 2.6 beschreibt die grundlegende Idee und den Aufbau der IIRA.

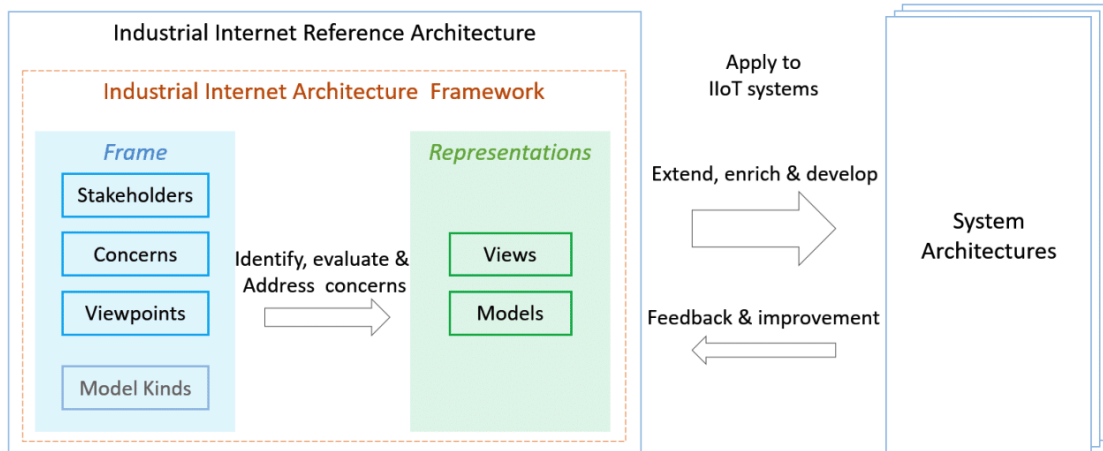


Abbildung 2.6: IIAF/IIRA - Übersicht

Die IIRA ist ein anerkannter, in der Industrie verbreiteter Standard. Da die Analyse der Netzwerksicherheit Testsystem (Weber 2018) durchgeführt werden soll, welches den Kommunikationsstandard OPC UA implementiert und sich am Referenzarchitekturmodell RAMI4.0 orientiert, wird sich im weiteren Verlauf der Thesis ausschließlich auf die in der IEC 62541<sup>2</sup> beschriebene Architektur als Referenzmodell bezogen.

### 2.4.3 Protokollstandards

Durch die vorausgesetzte M2M-Kommunikation wurde die Entwicklung neuer Protokolle zum effizienten Informationsaustausch vorangetrieben, welche es ermöglichen sollen, eine Standardisierung bereitzustellen und somit eine herstellerübergreifende und plattformunabhängige Kommunikation zu ermöglichen. Hierbei haben sich bzgl. der Referenzarchitekturen RAMI4.0 und IIRA die M2M-Kommunikationsstandards OPC UA und Data Distribution Services (DDS) etabliert.

#### **OPC UA**

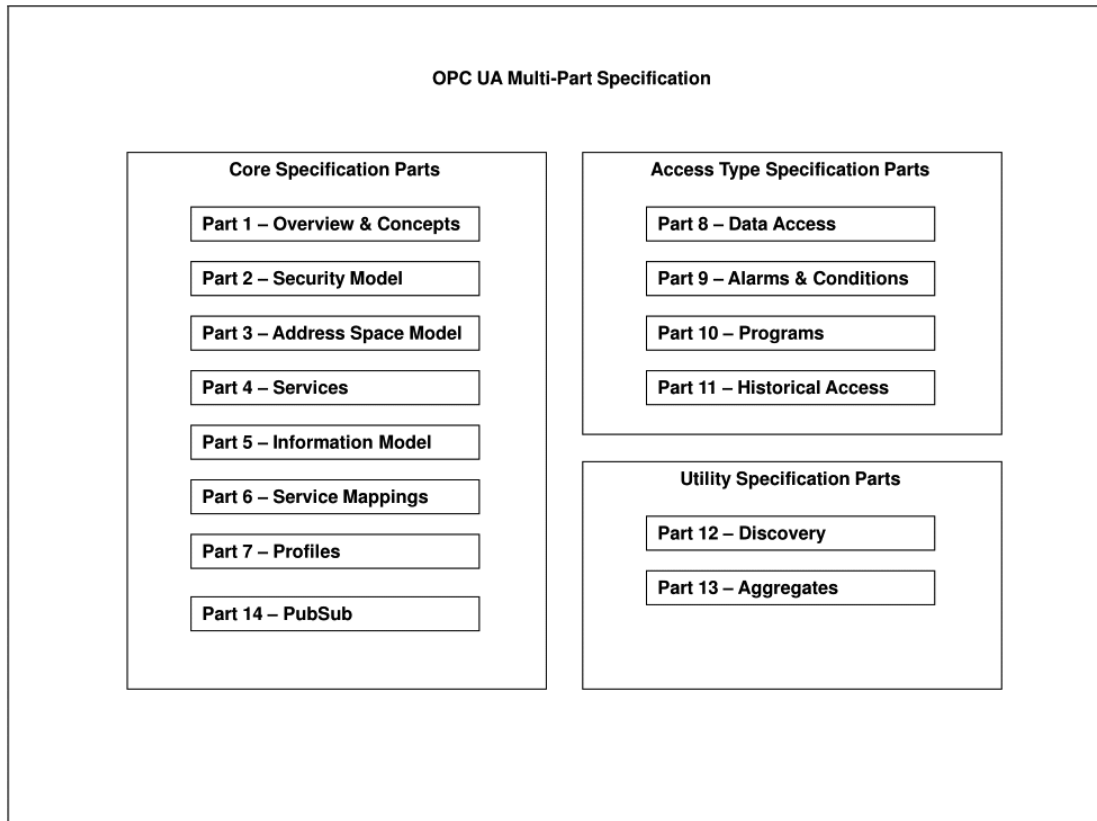
TODO - OPC UA ist in der International Electrotechnical Commission (IEC) 62541 als offener Standard definiert und erstreckt sich über Communication- und Information Layer des RAMI4.0. Es vereint Daten- und Informationsdienste und stellt einen sicheren, zuverlässigen und plattformübergreifenden Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Geräten und Systemen der Industrie bereit. Es wird die Kommunikation über die verschiedenen Schichten der Anwendungspyramide von der Feldebene bis zur Unternehmensebene ermöglicht (OPC Foundation 2014). OPC UA stellt ein Informationsmodell mit Hilfe einer SOA bereit, erfüllt die Anforderungen des RAMI4.0 und etabliert sich zunehmend im Maschinen- und Anlagenbau.

OPC UA wird in 14 geschichteten Spezifikationen beschrieben, welche sich in die Bereiche *Core*, *Access Type* und *Utility* unterteilen lassen. Dabei stellen die Spezifikationen 1-7 sowie 14 die Kernfunktionalitäten des Architekturmodells dar. Sie beschreiben die Struktur des OPC Addressraums und der Dienste, die darauf operieren. Die Spezifikationen 8-11 wenden diese Kernfunktionalitäten auf spezifi-

---

<sup>2</sup>IEC 62541 - Link: TODO - RAMI4.0

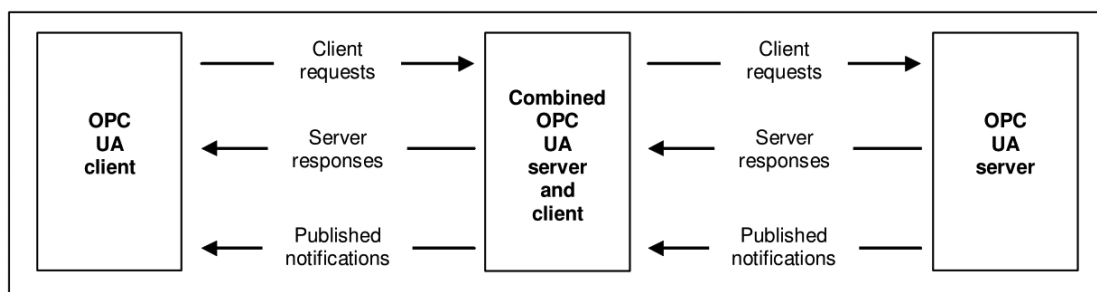
sche Open Platform Communications (OPC COM) Spezifikationen, wie Data Access (DA), Alarms and Events (A&E) und Historical Data Access (HDA) an. Die Teile 12 und 13 beinhalten Mechanismen zur Discovery von Systemen und beschreiben Möglichkeiten der Datenaggregation.



**Abbildung 2.7:** OPC UA Multi-Part Specification - OPC Foundation 2018a

Das Lesen- und Schreiben von Daten und die Kommunikation in Industrie 4.0 Umgebungen findet nach RAMI4.0 durch die Verwaltungsschale der Komponenten statt. Diese wird im OPC UA Stack durch den Adressraum beschrieben. Der Adressraum wird zur Speicherung von Knoten, deren Attribute und Referenzen zu anderen Knoten genutzt. Der Adressraum und das Informationsmodell von OPC UA werden in den Spezifikationen 3 **opcpc3** und 5 OPC Foundation 2018c definiert.

OPC UA ermöglicht die Kommunikation der Assets über ein Client-Server Pattern. Die Architektur setzt sich dabei aus einem OPC UA Client und einem OPC UA Server zusammen. Der OPC UA Server stellt verschiedene Funktionen bereit, auf welche der OPC UA Client mit Hilfe eines Request zugreifen kann. Des Weiteren ist es möglich durch einen Request des OPC UA Clients ein Element des Servers beobachten zu lassen, um bei Änderungen vom Server benachrichtigt zu werden. Um die Kommunikation zwischen OPC UA Servern zu gewährleisten, wird ein OPC UA Client in einen OPC UA Server integriert. In der Grafik Abbildung 2.8 wird das Client-Server Pattern der OPC UA Spezifikation schematisch dargestellt. Die linke Seite der Grafik beschreibt die Kommunikation zwischen einem Client und einem Server mit eingebettetem Client. In der rechten Seite der Grafik findet die Kommunikation zwischen dem eingebetteten Client und einem OPC UA Server statt.



**Abbildung 2.8:** OPC UA Client-Server Architektur - OPC Foundation 2018a



Im Jahr 2018 wurde der Standard zusätzlich um eine Spezifikation für das Publish-Subscribe Modell erweitert (Hoppe 2018). Das Publish-Subscribe Modell ermöglicht die Nutzung von OPC UA in Wide Area Network (WAN) Umgebungen und die Verwendung von Protokollen wie MQTT und Advanced Message Queuing Protocol (AMQP), während die Ende zu Ende Sicherheit und die standardisierte Datenmodellierung erhalten bleiben. Im Publish-Subscribe Modell wird das fehlertolerante Datagramm UDP als Transportprotokoll verwendet, wodurch geringe Latenzen bei der Kommunikation ermöglicht werden.

### **DDS**

DDS ist ein weiterer offener Standard der Open Management Group (OMG) und stellt eine Message oriented Middleware (MOM) zur Kommunikation in hochdynamischen verteilten Systemen dar. Er wurde für niedrige Latenzzeiten, einen hohen Datendurchsatz und eine skalierbare, belastbare und sichere Datenverteilung entwickelt, um die Kommunikation in Steuerungs- und Kontrollaufgaben zu realisieren. Der beschriebene Standard deckt alle Anforderungen der IIRA ab und hat sich bereits in industriellen Systemen etabliert. Gegenüber OPC UA beschreibt DDS eine dezentralisierte Architektur. Es bietet ein Konnektivitäts-Framework, welches ein Kommunikationsparadigma basierend auf einem Shared Data Model, einen Standard für die Definition domain-spezifischer Informationsmodelle, ein starkes Sicherheitsmodell, Discovery und reichhaltige APIs beinhaltet. Die Kommunikation findet direkt vom Publisher zum Subscriber statt. Dabei werden Latenzzeiten reduziert und durch die Nutzung von Broad- und Multicast die Netzlast beim Bereitstellen von Informationen an viele Empfänger gering gehalten. Es ist möglich die MOM DDS in eine OPC UA Architektur zu integrieren und mit dem Informationsmodell nutzen.

## **2.5 Anforderungen an Industrie 4.0 Umgebungen**

Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzbereiche von Industrie 4.0 Systemen, unterscheiden sich auch dementsprechend deren Anforderungen. Um eine sichere Kommunikation in diesen Umgebungen bereitzustellen dienen die Grundprinzipien der sicheren Kommunikation. Die Referenzmodelle RAMI4.0 und IIRA beschreiben

ebenfalls drei Anforderungen an den Übertragungskanal: Sicherheit, Verfügbarkeit und QoS (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016a).

### 2.5.1 Grundprinzipien der sicheren Kommunikation

TODO - in Bezug auf Industrie 4.0 ... oder Anforderungen an Industrie 4.0 Umgebungen basieren auf Grundprinzipien der sicheren Kommunikation Die Grundprinzipien der sicheren Kommunikation beschreiben die Schutzziele im Bereich der Informationssicherheit. Diese verdeutlichen den Anspruch an die Sicherheit an ein zu implementierendes System oder ein Netzwerk. Sie stellen einen vereinbarten Umfang gegen Bedrohungen dar, welcher von den Kommunikationspartnern gewährleistet wird und nachgewiesen werden kann. Diese klassischen Schutzziele sind auch für Industrie 4.0 Umgebungen zutreffend. Die weitreichende Vernetzung der Systeme in der Industrie 4.0 erfordert jedoch weitere Schutzziele, um einen rechtskonformen Umgang oder besondere Anforderungen sicherzustellen.

#### ***klassische Schutzziele***

TODO - Hierunter fallen die Bereiche Netzsicherheit und Datensicherheit, Sichere Identitäten und funktionale Sicherheit. Netzsicherheit und Datensicherheit werden in der AG3 der Plattform Industrie 4.0 adressiert. Die UAG Netzkommunikation arbeitet bzgl. dieser Punkte mit der AG3 zusammen. Zum Thema „Security und funktionale Sicherheit“ arbeitet die AG3 mit dem DKE-TBINK AK IT Security und Security by Design zusammen. Hinsichtlich funktionaler Sicherheit gibt es Anforderungen von Seiten IEC 61784-3. Diese müssen bei der Definition neuer Systeme berücksichtigt werden. - TODO

- Vertraulichkeit/Zugriffsschutz
- (Daten)-Integrität/Änderungsschutz
- Authentizität/Fälschungsschutz
- Verfügbarkeit

### **weitere Schutzziele**

- Verbindlichkeit/Nichtabstreitbarkeit: TODO - z.B. rechtliche Anforderungen
- Anonymität

### **2.5.2 Anforderungen der Referenzmodelle**

#### **Sicherheit**

- Netzsicherheit und Datensicherheit
- Sichere Identitäten
- funktionale Sicherheit

#### **Verfügbarkeit**

Die ständige Verfügbarkeit von Daten und Diensten spielt in der Industrie 4.0 eine bedeutende Rolle, um den Datenaustausch zwischen zwei Kommunikationspartnern im Netz jederzeit zu ermöglichen. Als Verfügbarkeit wird die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, dass ein System innerhalb eines bestimmten Zeitraumes erreichbar ist. Ein System gilt als verfügbar, wenn es erreichbar ist und die für es vorgesehenen Aufgaben erledigen kann.

Die Verfügbarkeit eines Systems wird in Verfügbarkeitsklassen gegliedert. Diese beschreiben Verfügbarkeitswahrscheinlichkeiten von 99% ( Verfügbarkeitsklasse 2 ) bis 99,9999% ( Verfügbarkeitsklasse 6 ). Eine exakte Definition, wann ein System hochverfügbar ist, gibt es nicht - TODO ref. Im Allgemeinen wird ab Verfügbarkeitsklasse 3 ( 99,99% ) von Hochverfügbarkeit gesprochen.

TODO - Verfügbarkeit gewährleisten durch...

#### **QoS**

TODO - QoS

### 2.5.3 Security by Design

In der Vergangenheit wurden Sicherheitsmechanismen üblicherweise nachträglich und reaktiv in die Entwicklung von Komponenten mit einbezogen. Industrie 4.0 Umgebungen erfordern umfassende Maßnahmen, um die in Unterabschnitt 2.5.1 beschriebenen Schutzziele zu erfüllen und eine sichere Kommunikation zu gewährleisten. Dies gilt vor allem für Maschinenbau- und Fertigungsunternehmen, welche häufig proprietäre Individualsoftware zur Steuerung der Maschinen einsetzen DTAG 2016. Aus der Notwendigkeit, Sicherheitsaspekte bereits in die Softwareentwicklung mit einzubeziehen und einen Schutz der Kommunikation zu gewährleisten, hat sich der Begriff *Security by Design* entwickelt.

Die Methoden und Ziele der Angreifer stehen jedoch auch unter einem ständigen Wandel. Somit ist es nicht möglich, eine Sicherheitsimplementierung zu entwickeln und diese wiederholt einzusetzen. Vielmehr ist es notwendig, die Sicherheit durch *Security by Design* so weit als möglich proaktiv herzustellen und gleichzeitig im Schadensfall flexibel und rasch zu reagieren, um das Schadensausmaß zu begrenzen. Es sind Maßnahmen zur Prävention, Detektion und Reaktion erforderlich (Platform Industrie 4.0 2015). Die Referenzarchitekturen RAMI4.0 und IIRA sowie die in den Architekturmodellen genutzten Techniken OPC UA und DDS haben das Konzept des *Security by Design* in ihre Kernbestandteile mit aufgenommen.

## 2.6 Testsystem

Die aus der Analyse hervorgehenden möglichen Schwachstellen und Bedrohungen im Bereich der Netzwerksicherheit in Industrie 4.0 Umgebungen und deren Auswirkungen sollen anhand eines vorhandenen, prototypischen Industrie 4.0 Testsystems Weber 2018 veranschaulicht werden. Das vorhandene System setzt die drei Schichten der Software-Architektur (Verteilungs-, Baustein- und Laufzeitschicht) nach Starke / Hruschka um. Die Netzwerkkommunikation wird über das Protokoll OPC UA realisiert, welches die Anforderungen der Industrie 4.0 und RAMI4.0 umsetzt.

### **2.6.1 Architektur**

Das vorhandene System ist, aufgrund der vorgesehenen Einsatzgebiete Lehre, Integrations- und Sicherheitstests, als virtuelle Maschine (VM) umgesetzt worden. Dies ermöglicht es die Testinfrastruktur vom restlichen Netz zu kapseln. Das Betriebssystem der VM stellt eine Firewall bereit, welche unerwünschten Netzwerktraffic von oder zu dem System verhindert. Um eine gute Erweiterbarkeit der Testumgebung und Modularisierung der Komponenten zu erreichen, werden die einzelnen Industrie 4.0 Komponenten mit Hilfe der Containerlösung Docker isoliert ausgeführt, verwaltet und deren Netzwerkkommunikation sichergestellt. Durch den zusätzlichen Einsatz des Deploymentsystems Kubernetes wird ein verteiltes Ausführen des Systems ermöglicht und somit eine gute Skalierbarkeit erreicht.

### **2.6.2 Komponenten**

***Repository***

***Discovery Server***

***Public-Key Infrastructure (PKI)***

***Identity Provider***

***Verwaltungsinterface***

***Scheduler***



## **Kapitel 3**

# **Analyse**

Im folgenden Kapitel wird die Analyse der Netzwerksicherheit in Industrie 4.0 Umgebungen durchgeführt. Zuerst wird eine Beschreibung und Einordnung der Bedrohungen von Industrie 4.0 Systemen anhand der in Unterabschnitt 2.5.1 genannten Schutzziele und der aktuellen Industriestandards Abschnitt 2.4 durchgeführt. Anschließend werden, aufgrund der bestehenden Infrastruktur und der Heterogenität der Netzwerklandschaft der Industrie, verschiedene Integrationsansätze für einen standardisierten Datenaustausch beschrieben. Die dabei etablierten Techniken und Protokolle des IoT und IIoT sowie neue M2M Kommunikationswege der Industrie 4.0 werden nach den Schichten des TCP/IP Referenzmodells untersucht, um eine strukturierte Vorgehensweise zu ermöglichen und ein ganzheitliches Bild der Netzwerkkommunikation zu erhalten. Die Ergebnisse der Analyse sollen genutzt werden, um verschiedene Anwendungsszenarien am Industrie 4.0 Testsystem (Weber 2018) durchzuführen.

### **3.1 Bedrohungen**

Die vierte industrielle Revolution, das IIoT und dessen Vielzahl an aktiven und passiven Elementen stellen in ihrer Komplexität eine große Herausforderung für die IT-Sicherheit dar. Einerseits muss die Sicherheit der laufenden Software, der Infrastruktur, Anwendungs- und Rechnersysteme gewährleistet werden, andererseits muss die Betriebssicherheit der Geräte und Anlagen, welche mit dem Internet verbunden sind sichergestellt werden. Das Management der IT-Sicherheit in Industrie 4.0 Netzen geht über Unternehmensgrenzen hinweg, da Netze und Systeme für

Kunden, Lieferanten und Partner bereitgestellt werden (DTAG 2016). Somit hat sich auch die Bedrohungslage der Netze geändert. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) beschreibt die Top 10 Bedrohungen und deren Folgen für Industrial Control System (ICS) in Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2016.

1. Social Engineering und Phishing
2. Einschleusen von Schadsoftware über Wechseldatenträger und externe Hardware
3. Infektion mit Schadsoftware über Internet und Intranet
4. Einbruch über Fernwartungszugänge
5. Menschliches Fehlverhalten und Sabotage
6. Internet-verbundene Steuerungskomponenten
7. Technisches Fehlverhalten und höhere Gewalt
8. Kompromittierung von Extranet und Cloud Komponenten
9. Denial of Service (DoS) und Distributed Denial of Service (DDoS)
10. Kompromittierung von Smartphones im Produktionsumfeld

TODO - Einordnung - Bezug auf Anwendungsszenarien

Um die in Unterabschnitt 2.5.1 genannten Schutzziele umzusetzen, ist es notwendig einen größtmöglichen Schutz gegen diese Bedrohungen bereitzustellen. Die Sicherheit eines Gesamtsystems kann nicht nur an einer einzigen Stelle im Kommunikationsstack hergestellt und gewährleistet werden. Es müssen alle Stellen des Kommunikationsstacks gegen Bedrohungen abgesichert werden (Plattform Industrie 4.0 2017). Dafür müssen die Netzwerkinfrastruktur und die eigentliche Kommunikation im Netzwerk gesichert werden. Dies geschieht durch die Abschottung von Systemen, die Einschränkung von Zugangsberechtigungen, die Härtung der Sicherheit der genutzten Komponenten sowie den Einsatz von geeigneten Netzwerkprotokollen und Verschlüsselungsverfahren.



## 3.2 Integrationsansätze

Die Grundlage der Industrie 4.0 Kommunikation ist ein standardisierter Datenaustausch über alle Schichten der Automatisierungspyramide hinweg. Dabei stellt der IEC-Standard OPC UA einen vielversprechenden Ansatz für einen standardisierten Informationsaustausch über Unternehmensgrenzen hinweg dar. Jedoch müssen auch bestehende Systeme in die Industrie 4.0 Kommunikation integriert werden. Dies führt häufig zu Problemen, da diese Systeme proprietäre Protokolle nutzen, besondere Anforderungen wie Echtzeitkommunikation besitzen oder gar keine Schnittstelle bereitstellen. Es bestehen grundsätzlich zwei Ansätze zur Integration dieser Anlagen. TODO - ref.

### 3.2.1 Konsolidierung der Netzwerkkommunikation

TODO - Eine Möglichkeit der Entwicklung zu einer Smart Factory ist die Konsolidierung der Netzwerkkommunikation. Fokus auf OPC UA, da standardisiert. TODO - neue Netze/Factories können so geplant werden, dass die Maschinen die benötigten Schnittstellen bereitstellen. Ansatz: teuer, aufwendig bzw. nicht möglich, da embedded System bzw. keine Ressourcen oder keine Schnittstellen

### 3.2.2 Gatewaykommunikation

Eine Alternative zur Umstellung der bestehenden Systeme stellt die Kommunikation über Gateways dar. Hierbei gibt es mehrere Softwarelösungen, welche unterschiedliche Ziele verfolgen. Es werden Systeme zur Anlagenoptimierung (TODO - ref. SePiA.Pro), der Bereitstellung einer offenen, branchenübergreifenden Plattform mit diversen Smart Services wie Datenanalyse und Flottenmanagement (TODO - ref. Siemens Mindsphere, DeviceInsight) und dem herstellerübergreifenden Gerätemanagement (AXOOM) entwickelt **acatec2016**. Die Systeme sammeln und verwalten die Daten der Anlagen an zentraler Stelle und stellen sie im Netzwerk zur Verfügung. Der Einsatzmöglichkeiten dieser Softwarelösungen sind von den vorhandenen Schnittstellen der Anlagen abhängig und benötigen eine individuelle Konfiguration um den unterschiedlichen Anforderungen der Industrielandschaft gerecht zu werden.

TODO - Softwareschwachstellen, Softwarefehler TODO - Herstellerabhängigkeit

### 3.3 Netzzugangsschicht

Die Netzzugangsschicht stellt die erste Instanz der Kommunikation in einem Netzwerk dar. Sie beinhaltet das Übertragungsmedium sowie die Topologie, in welcher die Kommunikation stattfindet. Das Übertragungsmedium bestimmt die Form der Signalübertragung. In Industrie 4.0 Netzen können neben der klassischen Kabelverbindung auch andere (instabile) Kanäle wie Mobilfunk oder Satelliten in Frage kommen. Um die Kommunikation über alle Medien sicher und zuverlässig zu gestalten, müssen auf technischer Ebene Protokolle genutzt werden, welche es ermöglichen die gegebenen Schutzziele zu realisieren und die Integrität der Daten bei der Übertragung über große Entfernungen zu gewährleisten. Dominante Technologien dieser Schicht sind Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.3 (Ethernet)<sup>1</sup>, IEEE 802.11 (Wireless LAN)<sup>2</sup> und IEEE 802.15.4<sup>3</sup> (Plattform Industrie 4.0 2017).

Aus zeitlichen Gründen wird keine weitere Analyse der verschiedenen Übertragungsmedien und deren Protokolle durchgeführt und sich im Rahmen dieser Thesis auf die Analyse von kabelgebundenen Ethernet-basierten Netzen, deren Topologie und Kommunikation beschränkt.

#### 3.3.1 physikalischer Zugang

Die Netzzugangsschicht beinhaltet als einzige Schicht des TCP/IP Referenzmodells nicht nur die verwendeten Protokolle zur Signalübertragung, sondern auch die physikalischen Gegebenheiten des Übertragungsmediums. Die Sicherheit dieser Netzwerkschicht beinhaltet somit nicht nur die verwendeten Techniken, sondern auch die physische Sicherheit der Systeme. Sie wird durch den Zugang zur Hardware dargestellt und besitzt eine große Bedeutung, um unbefugte Eingriffe in das Netzwerk zu verhindern. Die Sicherheit dieser Systeme wird durch die physikalische Abschottung mit Hilfe von abschließbaren Serverschränken, genereller Zugangskontrolle sowie der Abschaltung von Ports an Netzwerkkomponenten oder Endsyste-men gewährleistet. (Plattform Industrie 4.0 2017)

---

<sup>1</sup>Link zu IEEE 802.3

<sup>2</sup>Link zu IEEE 802.11

<sup>3</sup>Link zu IEEE 802.15.4

### 3.3.2 Topologie

Die Topologie eines Netzwerks bestimmt den physikalischen Weg der Netzwerkpakete über die Leitungen. In der Industrie werden je nach Anwendungsfall verschiedene Topologien, wie Punkt-zu-Punkt-, Bus-, Stern- oder auch Hybride-, zur Kommunikation im Netzwerk genutzt. Jede dieser Netzstrukturen bietet Vor- und Nachteile bzgl. Durchsatz, Administrationsaufwand und Skalierbarkeit (Burke 2013). Um die Grundidee der Industrie 4.0, die unternehmensübergreifende, intelligente Vernetzung von Produktionsressourcen umzusetzen, ist eine einheitliche Kommunikation notwendig. Industrie 4.0 Netze kommunizieren über TCP/IP Verbindungen und basieren auf dem *Ethernet*<sup>4</sup> Protokoll. Sie werden in über Gateways miteinander verbundenen Sterntopologien realisiert. Die Topologie eines Netzwerks bietet Schnittstellen, um Einfluss auf das Netzwerk zu nehmen. Selbst unbefugter Zugriff auf der untersten Schicht des TCP/IP Referenzmodells kann die Sicherheit der Datenübertragung oder die Funktionsweise des Netzwerks beeinträchtigen.

TODO - Beschreibung von Angriffen durch Eingriff auf Hardware; Verweis auf Anwendungsszenario in Internetschicht. TODO - Ansatz: Berechnung von Latenzzeiten, RTT, Auswirkungen aufzeigen, Congestion Window, Sliding Window

### 3.3.3 VLAN

TODO - Taggen von Frames, da keine Kommunikation im Schichtenmodell zwischen den Schichten stattfindet. Somit QoS schwierig, da es von allen Hardwarekomponenten unterstützt werden muss und nicht nur auf Anwendungsebene funktionieren kann.

### 3.3.4 ARP

TODO - praktisch nur wenn Tool vorhanden ist.

---

<sup>4</sup>Link zu IEEE Ethernet

### 3.3.5 vertikale Integration bestehender Komponenten

TODO - Feldbus, SPS, Anlagensteuerung (SCADA) -> Bindeglied zu IP-Netzen  
TODO - Ansatz: OPC UA Clients sind Gateways in Testumgebung -> Verweis auf Analyse in höheren Schichten  
TODO - Vieles in Praxis nicht umsetzbar darum größtmöglicher Schutz durch Abschottung.

## 3.4 Internetschicht

Auf der Internetschicht findet die Vermittlung der Datenpakete zwischen den Teilnehmern im Netzwerk statt. Auf dieser Schicht hat sich, mit dem Siegeszug des Internets, IP zum Standard für Netzwerkübergreifende Rechnerkommunikation durchgesetzt (Christoph Meinel 2011). Dies gilt auch für die immer komplexer werden den Industrienetzwerke und die Industrie 4.0.

Zu den Aufgaben der Internetschicht gehört das Bereitstellen von Adressen, das Routing, die Fragmentierung von Datenpaketen zur Übertragung im Netzwerk sowie die Sicherstellung der Dienstgüte. Um Routing und Adressvergabe in IP-Netzen zu realisieren, werden die Dienste DNS (Unterabschnitt 3.6.1) und DHCP (Unterabschnitt 3.6.2) genutzt. Das IP Adress Management (IPAM) und die Zuordnung der physikalischen Hardware zur logischen IP-Adresse erfolgt mit Hilfe des ARP. Da die Kommunikation in einem IP-Netz ohne diese Dienste und Protokolle nicht möglich ist, stellen sie einen wichtigen Bestandteil im Netzwerk dar und müssen vor Sabotage geschützt werden.

### 3.4.1 QoS

Eine Industrie 4.0 Netzwerkinfrastruktur kann aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die Systeme auf verschiedenste Weisen ausgeprägt sein. Die Heterogenität der Komponenten im Netzwerk und deren Anforderungen an die Kommunikation auf der vertikalen Ebene der Automatisierungspyramide Unterabschnitt 2.3.1 stellen eine Herausforderung für die Sicherheit der Datenübertragung dar und können die Umsetzung eines Netzwerks beeinflussen. Des Weiteren erstrecken sich Industrie 4.0 Umgebungen über weite Distanzen (Metropolitan Area Network (MAN), WAN, Global Area Network (GAN)) und sind somit auch von physikalischen Ge-

gebenheiten wie Latenz und Jitter betroffen. Diese Erscheinungen müssen berücksichtigt werden, um eine fehler- und verlustfreie, sichere Kommunikation zu gewährleisten Torscht 2014.

Für die Beurteilung und Bereitstellung der Dienstgüte in IP-Netzen müssen die Übertragungsgüte der Netzzugangsschicht sowie die übertragungstechnischen Parameter der Internetschicht (IP-Ebene) betrachtet werden. In IP-Netzen wird der Einfluss auf die QoS in den folgenden Parametern beschrieben:

- Latenzzeit: Dauer der Paketübertragung
- Jitter: Abweichung der Latenzzeit von ihrem Mittelwert
- Paketverlustrate: Wahrscheinlichkeit des Verlusts von IP-Paketen während der Übertragung
- Durchsatz: gemittelte Datenmenge pro Zeiteinheit

All diese Faktoren haben in einem paketorientierten Netzwerk, in welchem die Datenpakete nach dem *Best-Effort-Prinzip* versendet werden, auf die fehlerfreie Kommunikation aufgrund der durch *Ethernet* und IP bereitgestellten Fehler- und Flusskontrolle wenig Einfluss. Sie spielen jedoch bei zeitkritischen Anwendungen der Industrie 4.0 eine wichtige Rolle. Auf den niedrigeren Schichten des TCP/IP Referenzmodells ist es nicht möglich zwischen verschiedenen Datenpaketen der höheren Schichten zu unterscheiden. Um dieses Problem zu lösen werden auf Dienste mit besonderer Güte in VLANs aufgenommen und somit deren Pakete bereits auf der Netzzugangsschicht kenntlich gemacht (Unterabschnitt 3.3.3), um die Dienstqualität sicherzustellen. Des Weiteren müssen, um QoS in einem Netzwerk anzuwenden, diese Mechanismen auf der gesamten Übertragungsstrecke implementiert werden. Der Transport von Daten unterschiedlicher Priorität in Netzwerken wird in IEEE 802.1p und IEEE 802.1Q<sup>5</sup> beschrieben.

### 3.4.2 IPsec

TODO - Die Internetschicht bietet mit IPsec eine Möglichkeit den Datenfluss, im Vergleich zu anderen Verschlüsselungsverfahren, bereits auf der Internetschicht des TCP/IP Referenzmodells zu sichern.

---

<sup>5</sup>IEEE Std 802.1Q - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Bridges and Bridged Networks

### 3.5 Transportschicht

Während auf der Netzwerkschicht allein das Protokoll IP die Basis für die Vernetzung und Adressierung von Industrie 4.0 Systemen darstellt, wird das Protokoll der Transportschicht durch die Anforderungen an das Netzwerk bestimmt. Der wesentliche Teil der Kommunikation in der Industrie 4.0 erfolgt über ein IP Netzwerk, welches zum Datentransport das Protokoll TCP für *End2End* (Abschnitt 2.3.2) Kommunikation nutzt (Plattform Industrie 4.0 2017). Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, bieten sich in der Praxis bei besonderen Anforderungen wie der Verteilung von Informationen im Netzwerk oder zeitkritischen Automatisierungsanwendungen jedoch auch andere Strukturen für die Kommunikation wie *Publish-Subscribe* (Abschnitt 2.3.2) in Verbindung mit dem Datagramm UDP an.

Das Protokoll TCP sowie das Datagramm UDP sind für die Übertragung der Segmente im Netzwerk sowie das Multi-/Demultiplexing verantwortlich. Dabei spielt der Inhalt der zu übertragenden *payload* keine Rolle. Die Analyse der Sicherheit im Netzwerk auf dieser Schicht des TCP/IP Referenzmodells beschränkt sich somit ausschließlich auf die Form der Datenübertragung sowie der dafür genutzten Netzlast.

#### 3.5.1 TCP

Das Protokoll TCP<sup>6</sup> verfolgt das Prinzip eines *guaranteed delivery* und stellt eine zuverlässige Datenübertragung zwischen zwei *Hosts* (Unicast) bereit. Hierzu werden verschiedene Mechanismen zur Segmentierung der Daten, dem Verbindungsmanagement sowie der Fehler- und Flusskontrolle bereitgestellt. Diese Mechanismen, welche durch den Aufbau des des TCP Headers und die Nutzung von Timeouts und Algorithmen realisiert werden, sind für den Erfolg des Protokolls für zuverlässige, paketerorientierte *End2End* Kommunikation verantwortlich.

Ein wichtiger Bestandteil des TCP Verbindungsmanagements und der Fehlerkontrolle stellt der 3-Wege-Handshake beim Verbindungsaufbau sowie -abbau dar. Er wird mittels der *Sequence-* und *Acknowledgementnumber* sowie den zugehörigen *Flags* des TCP Headers (synchronise (SYN), synchronise-acknowledge (SYN-ACK), acknowledge (ACK), final (FIN)) realisiert. Während des Verbindungsaufbaus werden die Adresse des Clients sowie der Status der Verbindung im Speicher gehalten.

---

<sup>6</sup>Network Working Group 1981

Die folgende Abbildung zeigt schematisch den Ablauf eines TCP Verbindungsaufbaus zwischen Client und Server. Der Client sendet zuerst ein Paket mit SYN-Flag zum Server. Dieser bestätigt das eingetroffene Paket des Clients mit dem SYN-ACK Flag, inkrementiert die Sequenznummer  $x$  in seinem *acknowledgment number* Segment<sup>7</sup> und erzeugt eine neue Sequenznummer für das Antwortpaket. Der Verbindungsaufbau wird durch die Bestätigung des SYN-ACK Pakets durch den Client und den Empfang des ACK Pakets vom Server abgeschlossen. Die initiale Sequenznummer  $x$  des SYN Pakets sowie die initiale Sequenznummer  $y$  des SYN-ACK Pakets können von den Beteiligten frei bestimmt werden.

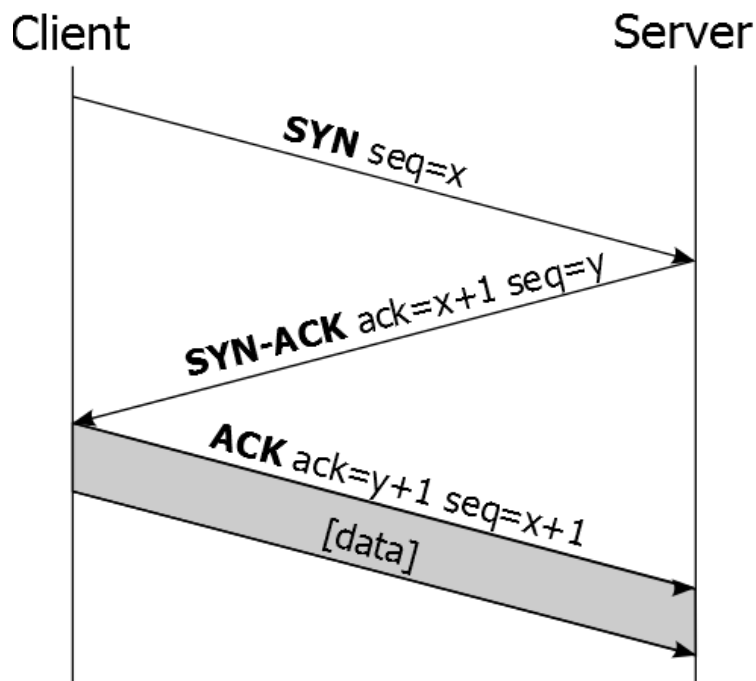


Abbildung 3.1: TCP Verbindungsaufbau

<sup>7</sup>text

#### ***SYN-Flood***

Der Mechanismus des 3-Wege-Handshakes kann durch einen SYN-Flood Angriff ausgenutzt werden und somit die Netz- und Systemlast manipuliert werden. Der SYN-Flood stellt eine Form des DoS bzw. DDoS Angriffs dar. Dabei werden zu einem gezielten TCP Dienst viele Pakete mit gesetztem SYN *Flag* gesendet, um einen Verbindungsaufbau zum Server vorzutäuschen. Nach Erhalt des Pakets sendet der Server dem Client ein SYN-ACK Paket um den Verbindungsaufbau zu initiieren und wartet auf Bestätigung. Diese Bestätigung wird vom Angreifer unterschlagen. Somit bleiben auf dem angegriffenen System Ressourcen dieser halb offenen Verbindung bis zum Erreichen eines Timouts belegt. Ein verteilter Angriff auf ein System kann dessen Ressourcen schnell komplett beanspruchen und somit zur Ablehnung jeglicher weiterer Verbindungen führen.

Die Kritikalität dieses Angriffs liegt in der Unausgewogenheit der benötigten Ressourcen zwischen Angreifer und Opfer. Es benötigt nur wenig Rechenaufwand und Bandbreite um ein 20 Byte großen TCP-SYN Header mit entsprechender *payload* zu erzeugen und zu versenden, jedoch viele Ressourcen um sich durch eine Echtzeitanalyse der Pakete durch eine Firewall oder SYN-Cookies vor diesen Angriffen zu schützen. Diese werden aufgrund ihrer Ressourcenbelastung aus wirtschaftlichen Gründen meist nur minimal oder gar nicht umgesetzt.

Der Mechanismus der SYN-Cookies wird auf dem Server implementiert. Hierbei werden in die initiale Sequenznummer des vom Server gesendeten SYN-ACK Pakets die Informationen Zeitstempel, IP Adresse und Port von Client und Server kodiert, welche normalerweise in einer Tabelle im Speicher gehalten werden müssten. Somit ist ein Überlaufen der Tabelle unmöglich, da sie nicht vorhanden ist. Jedoch benötigt jede Kodierung und Dekodierung Systemressourcen. Ein ausreichend großer Angriff auf das System kann somit trotzdem die gesamten Systemressourcen beanspruchen und somit das Ziel eines DDoS Angriffs, die Negierung eines Dienstes, erfüllen.

Dedizierte Firewalls können mit Hilfe von Intrusion Detection System (IDS) die Pakete beim Eintreffen im Netzwerk analysieren, Angriffe erkennen und Verbindungen dieser Quelladressen blockieren.



### **Sockstress**

Die Angriffsform Sockstress wurde im Jahr 2008 von den Sicherheitsforschern Jack C. Louis und Robert E. Lee von Outpost24<sup>8</sup> entdeckt. Sie beinhaltet eine einfache Form eines DoS Angriffs, welche den 3-Wege-Handshake des TCP für unterschiedliche Angriffsszenarien manipuliert. Das Ziel dieses Angriffs ist, ähnlich wie beim SYN-Flood, eine Negierung eines Dienstes oder des gesamten Systems mit Hilfe asymmetrischer Ressourcenauslastung bei Angreifer und Opfer.

Im Gegensatz zu SYN-Flood stellt Sockstress eine Verbindung zum Server über den 3-Wege-Handshake her. In der einfachsten Form des Angriffs wird beim letzten TCP Segment, welches vom Client zum Server während des 3-Wege-Handshakes übertragen wird, das *Receive Window* Flag des Headers auf 0 gesetzt. Dies bedeutet, dass der Client dem Server mitteilt, dass er im Moment keine weiteren Daten empfangen kann. Der Server wird, durch den abgeschlossenen Verbindungsaufbau, gezwungen die Verbindung im Speicher zu halten, offen zu lassen und den Client periodisch zu prüfen, ob dieser wieder Daten empfangen kann. Dies belegt Systemressourcen und kann genutzt werden, um einen Dienst oder ein System zum Ablehnen aller Verbindungen oder zum Absturz zu bewegen.

Da die Verbindungen zum Client zum Server vollständig aufgebaut werden, hat die Nutzung von SYN Cookies keine Auswirkungen auf den Erfolg dieses Angriffs. Industrieanlagen müssen mit Hilfe externer DDoS Serviceanbieter wie Akamai<sup>9</sup> oder Cloudflare<sup>10</sup>, Firewalls und IDS Systeme oder spezieller Appliances, welche den Netzwerkverkehr Netzwerk-, Transport- und Anwendungsschicht überwachen, geschützt werden.

Diese Form des DoS Angriffs wurde am vorhandenen Industrie 4.0 Testsystem (Weber 2018) durchgeführt, um den Angriffsaufwand sowie die Auswirkungen auf die Systeme und Netzwerkkommunikation in Industrieumgebungen an einem Beispiel darzustellen (siehe ??).

TODO - In Abbildung XY ist zu erkennen - asymmetrischer Angriff - Monitoring Ressourcenauslastung - RAM bleibt nach dem Angriff weiterhin belegt -> nur Systemneustart gibt Speicher wieder frei  
 TODO - Diagramm als Zusammenfassung der Implementierung  
 TODO - Ergebnisse beschreiben

<sup>8</sup><http://www.outpost24.com>

<sup>9</sup><https://www.akamai.com>

<sup>10</sup><https://www.cloudflare.com>

### 3.5.2 UDP

UDP<sup>11</sup> ist ein verbindungsloses<sup>12</sup>, nicht-zuverlässiges<sup>13</sup> Übertragungsprotokoll. Der UDP Header ist im Gegensatz zum TCP Header (20 Bytes) nur 8 Byte lang und bietet somit einen sehr geringen *Overhead*<sup>14</sup> beim Versenden von IP Paketen. UDP wurde als Alternative zu TCP entwickelt, um die Kommunikation mit niedrigeren Latenzen für Dienste wie Simple Network Management Protocol (SNMP) oder DNS oder Voice over IP (VoIP) zu ermöglichen (Olsen 2003). Es wird auf den für die Latenz kritischen 3-Wege-Handshake verzichtet und das *Fire-and-Forget*<sup>15</sup> Prinzip angewandt, wobei keine Verbindung zwischen zwei Kommunikationspartnern hergestellt wird, sondern die Pakete ohne Flusskontrolle vom Sender zum Empfänger gesendet werden.

UDP findet in vielen Industrienetzen Einsatz als Transportprotokoll. Es bietet sich, vor allem durch seine Simplizität und den geringen Overhead im Netzwerk für die Informationsverteilung mit niedrigen Latenzzeiten an. Durch die Broad- und Multicast Funktionalitäten des UDP ist es möglich über das Publish-Subscribe Pattern zu kommunizieren und somit die Netzlast bei einer großen Anzahl von Empfängern gering zu halten. Diese Form der Informationsverteilung über UDP wird in Unterabschnitt 3.6.3 mit Bezug auf das Protokoll OPC UA analysiert.

UDP führt keine Validierung der Absenderadresse im Paketheader durch (Olsen 2003). Dies ermöglicht die Anwendung von IP Spoofing. IP Spoofing kann genutzt werden, um DoS bzw. DDoS Angriffe auf ein System durchzuführen. Eine Analyse des Netzwerkdienstes DNS, welcher auf der Nutzung des Transportprotokolls UDP basiert, wird in Kapitel Unterabschnitt 3.6.1 beschrieben und durchgeführt.

## 3.6 Anwendungsschicht

Die Netzwerkkommunikation der Anwendungsschicht in Industrie 4.0 Umgebungen basiert auf dem IP der Internetschicht. Um die Integration und Verwaltung der Netzwerkteilnehmer zu erleichtern, werden IP basierende Dienste wie DNS für die Namensauflösung sowie DHCP für die Adressvergabe und das Routing genutzt.

---

<sup>11</sup>Link - <https://tools.ietf.org/html/rfc768>

<sup>12</sup>verbindungslos - TODO

<sup>13</sup>nicht zuverlässig - TODO

<sup>14</sup>Overhead - TODO

<sup>15</sup>Fire-and-Forget - TODO

Des Weiteren wird sie in Industrieumgebungen durch eine Vielzahl von Protokollen beschrieben. Bestehende Lösungen des IoT nutzen Protokolle wie HTTP, XMPP oder Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) zur Kommunikation über das Netzwerk. In der M2M Kommunikation des IIoT haben sich die Protokolle und Standards OPC UA, DDS, MQTT und CoAP für unterschiedliche Anforderungen an die Netze und deren Teilnehmer hervor getan.

### 3.6.1 DNS

DNS wird von der Internet Engineering Task Force (IETF) in den Request for Comments (RFC) 1034<sup>16</sup>, 1035<sup>17</sup>, 2181<sup>18</sup> und 2782<sup>19</sup> beschrieben und verwaltet. Es stellt einen hierarchischen Verzeichnisdienst für IP-Netze zur Verfügung.

Eine der Hauptaufgaben des DNS ist der *forward lookup*. Hierbei werden Domain- bzw. Hostnamen in IP-Adressen übersetzt. Das Zusammenspiel eines hierarchischen Verzeichnisdienstes und der Namensauflösung bietet Angriffsfläche zum Eingriff auf die Kommunikation im Netzwerk. Im folgenden werden bekannte Angriffsformen auf den DNS Dienst und deren Auswirkungen auf das Netzwerk beschrieben.

#### **DNS Spoofing**

Die Angriffsmethode des DNS Spoofing verfolgt, wie *Cache Poisoning*<sup>20</sup>, das Ziel gefälschte Resource Record (RR) in den DNS Cache des Opfers einzuschleusen. Während das *Cache Poisoning* aus einer Softwareschwachstelle hervorging, bei der zusätzliche, gefälschte DNS Einträge zu korrekten DNS Antworten hinzugefügt wurden und somit der Cache eines Nameservers kompromittiert wird, befindet sich der Angriffsvektor beim DNS Spoofing in der Fälschung von DNS Antworten. Der Header der Netzwerkpakete werden mit Hilfe von *IP Spoofing*<sup>21</sup> so manipuliert, dass sie vorgeblich vom *authorativen* Nameserver stammen.

---

<sup>16</sup>Domain Names – Concepts and Facilities

<sup>17</sup>Domain Names – Implementation and Specification

<sup>18</sup>Clarifications to the DNS Specification

<sup>19</sup>A DNS RR for specifying the location of services (DNS SRV)

<sup>20</sup>Cache Poisoning - iwas

<sup>21</sup>IP Spoofing bezeichnet das Versenden von IP Paketen mit gefälschter Absender-IP

### 3 Analyse

Um DNS Spoofing erfolgreich durchzuführen muss die gefälschte DNS Response des Angreifers vor der Antwort des zuständigen Nameservers beim angegriffenen DNS Resolver eintreffen. Sobald der physikalische Zugang zum Netzwerk gewährleistet ist, können die Latenzzeiten der gefälschten Pakete im Netzwerk sehr gering gehalten werden. Ist dies nicht möglich, kann mit Hilfe eines DoS bzw. DDoS Angriffs auf den zuständigen Nameserver, dessen Antwortzeit beeinflusst werden. Des weiteren muss die ID im DNS Header mit der des Request übereinstimmen. Dies kann am Testsystem am Beispiel der Namensauflösung des OPC UA Discovery Servers mit Hilfe des Netzwerkanalysertools Wireshark<sup>22</sup> nachgewiesen werden.

No.	Time	Source	Destination	No.	Time	Source	Destination
10	0.383177036	172.18.0.2	10.0.150.1	10	0.383177036	172.18.0.2	10.0.150.1
11	0.383492183	10.0.150.1	172.18.0.2	11	0.383492183	10.0.150.1	172.18.0.2

<div>Frame 10: 75 bytes on wire (600 bits), 75 bytes captured (600) on interface 0 Ethernet II, Src: 02:42:ac:12:00:02 (02:42:ac:12:00:02), Dst: 02:42:58:54:18:25 (02:42:58:54:18:25) Internet Protocol Version 4, Src: 172.18.0.2, Dst: 10.0.150.1 User Datagram Protocol, Src Port: 54031, Dst Port: 53 Domain Name System (query) Transaction ID: 0xa85d Flags: 0x0100 Standard query Questions: 1 Answer RRs: 0 Authority RRs: 0 Additional RRs: 0 Queries   discoveryserver: type A, class IN     Name: discoveryserver     [Name Length: 15]     [Label Count: 1]     Type: A (Host Address) (1)     Class: IN (0x0001) [Response In: 11]</div>	<div>Frame 11: 91 bytes on wire (728 bits), 91 bytes captured (728) on interface 0 Ethernet II, Src: 02:42:58:54:18:25 (02:42:58:54:18:25), Dst: 02:42:ac:12:00:02 (02:42:ac:12:00:02) Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.150.1, Dst: 172.18.0.2 User Datagram Protocol, Src Port: 53, Dst Port: 54031 Domain Name System (response) Transaction ID: 0xa85d Flags: 0x8580 Standard query response, No error Questions: 1 Answer RRs: 1 Authority RRs: 0 Additional RRs: 0 Answers   discoveryserver: type A, class IN, addr 172.18.0.7     Name: discoveryserver     Type: A (Host Address) (1)     Class: IN (0x0001)     Time to live: 1     Data length: 4     Address: 172.18.0.7 [Request In: 10] [Time: 0.000315147 seconds]</div>
--	--

Abbildung 3.2: Wireshark - ID im DNS Header

<sup>22</sup>Link zu Wireshark

In der Darstellung ist auf der linken Seite ein DNS Request des OPC UA Discovery Servers und dessen DNS Header mit ID zu erkennen. Auf der rechten Seite ist die Antwort des im Netzwerk vorhandenen DNS Nameservers zu sehen.

### ***DNS Amplification***

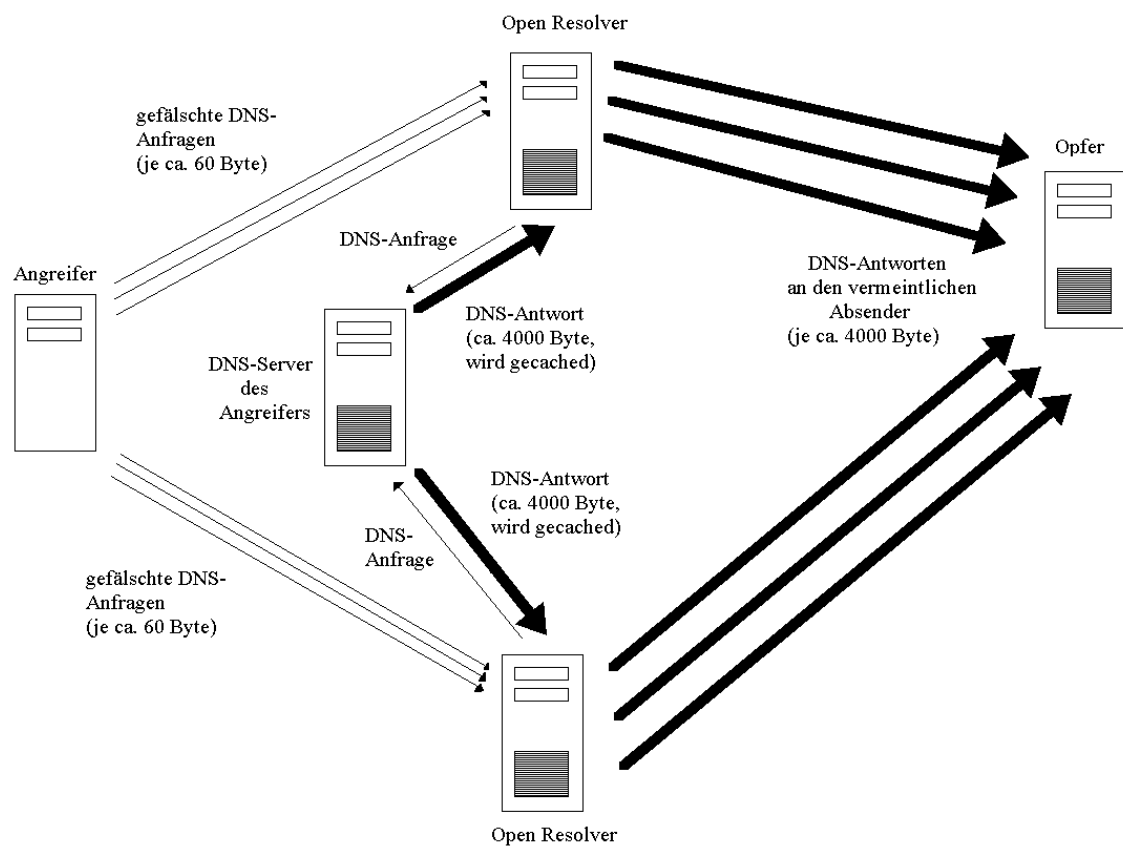
Eine Form eines DDoS Angriffs (??) ist über DNS möglich und wird DNS Amplification genannt. Bei der DNS Amplification werden DNS Anfragen an offene Nameserver gesendet und mit Hilfe von IP Spoofing als Quell-IP die Adresse des Angreifers genutzt. Somit treffen die DNS Antworten beim anzugreifenden System ein und belasten dieses durch erhöhten Rechenaufwand sowie dessen Netzwerk durch Traffic. Ein weiterer Seiteneffekt dieses Angriffs ist eine hohe Last der Nameserver, welches durch das rekursive Verhalten der DNS Namensauflösung hervorgerufen wird. DNS Amplification bezeichnet eine Form des Distributed-Reflected-Denial-of-Service (DRDoS).

Mit der Erweiterung des DNS in der IETF RFC 2617<sup>23</sup> wurde es notwendig, die Größe der DNS Antworten von 512 Byte auf einen dynamischen Puffer bis über 4000 Bytes zu erhöhen, um zusätzliche Informationen und Flags wie Abbildung 3.6.1 über das DNS übertragen zu können. Dies wird sich vom Angreifer zunutze gemacht, da an den Nameserver Requests mit einer Paketgröße von 60 Bytes gesendet werden können, welche eine Antwort mit 4000 Bytes und mehr provozieren und somit einen Base Amplification Factor (BAF) von ca. 66 im Netz haben. Ledermüller 2009. Der BAF beschreibt das Verhältnis von Eingang- zum Ausgangssignal. Dies wird bei DNS Amplifikation durch die Paketgröße der Anfrage sowie der Antwort dargestellt.

Die folgende Abbildung stellt einen DDoS Angriff durchgeführt durch DNS Amplification schematisch dar. Der Angreifer (links) sendet zu zwei offenen Nameservern gefälschte DNS Anfragen mit Quelladresse des Opfers (rechts). Die offenen Nameserver erfragen beim autoritativen Nameserver die Zone, dieser stellt die erfragten RR bereit und die offenen Nameserver senden dem Opfer Antworten zu.

---

<sup>23</sup>Link - <https://www.ietf.org/rfc/rfc2671.txt>



**Abbildung 3.3:** Schematisches Beispiel: DNS Amplification

Diese Form des Angriffs kann aus dem internen Netz sowie von extern auf öffentlich zugängliche Systeme durchgeführt werden. DoS Attacken stellen besonders für Industrie 4.0 Netzwerke, deren komplexe Kommunikation und Anforderungen eine hohe Bedrohung dar. Durch den erheblichen BAF können diese Angriffe mit wenig Bandbreite beim Angreifer durchgeführt werden und gleichzeitig das Netzwerk des Opfers voll auslasten. Wie in Abbildung 3.4 dargestellt, kann durch die Abfrage der Zone *isc.org* eine 3385 Byte große Antwort vom Nameserver provoziert werden.

```
; <<>> DiG 9.13.0 <<>> -t any isc.org
;; global options: +cmd
;; Got answer:
;; ->>HEADER<<- opcode: QUERY, status: NOERROR, id: 45468
;; flags: qr rd ra; QUERY: 1, ANSWER: 32, AUTHORITY: 0, ADDITIONAL: 1

;; OPT PSEUDOSECTION:
; EDNS: version: 0, flags:; udp: 1280
;; QUESTION SECTION:
;isc.org.                IN      ANY

;; ANSWER SECTION:
isc.org. 7200 IN SPF "v=spf1 a mx ip4:204.1
isc.org. 7200 IN CAA 0 issue "letsencrypt.o
isc.org. 60 IN A 149.20.64.69
isc.org. 7200 IN MX 20 mx.ams1.isc.org.
isc.org. 7200 IN TXT "google-site-verificat
isc.org. 7200 IN CAA 0 iodef "mailto:hostma
isc.org. 7200 IN NS ams.sns-pb.isc.org.
isc.org. 7200 IN NS ord.sns-pb.isc.org.
isc.org. 7200 IN CAA 0 issue "comodoca.com"
isc.org. 7200 IN MX 10 mx.pao1.isc.org.
isc.org. 7200 IN SOA ns-int.isc.org. hostma
isc.org. 7200 IN DNSKEY 257 3 5 BEAAAA0hHQDBrh
isc.org. 7200 IN CAA 0 issue "Digicert.com"
isc.org. 7200 IN DNSKEY 256 3 5 AwEAAcdkaRUlsR
isc.org. 7200 IN NS ns.isc.afiliat-nst.inf
isc.org. 7200 IN TXT "v=spf1 a mx ip4:204.1
isc.org. 3600 IN NSEC _adsp._domainkey.isc.o
isc.org. 7200 IN NAPTR 20 0 "S" "SIP+D2U" ""
isc.org. 7200 IN NS sfba.sns-pb.isc.org.
isc.org. 60 IN AAAA 2001:4f8:0:2::69
isc.org. 7200 IN RRSIG SOA 5 2 7200 201807112
isc.org. 7200 IN RRSIG NS 5 2 7200 2018071123
isc.org. 60 IN RRSIG A 5 2 60 2018071123340
isc.org. 7200 IN RRSIG MX 5 2 7200 2018071123
isc.org. 7200 IN RRSIG TXT 5 2 7200 201807112
isc.org. 60 IN RRSIG AAAA 5 2 60 2018071123
isc.org. 7200 IN RRSIG NAPTR 5 2 7200 2018071
isc.org. 3600 IN RRSIG NSEC 5 2 3600 20180711
isc.org. 7200 IN RRSIG DNSKEY 5 2 7200 201807
isc.org. 7200 IN RRSIG DNSKEY 5 2 7200 201807
isc.org. 7200 IN RRSIG SPF 5 2 7200 201807112
isc.org. 7200 IN RRSIG CAA 5 2 7200 201807112

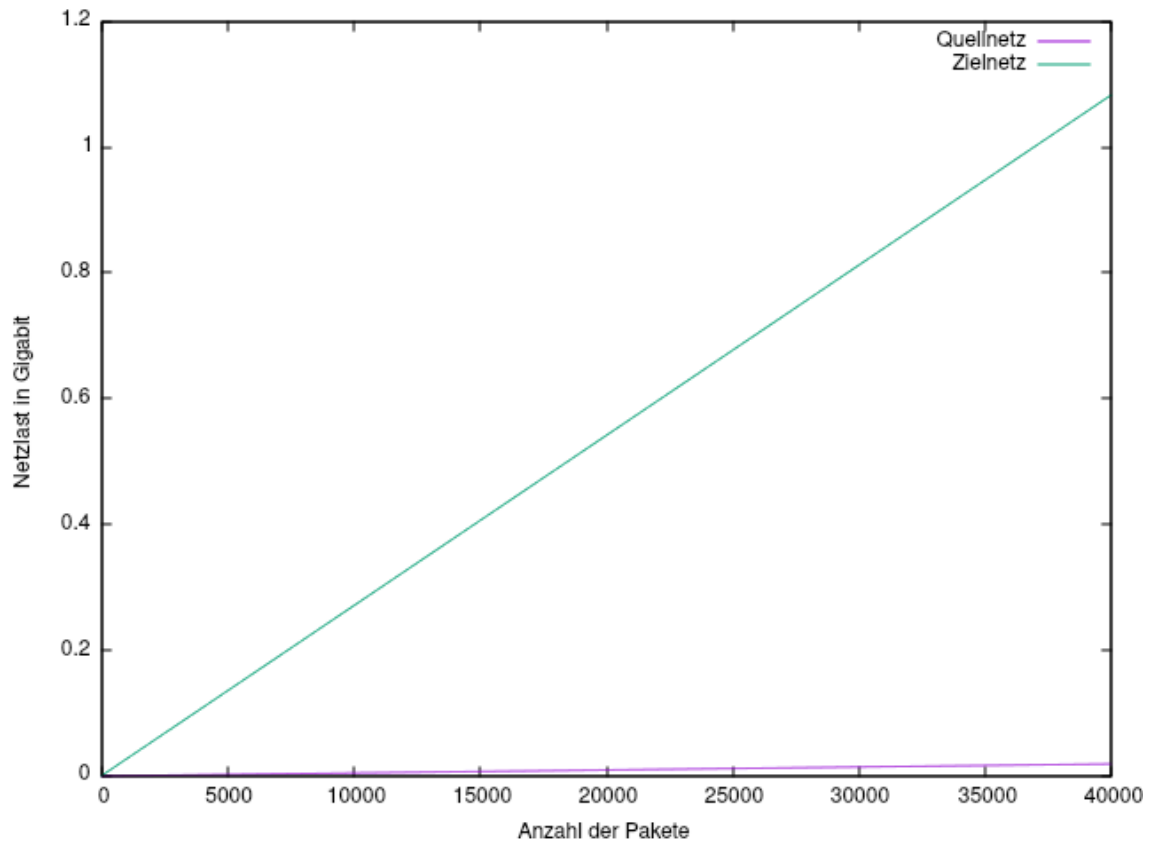
;; Query time: 596 msec
;; SERVER: 10.0.150.1#53(10.0.150.1)
;; WHEN: Mo Jun 18 18:04:45 CEST 2018
;; MSG SIZE rcvd: 3385
```

Abbildung 3.4: DNS Amplification am Beispiel von *isc.org*

### 3 Analyse

---

Dies führt zu einem BAF von ca. 56. Die folgende Grafik stellt einen Angriff mit diesem BAF dar. Auf der X-Achse ist die Anzahl der gesendeten Pakete dargestellt, die Y-Achse zeigt die Last des Netzwerkes in Gigabit auf. Die Kurven beschreiben das Netz des Angreifers sowie des Opfers.



**Abbildung 3.5:** Netzlast bei DNS Amplification



#### TODO - Skalierung der Grafik

Auf der Darstellung ist zu erkennen, dass bei diesem Angriff eine lineare Steigerung der Netzlast in beiden Netzen vorliegt. Entscheidend ist jedoch der BAF, welcher das Verhältnis zwischen der Lastzunahme im Angreifer- und Opfernnetz beschreibt. Es ist zu erkennen, dass beim Versandt von 35000 Paketen im Quellnetzwerk nur ca. 0.016 Gigabit Daten transferiert werden müssen, dafür aber knapp 1 Gigabit an Daten in das Zielnetzwerk übertragen werden und dort für eine erhebliche Last sorgen.

Der DNS bietet weitere Angriffsmöglichkeiten wie DNS Fast Fluxing oder DNS Information Leakage. Diese Angriffe dienen zum *Phishing* von Daten oder der Spionage der Netzwerkstruktur. Sie nehmen initial keinen Einfluss auf den Netzwerkverkehr und dienen der Vorbereitung von Folgeangriffen und dem Sammeln von Informationen. Die Angriffsformen werden in Ledermüller 2009 näher beschrieben. Die Analyse der Sicherheit der Netzwerkkommunikation beschränkt sich auf Angriffe, welche direkten Einfluss in die Kommunikation im Netzwerk haben. Weitere Formen der DoS/DDoS Angriffe finden auf Transportschicht Abschnitt 3.5 durch *SYN-Flooding* oder auf Anwendungsschicht Abschnitt 3.6 zur Negierung eines Speziellen Dienstes statt.

TODO - Schutzmaßnahmen sind DNSSEC und zufällige Informationen TODO - Die Auswirkungen eines solchen Angriffs ... TODO - Sicherheitsmaßnahmen siehe Ledermüller 2009

#### 3.6.2 DHCP

DHCP ist von der IETF im RFC 2131<sup>24</sup> definiert. Es stellt ein Framework zur Bereitstellung von *Host* Konfigurationsparametern in einem TCP/IP Netzwerk dar. Dazu gehören die IP Adresse, Netzmaske, Gateway sowie zuständiger DNS des Clients. Da ein neuer Client im Netzwerk keine Informationen über die vorhandenen Clients und dessen Topologie besitzt, muss er, um die Konfigurationsparameter für das Netzwerk zu erhalten (DHCP Discover), über einen Broadcast im Netz nach Adress-Angeboten fragen. Dieser findet über das Transportprotokoll UDP statt über die Ports 67 (Server) und 68 (Client) statt.

---

<sup>24</sup>Link - <https://www.ietf.org/rfc/rfc2131.txt>

Der Mangel an Informationen bei der initialen Verbindung eines Clients im Netzwerk, kann von einem Angreifer genutzt werden, um die Netzwerkkonfiguration zu manipulieren. Da der Broadcast des Clients an das gesamte Netzwerk versandt wird, ist es dem Angreifer möglich selbst auf diese Anfrage zu antworten. Hierzu wird die Technik des Spoofing in Verbindung mit ARP Poisoning oder einem zusätzlichen DHCP Server (Rogue DHCP), welcher vom Angreifer kontrolliert wird, im Netzwerk genutzt. In diesem Fall muss es dem Angreifer nur gelingen schneller auf den DHCP Discover bzw. DHCP Request des Clients zu antworten als der zuständige DHCP Server. Somit ist es möglich die Netzwerkkonfiguration des Clients zu manipulieren.

Ein Angriff auf das DHCP in Netzwerken kann weitreichende Folgen für die Netzwerksicherheit mit sich bringen. Durch die Änderung der Client-Adressen und Subnetze kann es zu IP Adresskonflikten im Netzwerk kommen oder die Kommunikation beschränkt bzw. stillgelegt werden. Größere Auswirkungen auf die Netzwerksicherheit stellt das Umlenken des Datenverkehrs durch Manipulation der DNS- bzw. Gateway-Parameter dar. Hierbei kann der gesamte Netzwerkverkehr eines Clients umgelenkt werden, um einen MitM Angriff durchzuführen und den Netzwerkverkehr auszulesen.

In Kapitel ?? wird die Erweiterung des Testsystems (Weber 2018) um einen zusätzlichen DHCP Server im Netzwerk durchgeführt, um mögliche Auswirkungen auf den Netzwerkverkehr an einem praktischen Beispiel darzustellen. Durch die Implementierung eines weiteren DHCP Servers im Netzwerk wird ein Eingriff auf das Netzwerk in der Netzzugangsschicht und die gleichzeitige Manipulation des DHCP der Anwendungsschicht des TCP/IP Referenzmodells beschrieben.

Da das IP Hilfsprotokoll DHCP keine Sicherheitsmaßnahmen zur Verhinderung dieser Angriffe mit sich bringt, ist es notwendig sich vor diesen Bedrohungen schon auf den unteren Schichten des TCP/IP Referenzmodells zu schützen. Eine in der Industrie weit verbreitete Technik zum Verhindern von Angriffen auf das DHCP wird bereits in der Netzzugangsschicht umgesetzt. Netzwerkkomponenten wie Router und Switches werden mit Hilfe von DHCP Snooping konfiguriert, welches es ermöglicht DHCP Nachrichten zu überwachen und diese nur von vertrauenswürdigen Ports in das Netzwerk weiterzuleiten. Somit werden DHCP Pakete, welche von einem im Netzwerk eingeschleusten Rogue-DHCP im Netzwerk verteilt werden sollen direkt verworfen und nehmen keinen Einfluss auf das bestehende Netzwerk.

### 3.6.3 OPC UA

Die Kommunikation zwischen OPC UA Komponenten findet auf der Anwendungsschicht des TCP/IP Referenzmodells statt. OPC UA stellt eine vertikale Verbindung der Kommunikationspartner auf allen Ebenen der Automatisierungspyramide her. Aufgrund der Öffnung von Unternehmen nach außen, den immer höheren Informationsbedarf und die direkte Kommunikation mit Händler und Kunden ist OPC UA ein attraktives Ziel für Industriespionage und Sabotage des Netzwerks (OPC Foundation 2018b).

OPC UA wurde als Client-Server Architektur entwickelt. Um OPC UA auch in Systemen der unteren Ebenen der Automatisierungspyramide, wie Kleinststeuerungen, Sensoren und Low-End-Embedded-Systeme, einsetzen zu können, werden meist geringe Latenzen in den Netzwerken und ein geringer Overhead aufgrund von Ressourcenmangel sowie die Kommunikation mit mehreren Partnern benötigt. Diese Anforderungen werden von dem im Jahr 2018 veröffentlichten 14 Teil der OPC UA Spezifikation *Publish Subscribe* adressiert. Das *Publish Subscribe* Modell wird mit Hilfe des Transportprotokolls UDP umgesetzt und ermöglicht den Multi- und Broadcast sowie die Möglichkeit der häufigen Übertragung von kleinen Datenmengen um *Logging* oder *Monitoring* durchzuführen, ohne das Netzwerk durch einen 3-Wege-Handshake bei jedem Verbindungsaufbau zusätzlich zu belasten (OPC Foundation 2018a).

Aus zeitlichen Gründen wird sich im weiteren Verlauf der Thesis auf die Sicherheit der Netzwerkkommunikation im etablierten OPC UA *Client Server* Modell beschränkt.

Die OPC UA beschreibt ein mehrschichtiges Sicherheitskonzept, welches *Transport Layer*- und *Application Layer Security* umfasst. Die *Transport Layer Security* stellt die Sicherheit auf Nachrichtenebene her und beinhaltet *Application Authentication*, *Integrity* und *Confidentiality*. Um dies zu ermöglichen, werden verschiedene Transport- sowie Anwendungsprotokolle im Verbund genutzt. Die Sicherheit auf Anwendungsebene stellt weitere Sicherheitsmechanismen zur *Availability*, *Auditing*, *User Authorization* und *User Authentication* bereit.

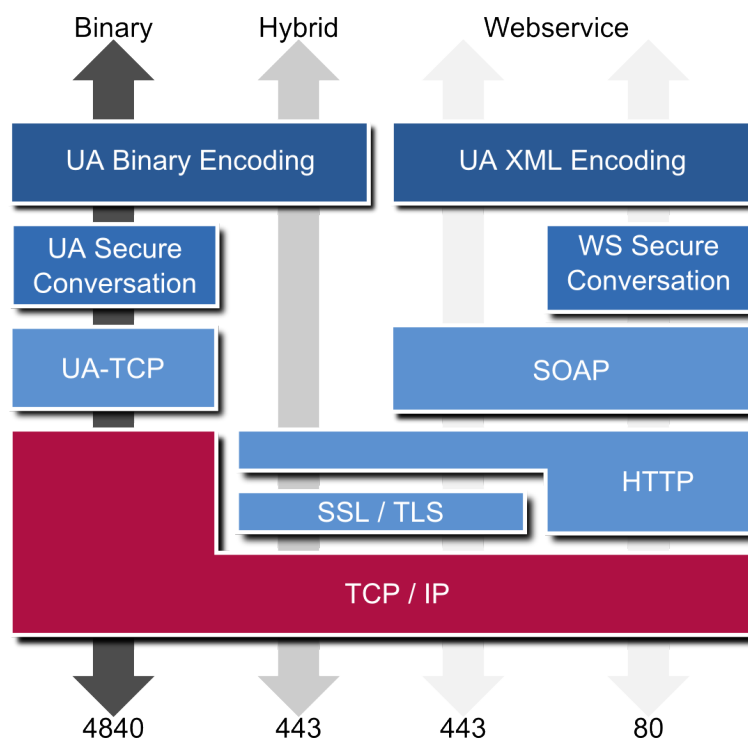
#### ***Transport Layer Security***

Die OPC UA beschreibt mit dem OPC UA Connection Protocol (UACP) ein abstraktes Protokoll zur Herstellung einer Vollduplexverbindung in einer Client-Server Architektur. Implementierungen dieses Protokolls können über jede Middleware, welche den Austausch von Nachrichten im Vollduplexverfahren über TCP/IP und *Websockets* unterstützt, durchgeführt werden. Somit ist das von OPC UA spezifizierte Protokoll für die Zukunft flexibel. Die Spezifikation des abstrakten Protokolls UACP wird im 5. Teil der OPC UA Spezifikation<sup>25</sup> beschrieben und beinhaltet die Form der Nachricht, den Verbindungsaufbau, die Kommunikation und die Fehlerbehandlung.

In Abbildung 3.6 ist dargestellt, dass OPC UA verschiedene Protokollestacks für unterschiedliche Anforderungen zur Kommunikation zwischen den Komponenten bereitstellt. Diese bestehen aus einer Verbindung von TCP auf Transportebene und dem Unified Architecture (UA) Binary Protokoll zur Kodierung der Nachrichten, einem Webservice über HTTP/Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) und Simple Object Access Protocol (SOAP) mit Extensible Markup Language (XML) Encoding oder einer hybriden Form aus beiden. Alle Kommunikationsformen beinhalten ein Sicherheitsmodell auf Transport- oder Nachrichtenebene.

---

<sup>25</sup>OPC Unified Architecture Specification Part 6: Mappings (OPC Foundation 2018c)



**Abbildung 3.6:** OPC UA Kommunikationswege

Die beschriebenen Protokollstacks bilden mit ihren Sicherheitsmechanismen die Grundlage für eine sichere Datenübertragung. Die Form der Datenübertragung über SOAP/HTTP wurde ab Version 1.03 der Spezifikation als veraltet angesehen, da es in der Industrie nicht umgesetzt wurde (OPC Foundation 2018c). Die Protokolle UA Binary über TCP und die Hybridform aus den Protokollen UA Binary und HTTPS Webservice werden im folgenden auf ihre Standhaftigkeit bzgl. der Sicherheitsanforderungen in Industrie 4.0 Umgebungen analysiert.

#### ***UA Binary über TCP***

Das UA Binary Protokoll über TCP wird für Kommunikation mit optimierter Geschwindigkeit und Durchsatz genutzt. Es besitzt den geringsten Overhead sowie Ressourcenverbrauch, da kein zusätzlicher Parser für HTTP oder XML genutzt werden muss und somit die Systemlast gering gehalten werden kann. Zur Kommunikation wird standardmäßig der Port 4840 genutzt. Die sichere Kommunikation wird erst auf Nachrichtenebene durch die UA Secure Conversation hergestellt (siehe Abschnitt 3.6.3). Für die Transportebene gelten durch das genutzte Protokoll TCP weiterhin die Bedrohungen von Unterabschnitt 3.5.1.

#### ***UA Binary über HTTPS***

Die Hybridform der Kommunikation über einen HTTPS Webservice mit Hilfe der UA Binary Protokolls vereint die Vorteile des Ressourcenschonenden UA Binary Protokolls über TCP und die weitreichende Kompatibilität eines Webservices. Die Sicherheit der Netzwirkommunikation wird bereits auf der Transportebene mit Hilfe von Transport Layer Security (TLS) hergestellt.

Die Transportsicherheit wird mit TLS 1.2 und der Cipher Suite *TLS RSA WITH AES 256 CBC SHA256* bereitgestellt (OPC Foundation 2018d). Hierbei ist zu beachten, dass die Rechenleistung der Systeme wächst und somit Verschlüsselungsalgorithmen mit der Zeit unsicher werden. Eine TLS Verbindung mit schwacher Cipher Suite stellt keine sichere Verbindung bereit. Des Weiteren wurden in den Implementierungen von TLS Fehler verursacht, welche die Transportsicherheit wie z. B. im Falle von *Heartbleed*<sup>26</sup> verhinderten.

---

<sup>26</sup>Link zu Heartbleed

Eine weitere Bedrohung stellt das genrelle Verfahren der Ausstellung von Zertifikaten bereit. Diese Zertifikate werden von Dienstleistern ausgestellt, welche als vertrauenswürdig eingestuft und als Root-Certificate Authority (CA) bezeichnet werden. Die Herstellung der Vertrauenswürdigkeit eines Ausstellers liegt im Ermessen des Softwareherstellers und dessen Aufnahme in die Liste vertrauenswürdiger CA.

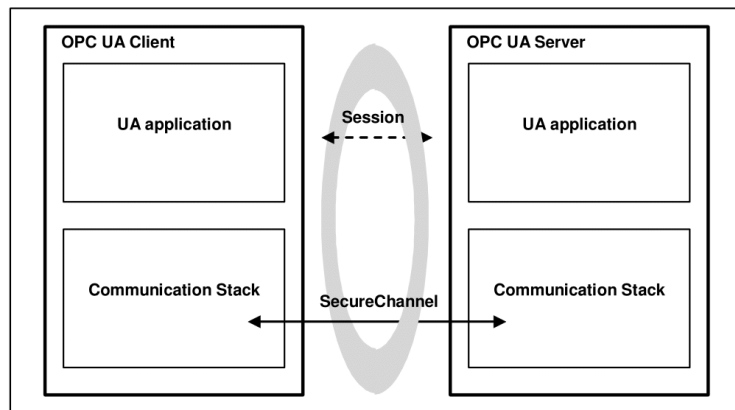
TODO - zu dünn

Die Kommunikation des Protokolls OPC UA über Webservices und HTTP bzw. HTTPS wird im Rahmen dieser Thesis nicht weiter bearbeitet, da die Implementierung des im Testsystem genutzten NodeJS Moduls node-opcua unvollständig ist.

### ***Application Layer Security***

OPC UA stellt aufgrund der verschiedenen Anforderungen der Industrie an ihre Systeme mehrere Sicherheitskonfigurationen zur Informationsübertragung zur Verfügung. Dies ist notwendig, da die Verwendung von Verschlüsselungsalgorithmen und Kodierungsverfahren Ressourcen benötigt und Latenzen verursacht, welche unter Umständen nicht vorhanden sind oder nicht geleistet werden können. Eine Fehlkonfiguration des Protokolls kann jedoch auch Auswirkungen auf den Betrieb des Netzwerks und der Komponenten haben sowie die Integrität der Daten gefährden.

OPC UA verifiziert vor dem Austausch von Nachrichten zwischen zwei Komponenten, ob ein *Secure Channel* vorhanden ist, über welchen die Daten übertragen werden. Dieser wird vom bestehenden Netzwerkstack und den genutzten niedrigeren Protokollen bereitgestellt (OPC Foundation 2018a). Die UA *Secure Conversation* besteht aus dem *Secure Channel*, der Session und dessen gesetztem *SecurityMode* (OPC Foundation 2018b). Die Form der Nachrichten im *Secure Channel* wird durch die *Security Policy* im gewählten *Security Mode* bestimmt. Bei der Verwendung der *Security Policy* „none“ wird ein *Secure Channel* hergestellt, welcher jedoch keine Sicherheitsprofile bereitstellt (OPC Foundation 2018d). Dies wird in Abbildung 3.7 dargestellt.



**Abbildung 3.7:** OPC UA Secure Channel



TODO Rechenleistung erhöht sich -> Verschlüsselungsalgorithmen werden unsicher -> OPC ist flexibel für Zukunft und Anforderungen

### ***weitere Sicherheitsbestandteile***

TODO - PKI TODO - Zertifikatsmanagement TODO - Zeitsynchronisation TODO  
- Kerberos OAuth2 TODO - siehe BSI UPC UA Analyse

### **3.6.4 MQTT/CoAP**

TODO - Ansatz: Wireshark an Bridge der Testumgebung im Sternnetzwerk und Druckerkomponente oder andere manipulieren; andere Protokolle von Feldebene an Switch auslesen; vielleicht hier nur beschreiben und in den höheren Schichten durchführen mit CoAP oder MQTT -> OPC UA Komponenten sind Gateway

## **3.7 Schutzmaßnahmen**

TODO - Applikationssicherheit != Netzwerksicherheit != Betriebssystemsicherheit

### **3.7.1 allgemeine Schutzmaßnahmen**

TODO - Schutz auf allen Ebenen -> z.B. OPC UA basiert auf IP-Netz -> Angriffsvektoren von IP und genutzten Diensten immer noch zutreffend

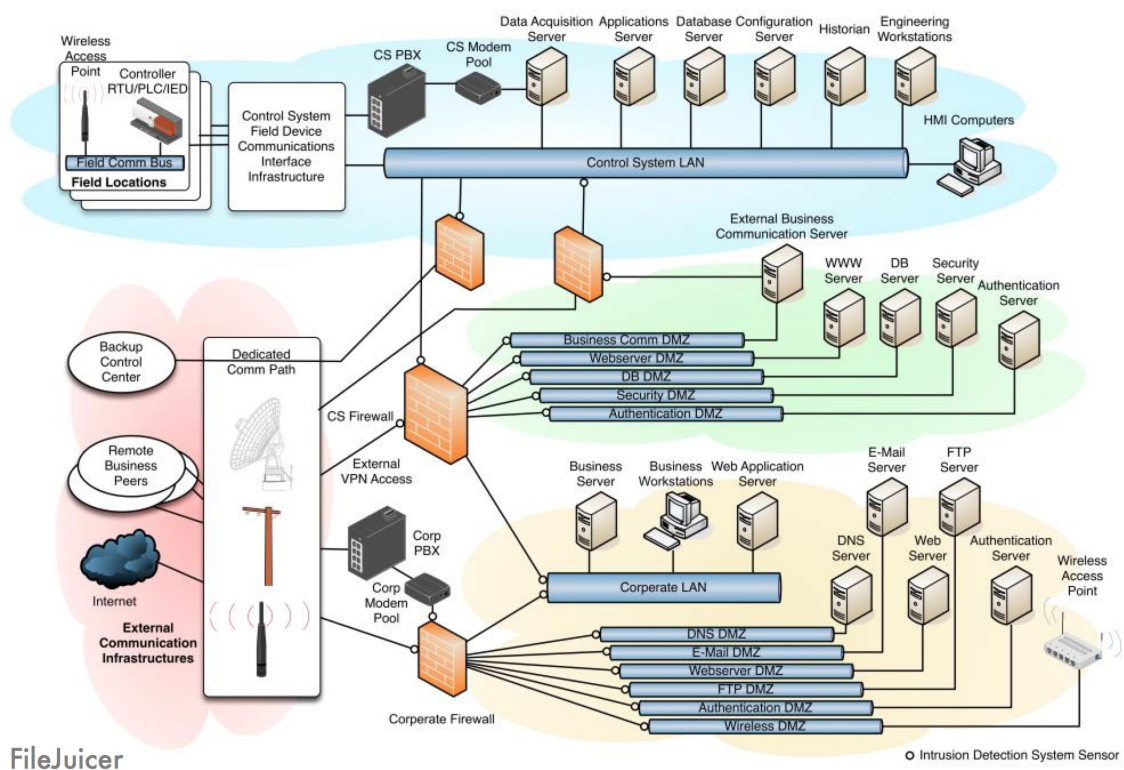
### **3.7.2 TODO**

### **3.7.3 TODO**

### **3.7.4 Defense in Depth**

Auf der Netzzugangsschicht fallen, wie auf allen anderen Schichten, Betriebsdaten an, welche genutzt werden können, um Angriffe oder unregelmäßige Aktivitäten im Netzwerk zu erkennen. Es kann protokolliert werden, wann ein Gerät mit dem Netzwerk verbunden war und welche Pakete andere Netzwerkteilnehmer

von diesem Gerät erhalten haben (Plattform Industrie 4.0 2017). Die Norm IEC 62443<sup>27</sup> definiert die Defense in Depth Strategie. Sie stellt ein Konzept bereit, um die IT-Sicherheit der Anlagen, die Netzwerksicherheit und Systemintegrität nach dem Stand der Technik zu schützen. Sie gliedert eine Unternehmensinfrastruktur in multiple und redundante Sicherheitsschichten (Zonen), um ein höchstmögliches Sicherheitsniveau zu erreichen. Die unabhängigen Verteidigungslinien sollen Angriffe verzögern, um Zeit für Gegenmaßnahmen zu gewinnen. Die Kommunikation erfolgt in separierten Netzsegmenten, welche zusätzlich mit IDS nutzen, um Angriffe schnell zu erfassen und Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Somit wird der Aufwand, um die unteren Netzwerkebenen zu kompromittieren durch den Einsatz von Demilitarized Zone (DMZ), IDS, Paketfilter und Time Access Control wesentlich erhöht. Zusätzlich ist das „Zone and Conduit“ Modell eines der zentralen Elemente der Defense in Depth Strategie. Die verschiedenen Zonen können nur mittels spezieller Leitungen (Conduits) miteinander kommunizieren.



**Abbildung 3.8:** Defense in Depth Strategie - David Kuipers 2006

<sup>27</sup>ref. IEC 62443

Das Defense in Depth Konzept stellt ein Konzept dar, um Industrieanlagen und Unternehmensnetzwerke vor Angriffen zu schützen. Bei der sich ständig ändernden Bedrohungslage in den komplexen Netzen wird bei dieser Strategie jedoch weniger ein vollständiger Schutz bereitgestellt, als eine Strategie zur Schadensbegrenzung im Falle eines Angriffs.

### **3.8 Zwischenfazit**

TODO - Ergebnisse beschreiben -> Auswahl der Anwendungsszenarien, Grundlage des Konzepts

Die beschriebenen Anforderungen müssen, um eine sichere Netzwerkkommunikation zu gewährleisten, von allen beteiligten Komponenten der Umgebung integriert und umgesetzt werden. Industrie 4.0 Umgebungen können in unterschiedlichster Form ausgeprägt sein. Die Umsetzung der Hard- und Softwarekomponenten hängt von den zu übertragenden Daten, dem Übertragungsmedium, der Übertragungsdistanz und vorausgesetzten Dienstgüte ab.



## Kapitel 4

# Anwendungsszenarien

Aufgrund der in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnisse wurden verschiedene Anwendungsszenarien zur Erweiterung des Testsystems herausgearbeitet.

TODO - Tabelle

Die Umsetzung priorisierter Anwendungsszenarien wie SYN-Flood, ARP Spoofing oder DNS Amplification war aus zeitlichen Gründen nicht möglich, da die Manipulation des Netzwerks und dessen Kommunikation im gegebenen Testsystem aufgrund der genutzten Software nur begrenzt möglich war und somit die Bereitstellung einer Netzwerkinfrastruktur wesentlicher Bestandteil der Thesis war. Dies wird in Abschnitt 5.4 näher erläutert.

Nach Abwägung der Faktoren zeitlicher Aufwand, Umsetzbarkeit und Darstellungsmöglichkeit und Mehrwert für das System, wurde sich für die folgenden Anwendungsszenarien entschieden.

### 4.1 OPC UA Kommunikation

Die Kommunikation des OPC UA Protokolls findet laut Spezifikation, wie in Abschnitt 3.6.3 beschrieben, immer im *Secure Channel* statt. Der *Secure Channel* stellt verschiedene *Security Policies* für unterschiedliche Anwendungsfälle zur Verfügung. Administratoren müssen abwägen in wie Fern Ressourcen und Latenz für die Absicherung der Kommunikation im Netzwerk gewährleistet werden können. Die Kommunikation zwischen OPC UA Komponenten und die verschiedenen Sicherheitsprofile können im vorhandenen Testsystem (Weber 2018) untersucht werden.

Hierfür wird das Netzwerkanalysetool Wireshark<sup>1</sup> genutzt, um den Netzwerkverkehr zwischen den Komponenten abzuhören. In Verbindung mit dem OPC UA *Secure Channel* wird das System erweitert, um verschiedene Sicherheitsprofile für die Kommunikation bereitzustellen und somit die Auswirkungen einer Fehlkonfiguration darstellen zu können.

### 4.2 MitM

Im vorhandenen System soll die Darstellung eines MitM Angriffs ermöglicht werden. Dieser wird mit Hilfe eines Rogue DHCP Servers durchgeführt. Es soll ermöglicht werden, die Netzwerkkonfiguration einer Komponente so zu Manipulieren, um die Kommunikation mithören zu können. Dies beinhaltet die Bereitstellung einer Netzwerkinfrastruktur inklusive DHCP und DNS.

### 4.3 Manipulation von ungesichertem Netzwerkverkehr

Im dritten Anwendungsszenario sollen die durch den durchgeführten MitM Angriff gewonnenen Informationen genutzt werden, um die Funktionalität eines weiteren Systems im Netzwerk zu stören und somit direkt Einfluss auf einen Prozess in einem Industrienetzwerk nehmen. Aufgrund der in Unterabschnitt 2.3.3 beschriebenen Faktoren und der immer weiteren Vernetzung ressourcenschwacher Komponenten soll das Anwendungsszenario anhand einer minimalen IIoT Komponente am Protokoll CoAP durchgeführt werden.

---

<sup>1</sup>Link: <https://www.wireshark.org/>

## Kapitel 5

### Konzept

Im folgenden Kapitel wird das entwickelte Konzept zur Erweiterung des Testsystems (Weber 2018) beschrieben. Das Konzept wurde entwickelt, um anhand der in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnisse, verschiedene Angriffsformen in einer Industrie 4.0 Netzwerkumgebungen und deren Einfluss auf das System und die Netzwerkkommunikation demonstrieren zu können. Da die entstehende Integration und Implementierung des Konzepts für Test- und Lehrzwecke genutzt werden soll, in Zukunft um weitere Funktionalitäten erweitert werden soll und flexibel Einsetzbar sein soll, stehen die Aspekte Portabilität, Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit bei der Entwicklung des Konzepts im Vordergrund.

Das Konzept beinhaltet die Darstellung der Verteilungs-, Baustein- und Laufzeit-sicht. Dabei wird die entwickelte Netzwerkinfrastruktur, die einzelnen Komponenten sowie die Gesamtfunktionalität des Systems beschrieben.

Um eine ganzheitliche Infrastruktur mit den grundlegenden Netzwerkdiensten bereitstellen zu können, kann die Kommunikation der Systeme nicht auf der Abstraktionsebene des Docker Containernetzwerks stattfinden. Das IPAM im Netzwerk sowie die gewünschten Dienste DHCP und DNS können dort nicht ausreichend konfiguriert werden. Es mussten im Laufe der Entwicklung, aufgrund des gegebenen Systems und der genutzten Software, mehrere Konzepte zur Umsetzung verschiedener Anwendungsszenarien verworfen werden. Diese werden in ?? kurz beschrieben. Die Softwarebeschränkungen und deren Auswirkungen auf die Umsetzung des Konzepts sowie der Integration werden in Abschnitt 5.4 erläutert.

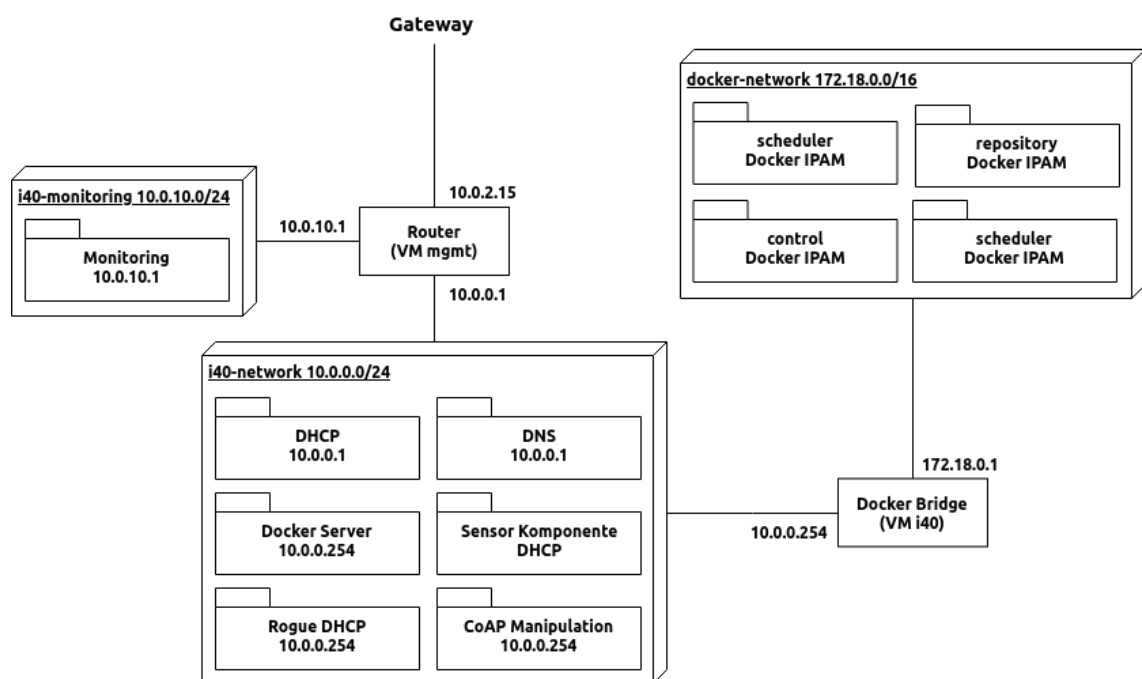
### 5.1 Verteilungssicht

Die Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit des Testsystems wird auf der Verteilungssicht durch die Nutzung einer VM und deren Docker Container realisiert. Um die Heterogenität des Systems gering zu halten, jedoch ein vollwertiges Netzwerk abbilden zu können, werden der vorhandenen Grundstruktur des Testsystems (Weber 2018) VM zwei weitere Maschinen hinzugefügt.

Die VMs simulieren, im Gegensatz zur Containervirtualisierung ein vollständiges System sowie dessen Hardware. Dies ermöglicht eine weitgehende Kontrolle über die Netzwerkschnittstellen und die Konfiguration gekapselter Netzwerkinfrastrukturen. Diese Vorteile werden genutzt, um die Netzwerkkommunikation mit Hilfe von virtuellen, internen Netzwerken auf der Abstraktionsebene der VMs durchzuführen.

Das Konzept der Netzwerkinfrastruktur ist in Abbildung 5.1 in Anlehnung an ein Unified Modeling Language (UML)-Verteilungsdiagramm dargestellt. Zur Umsetzung der in Kapitel 4 beschriebenen Szenarien, ist es notwendig den Netzwerkdienst DHCP bereitzustellen. Dieser wird, zusammen mit dem Dienst DNS im Netzwerk „i40-network“ bereitgestellt. Das zusätzliche Netzwerk „i40-monitoring“ wird genutzt, um die Netzwerkkommunikation über ein Gateway umzusetzen und somit einen MitM Angriff durchführen zu können. Die Kommunikation zwischen den Netzwerken wird über Router realisiert.



**Abbildung 5.1:** Netzwerkinfrastruktur

Die Kapselung und Sicherheit des Testsystems ist durch die Erweiterung um zusätzliche VMs und Dienste weiterhin gegeben. Die Kommunikation mit dem Hostsystem und externen Netzen findet ausschließlich über die Netzwerkschnittstelle des Routers statt und dient der Installation und Konfiguration der Komponenten. Diese kann im Betrieb deaktiviert werden, um eine vollständige Isolation der Umgebung zu erzielen.

Durch die Konfigurationsmöglichkeiten der Hardware und des Netzwerks ist eine weitere Kapselung der Netzwerke mit Hilfe von VLAN auf der Netzzugangssicht umsetzbar. Dies wird im Rahmen der Thesis jedoch aus zeitlichen Gründen nicht weiter bearbeitet.

### 5.1.1 Industrienetzwerk

Das Industrienetzwerk „i40-network“ stellt den zentralen Bestandteil der Architektur dar. Dieses Netzwerk wird von den Diensten DHCP und DNS verwaltet und beinhaltet das Industrie 4.0 Produktionssystem und dessen Docker Sub-Architektur sowie die Sensor Komponente, welche Daten zum CoAP Monitoring liefert. Der Netzwerkverkehr sowie die Verwaltung des Containernetzwerks wird vom Docker Dienst und dessen Netzwerkbrücke übernommen. Die Kommunikation mit dem Monitoringnetzwerk sowie mit externen Netzen wird mit Hilfe von IP Forwarding und Network Address Translation (NAT) hergestellt. Der Rogue DHCP Server befindet sich ebenfalls in diesem Netz und dient der Manipulation des für das Netzwerk *authorativen* DHCP Servers. Die Umsetzung dieses Netzwerks, der beinhalteten Dienste und der vollständigen Kontrolle über diese ist die Basis für die Durchführung der Anwendungsszenarien.

### 5.1.2 Monitoring-Netzwerk

Das Netzwerk „i40-monitoring“ simuliert ein zusätzliches Netzwerk, welches Dienste zur Analyse und Überwachung der Komponenten im Netzwerk bereitstellen soll. Im beschriebenen Konzept besitzt das Monitoring-Netzwerk ausschließlich eine Komponente zur Überwachung der gesendeten Daten des im „i40-network“ vorhandenen Sensors. Eine weitere Ausführung der Komponenten im Netzwerk hätte keinen Einfluss auf die gewählten Anwendungsszenarien (Abschnitt 4.2 und Ab-

schnitt 4.3) gehabt, da die Kommunikation über ein Gateway der ausschlaggebende Faktor für die Integration des zusätzlichen Netzwerks war. Aus diesem Grund wurde auch kein DHCP und DNS für das Netzwerk konfiguriert. Die Adressvergabe verläuft statisch.

### 5.1.3 Containernetzwerk

Das Containernetzwerk beschreibt das grundlegende Testsystem und wird in Weber 2018 beschrieben. Die bereitgestellten Container der Industrie 4.0 Umgebung werden durch den Docker Server verwaltet. Dieser übernimmt das IPAM sowie den DNS. Die Kommunikation zwischen den Container sowie mit dem Hostsystem findet über eine Software-Bridge<sup>1</sup> statt. Diese Form der Netzwerkkommunikation ermöglicht es das Anwendungsszenario Abschnitt 4.1 durchzuführen. Die Software-Bridge nimmt den gesamten Netzwerkverkehr entgegen und leitet ihn weiter. Somit ist es möglich diesen vom System, welches die Container verwaltet, zentral zu untersuchen.

## 5.2 Bausteinsicht

Die aus den Anwendungsszenarien (Kapitel 4) hervorgehenden Anforderungen müssen durch die Komponenten im System umgesetzt werden. Hinzu kommt, dass die beschriebenen Netzwerke durch erforderlichen Dienste verwaltet werden müssen, um die Kommunikation der Komponenten zu gewährleisten. Die logische Darstellung der Verteilungssicht unterscheidet sich grundlegend von der Umsetzung der Komponenten in der Bausteinsicht. Die Virtualisierung der Maschinen erlaubt es mehrere Komponenten auf einem System zusammenzufassen und mit mehreren Netzwerkschnittstellen in verschiedenen Netzen auszustatten, um multiple Systeme darstellen zu können.

In Abbildung 5.2 werden die VMs sowie deren Dienste und Schnittstellen in die Netzwerke dargestellt. Die Dienste DHCP, DNS im Netzwerk „i40-network“ sowie die generellen Routingfunktionalitäten werden von der VM „mgmt“ bereitgestellt. Des Weiteren wird dort der CoAP Server umgesetzt, welcher sich im Netzwerk „i40-monitoring“ befindet. Die VM „i40“ beinhaltet die Komponenten zur Manipu-

---

<sup>1</sup>TODO - eine Bridge ...

lation des Netzwerks sowie das Containernetzwerk. Der CoAP Client des Netzwerk „i40-network“ wird auf der VM „comp“ ausgeführt.

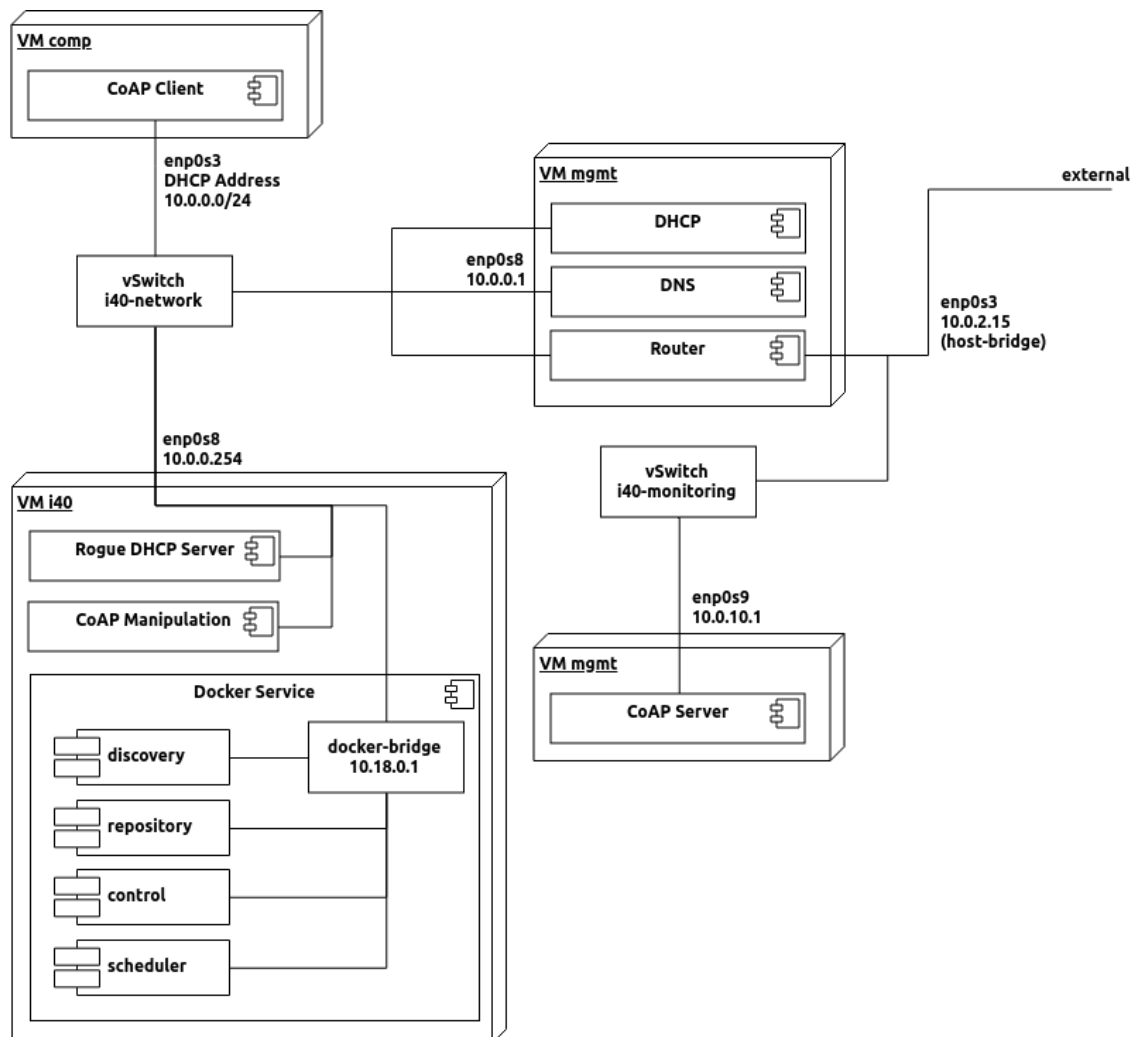


Abbildung 5.2: Virtuelle Maschinen und Dienste

### 5.2.1 Router

Die Routingfunktionalitäten werden auf der VM „mgmt“ umgesetzt. Die VM besitzt in jedem Netzwerk ein Interface, welches als Schnittstelle dient und zur Weiterleitung der Pakete genutzt wird. Die VM „mgmt“ ist die einzige Komponente der Architektur, welche eine Verbindung zum Hostsystem besitzt. Die Weiterleitung der Pakete wird auf der Internetschicht des TCP/IP Referenzmodells mit Hilfe von IPv4 Forwarding und NAT umgesetzt. Durch das Routing zum Hostsystem ist eine Verbindung der anderen, gekapselten Maschinen sowie zukünftiger Maschinen

für Installations- und Konfigurationszwecke in externe Netzwerke möglich. Um die Sicherheit des Netzwerkverkehrs sicherzustellen dürfen nur Pakete von Verbindungen, welche aus einem der internen Netze initiiert wurden weitergeleitet werden. Abbildung 5.3 stellt die Schnittstellen der Komponente dar.

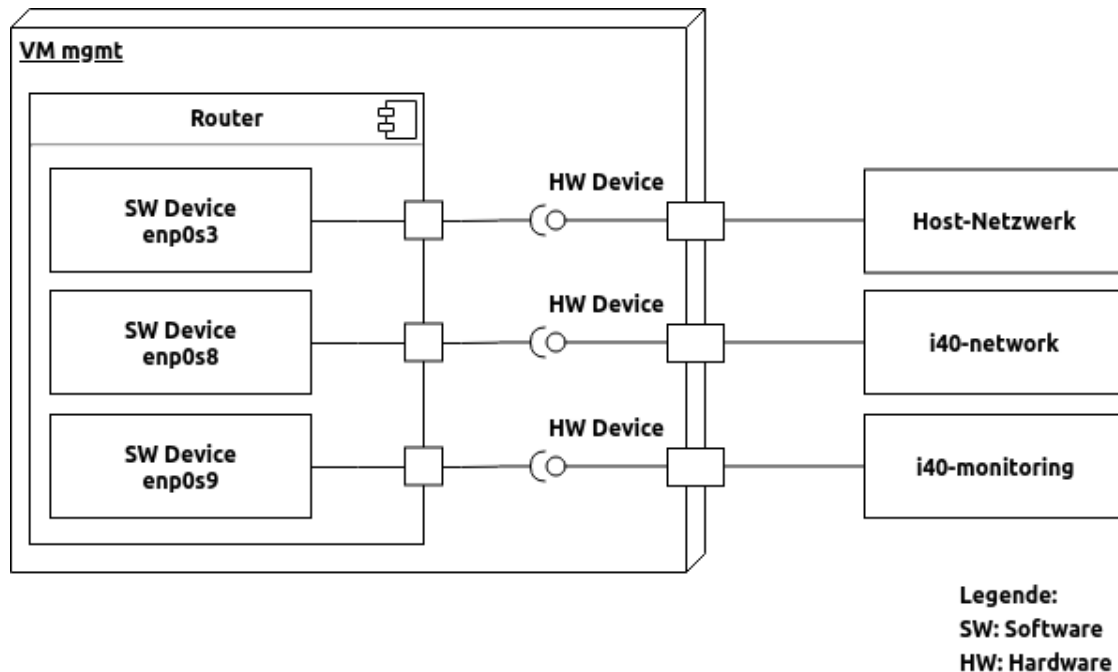


Abbildung 5.3: Routerkomponente

### 5.2.2 DHCP Server/DNS Server

Die Dienste DHCP und DNS werden zusammen auf der VM „mgmt“ konfiguriert. Sie stellen ihre Dienste im Netzwerk „i40-network“ bereit, indem sie auf die zuständige Schnittstelle gebunden werden. Zur Umsetzung der Anwendungsszenarien Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 liegt der Fokus der bereitzustellenden Funktionalität auf dem DHCP Server. Dieser muss den weiteren Komponenten im Netzwerk beim DHCP *discover*, welcher über einen Broadcast<sup>2</sup> durchgeführt wird, eine Netzwerkkonfiguration bereitstellen. Dabei ist die Vergabe eines Standardgateways für die spätere Durchführung des MitM Anwendungsszenario essentiell. Das IPAM sowie die Konfiguration des DNS und dessen dynamische Zonenaktualisierungen spielen bei der Umsetzung des Angriffs nur eine nebensächliche Rolle. Sie werden jedoch trotzdem umgesetzt, da die Konfiguration des IPAM und der *address range*

<sup>2</sup>TODO Broadcast

der DHCP *leases* eine Möglichkeit gibt den Wechsel des DHCP Servers zu Lehrzwecken visualisieren zu können. Die Bereitstellung eines mit dem DHCP Server kompatiblen DNS Servers vereinfacht durch die Namensauflösung die Verwaltung der virtuellen Maschinen in der Testumgebung und ermöglicht eine Skalierbare Erweiterung des Systems. Die Verwaltung eines separaten DNS Servers ermöglicht die Umsetzung weiterer Anwendungsszenarien und die Analyse des Sicherheitsmechanismus Domain Name System Security Extensions (DNSSEC) am Testsystem. Diese Anwendungsmöglichkeiten sind kein Bestandteil der Thesis und werden im folgenden nicht weiter erläutert. Sie bieten jedoch Ansatzmöglichkeiten für zusätzliche Erweiterungen am System und werden in Kapitel 9 näher beschrieben.

Abbildung 5.4 zeigt die Komponenten DHCP Server und DNS Server und die genutzten Schnittstellen in Bezug auf das Gesamtsystem. Beide Dienste werden auf das Netzwerkinterface des Netzwerks „i40-network“ gebunden. Somit werden die Dienste ausschließlich im beschriebenen Netzwerk bereitgestellt.

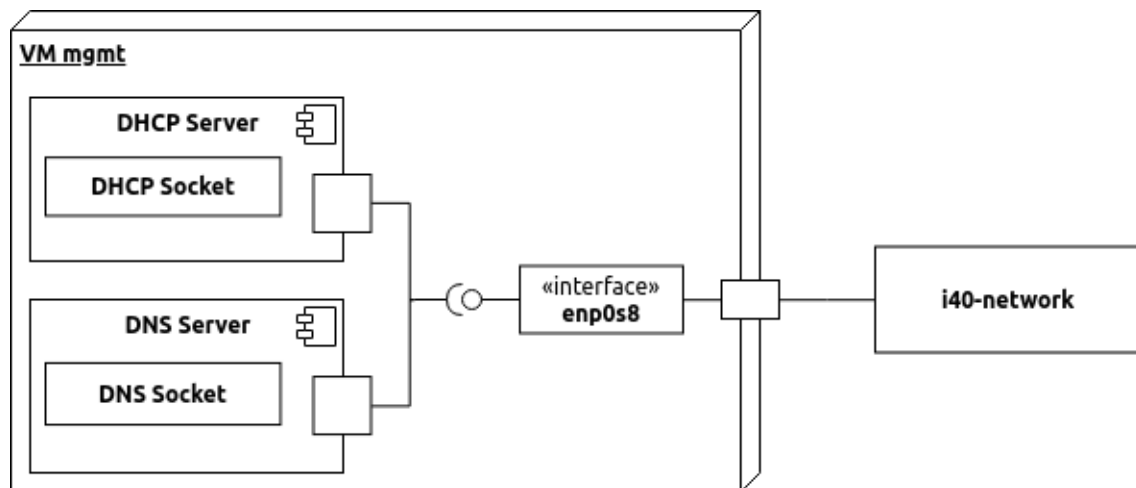


Abbildung 5.4: DHCP und DNS Server

### 5.2.3 CoAP Client/CoAP Server

Die Komponenten CoAP Client und CoAP Server dienen der Erweiterung des Testsystems um ein weiteres IIoT Protokoll zur Darstellung des in Abschnitt 4.3 beschriebenen Szenarios. Die Komponenten simulieren einen Temperatursensor sowie ein Monitoringsystem, welches ein Webinterface zur Darstellung der gemessenen Temperatur besitzt. Der CoAP Client wird auf der VM „comp“ realisiert und befindet sich im Netzwerk „i40-network“. Er sendet die gemessenen Daten zum zu-

ständigen CoAP Server im Netzwerk „i40-monitoring“. Der CoAP Server wird, da er den einzigen Dienst in diesem Netzwerk darstellt, auf der VM „mgmt“ bereitgestellt. Die VM „mgmt“ besitzt bereits ein Interface im Netzwerk „i40-monitoring“. Der Dienst kann auf die Adresse der Schnittstelle gebunden werden. Es muss keine weitere VM zum Netzwerk hinzugefügt werden.

Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 visualisieren die Bestandteile der betroffenen Komponenten, deren bereitgestellte Dienste und die genutzten Schnittstellen.

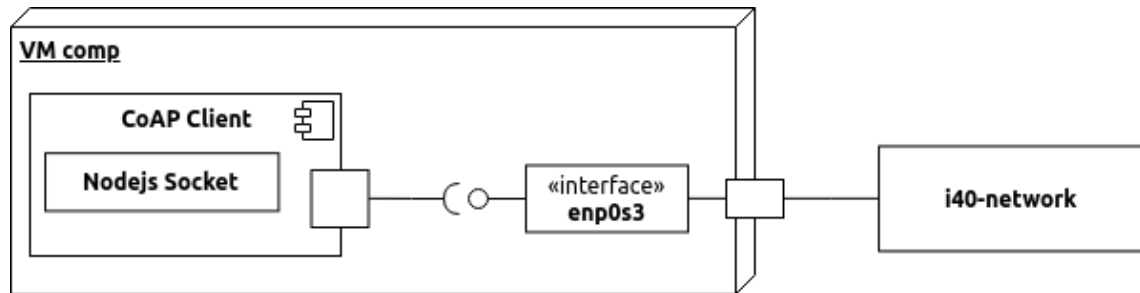


Abbildung 5.5: CoAP Client

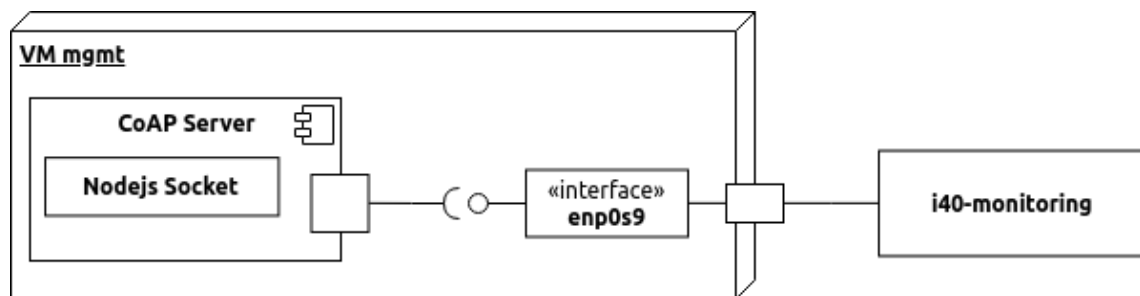


Abbildung 5.6: CoAP Server

#### 5.2.4 Rogue DHCP Server

Die Bereitstellung des Rogue DHCP Servers findet auf der bestehenden VM „i40“ statt. Die bestehende virtuelle Maschine stellt bereits Tools zu Analyse der Netzwerkkommunikation für das Dockernetzwerk bereit. Eine Erweiterung dieses Systems ermöglicht es die bereitgestellten Anwendungen zur Analyse in den Anwendungsszenarien des Netzwerks der VMs ebenfalls zu nutzen. Dies wird durch die Trennung der Netzwerkschnittstellen ermöglicht. Die Analyse der Pakete findet fortan auf der Schnittstelle „enp0s8“ statt der Docker Netzwerkbrücke statt. Um die Netzwerkpakete der anderen Teilnehmer über die Schnittstelle der VM zu leiten, muss die Maschine selbst als Gateway für die Kommunikation zwischen den

Netzen genutzt werden. Der Rogue DHCP Server ermöglicht die Änderung des Standardgateways bei Erneuerung des DHCP *lease* der Client und kann somit den Verkehr auf das lokale System umleiten. ?? zeigt die Eingliederung des Dienstes in das vorhandene System. Der Dienst muss im Netzwerk „i40-network“ agieren und wird somit auf das Interface „enp0s8“ gebunden.

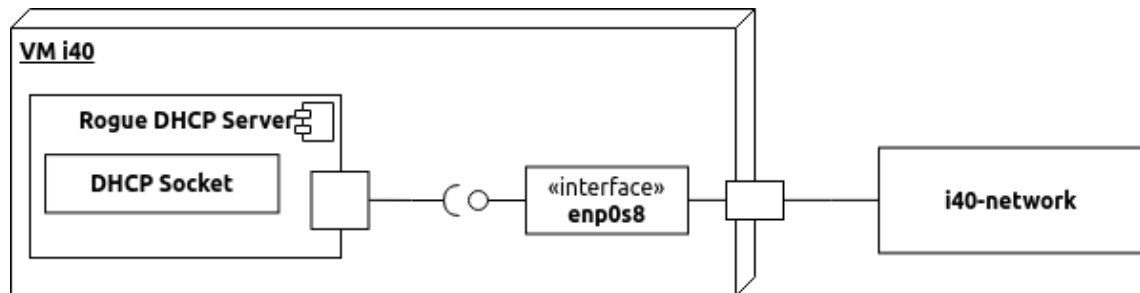


Abbildung 5.7: Rogue DHCP Server

### 5.2.5 CoAP Manipulationssystem

Das CoAP Manipulationssystem wird genutzt, um das CoAP Monitoringsystem durch falsche bzw. unzulässige Netzwerkpakete zu beeinflussen. Es wird ebenfalls auf der VM „i40“ bereitgestellt. Dies ermöglicht die weiterhin die zentrale Verwaltung des Systems und die Durchführung der Anwendungsszenarien. Eine Bereitstellung des Manipulationsdienstes auf dem gleichen System wie der Rogue DHCP Server und die Anwendungen zur Netzwerkanalyse ist sinnvoll, da die Umleitung der Netzwerkpakete durch den Rogue DHCP Server und die anschließende Analyse des Verkehrs die Grundlage für die Manipulation des Monitoringsystems darstellt und voneinander abhängig ist.

Das CoAP Manipulationssystem versendet Netzwerkpakete mit gefälschten Daten zum CoAP Monitoringsystem. Diese werden über die Netzwerkschnittstelle „enp0s8“ in das „i40-network“ versandt. Die Verbindung in das Netzwerk „i40-monitoring“ wird über die Routingfunktionalitäten der VM „mgmt“ bereitgestellt. Abbildung 5.8 beschreibt den Aufbau der Komponente.



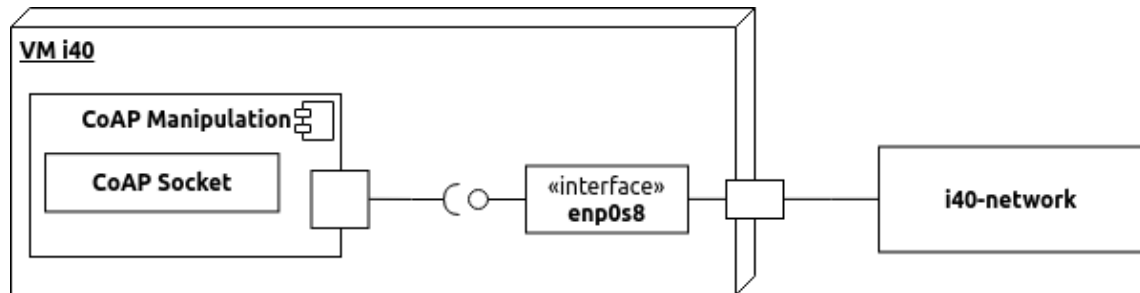


Abbildung 5.8: CoAP Manipulationssystem

### 5.2.6 Docker Service

An der Netzwerkkonfiguration sowie am auf der VM „i40“ bereitgestellten Docker Service wurden keine Änderungen vorgenommen. Die genutzte Konfiguration des Dienstes ist in Weber 2018 erläutert. Eine Integration der neuen Komponenten als zusätzliche Container im bestehenden Netzwerk war nicht möglich, da dies die Analyse des Netzwerks durch die Netzwerkimplementierung der Software Docker verfälscht bzw. verhindert. Eine genaue Beschreibung der Beschränkungen, welche bei der Umsetzung des Systems zum Tragen kamen, wird in ?? durchgeführt.

## 5.3 Laufzeitsicht

Die Laufzeitsicht dient der Darstellung der Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten zur Bereitstellung einer Gesamtfunktionalität. In diesem Abschnitt werden die essentiellen Abläufe des Systems in Anlehnung an UML-Sequenzdiagramme dargestellt, welche die Netzwerkkommunikation und -konfiguration zwischen den Komponenten bereitstellen.

### 5.3.1 Routing

TODO - Routing darstellen.

### 5.3.2 DHCP

Im Netzwerk „i40-network“ werden die Dienste DHCP und DNS zur dynamischen Konfiguration und Namensauflösung der Hosts genutzt. Abbildung 5.9 zeigt die

Konfiguration eines Hosts beim Bezug der Netzwerkkonfiguration im „i40-network“ mit Hilfe des zuständigen DHCP Servers. Die Netzwerknachrichten der DHCP Konfiguration werden, da der Client zum Zeitpunkt der dynamischen Konfiguration noch keine IP Adresse im Netzwerk besitzt, über den Broadcast im Netzwerk versandt. Die Pakete werden ausschließlich von DHCP Servern angenommen und verarbeitet, weitere Clients im Netzwerk verwerfen die Pakete. Im Sequenzdiagramm ist, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten nur die Kommunikation zwischen den aktiven Beteiligten während der dynamischen Konfiguration des Hosts dargestellt.

Um vollständige Funktionalität des Clients im Netzwerk bereitzustellen, werden IP Adresse, Netzwerkmaske, DNS sowie ein Gateway zur Verbindung in andere Netze benötigt. Nach dem DHCPDISCOVER des Clients bietet der DHCP Server mit Hilfe des DHCPOFFER Netzwerkkonfigurationen für den Client an. Dieser bestätigt die Konfiguration mit einem DHCPREQUEST. Ist die vom Server angebotene Konfiguration gültig und die IP Adresse weiterhin frei, wird vom Server ein DHCPACK gesendet, um die Konfiguration zu bestätigen.

DNS und DHCP arbeiten im Testsystem zusammen. Der DHCP Server muss den DNS Server über neue Clients im Netzwerk informieren, um eine Namensauflösung dieser bereitstellen zu können. Die Kommunikation zur Aktualisierung der DNS Zonen geschieht wird mit Hilfe eines symmetrischen Schlüssels gesichert. Beide Komponenten müssen diesen Schlüssel besitzen, um sich beim anderen Dienst zu Authentifizieren. Die dynamische Aktualisierung einer DNS Zone wird ebenfalls in Abbildung 5.9 beschrieben.

### 5.3.3 DNS

Die Namensauflösung der internen Adressen findet direkt auf dem DNS Server statt. Bei einem DNS Request werden die lokalen Zonendateien durchsucht und in der Answer Section der DNS Response die gewünschten RR bereitgestellt. Das interne Netzwerk „i40-network“ besitzt eine Zone auf dem Nameserver. Dort müssen alle statischen Adressen zur Namensauflösung eingetragen werden. Die dynamischen Adressen werden ebenfalls in dieser Zone temporär hinterlegt. Um eine Namensauflösung in externe Netze zu gewährleisten, muss der DNS Server weitere Nameserver kennen, um Domainnamen, welche nicht in der Datenbank des lokalen Servers vorhanden sind, aufzulösen. Das DNS System nutzt Rekursion oder Iteration, um den *authorativen* Server im Netzwerk zu bestimmen und die Namensauflösung be-

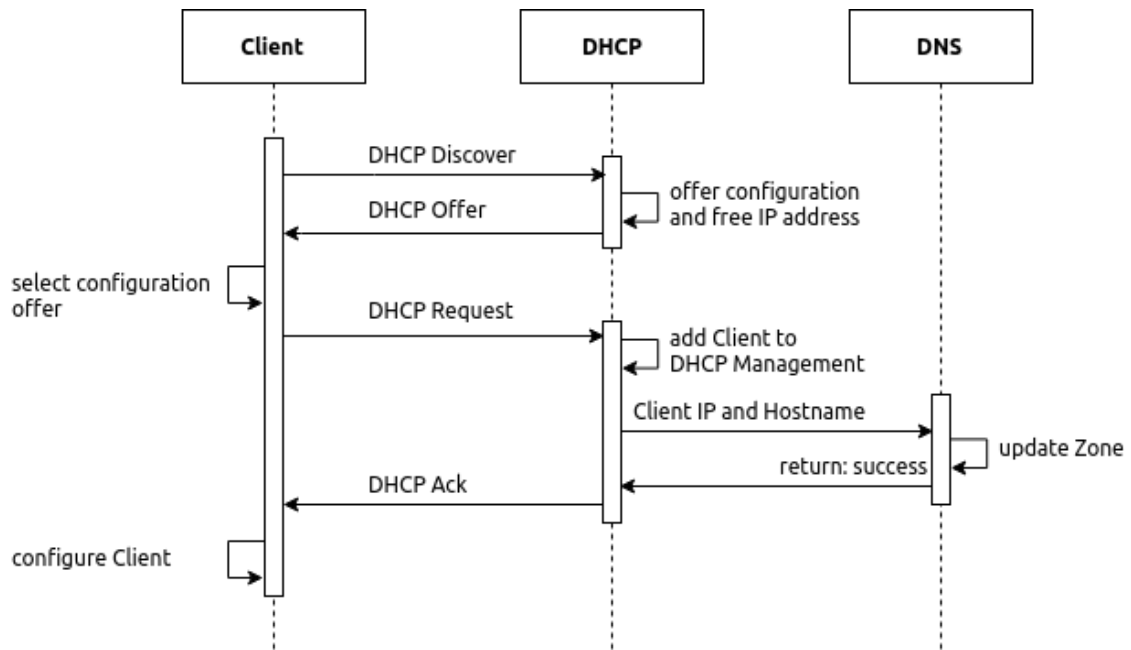


Abbildung 5.9: Dynamische Hostkonfiguration mit DHCP und DNS

reitzustellen. Der Ablauf der Namensauflösung wird vom zuständigen Nameserver bestimmt. Abbildung 5.10 stellt den Ablauf der rekursiven Namensauflösung einer externen DNS Zone vereinfacht dar. Der lokale DNS Server arbeitet als DNS-Forwarder. Er leitet die Anfrage zur unbekannten Zone an einen externen DNS weiter, welcher die Adresse auflöst und dem internen Nameserver das Ergebnis mitteilt. Die Rekursion der Befragung weiterer DNS Server findet solange statt, bis ein für die Domain zuständiger Nameserver gefunden wurde, welcher die Adresse auflöst. Bei der iterativen Namensauflösung sendet der DNS Server dem Client die Adresse des *authorativen* DNS Servers zu. Dieser führt dann einen erneuten DNS Query bei diesem Server durch. Der Ablauf der iterativen Namensauflösung wird in Abbildung 5.11 dargestellt.

Die genutzte Form der Namensauflösung hat auf die Umsetzung des Konzepts keinen Einfluss. Um eine Namensauflösung in externe Netze bereitzustellen muss der DNS Server lediglich eine erreichbare DNS Forward-Adresse besitzen.

### 5.3.4 Kommunikation CoAP Client und Server

Das Zusammenspiel der bisher beschriebenen Komponenten wird für die Kommunikation zwischen CoAP Client und CoAP Server benötigt. Im in Abschnitt 4.3

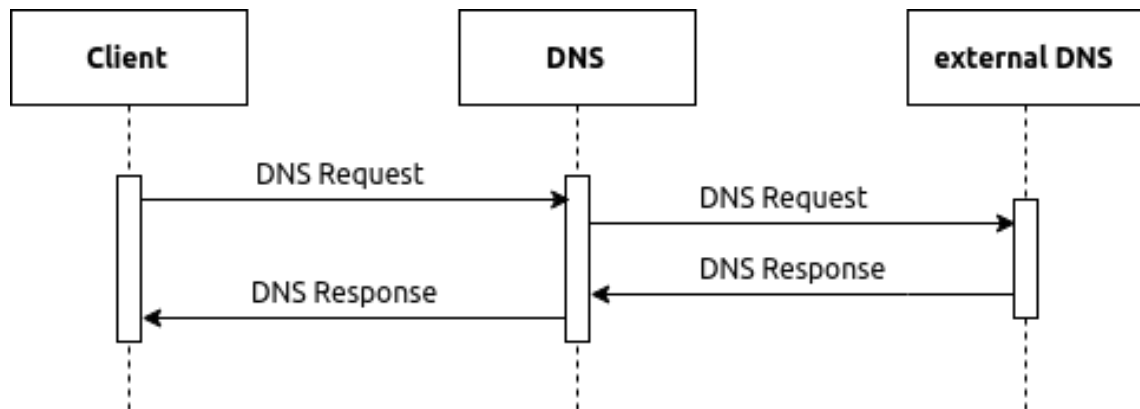


Abbildung 5.10: Rekursive DNS Namensauflösung

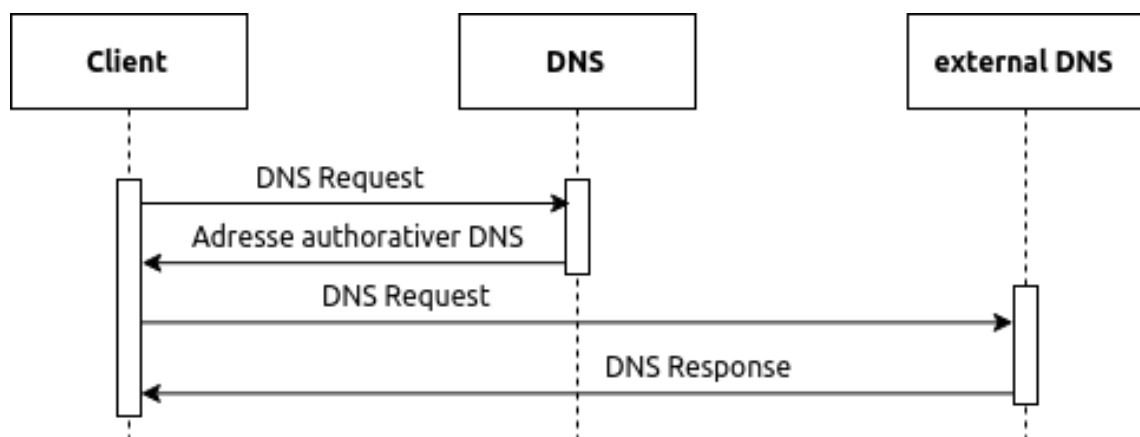
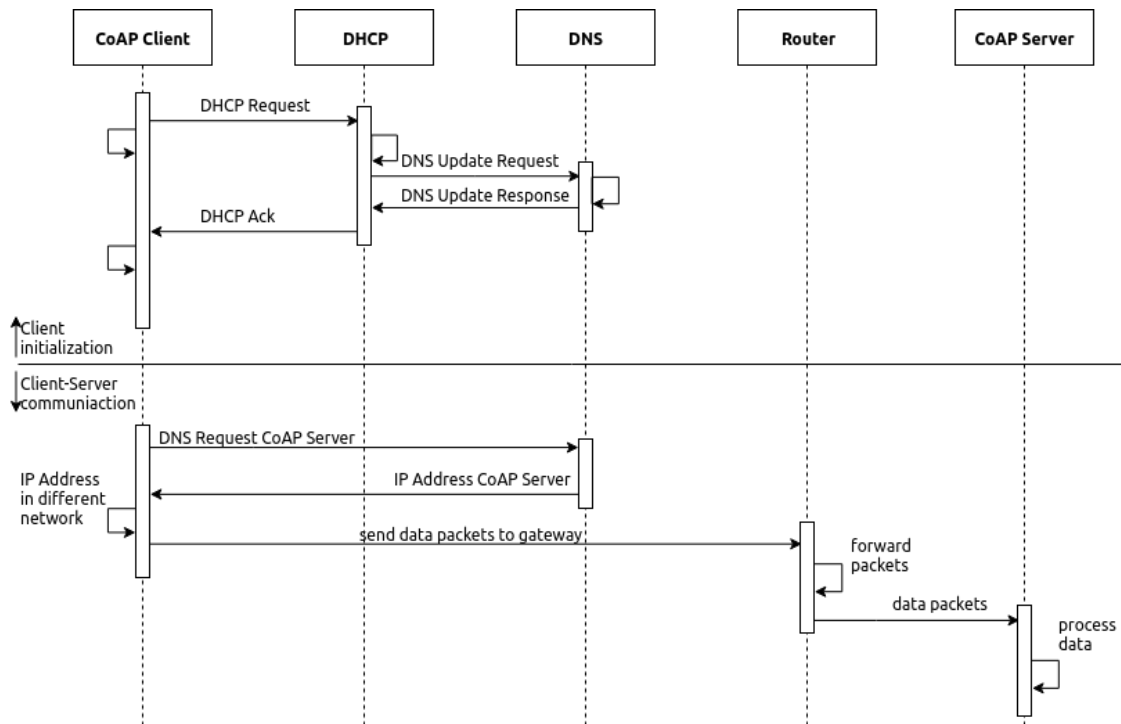


Abbildung 5.11: Iterative DNS Namensauflösung

beschriebenen Anwendungsszenario findet zwischen den Komponenten ausschließlich eine unidirektionale<sup>3</sup> Kommunikation vom Client zum Server statt. Abbildung 5.12 zeigt die Netzwerkkonfiguration des Clients und die genutzten Komponenten bei der Übermittlung einer Nachricht vom Client zum Server und steht beispielhaft für die Kommunikation aller Komponenten im Netzwerk. Um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu erhalten, findet nur noch eine einfache Beschreibung der Initialisierung des Clients statt. Diese wurde bereits in Abbildung 5.9 beschrieben. Die Kommunikation zwischen CoAP Client und DHCP findet im Netzwerk „i40-network“ statt. Die Kommunikation zwischen dem Client und Server erfordert die Nutzung eines Routers, da sich die Serverkomponente im Netzwerk „i40-monitoring“ befindet. Die Struktur der Netzwerkkommunikation gilt für alle Komponenten des Netzwerks „i40-network“.

<sup>3</sup>TODO - Unidirektional -> in eine Richtung



**Abbildung 5.12:** Initialisierung von CoAP Client und Kommunikation zwischen CoAP Client und CoAP Server

### 5.3.5 Manipulation des Netzwerkverkehrs

Durch die Aktivierung der Rogue DHCP Komponente auf der VM „i40“ wird ein zweiter DHCP Server im Netzwerk aktiviert. Komponenten, welche über einen DHCP Discover den für das Netzwerk zuständigen DHCP Server kontaktieren möchten, können nun auch eine Antwort des Rogue DHCP Servers erhalten. Dieser stellt eine DHCP Konfiguration mit sich selbst als Gateway bereit. Trifft der DHCP Offer des Rogue DHCP Servers vor dem DHCP Offer des eigentlichen DHCP Servers beim Client ein, sendet dieser den gesamten Netzwerktraffic, welcher für andere Netze bestimmt ist über den neuen DHCP Server. Um die Netzwerkkommunikation der Systeme, welche den Rogue DHCP Server als Gateway nutzen weiterhin bereitzustellen, muss dieser die Pakete wieder zum ursprünglichen Router weiterleiten. Der Ablauf der Kommunikation wird in Abbildung 5.13 vereinfacht beschrieben. DHCP Nachrichten werden nicht gerichtet an Systeme gesendet, diese werden über den Broadcast des Netzwerks kommuniziert. Die DNS Namensauflösung wurde in der Darstellung nicht aufgeführt, da sie zur Umleitung der Netzwerkpakete in diesem Beispiel keinen Beitrag leistet.

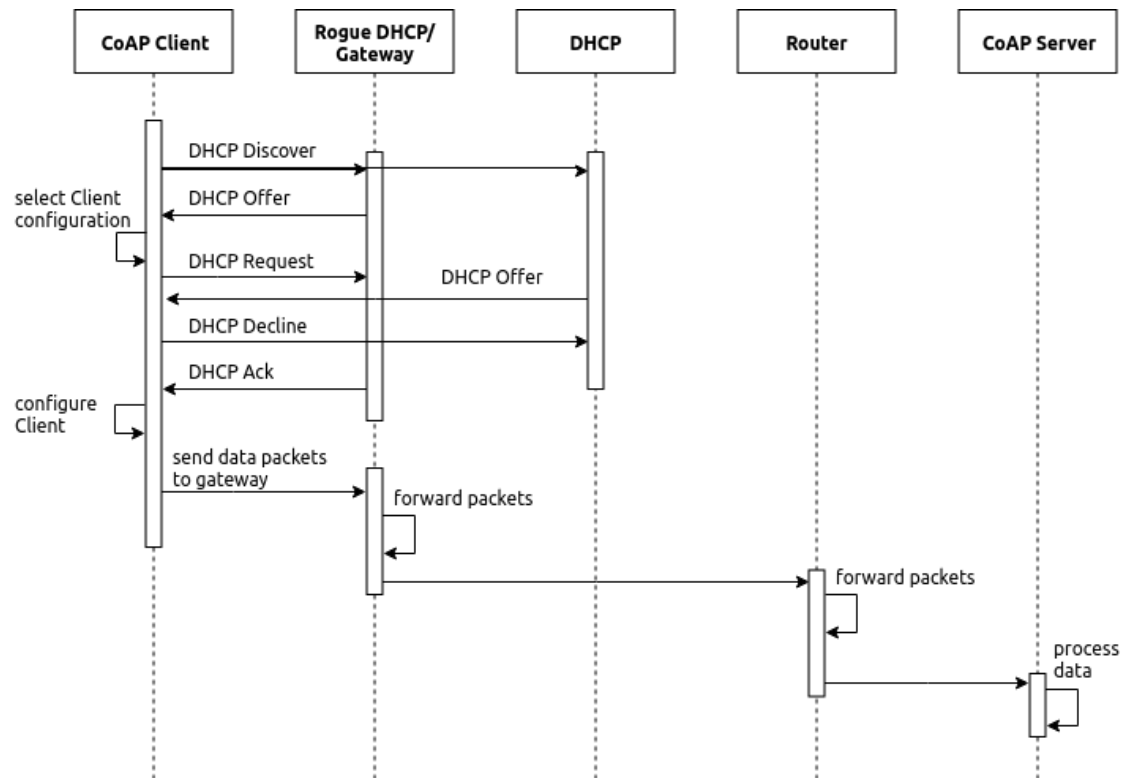


Abbildung 5.13: Umleitung der Netzwerkkommunikation durch Manipulation des Gateways

### 5.4 Anpassungen

Im Laufe der Entwicklung des Konzepts mussten immer wieder Anpassungen vorgenommen werden. Diese bezogen sich auf die Umsetzbarkeit des Konzepts in Bezug zu dem im Testsystem bisher verwendeten Softwarestack.

Ursprünglich wurde die Erweiterung des Testsystems um zusätzliche Docker Container, welche die aus den in Kapitel 4 beschriebenen Anwendungsszenarien hervorgehenden Anforderungen sowie die benötigte Netzwerkinfrastruktur umsetzen, geplant. Dies war nicht möglich, da die Containervirtualisierung kein vollständiges System inklusive Hardwarekomponenten simuliert, sondern lediglich ein isoliertes Gastsystem darstellt, welches den Kernel und die Komponenten des Hostsystems nutzt. Die Netzwerkimplementierung der genutzten Software Docker stellt vier Netzwerktreiber<sup>4</sup> zur Kommunikation der Container mit anderen Komponenten bereit. Jeder dieser Treiber stellt ein eigenes, statisches IPAM mit Hilfe des Docker Service bereit. Der Treiber *macvlan* simuliert zwar eine physikalische Schnittstelle der Container mit Hilfe einer **MAC! (MAC!)** Adresse, jedoch übernimmt der Do-

<sup>4</sup>Docker Netzwerktreiber - <https://docs.docker.com/network/>

cker Service weiterhin das IPAM. Die Adressvergabe und Netzwerkkonfiguration ist somit weiterhin nur statisch beim Start der Container möglich.

Eine Alternative würde die Nutzung von Pipeworks<sup>5</sup> darstellen. Die Software ermöglicht es die Container zu einem logischen, physikalischen Interface zu verbinden, indem sie im Container einen zusätzlichen Netzwerkadapter bereitstellt. Somit könnte die externe Verwaltung der Docker Netzwerkschnittstellen über einen DHCP Server bereitgestellt werden. Die Software stellt keine solide Implementierung bereit und rät dazu wenn möglich auf die offiziellen Implementierungen von Docker zurückzugreifen. Mit der Erweiterung des Systems um zusätzliche Softwareimplementierungen können weitere Nebeneffekte oder Probleme bei der Umsetzung der Anwendungsszenarien aufgrund von Softwarebeschränkungen entstehen.

Da keiner der Beschriebenen Ansätze eine zufriedenstellende Lösung zur Umsetzung der Anwendungsszenarien bereitstellt, wurde die Erweiterung des Systems und die Darstellung verschiedener Netzwerkkomponenten und deren Kommunikation mit Hilfe von VMs realisiert. VMs werden in Industrie 4.0 Netzwerken weitreichend und produktiv genutzt. Sie können die Infrastruktur repräsentieren und bieten auch für die Zukunft eine stabile Grundlage zur Integration weiterer Dienste im Testsystem. Sie stellen umfangreiche Konfigurationsmöglichkeiten für die virtualisierte Hardware der Clients sowie das Netzwerk bereit.

---

<sup>5</sup>Pipeworks - <https://github.com/jpetazzo/pipework>





## Kapitel 6

### Umsetzung

Die Umsetzung eines Prototyps soll der Validierung des erstellten Konzepts dienen. Um das in dieser Arbeit beschriebene Konzept zu überprüfen, wurden die in Kapitel 4 beschriebenen Anwendungsszenarien, welche die Analyse und Manipulation der Netzwerkkommunikation im System ermöglichen, umgesetzt. Die Bereitstellung dieser Anwendungsszenarien erfordert aufgrund der in Abschnitt 5.4 beschriebenen, durch die Softwarewahl auftretenden Beschränkungen der Netzwerkkonfiguration, eine Anpassung der Architektur sowie die Erweiterung des bestehenden Systems um weitere Komponenten.

Die vorhandene Implementierung des OPC UA Protokolls der Industrie 4.0 Testumgebung wurde um die Bereitstellung von Sicherheitsprofilen im Secure Channel erweitert. Dadurch ist es möglich, die Netzwerkkommunikation der Komponenten an der Netzwerkbrücke des Docker Services bzgl. der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Anforderungen zu analysieren.

Des weiteren wurde das Testsystem um eine Netzwerkumgebung mit weiteren Netzwerkteilnehmern in verschiedenen Netzen erweitert. Diese stellen die Dienste DHCP sowie DNS bereit. Um die Kommunikation zwischen den Netzwerkteilnehmern und dem vorhandenen Containernetz bereitzustellen, wurde ein Router für den Transport und die Wegfindung der Pakete zwischen den verschiedenen Netzen konfiguriert. Dieser Verbund ermöglicht die Umsetzung einer MitM Attacke mit Hilfe eines Rogue DHCP Servers im Netzwerk.

Um den Eingriff und die Manipulation der Netzwerkkommunikation zweier Komponenten zu untersuchen, wurde eine CoAP Client-Server Architektur implementiert. Über die beschriebene MitM Attacke ist es möglich Informationen über die

Kommunikation der implementierten CoAP Komponenten zu erlangen und diese zu verändern.

Die Anzahl der benötigten virtuellen Komponenten wird gering gehalten, indem die vorhandenen VMs mit mehreren Netzwerkinterfaces bereitgestellt werden. Dies ermöglicht die logische Trennung der Dienste auf einer VM in verschiedene Netzwerke. Die Dienste werden auf die speziellen Netzwerkinterfaces gebunden. Somit kann eine Simulation der Kommunikation über Gateways ermöglicht werden.

### 6.1 Softwarewahl

Das vorhandene Testsystem (Weber 2018) basiert auf einer Ubuntu Desktop 18.04 (**LTS! (LTS!)**)<sup>1</sup> virtuellen Maschine und der Containervirtualisierung Docker. Beim für die Erweiterung genutzten Softwarestack wurde sich weitestgehend am Testsystem orientiert, um die Kompatibilität zu bestehenden Komponenten zu gewährleisten und weiterhin ein flexibles System bereitzustellen. Für die Analyse der Netzwerkkommunikation des genutzten Protokolls OPC UA wurden die benötigten Änderungen direkt am Quellcode der NodeJS Implementierung des Industrie 4.0 Testsystems vorgenommen. Weitere Komponenten wurden, aufgrund von Abschnitt 5.4, in weiteren virtuellen Maschinen umgesetzt, um das IPAM des Netzwerks selbst bereitstellen und manipulieren zu können. Um Lizenzkosten zu vermeiden, wurde als Basis für die zusätzlichen virtuellen Maschinen das Betriebssystem Ubuntu Server in der letzten verfügbaren **LTS!** Version genutzt. Die genutzten Softwarepakete und Bibliotheken sind Bestandteil des GNU-Projekts<sup>2</sup> und sollten somit analog in anderen Unix Betriebssystemen genutzt werden können. Aufgrund der weiten Verbreitung und umfangreichen Dokumentation wurde die Software *isc-dhcp-server*<sup>3</sup> und *bind*<sup>4</sup> genutzt. Die Routingfunktionalitäten wurden über *iptables*<sup>5</sup> bereitgestellt. Als Hypervisor kommt weiterhin die Software „Oracle VM Virtual Box“ zum Einsatz, um die Komplexität des Systems gering zu halten.

---

<sup>1</sup>LTS - Long Term Support TODO

<sup>2</sup>text

<sup>3</sup>DHCP Server unso TODO

<sup>4</sup>DNS Server unso TODO

<sup>5</sup>iptables sau geil

## 6.2 Integration

Die Integration des Systems beschreibt die Bereitstellung und Konfiguration der System- und Netzwerkarchitektur. Um den Zeit- und Arbeitsaufwand für die Bereitstellung des Betriebssystems zu minimieren, wurde, um die zwei zusätzlichen virtuellen Maschinen bereitzustellen, ein Minimalsystem des Ubuntu Server 18.04 (**LTS!**) generisch installiert und als Vorlage genutzt. Hierbei wurde der Benutzer „i40“ mit dem Passwort „industrie40“ angelegt, welcher für alle Maschinen gilt.

Aus der Vorlage wurden die Klone „mgmt“ und „comp“ erstellt. Die VM „mgmt“ dient der Bereitstellung der im Testnetzwerk benötigten Dienste DHCP und DNS und dient als Router zwischen den verschiedenen internen Netzwerken sowie zum Host System. Auf der VM „comp“ wurde der CoAP Client umgesetzt. Die vorhandene VM „i40“ wird um einen Rogue DHCP Server erweitert.

Zuerst wurde die Netzwerkkonfiguration aller vorhandener virtueller Maschinen wie in ?? beschrieben angepasst. Dies konnte in den Einstellungen des Hypervisors durchgeführt werden. Die Netzwerkkonfiguration der VM „i40“ wurde von NAT auf das interne Netzwerk „i40-netzwerk“ geändert. Der VM „mgmt“ wurden drei Netzwerkadapter hinzugefügt. Der erste Adapter gehört dem internen Netzwerken „i40-netzwerk“ an, der zweite Adapter dem internen Netzwerken „i40-monitoring“, der dritte Adapter dient dem Host-NAT. Die VM „comp“ besitzt nur einen Netzwerkadapter, welcher dem internen Netzwerk „i40-monitoring“ angehört.

Die Installation und Konfiguration aller Komponenten sowie deren Konfigurationsdateien werden in den jeweiligen Readme Dateien des Git Repositories<sup>6</sup> detailliert beschrieben.

### 6.2.1 Netzwerkverwaltung

Um die grundlegenden Netzwerkdienste in den internen Netzwerken bereitzustellen und die Kommunikation anderer Netzwerkteilnehmer mit externen Netzen wie dem Internet zur Installation und Konfiguration weiterer Software zu ermöglichen, wurde mit der Installation und Konfiguration der VM „mgmt“ begonnen.

Nach dem Start der VM wurde der Hostname zur Namensauflösung auf dem System geändert. Anschließend wurde die Netzwerkkonfiguration aller Adapter durch-

---

<sup>6</sup>TODO - Mein Git

geführt und den Schnittstellen der internen Netzwerke die statischen IP Adressen 10.0.0.1 und 10.0.10.1 zugewiesen. Der Adapter zum Hostsystem bleibt unverändert. Auf der IP Adresse 10.0.0.1 werden für das Netzwerk „i40-network“ die Dienste DHCP und DNS konfiguriert. Für das Netzwerk „i40-monitoring“ wird kein DHCP konfiguriert, da nur zwei Komponenten im Netzwerk vorhanden sind und die Form der Adressvergabe in diesem Netzwerk keinen Einfluss auf die Umsetzung des Konzepts hat.

### **DNS/DHCP**

Eine korrekte Namensauflösung in einem Netzwerk mit dynamischen IP Adressen kann nur ermöglicht werden, wenn die Dienste DNS und DHCP zusammenarbeiten. Die Authentifizierung zwischen DNS und DHCP zur automatischen Erstellung und Erneuerung von Zonen für Teilnehmer mit dynamischen Adressen findet mit Hilfe eines symmetrischen Schlüssels statt, welcher auf beiden Servern hinterlegt sein muss. Der Schlüssel wurde mit Hilfe des Tools *rndc-confgen* erstellt.

Anschließend wurde der DNS Server installiert und konfiguriert. Dabei wurden die Berechtigungen zum Anfragen des DNS Servers auf das gewünschte Netz 10.0.0.0/24 beschränkt, um die Nutzung des Servers als Open DNS<sup>7</sup> zu verhindern, die DNS Server von Google (8.8.8.8) und OpenDNS (208.67.220.220) als Forwarder genutzt, der erstellte Schlüssel eingebunden und das Interface des Dienstes auf das Netzwerk „i40-network“ beschränkt. Auf die Konfiguration des Sicherheitsmechanismus DNSSEC wurde aus zeitlichen Gründen verzichtet.

Um eine Namensauflösung im Netzwerk bereitzustellen, wurde eine *Forward*- sowie *Reverselookup*-Zone für die Suchdomain „i40-network.lan“ erstellt und die statischen IP Adressen der VMs „i40“ und „mgmt“ hinterlegt. Nach dem Neustart des Dienstes wurde mit Hilfe der Software *dig* die korrekte Funktionalität der Namensauflösung im Netzwerk getestet.

Danach wurde der DHCP Server installiert. In der Konfiguration des Servers wurde ebenfalls der erstellte Schlüssel zur Aktualisierung des DNS Zonen hinterlegt. Es wurde das Feature „ddns-updates“ aktiviert, den Dienst auf das Interface der Netzwerks „i40-network“ beschränkt und die zu Verteilenden DHCP Informationen wie DHCP Range, Gateway und Nameserver definiert. Die DHCP Range des Servers

---

<sup>7</sup>OPENDNS TODO WAS DES

wurde auf die Adressen 10.0.0.2 - 10.0.0.100 beschränkt, um im späteren Verlauf einen Wechsel des DHCP Servers auf den anderen Systemen durch einen Wechsel der IP Adresse besser verdeutlichen zu können.

Die Validierung der Funktionalität des DHCP Servers wird durch die Konfiguration des DHCP Clients der VM „comp“ durchgeführt.

### **Routing**

Die Umsetzung der Routingfunktionalität benötigte keine zusätzliche Installation von Software. Sie wurde durch IP Forwarding und NAT mit Hilfe von *iptables* umgesetzt. Das IP Forwarding muss auf Betriebssystembasis durch Änderung einer Konfiguration<sup>8</sup> aktiviert werden. Anschließend konnten die folgenden Regeln definiert werden, um die Pakete bei Verbindungen, welche von den internen Netzen hergestellt wurden, weiterzuleiten.

```
iptables -A FORWARD -i enp0s8 -o enp0s9 -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j
ACCEPT
iptables -A FORWARD -i enp0s9 -o enp0s8 -j ACCEPT
iptables -A FORWARD -i enp0s3 -o enp0s8 -m state --state RELATED,ESTABLISHED -j
ACCEPT
iptables -A FORWARD -i enp0s8 -o enp0s3 -j ACCEPT
```

**Listing 6.1:** Iptables

Das Interface „enp0s3“ beschreibt die Verbindung zum Hostsystem, der Adapter „enp0s8“ ist Teil des Netzwerks „i40-network“, der Adapter „enp0s9“ stellt die Schnittstelle des Routers im Netzwerk „i40-monitoring“ dar.

Um das Regelwerk bei jedem Neustart bereitzustellen wird es in einer Datei<sup>9</sup> gespeichert und durch das Softwarepaket *iptables-persistent* bei jedem Systemstart wiederhergestellt.

### **Delay**

Ein weiterer Bestandteil des Netzwerkstacks des Linux Kernels stellt das Tool *tc*<sup>10</sup> dar. Hiermit wurde im Netzwerkinterface des DHCP Servers ein Delay von 500ms

<sup>8</sup>IPv4 Forwarding : /etc/sysctl.conf

<sup>9</sup>iptables Konfiguration : /etc/iptables/rules.v4

<sup>10</sup>tc : traffic control

simuliert. Dies ermöglicht im weiteren Verlauf, dass die Netzwerkpakete des Rogue DHCP Servers früher beim anzugreifenden Client eintreffen, als die Pakete des zuständigen Servers.

### 6.2.2 CoAP Server

Das Monitoringsystem der CoAP Komponente wurde auf der VM „comp“ umgesetzt. Nach dem Start der Maschine wurde auch hier der Hostname angepasst und die Netzwerkkonfiguration auf DHCP gesetzt. Dies stellte eine optimale Gelegenheit zum testen des bereitgestellten DNS und DHCP Servers sowie der Routing-funktionalitäten dar.

Die Konfigurationsparameter des DHCP Servers, welche aus IP Adresse, DNS und Gateway bestehen, konnten auf dem Client mit Hilfe der Tools *ip*<sup>11</sup> und *systemd-resolv*<sup>12</sup> überprüft werden und somit die korrekte Funktionalität des DHCP Servers nachgewiesen werden. Die Funktionalität des DNS Servers im Netzwerk konnte auf diesem Server mit dem Tool *dig* nachgewiesen werden, indem die RR der Management-VM sowie die RR der dynamisch bezogenen Komponenten-VM abgefragt und überprüft wurden.

Zur späteren Ausführung des implementierten Überwachungssystems musste auf diesem System ein Webserver bereitgestellt werden. Dies geschieht durch das Paket *nodejs*, welches auf dem System installiert wurde.

## 6.3 Implementierung

Die Implementierung umfasst die Erweiterung und Anpassung des vorhandenen Systems sowie die Bereitstellung eines neuen Dienstes. Die vorhandene Implementierung über das Protokoll OPC UA wird angepasst, um die Kommunikation über den *Secure Channel* mit Hilfe verschiedener Sicherheitsprofile zu analysieren. Hierbei wird eine unverschlüsselte sowie verschlüsselte Kommunikation zwischen OPC UA Client und Server bereitgestellt.

Das Testsystem wurde um ein zusätzliches Monitoringsystem erweitert, welches eine CoAP Komponente überwacht. Die Ausführung dieser Architektur dient der

---

<sup>11</sup>*ip* a und so

<sup>12</sup>*TODO* - des auch

Analyse eines weiteren IIoT Protokolls in Bezug auf die Manipulation von Netzwerktraffic und Verdeutlichung der Auswirkungen dieser Bedrohung.

### 6.3.1 OPC UA Secure Channel

Um die Verwendung verschiedener Sicherheitsrichtlinien im OPC UA *Secure Channel* bereitzustellen muss die Form des Verbindungsaufbaus der vorhandenen OPC UA Clients im Quellcode geändert werden. Die OPC UA Server des Testsystems stellen die verschiedenen Sicherheitsprofile *None*, *Basic128Rsa15*, *Basic256* und *Basic256Sha256* bereit. Diese beinhalten den für die Nachrichtenübermittlung genutzten Verschlüsselungsalgorithmus. Bei der Übertragung der Daten im *Secure Channel* wird der OPC UA *MessageSecurityMode* auf das Sicherheitsprofil angewandt. Hierbei stehen die Optionen NONE, SIGN und SIGNANDENCRYPT zur Verfügung. Im Vorhandenen Testsystem werden keine Zertifikate verwaltet. Das Signieren der Nachrichten mit dem privaten Schlüssel des Absenders ermöglicht einen Zuwachs der Sicherheit der Netzwerkkommunikation, da dies die Integrität der Nachrichten sicherstellt. Da im Testsystem keine Verwaltung der Zertifikate stattfindet, ist kein Signieren der Nachrichten möglich. Im gegebenen System wurde jedoch die Verschlüsselung der Nachricht auf Anwendungsebene durch den Algorithmus *Basic256Sha256* implementiert.

Der Quellcode der OPC UA Clients in den Containern *scheduler* und *control* wurde so angepasst, dass eine Aktivierung und Deaktivierung der Verschlüsselung in der Konfigurationsdatei *config.json* der jeweiligen Server vorgenommen werden kann. Zur Anwendung einer Konfigurationsänderung ist ein erneutes Bauen sowie der Neustart des Containers notwendig. Die Installation und Konfiguration der Anpassungen am bestehenden Testsystem werden in den entsprechenden Readme Dateien des Repositories<sup>13</sup> beschrieben und anhand von Scripten unterstützt.

### 6.3.2 CoAP Monitoringsystem

CoAP Client und Server dienen der Repräsentation eines MitM Angriffsszenarios. Beide Komponenten wurden mit minimaler Funktionalität implementiert. Für die Implementierung dieses Prototyps bietet sich der NodeJs Stack an, welcher mit

---

<sup>13</sup>TODO - siehe Repo Readme

*node-coap*<sup>14</sup> eine Bibliothek für das CoAP Netzwerkprotokoll bereitstellt und wenig Ressourcen benötigt.

Der CoAP Client besteht aus einem Server, welcher einen Temperatursensor einer Gießmaschine simuliert. Die Temperatur wird alle fünf Sekunden zum zuständigen Überwachungssystem übermittelt. Die Übertragung erfolgt unverschlüsselt über das Transportprotokoll UDP, welches es möglich macht die Kommunikation im Netzwerk auch ohne Server analysieren zu können. Der Client sendet alle fünf Sekunden die Temperatur eines Sensors einer Gießmaschine zu einer in der Datei *config.json* konfigurierten Uniform Resource Locator (URL). Der CoAP Client wurde auf der VM „comp“ bereitgestellt.

Der CoAP Server stellt den Empfänger der Nachrichten dar. Er stellt ein Webinterface bereit, um die empfangenen Daten zu visualisieren. Aufgrund der Simplität der bereitgestellten Funktionalitäten wurde zur Implementierung des Systems ausschließlich ein *Pen-and-Paper-Protoyping* durchgeführt. Der CoAP Server bietet in der Datei *config.json* die Möglichkeit die IP Adresse, auf welche der Socket des Webservers gebunden wird zu bestimmen. Da das System auf der VM „mgmt“ ausgeführt wird und um dem Server im Testsystem das Netzwerk „i40-monitoring“ zuzuweisen, wurde die IP Adresse 10.0.10.1 in der Konfiguration gesetzt. Das Graphical User Interface (GUI) des Webinterface wird in ?? dargestellt.

TODO - Screenshot GUI

### 6.3.3 CoAP Manipulationssystem

TODO - Implementierung u. Beschreibung

## 6.4 Quellcode

Der erstellte Quellcode ist im öffentlichen GitHub Repository<sup>15</sup> unter der Massachusetts Institute of Technology (MIT) Lizenz verfügbar. Das Lizenzierungsmodell erlaubt die freie Nutzung und Änderung der Software durch Dritte.

---

<sup>14</sup>TODO : Github - node-coap

<sup>15</sup><https://github.com/fjnalta/i40-testbed>



Der gesamte Quellcode befindet sich im Verzeichnis „src“ des GitHub Repositories <https://github.com/fjnalta/thesis>. Die Ordner „CoAP\_Client“ und „CoAP\_Server“ repräsentieren die Implementierungen der CoAP Komponenten und deren Monitoringsystem. Im Ordner „scripts“ werden Scripte zur Installation und Konfiguration des Testsystems bereitgestellt. Das vorhandene, aktualisierte Testsystem (Weber 2018) ist im Ordner „i40-testsystem“ eingebettet.

## 6.5 Dokumentation

Die Dokumentation der implementierten Komponenten, deren Inbetriebnahme und Funktionsweise findet neben der schriftlichen Ausarbeitung in den jeweiligen *Readme* Dateien des Repositories <https://github.com/fjnalta/thesis> im Verzeichnis „testbed“ und dessen Unterverzeichnissen statt. Des Weiteren wurde der Quellcode der Software mit Kommentaren versehen, um eine Nutzung des Testsystems auch ohne die schriftliche Ausarbeitung zu ermöglichen.



## Kapitel 7

# Validierung

Mit der Implementierung und Durchführung der in Kapitel 4 beschriebenen Szenarien wird das in Kapitel 5 erstellte Konzept validiert.

### TODO

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Paketanalyse mit der vorhandenen *Security Policies* „none“. Der OPC UA Client des Containers „control“, welcher die Liste der im Netzwerk vorhandenen OPC UA Server abfragt besitzt die IP-Adresse 172.18.0.6, der Container des Discovery Servers die IP-Adresse 172.18.0.2. In Abbildung 7.1 ist der Request des Control Containers zum Aufbau eines *Secure Channel* dargestellt. Die verwendete *Security Policy* ist im Bereich „SecurityPolicyUri“ des OPC UA Protokolls beschrieben. In Abbildung 7.2 ist die Antwort des OPC UA Discovery Servers im *Secure Channel* dargestellt.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
15	2.808843433	172.18.0.6	172.18.0.2	OpcUa	128	Hello message
17	2.809097044	172.18.0.2	172.18.0.6	OpcUa	94	Acknowledge message
19	2.809440726	172.18.0.6	172.18.0.2	OpcUa	198	OpenSecureChannel message: OpenSecureChannelRequest
20	2.809904144	172.18.0.2	172.18.0.6	OpcUa	201	OpenSecureChannel message: OpenSecureChannelResponse
21	2.811656716	172.18.0.6	172.18.0.2	OpcUa	165	UA Secure Conversation Message: FindServersRequest
22	2.814352216	172.18.0.2	172.18.0.6	OpcUa	657	UA Secure Conversation Message: FindServersResponse
25	2.815424419	172.18.0.6	172.18.0.2	OpcUa	123	CloseSecureChannel message: CloseSecureChannelRequest
▶ Frame 19: 198 bytes on wire (1584 bits), 198 bytes captured (1584 bits) on interface 0						
▶ Ethernet II, Src: 02:42:ac:12:00:06 (02:42:ac:12:00:06), Dst: 02:42:ac:12:00:02 (02:42:ac:12:00:02)						
▶ Internet Protocol Version 4, Src: 172.18.0.6, Dst: 172.18.0.2						
▶ Transmission Control Protocol, Src Port: 42854, Dst Port: 4840, Seq: 63, Ack: 29, Len: 132						
▼ OpcUa Binary Protocol						
Message Type: OPN						
Chunk Type: F						
Message Size: 132						
SecureChannelId: 0						
SecurityPolicyUri: http://opcfoundation.org/UA/SecurityPolicy#None						
SenderCertificate: <MISSING>[OpcUa Null ByteString]						
ReceiverCertificateThumbprint: <MISSING>[OpcUa Null ByteString]						
SequenceNumber: 1						
RequestId: 1						
▼ Message : Encodeable Object						
▶ TypeId : ExpandedNodeId						
▶ OpenSecureChannelRequest						

Abbildung 7.1: Paketanalyse OPC UA - Client Request bei Sicherheitsprofil "none"

## 7 Validierung

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
15	2.808843433	172.18.0.6	172.18.0.2	OpcUa	128	Hello message
17	2.809097044	172.18.0.2	172.18.0.6	OpcUa	94	Acknowledge message
19	2.809440726	172.18.0.6	172.18.0.2	OpcUa	198	OpenSecureChannel message: OpenSecureChannelRequest
20	2.809904144	172.18.0.2	172.18.0.6	OpcUa	201	OpenSecureChannel message: OpenSecureChannelResponse
21	2.811656716	172.18.0.6	172.18.0.2	OpcUa	165	UA Secure Conversation Message: FindServersRequest
22	2.814352216	172.18.0.2	172.18.0.6	OpcUa	657	UA Secure Conversation Message: FindServersResponse
25	2.815424419	172.18.0.6	172.18.0.2	OpcUa	123	CloseSecureChannel message: CloseSecureChannelRequest

▼ OpcUa Service : Encodeable Object

- TypeId : ExpandedNodeId
- ▼ FindServersResponse
  - ResponseHeader: ResponseHeader
  - ▼ Servers: Array of ApplicationDescription
    - ArraySize: 4
    - ▼ [0]: ApplicationDescription
      - ApplicationUri: urn:DiscoveryServer
      - ProductUri: DiscoveryServer
      - ▼ ApplicationName: LocalizedText
        - EncodingMask: 0x02, has text
        - Text: DiscoveryServer
      - ApplicationType: DiscoveryServer (0x00000003)
      - GatewayServerUri: [OpcUa Empty String]
      - DiscoveryProfileUri: [OpcUa Empty String]
      - DiscoveryUrls: Array of String
    - ▼ [1]: ApplicationDescription
      - ApplicationUri: urn:SERVER\_5b2f9229d8dbfe0008ce2aff
      - ProductUri: SERVER\_5b2f9229d8dbfe0008ce2aff
      - ▼ ApplicationName: LocalizedText
        - EncodingMask: 0x03, has locale information, has text
        - Locale: en
        - Text: Verpack
      - ApplicationType: Server (0x00000000)
      - GatewayServerUri: [OpcUa Null String]
      - DiscoveryProfileUri: [OpcUa Empty String]
      - DiscoveryUrls: Array of String

**Abbildung 7.2:** Paketanalyse OPC UA - Server Response bei Sicherheitsprofil "none"

Es ist zu erkennen, dass die Kommunikation, obwohl der *Secure Channel* genutzt wird, nicht verschlüsselt ist. Die Endpunkte sowie deren Adressen und bereitgestellte Methoden können aus den Paketen ausgelesen werden.

Im Folgenden wird erneut das Abfragen des Control Containers aller im Netzwerk vorhandenen Endpunkte beim Discoveryserver beschrieben, jedoch wird das Sicherheitsprofil "Basic256Sha256" mit dem *MessageSecurityMode SSIGNANDENCRIPT* genutzt. Der OPC UA Client besitzt die IP-Adresse 172.18.0.7. Der Discoveryserver weiterhin die Adresse 172.18.0.2. Abbildung 7.3 zeigt den Request, Abbildung 7.4 die verschlüsselte Response im *Secure Channel*.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
171	20.16426180	172.18.0.7	172.18.0.2	OpcUa	128	Hello message
173	20.16449744	172.18.0.2	172.18.0.7	OpcUa	94	Acknowledge message
175	20.16874817	172.18.0.7	172.18.0.2	OpcUa	1867	OpenSecureChannel message: ServiceId 0
177	20.17661573	172.18.0.2	172.18.0.7	OpcUa	1867	OpenSecureChannel message: ServiceId 0
179	20.18236768	172.18.0.7	172.18.0.2	OpcUa	210	UA Secure Conversation Message: ServiceId 0
180	20.18540794	172.18.0.2	172.18.0.7	OpcUa	690	UA Secure Conversation Message: ServiceId 0
183	20.18632026	172.18.0.7	172.18.0.2	OpcUa	162	CloseSecureChannel message: ServiceId 0
▶ Frame 175: 1867 bytes on wire (14936 bits), 1867 bytes captured (14936 bits) on interface 0 ▶ Ethernet II, Src: 02:42:ac:12:00:07 (02:42:ac:12:00:07), Dst: 02:42:ac:12:00:02 (02:42:ac:12:00:02) ▶ Internet Protocol Version 4, Src: 172.18.0.7, Dst: 172.18.0.2 ▶ Transmission Control Protocol, Src Port: 36366, Dst Port: 4840, Seq: 63, Ack: 29, Len: 1801 ▼ OpcUa Binary Protocol Message Type: OPN Chunk Type: F Message Size: 1801 SecureChannelId: 0 SecurityPolicyUri: http://opcfoundation.org/UA/SecurityPolicy#Basic256Sha256 SenderCertificate: 308204a030820388a003020102020900a9bbbd8145e619d6... ReceiverCertificateThumbprint: c656d2b62e679d3a242453e9bc4bb297c4d9ab3e SequenceNumber: 2906887337 RequestId: 4079820223 ▼ Message : Encodeable Object ▶ TypeId : ExpandedNodeId						

**Abbildung 7.3:** Paketanalyse OPC UA - Client Request bei Sicherheitsprofil "Basic256Sha256" und *MessageSecurityMode SSIGNANDENCRIPT*

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
171	20.16426180	172.18.0.7	172.18.0.2	OpcUa	128	Hello message
173	20.16449744	172.18.0.2	172.18.0.7	OpcUa	94	Acknowledge message
175	20.16874817	172.18.0.7	172.18.0.2	OpcUa	1867	OpenSecureChannel message: ServiceId 0
177	20.17661573	172.18.0.2	172.18.0.7	OpcUa	1867	OpenSecureChannel message: ServiceId 0
179	20.18236768	172.18.0.7	172.18.0.2	OpcUa	210	UA Secure Conversation Message: ServiceId 0
180	20.18540794	172.18.0.2	172.18.0.7	OpcUa	690	UA Secure Conversation Message: ServiceId 0
183	20.18632026	172.18.0.7	172.18.0.2	OpcUa	162	CloseSecureChannel message: ServiceId 0
▶ Frame 180: 690 bytes on wire (5520 bits), 690 bytes captured (5520 bits) on interface 0 ▶ Ethernet II, Src: 02:42:ac:12:00:02 (02:42:ac:12:00:02), Dst: 02:42:ac:12:00:07 (02:42:ac:12:00:07) ▶ Internet Protocol Version 4, Src: 172.18.0.2, Dst: 172.18.0.7 ▶ Transmission Control Protocol, Src Port: 4840, Dst Port: 36366, Seq: 1830, Ack: 2008, Len: 624 ▼ OpcUa Binary Protocol Message Type: MSG Chunk Type: F Message Size: 624 SecureChannelId: 33 Security Token Id: 1 Security Sequence Number: 1215344638 Security RequestId: 1824677289 ▼ OpcUa Service : Encodeable Object ▶ TypeId : ExpandedNodeId						

**Abbildung 7.4:** Paketanalyse OPCUA - Server Response bei Sicherheitsprofil "Basic256Sha256" und *MessageSecurityMode SSIGNANDENCRIPT*

Es ist zu erkennen, dass der gesamte Netzwerkverkehr im *Secure Channel* durch den Algorithmus SHA256 verschlüsselt wurde.

## Kapitel 8

### Fazit

Da die grundlegende Netzwerkstruktur der TCP/IP Netzwerke für Industrie 4.0 Kommunikation übernommen wird, sind auch die damit zusammenhängenden Voraussetzungen und Sicherheitsgedanken zu beachten. Plattform Industrie 4.0 2017

Vielzahl von Angriffen auf die verschiedenen Schichten des TCP/IP Referenzmodells, welches in Industrie 4.0 Umgebungen genutzt wird. In der Thesis wurden nur wenige Beispielhafte Angriffe dargestellt und durchgeführt.

Analyse der Netzwerkkommunikation in Industrie 4.0 Umgebungen und Erweiterung einer prototypischen Security Testumgebung zur Darstellung verschiedener Berohungsfaktoren

Security Mechanismen sind nicht umsonst und beeinträchtigen die Performance. Security sollte daher nur dort zur Anwendung kommen, wo sie auch benötigt wird. Diese Entscheidung soll aber nicht der Entwickler / Produktmanager treffen, sondern der Anlagenbetreiber (Systemadministration).

Die Nutzung von OPC UA bietet keinen automatischen Schutz der IT-Infrastruktur - Konfiguration ist notwendig. Obwohl Securiy by Design. Basiert auf Unteren Schichten.





## Kapitel 9

### Ausblick

TODO - LDAP - Firewall - CoAP Auth - SSL - OPC UA System Erweitern - Zertifikatsmanagement, PKI, IdM - weitere Angriffsmethoden - DNS Amplification, SYN-Flood, ARP Spoofing, usw. Ipv6

TODO - das hier ist referenziert im Konzept! Durch die eigene Verwaltung des DNS Servers ist es in Zukunft möglich weitere Anwendungsszenarien am Testsystem darzustellen. Dazu gehören u. A. der in Abschnitt 3.6.1 beschriebene Angriff der DNS Amplification durch die Generierung eigener Zonen mit extrem vielen RR, um eine möglichst große DNS Response zu provozieren sowie das DNS Spoofing und die Analyse der Sicherheitsmechanismen von DNSSEC.



# Abkürzungsverzeichnis

<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>KRITIS</b>	Kritische Infrastrukturen
<b>IPC</b>	Industrie PC
<b>SPS</b>	speicherprogrammierbare Steuerungen
<b>SCADA</b>	Supervisory Control and Data Acquisition
<b>ERP</b>	Enterprise Resource Planning
<b>MES</b>	Manufacturing Execution System
<b>RAMI4.0</b>	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
<b>IIRA</b>	Industrial Internet Reference Architecture
<b>IIAF</b>	Industrial Internet Architecture Framework
<b>IIC</b>	Industrial Internet Consortium
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>IIoT</b>	Industrial Internet of Things
<b>IT</b>	Informationstechnik
<b>CPS</b>	Cyber-physisches System
<b>OPC UA</b>	Open Platform Communications Unified Architecture
<b>M2M</b>	Machine to Machine
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>ICS</b>	Industrial Control System
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>MAN</b>	Metropolitan Area Network
<b>WAN</b>	Wide Area Network
<b>GAN</b>	Global Area Network
<b>OPC COM</b>	Open Platform Communications
<b>DA</b>	Data Access

<b>A&amp;E</b>	Alarms and Events
<b>HDA</b>	Historical Data Access
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>DNS</b>	Domain Name System
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>SOA</b>	Service Oriented Architecture
<b>OMG</b>	Open Management Group
<b>DDS</b>	Data Distribution Services
<b>HTTP</b>	Hypertext Transfer Protocol
<b>HTTPS</b>	Hypertext Transfer Protocol Secure
<b>SOAP</b>	Simple Object Access Protocol
<b>CoAP</b>	Constrained Application Protocol
<b>XMPP</b>	Extensible Messaging and Presence Protocol
<b>MQTT</b>	Message Queue Telemetry Transport
<b>AMQP</b>	Advanced Message Queuing Protocol
<b>VM</b>	virtuelle Maschine
<b>PKI</b>	Public-Key Infrastructure
<b>BSI</b>	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
<b>DoS</b>	Denial of Service
<b>DDoS</b>	Distributed Denial of Service
<b>DMZ</b>	Demilitarized Zone
<b>IDS</b>	Intrusion Detection System
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>ARP</b>	Address Resolution Protocol
<b>DHCP</b>	Dynamic Host Configuration Protocol
<b>RFC</b>	Request for Comments
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>RR</b>	Resource Record
<b>BAF</b>	Base Amplification Factor
<b>DRDoS</b>	Distributed-Reflected-Denial-of-Service
<b>VLAN</b>	Virtual Local Area Network

<b>IPAM</b>	IP Address Management
<b>SYN</b>	synchronise
<b>ACK</b>	acknowledge
<b>SYN-ACK</b>	synchronise-acknowledge
<b>FIN</b>	final
<b>VoIP</b>	Voice over IP
<b>SNMP</b>	Simple Network Management Protocol
<b>TLS</b>	Transport Layer Security
<b>SMTP</b>	Simple Mail Transfer Protocol
<b>MOM</b>	Message oriented Middleware
<b>URL</b>	Uniform Resource Locator
<b>UA</b>	Unified Architecture
<b>XML</b>	Extensible Markup Language
<b>CA</b>	Certificate Authority
<b>UACP</b>	OPC UA Connection Protocol
<b>MitM</b>	Man in the Middle
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology
<b>GUI</b>	Graphical User Interface
<b>UML</b>	Unified Modeling Language
<b>NAT</b>	Network Address Translation
<b>DNSSEC</b>	Domain Name System Security Extensions



# **Tabellenverzeichnis**





# Abbildungsverzeichnis

2.1	Kommunikationsbeziehungen in einer Industrie 4.0 Umgebung - TODO ref. sichere Unternehmensübergreifende Kommunikation . .	7
2.2	Das Internet der Dinge - Plattform Industrie 4.0 2016 . . . . .	9
2.3	Automatisierungspyramide - TODO ref. Langmann,2004 . . . . .	10
2.4	horizontale und vertikale Integration - TODO ref. HP Industry-of- things siehe bookmark . . . . .	12
2.5	RAMI 4.0 - Plattform Industrie 4.0 2016 . . . . .	17
2.6	IIAF/IIRA - Übersicht . . . . .	19
2.7	OPC UA Multi-Part Specification - OPC Foundation 2018a . . . . .	21
2.8	OPC UA Client-Server Architektur - OPC Foundation 2018a . . . . .	22
3.1	TCP Verbindungsaufbau . . . . .	37
3.2	Wireshark - ID im DNS Header . . . . .	42
3.3	Schematisches Beispiel: DNS Amplification . . . . .	44
3.4	DNS Amplification am Beispiel von isc.org . . . . .	45
3.5	Netzlast bei DNS Amplification . . . . .	46
3.6	OPC UA Kommunikationswege . . . . .	51
3.7	OPC UA Secure Channel . . . . .	54
3.8	Defense in Depth Strategie - David Kuipers 2006 . . . . .	56
5.1	Netzwerkinfrastruktur . . . . .	63
5.2	Virtuelle Maschinen und Dienste . . . . .	66
5.3	Routerkomponente . . . . .	67
5.4	DHCP und DNS Server . . . . .	68
5.5	CoAP Client . . . . .	69
5.6	CoAP Server . . . . .	69
5.7	Rogue DHCP Server . . . . .	70
5.8	CoAP Manipulationssystem . . . . .	71
5.9	Dynamische Hostkonfiguration mit DHCP und DNS . . . . .	73
5.10	Rekursive DNS Namensauflösung . . . . .	74
5.11	Iterative DNS Namensauflösung . . . . .	74
5.12	Initialisierung von CoAP Client und Kommunikation zwischen CoAP Client und CoAP Server . . . . .	75

5.13	Umleitung der Netzwerkkommunikation durch Manipulation des Gateways . . . . .	76
7.1	Paketanalyse OPC UA - Client Request bei Sicherheitsprofil "none"	89
7.2	Paketanalyse OPC UA - Server Response bei Sicherheitsprofil "none"	90
7.3	Paketanalyse OPC UA - Client Request bei Sicherheitsprofil "Basic256Sha256 und MessageSecurityMode SSIGNANDENCRYPT" .	91
7.4	Paketanalyse OPCUA - Server Response bei Sicherheitsprofil "Basic256Sha256 und MessageSecurityMode SSIGNANDENCRYPT" .	91

# Listings

6.1	Iptables . . . . .	83
-----	--------------------	----



# Literatur

- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, BSI (2016). „Industrial Control System Security“. In:
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi (2016a). „Netzkommunikation für Industrie 4.0“. In: *Plattform Industrie 4.0*.
- (2016b). „Technischer Überblick: Sichere unternehmensübergreifende Kommunikation“. In:
- Burke, Manfred (2013). *Rechnernetze*. Springer.
- Christoph Meinel, Harald Sack (2011). *Internetworking - Technische Grundlagen und Anwendung*. Springer.
- David Kuipers, Mark Fabro (2006). „Control Systems Cyber Security“. In:
- Drath, Rainer (2014). „Industrie 4.0 - eine Einführung“. In: *openautomation.de*.  
URL:  
[https://www.openautomation.de/fileadmin/user\\_upload/Stories/Bilder/oa\\_2014/oa\\_3/oa\\_3\\_14\\_ABB.pdf](https://www.openautomation.de/fileadmin/user_upload/Stories/Bilder/oa_2014/oa_3/oa_3_14_ABB.pdf).
- DTAG, Deutsche Telekom AG (2016). „Sicherheit im Industriellen Internet der Dinge“. In:
- Hoppe, Stefan (2018). „OPC Foundation announces OPC UA PubSub release as important extension of OPC UA communication platform“. In: URL: <https://opcfoundation.org/news/press-releases/opc-foundation-announces-opc-ua-pubsub-release-important-extension-opc-ua-communication-platform/>.
- Industrial Internet Consortium, IIC (2017). „The Industrial Internet of Things - Volume G1: Reference Architecture“. In:
- Lass Sander, Kotarski David (2014). „IT-Sicherheit als besondere Herausforderung von Industrie 4.0“. In: *Kersten W, Koller H, Lödding, H (ed) Industrie 4.0: Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*.

- Ledermüller, Thomas (2009). „DNS-Sicherheit im Rahmen eines IT-Grundschutz-Bausteins“. In:
- Network Working Group (1981). *Transmission Control Protocol*. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc793>.
- Olsen, Camilla (2003). „Security issues relating to the use of UDP“. In: *Global Information Assurance Certification Paper*.
- OPC Foundation (2014). „OPC Unified Architecture - Wegbereiter der 4. industriellen (R)Evolution“. In:
- (2018a). „OPC Unified Architecture Specification Part 1: Overview and Concepts“. In: URL: <https://opcfoundation.org/UA/Part1/>.
  - (2018b). „OPC Unified Architecture Specification Part 2: Security Model“. In: URL: <https://opcfoundation.org/UA/Part2/>.
  - (2018c). „OPC Unified Architecture Specification Part 5: Information Model“. In: URL: <https://opcfoundation.org/UA/Part5/>.
  - (2018d). „OPC Unified Architecture Specification Part 7: Profiles“. In: URL: <https://opcfoundation.org/UA/Part7/>.
- Plattform Industrie 4.0 (2015). „Umsetzungsstrategie Industrie 4.0“. In:
- Plattform Industrie 4.0 (2016). „Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0): An Introduction“. In: *Publikationen der Plattform Industrie 4.0*. URL: [https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-eine-einfuehrung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=9](https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-eine-einfuehrung.pdf?__blob=publicationFile&v=9).
- (2017). „Sichere Kommunikation für Industrie 4.0“. In: *Publikationen der Plattform Industrie 4.0*. URL: [https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/sichere-kommunikation-i40.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/sichere-kommunikation-i40.pdf?__blob=publicationFile&v=6).
- Schleupner, Linus (2016). *Sichere Kommunikation im Umfeld von Industrie 4.0*. Springer.
- Torscht, Dipl.-Ing. Robert (2014). „Kommunikation bei Industrie 4.0“. In: *SPS-Magazin, Fachzeitschrift für Automatisierungstechnik*.
- W.A. Halang, H. Unger (Hrsg.) (2016). *Internet der Dinge*. Springer.
- Weber, Martin (2018). „Ein Konzept für ein virtuelles Security Testbed für eine Industrie 4.0 Umgebung mit prototypischer Implementierung“. In: