**Hoofdstuk: Testscripts en Validatie van de Meetomgeving**

Om een objectieve vergelijking te kunnen maken tussen de prestaties van 4G- en 5G-netwerken in de context van gebouwbeheersystemen, werd er een reeks testscripts ontwikkeld in Python en Bash. Deze scripts dienen om op systematische wijze netwerkstatistieken te verzamelen, protocollaire communicatie te simuleren en de betrouwbaarheid van de verbinding tussen controlemodules en serveromgevingen te meten. In dit hoofdstuk wordt toegelicht welke scripts werden opgesteld, wat hun doel is binnen de testopstelling, hoe ze werken en hoe ze initieel gevalideerd werden op een lokaal wifinetwerk.

**5.1 Overzicht van de scripts**

De scripts zijn opgedeeld in twee hoofdcategorieën: netwerkdiagnose en protocolsimulatie.

1. Netwerkdiagnose (Bash-script)  
Het eerste script focust op algemene netwerkmetingen. Dit script voert periodiek ping-opdrachten uit naar de testrouter of controller en registreert daarbij de round-trip time (RTT), pakketverlies en jitter. Daarnaast worden iperf3-metingen uitgevoerd voor het analyseren van de beschikbare bandbreedte. De resultaten worden gelogd in een CSV-bestand voor latere analyse.

Voorbeeldfragment uit het script:

**```bash**

**#!/bin/bash**

**HOST="192.168.1.1"**

**LOG="ping\_test.csv"**

**echo "timestamp,rtt\_min,rtt\_avg,rtt\_max,packet\_loss" > $LOG**

**while true; do**

**OUT=$(ping -c 5 $HOST)**

**RTT=$(echo "$OUT" | tail -1 | awk -F '/' '{print $5","$6","$7}')**

**LOSS=$(echo "$OUT" | grep -oP '\d+(?=% packet loss)')**

**echo "$(date),$RTT,$LOSS" >> $LOG**

**sleep 60**

**done**

**```**

2. Modbus-communicatie test (Python-script)  
Het tweede script is gericht op het testen van industriële communicatie via het Modbus TCP-protocol. Dit script maakt gebruik van de pymodbus-bibliotheek om op geregelde tijdstippen waarden op te vragen bij een Xenta-module die met een AS-P controller verbonden is. Het meet de responstijd en controleert op fouten in de transmissie. Zo wordt nagegaan in welke mate netwerkvertragingen een impact hebben op de communicatie tussen veldmodules en beheersystemen.

Voorbeeldfragment uit het script:

**```python**

**from pymodbus.client import ModbusTcpClient**

**import time, csv, datetime**

**client = ModbusTcpClient('192.168.1.10', port=502)**

**with open("modbus\_results.csv", "w", newline='') as file:**

**writer = csv.writer(file)**

**writer.writerow(["timestamp", "response\_time\_ms", "success"])**

**while True:**

**start = time.time()**

**result = client.read\_holding\_registers(0, 1, unit=1)**

**end = time.time()**

**delta = round((end - start) \* 1000, 2)**

**status = "OK" if result.isError() == False else "FAIL"**

**writer.writerow([datetime.datetime.now(), delta, status])**

**time.sleep(10)**

**```**

**5.2 Testdoelstellingen**

De scripts dienen meerdere doelen binnen de testopstelling:

* Het verzamelen van relevante netwerkstatistieken, zoals latency, bandbreedte, jitter en pakketverlies.
* Het analyseren van de betrouwbaarheid van Modbus-communicatie over mobiele netwerken, wat representatief is voor het gedrag van HVAC- en verlichtingssystemen in realistische scenario’s.
* Het opsporen van storingen of onverwacht gedrag in de verbinding tussen modules via het mobiele netwerk.
* Het creëren van een reproduceerbare en geautomatiseerde testmethode voor consistente evaluaties.

**5.3 Eerste validatie op lokaal wifi-netwerk**

Voordat de scripts worden ingezet in de volledige testopstelling met 4G en 5G, worden ze eerst uitvoerig getest op het lokale wifi-netwerk. Deze validatiefase dient om mogelijke bugs in de scripts op te sporen, de logs te controleren op correcte structuur, en na te gaan of de scripts robuust functioneren bij langdurige uitvoering.

De gebruikte testomgeving bestond uit:

* Een AS-P controller verbonden via ethernet met een router.
* Een PC of server verbonden via hetzelfde netwerk.
* De scripts werden uitgevoerd op de server die tegelijkertijd dienst deed als logger.

Tijdens deze validatiefase werd onder andere bevestigd dat:

* De ping- en iperf3-metingen een correct verloop kenden en reproduceerbare resultaten gaven.
* De Modbus-simulatie foutloos opstartte, verbinding kon maken met de AS-P controller, en systematisch correcte registerwaarden ontving.
* CSV-bestanden correct en overzichtelijk werden opgebouwd voor latere verwerking in Excel of Python-analyse.

Deze validatiefase is van groot belang om zeker te zijn dat de scripts in latere fases waar netwerkverstoringen of bereikproblemen reëler zijn betrouwbaar blijven functioneren. Het beperkt de foutmarge en verhoogt de reproduceerbaarheid van de tests.

**Hoofdstuk 4 – Basisopstelling zonder Server**

Om snel van start te kunnen gaan met het uitvoeren van testen en metingen werd een basisopstelling uitgewerkt waarbij geen gebruik wordt gemaakt van een externe server. Deze opstelling dient als eerste implementatie van het testnetwerk en biedt voldoende functionaliteit om al cruciale netwerkanalyses en communicatieproeven uit te voeren. In dit hoofdstuk wordt deze basisopstelling besproken, samen met de gebruikte componenten, verbindingen en de functionele doelen die hiermee gerealiseerd worden.

**4.1 Doel van de basisopstelling**

De bedoeling van deze initiële configuratie is om een minimale maar representatieve omgeving op te zetten waarin het gedrag van een gebouwbeheersysteem (GBS) getest kan worden over zowel een privaat 4G- als 5G-netwerk. De nadruk ligt hierbij op de communicatie tussen een Spacelogic AS-P controller en één of meerdere TAC Xenta-modules. Deze componenten vormen een realistische representatie van HVAC- en verlichtingssystemen in gebouwen.

Door het weg laten van een centrale server worden de scripts en logging lokaal uitgevoerd op een laptop of test-PC die direct met het netwerk verbonden is. Dit verlaagt de complexiteit van de opstartfase en maakt het eenvoudiger om foutopsporing te doen tijdens de eerste tests.

**4.2 Componenten in de opstelling**

De basisopstelling bevat de volgende kerncomponenten:

* Spacelogic AS-P Controller: functioneert als centrale regelaar die via Modbus TCP communiceert met de Xenta-modules.
* TAC Xenta Module (type 401): simulatie van een HVAC- of verlichtingsmodule die uitleesbaar is via Modbus.
* Laptop of test-PC: voert de testscripts uit en verzamelt meetgegevens (zoals latency, responstijden, packet loss, etc.).
* Mobiel netwerk (4G of 5G): verbinding tussen de PC en de controller gebeurt via een mobiele router of gateway. Er wordt gebruikgemaakt van het privaat 4G/5G-netwerk beschikbaar op de HOGENT-campus.

**4.3 Verbindingsstructuur**

De verbindingen worden als volgt gelegd:

1. De AS-P controller wordt verbonden met een mobiele router/gateway via ethernet.
2. De test-PC/laptop wordt via USB of ethernet verbonden met dezelfde mobiele router.
3. De mobiele router is verbonden met het 4G- of 5G-netwerk, afhankelijk van het scenario.
4. De TAC Xenta-module is bekabeld aangesloten op de AS-P controller via een RS-485-bus of IP, afhankelijk van de configuratie.
5. Er is geen centrale server, dus alle scripts draaien op de test-PC.

Deze opstelling maakt het mogelijk om onder reële netwerkcondities de communicatie en responstijd van het GBS te meten en zo de betrouwbaarheid van beide netwerken te evalueren.

**4.4 Functionele werking van de opstelling**

De communicatie tussen de PC en de controller wordt voortdurend gemonitord door de Python- en Bash-scripts die eerder besproken werden. Zo worden de volgende metingen uitgevoerd:

* Latency tussen PC en controller via ping-tests.
* Bandbreedte en jitter via iperf3 indien ondersteund door de router.
* Realtime uitlezing van registers via Modbus TCP.
* Registratie van eventuele time-outs of fouten in de communicatie.

Alle meetresultaten worden gelogd en gestructureerd opgeslagen om later geanalyseerd te worden in functie van het gekozen netwerktype (4G of 5G).

**4.5 Voordelen van deze opstelling**

* Eenvoudige opstart: geen nood aan serverinstallatie of configuratie.
* Directe controle en logging: alles gebeurt lokaal op de test-PC.
* Duidelijke afbakening van testdomein: beperkt aantal variabelen maakt het gemakkelijker om netwerkinvloed te isoleren.
* Schaalbaar: indien later nodig, kan een server eenvoudig worden toegevoegd aan deze basisstructuur.

**4. Testopstelling met Geïntegreerde Server**

Voor het uitvoeren van netwerkgerelateerde prestatietests op HVAC- en verlichtingssystemen in gebouw C, werd een testopstelling ontwikkeld waarin een private 4G- en 5G-netwerk vergeleken worden. Om deze tests op een gecontroleerde en schaalbare manier te kunnen uitvoeren, werd een kleine server opgenomen in het testnetwerk.

**4.1 Doel van de Opstelling**

Het hoofddoel van deze testopstelling is het evalueren van de performantie van communicatieprotocollen, zoals Modbus, die gebruikt worden voor het aansturen van TAC Xenta modules via een SpaceLogic AS-P controller. Er wordt onderzocht hoe deze systemen reageren onder verschillende netwerkcondities (4G vs 5G). De integratie van een lokale server maakt het mogelijk om testdata te genereren, netwerkverkeer te loggen en simulaties of scriptgestuurde polls uit te voeren.

**4.2 Benodigde Hardware**

* **SpaceLogic AS-P controller** – fungeert als gateway tussen IP-netwerk en veldapparatuur (Modbus/RS485).
* **TAC Xenta modules (bv. Xenta 401)** – HVAC-controllers aangesloten via Modbus.
* **5G Router (bv. Teltonika RUTX50 of vergelijkbaar)** – verbindt de AS-P controller met het 5G netwerk.
* **4G Router (voor scenariovergelijking)** – voor testen over een privaat LTE-netwerk.
* **Mini Server (bv. Intel NUC of Raspberry Pi 5)** – draait scripts, verzamelt data en fungeert als testbedcontroller.
* **Laptop/PC** – voor initiële configuratie, monitoring en data-analyse.
* **Netwerkcomponenten** – Ethernetkabels, voeding, eventueel een switch.

**4.3 Software en Tools**

* **Python/Bash scripts** – voor periodieke polling van Modbus registers en logging van reactietijden.
* **Grafana + InfluxDB** – voor visualisatie en opslag van netwerk- en systeemdata.
* **Tcpdump/iPerf** – netwerkdiagnosetools voor latency, jitter en packet loss.
* **Modbus client** – via Python (pymodbus) of modpoll CLI-tool.

**4.4 Netwerkstructuur**

De server bevindt zich in hetzelfde subnet als de AS-P controller en is bereikbaar via zowel 4G als 5G afhankelijk van het testscenario. De Xenta modules zijn via Modbus (RTU of TCP) verbonden met de AS-P controller, die als interface naar het IP-netwerk fungeert. Alle communicatie tussen de controller en de server verloopt via de mobiele netwerken, waarbij testsoftware op de server de communicatie meet, logt en visualiseert.

**4.5 Testprocedure**

1. **Configuratie van de AS-P**: verbinding met Xenta modules opzetten, Modbus-mapping controleren.
2. **Netwerkconnectie testen**: Router configureren voor respectievelijk 4G en 5G.
3. **Metingen uitvoeren**:
   * Latency: gemiddelde responstijd van Modbus polls.
   * Jitter: variatie in responstijden.
   * Packet loss: percentage verloren pakketten.
   * Betrouwbaarheid: frequentie van time-outs of verbindingsonderbrekingen.
4. **Data logging**: met scripts wordt continu data opgeslagen op de server.
5. **Analyse & vergelijking**: met Grafana worden verschillen tussen 4G en 5G inzichtelijk gemaakt.

**4.6 Rol van de Server**

De server speelt een centrale rol als controle- en dataverzamelpunt in de testopstelling. Het voordeel hiervan is dat alle meetdata lokaal opgeslagen kunnen worden, onafhankelijk van externe cloudverbindingen. Dit maakt reproduceerbare en betrouwbare metingen mogelijk en verlaagt de complexiteit van troubleshooting.

--

Uitgebreider

**Opbouw van de Testopstelling met Geïntegreerde Server**

In het kader van deze bachelorproef wordt onderzocht welk type mobiel netwerk – 4G of 5G – het meest geschikt is voor het aansturen van HVAC- en verlichtingssystemen in een slimme gebouwcontext. Het onderzoek richt zich specifiek op gebouw C van HOGENT, waar zowel een private 4G- als een private 5G-netwerk beschikbaar zijn. Deze infrastructuur biedt een unieke gelegenheid om de twee netwerktechnologieën onder realistische omstandigheden met elkaar te vergelijken.

Om deze vergelijkende studie op een gecontroleerde en reproduceerbare manier uit te voeren, is een testopstelling ontworpen waarin de daadwerkelijke gebouwbeheerscomponenten worden geïntegreerd. Deze opstelling omvat een SpaceLogic AS-P controller, TAC Xenta modules, een 5G- en 4G-router, en een lokale server die fungeert als testcontroller en dataverzamelpunt.

**Doel en Relevantie van de Servergebaseerde Opstelling**

De integratie van een lokale server in de testopstelling is cruciaal om verschillende redenen. Enerzijds maakt het gebruik van een server het mogelijk om actieve metingen en simulaties te draaien, zoals periodieke Modbus-polling of netwerkverkeersanalyses. Anderzijds kan de server dienen als opslagpunt voor testdata en als host voor dashboards of analysetools zoals Grafana. Hierdoor kunnen metingen over langere periodes worden verzameld, vergeleken en visueel geïnterpreteerd.

Daarnaast biedt de server flexibiliteit: bijkomende softwarecomponenten zoals packet sniffers (bv. tcpdump), netwerkstress-tools (bv. iperf), of protocoolsimulaties kunnen eenvoudig worden toegevoegd zonder dat dit invloed heeft op de werking van de fysieke gebouwcomponenten.

**Samenstelling van de Testopstelling**

De basis van de testomgeving bestaat uit een aantal fysieke en logische componenten:

**1. SpaceLogic AS-P Controller**

De SpaceLogic AS-P controller van Schneider Electric fungeert als centrale automatiseringsunit en integreert communicatie tussen het IP-netwerk en veldapparatuur via onder andere Modbus RTU en TCP. In deze opstelling verbindt de AS-P controller met meerdere TAC Xenta modules via een seriële RS485-verbinding (Modbus RTU). Aan de andere kant maakt de AS-P controller verbinding met het netwerk via Ethernet, met de keuze om dit te routeren via het 4G- of 5G-netwerk.

**2. TAC Xenta Modules**

De TAC Xenta reeks (bijvoorbeeld de 401 of 301 modules) bestaat uit programmeerbare HVAC-controllers die gebruikt worden voor het aansturen van verwarming, ventilatie, koeling en verlichting. Voor deze test volstaat het om één of enkele Xenta 401-modules te gebruiken, mits er voldoende representatieve datapunten beschikbaar zijn. De modules bieden een standaard Modbus-interface voor uitlezing van sensorwaarden of het sturen van actuatoren.

**3. 5G- en 4G-Router**

Voor connectiviteit met het mobiele netwerk wordt gebruikgemaakt van een industriële 5G-router, zoals de Teltonika RUTX50, die compatibel is met zowel private als publieke mobiele netwerken. Voor het 4G-gedeelte kan een gelijkaardig model of een aparte LTE-router worden gebruikt, afhankelijk van de beschikbaarheid. Deze routers verbinden de AS-P controller met respectievelijk het 4G- en 5G-netwerk, waarbij steeds slechts één actief is per testscenario.

**4. Lokale Mini-Server**

Een mini-server (zoals een Intel NUC of een Raspberry Pi 5) wordt ingezet als centraal test- en logpunt. De server draait verschillende scripts in Python of Bash die netwerkstatistieken loggen en periodiek gegevens opvragen via Modbus. Bovendien kunnen tools zoals InfluxDB en Grafana geïnstalleerd worden om meetgegevens op te slaan en grafisch te analyseren. De server is op netwerkniveau verbonden via de router en communiceert over IP met de AS-P controller.

**Werking van de Opstelling**

De testomgeving wordt afwisselend verbonden met het 4G- of 5G-netwerk. Hierbij verandert de router tussen de twee netwerken, terwijl de rest van de infrastructuur ongewijzigd blijft. Via de lokale server worden meerdere soorten metingen uitgevoerd. Een typische meting kan bestaan uit het periodiek uitlezen van Modbus-regels van een Xenta 401-module en het loggen van de tijd die nodig is voor elke response.

Tegelijkertijd worden netwerkparameters zoals latency (vertraging), jitter (variatie in vertraging), packet loss (verlies van datapakketten), en beschikbaarheid (downtime) geregistreerd. Deze parameters worden verzameld over meerdere meetreeksen, zodat statistische vergelijkingen tussen 4G en 5G mogelijk zijn.

**Overzicht van Nodige Componenten**

| **Component** | **Beschrijving** |
| --- | --- |
| SpaceLogic AS-P | Gateway tussen veldapparatuur en IP-netwerk |
| TAC Xenta 401 | HVAC-module, communicatie via Modbus |
| 5G-router (bv. RUTX50) | Industriële router met 5G-ondersteuning |
| 4G-router | Voor testscenario met LTE |
| Mini-server (NUC/RPi) | Draait scripts, database en dashboard |
| Ethernetkabels | Verbinding tussen controller, router en server |
| Voeding/adapters | Voor alle actieve componenten |
| Laptop | Voor configuratie, monitoring en logging |

--------