



Hochschule Karlsruhe
Technik und Wirtschaft
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Entwurf einer Architektur und Implementierung eines Proof of Concept für ein echtzeitfähiges SCADA System mit Webfrontend

Bachelor-Thesis
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering

vorgelegt von

Florian Weber (44907)

Abgabe: 12.11.2019

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Philipp Nenninger
Zweitprüfer: Prof. Dr. Stefan Ritter

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Die Stellen meiner Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken und Quellen, einschließlich der Quellen aus dem Internet, entnommen sind, habe ich in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlohnung kenntlich gemacht. Dasselbe gilt sinngemäß für Quellcode und Abbildungen.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis | 5 |
| Abbildungsverzeichnis | 6 |
| Quellcodeverzeichnis | 7 |
| 1 Einführung | 8 |
| 1.1 Motivation | 8 |
| 1.2 Zielsetzung | 8 |
| 1.3 Gliederung | 9 |
| 2 Aktueller Stand der Technik | 10 |
| 2.1 Compact HMI | 10 |
| 2.2 WinCC V7 | 10 |
| 2.3 OpenEnterprise | 10 |
| 3 Theoretische Grundlagen | 11 |
| 3.1 Websocket | 11 |
| 3.2 Datenbanken | 11 |
| 3.2.1 Relationale Datenbank | 12 |
| 3.2.2 SQL | 14 |
| 3.2.3 Stored Procedures | 14 |
| 3.3 OPC UA | 15 |
| 3.4 Echtzeit | 16 |
| 4 Systementwurf | 18 |
| 4.1 Use-Cases | 18 |
| 4.2 Architektur | 21 |
| 4.2.1 Backend | 21 |
| 4.2.2 Frontend | 22 |
| 4.2.3 Protokoll zwischen Frontend und Backend | 24 |
| 4.3 Datenstruktur | 30 |
| 4.3.1 Backend | 30 |
| 4.3.2 Frontend | 31 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Proof of Concept | 35 |
| 5.1 | Backend | 35 |
| 5.1.1 | WebSocketServer | 37 |
| 5.1.2 | SqlClient | 40 |
| 5.1.3 | OpcuaServer | 43 |
| 5.2 | Frontend | 45 |
| 5.3 | Test des Proof of Concepts (PoCs) | 48 |
| 5.3.1 | Testaufbau | 48 |
| 5.3.2 | Test der OPC UA Schnittstelle | 48 |
| 5.3.3 | Test der Echtzeitfähigkeit | 48 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 52 |
| | Literaturverzeichnis | 53 |
| | Anhang | 55 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--|---|
| ACK Acknowledgment | IP Internet Protocol |
| BDO Business Data Object | JS JavaScript |
| CA Certification Authority | JSON JavaScript Object Notation |
| CRUD Create, Read, Update and Delete | ODBC Open Database Connectivity |
| CSMA/CD Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection | OPC UA Open Platform Communications |
| CSS Cascading Style Sheets | OPC |
| CSV Comma Separated Values | PLC Programmable Logic Controller |
| DBMS Datenbank Management System | PoC Proof of Concept |
| EDD Electronic Device Description | RTT Round Trip Time |
| ERD Entity Relationship Diagram | SCADA Supervisory Control And Data Acquisition |
| GUI Graphical User Interface | SQL Structured Query Language |
| HTML Hypertext Markup Language | STL Standart Template Library |
| HTTP Hypertext Transfer Protocol | TCP Transmission Control Protocol |
| HTTPS Hypertext Transfer Protocol Secure | URL Uniform Resource Locator |
| | WSS WebSocket Secure |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 3.1 | Beispiel Datenstruktur mit Ergebnis von einem „Join“ Query . . . | 13 |
| 3.2 | Eigenes Beispiel SQL Query - Select mit Join | 14 |
| 4.1 | Anwendungsfalldiagramm des SCADA Systems I | 19 |
| 4.2 | Use-Case Diagramm des SCADA Systems II | 20 |
| 4.3 | Kommunikationsmodell des SCADA Systems | 21 |
| 4.4 | Frontend Layout | 23 |
| 4.5 | Datenzugriff innerhalb des Frontends | 23 |
| 4.6 | Websocket Message Container und Event | 25 |
| 4.7 | Aktivitätsdiagramme Dispatcher Backend I | 27 |
| 4.8 | Aktivitätsdiagramm Dispatcher Backend II | 28 |
| 4.9 | Aktivitätsdiagramme Dispatcher Frontend | 29 |
| 4.10 | ERD des SCADA Systems | 33 |
| 4.11 | Frontend Datenstruktur | 34 |
| 5.1 | Klassendiagramm Überblick Backend | 36 |
| 5.2 | Klassendiagramm der Klasse „ <i>WebsocketServer</i> “ | 37 |
| 5.3 | Klassendiagramm der Klasse „ <i>ws_session</i> “ | 39 |
| 5.4 | Klassendiagramm der Klasse „ <i>ws_message</i> “ | 39 |
| 5.5 | Klassendiagramm der Klasse „ <i>SqlClient</i> “ | 40 |
| 5.6 | Klassendiagramm der Klasse „ <i>sql_message</i> “ | 41 |
| 5.7 | Klassendiagramm der Klasse „ <i>OpcuaServer</i> “ | 43 |
| 5.8 | Klassendiagramm der Klasse „ <i>opcua_changeRequest</i> “ | 44 |
| 5.9 | Screenshot der Login Seite im Browser | 45 |
| 5.10 | Screenshot einer Beispielseite | 45 |
| 5.11 | Screenshot, Zustände eines Textfelds | 46 |
| 5.12 | Screenshot, Zustände eines Buttons | 46 |
| 5.13 | Screenshot einer Beispielseite mit ausgeklappter Navigation | 47 |
| 5.14 | Latenzzeiten im vier Stunden Dauertest | 49 |
| 5.15 | Auszug aus dem Paketmitschnitt während des vierstündigen Dauertests aus dem Programm Wireshark [3] | 49 |
| 5.16 | Verhalten von TCP bei Paketverlust [9] | 50 |
| 5.17 | Latenzzeiten im vier Stunden Dauertest über die Anzahl der vom Backend zum Frontend gesendeten Paketen | 51 |

Quellcodeverzeichnis

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Methode „ <i>addSession</i> “ der Websocket Server Klasse | 38 |
| 2 | SQL Skript um die Datenstruktur der Datenbank zu erzeugen . . | 55 |
| 3 | SQL Skript um die gespeicherten Prozeduren der Datenbank zu erstellen | 58 |
| 4 | Beispiel Business Data Object (BDO) (Datenstruktur) des Frontends | 61 |
| 5 | Test Skript zur Latenz Messung | 67 |

1 Einführung

1.1 Motivation

Durch mein Studium der Elektrotechnik mit Vertiefung in die Automatisierungstechnik konnte ich Eindrücke in die Vorgehensweise und Möglichkeiten der Graphical User Interface (GUI) Programmierung für Industrieanlagen gewinnen. Dabei fiel mir auf, dass der aktuelle Stand der Technik in der Automatisierungstechnik noch stark vom Stand in anderen softwaregeprägten Bereichen abweicht. So wird in der Automatisierungstechnik noch immer auf statisch geschriebene Benutzeroberflächen gesetzt, die kompiliert werden müssen und damit viele Einschränkungen mit sich bringen. Es ist zum Beispiel nicht möglich, ein Steuerelement zur Laufzeit in Abhängigkeit vorhandener Entitäten zu instanzieren. Meist schafft man sich Abhilfe, indem man ein Element entweder ein- oder ausblendet. Ein weiteres Problem vorhandener Lösungen ist, dass diese meist plattformgebunden sind und nur lokal, mit entsprechender Software des Herstellers, lauffähig sind. In der heutigen Informatik wird immer mehr auf grafische Benutzeroberflächen gesetzt, welche als Webapplikation in einem beliebigen Browser verwendbar sind.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf einer Architektur für ein echtzeitfähiges Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) System mit Webfrontend. Durch ein PoC wird geprüft ob die Architektur auch in die Praxis umsetzbar ist. Hierbei wird die Applikation streng in Frontend und Backend getrennt. Das Frontend wird als Webapplikation im PoC implementiert. Dabei werden folgende Anforderungen an die Architektur gestellt:

- Die Datenrate des Frontends soll bei vertretbarem Aufwand so klein wie möglich sein. Dies ermöglicht die Nutzung des Systems in einem Umfeld mit geringer verfügbarer Bandbreite zur Steuerungsebene.
- Die Architektur soll Steuerelemente unterstützen, die eine Eingabe durch den Nutzer zulassen, sowie Steuerelemente die eine Darstellung eines Prozesswerts ermöglichen.

- Die Webapplikation selbst soll so modular sein, dass man zur Laufzeit Steuerelemente hinzufügen und entfernen kann, ohne dass das Frontend offline geht.
- Die Prozessdaten sollen nicht, wie aktuell bei vielen Webapplikationen üblich, durch Polling synchronisiert werden, sondern die Weboberfläche soll auf Datenänderungen des Prozesses asynchron in Echtzeit (bei statischem Routing im Netzwerk) reagieren. Dasselbe gilt für die Eingaben des Nutzers.
- Die Architektur soll eine herstellerunabhängige Schnittstelle zur Integration in ein vorhandenes System bereitstellen.
- Die Weboberfläche soll eine feste Auflösung haben und muss nicht auf Änderungen des Viewports reagieren. Ausnahmen bilden hierbei Darstellungen die dies, durch ihre einfache Gestalt, erlauben.

Der Beweis der Realisierbarkeit soll durch eine Beispielimplementierung (PoC) erbracht werden. Dabei wird je ein Eingabeelement (z.B. Button), ein Ausgabeelement (z.B. Label), sowie ein Ein-/Ausgabeelement (z.B. ein Textfeld) implementiert.

1.3 Gliederung

Diese Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. In Kapitel 1 wird kurz die Motivation zu dieser Arbeit erklärt und die Zielsetzung formuliert. Anschließend werden in Kapitel 2 kurz drei SCADA Systeme vorgestellt. Um die Arbeit verständlicher zu machen wird in Kapitel 3 das notwendige Theoriewissen zur Arbeit vermittelt. In Kapitel 4 wird schließlich ein Systementwurf für ein SCADA System erarbeitet. Das Kapitel 5 ist der Implementierung des PoCs sowie deren Besonderheiten gewidmet. Dazu wird zuerst Backend und Frontend beschrieben um anschließend deren gemeinsames Protokoll zu erklären. Anschließend wird das PoC getestet und das Ergebnis analysiert. Im letzten Kapitel (Kapitel 6) wird das wesentliche der Arbeit zusammengefasst und einen Ausblick für weiterführende Arbeiten gegeben.

2 Aktueller Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die führenden SCADA Systeme der drei größten Automatisierungstechnik Unternehmen der Welt [2] kurz vorgestellt.

2.1 Compact HMI

Das SCADA System von *ABB* am Markt heist „*Compact HMI 6.0 Overview*“. Es ist lauffähig auf *Windows 8.1*, *Windows 10 2016 LTSB*, *Windows Server 2012 R2* sowie *Windows Server 2016* [1]. Dieses System bietet als Schnittstellen (OPC) (DA, HDA, AE), Comli, SattBus, Modbus Serial sowie Modbus TCP an [1]. Programmable Logic Controllers (PLCs) werden bevorzugt über die OPC Schnittstelle in das SCADA System integriert [1]. Ausserdem integriert das System den Versand von E-Mails oder SMS [1].

2.2 WinCC V7

Das SCADA System des Herstellers *Siemens* ist „*SIMATIC WinCC V7*“. Es bietet eine Vielzahl an Optionen die verschiedene Funktionen implementieren. Laut Siemens [15] ist es ein Sektor- und Technologieneutrales System das über sogenannte „*WINCC V7 options*“ skalierbar ist. Es bietet außerdem eine Weboberfläche um über das Internet zu steuern und Werte zu überwachen [15].

2.3 OpenEnterprise

„*OpenEnterprise*“ ist das aktuelle SCADA System des Herstellers Emerson. Es setzt sich aus einer Vielzahl von Teilsystemen zusammen. Jedes dieser Teilsysteme ist ausschließlich unter Microsoft Windows lauffähig [4]. Zur Anbindung an externe Datenbanksysteme, unterstützt „*OpenEnterprise*“ die Verbindung über Open Database Connectivity (ODBC) Treiber [4].

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Websocket

Websockets bieten die Möglichkeit Nachrichten zwischen einem Server und einer Webanwendung asynchron auszutauschen. Jede Websocket Verbindung startet zu Beginn als Hypertext Transfer Protocol (HTTP) Verbindung. Der Client sendet einen HTTP Request vom Typ *GET*, mit den Attributen *Connection: Upgrade* und *Upgrade: websocket* im Header, an den HTTP Server. Unterstützt der HTTP Server das Websocket Protokoll, bestätigt er die Anfrage mit einem *HTTP/1.1 101 Switching Protocols* Response. Anschließend bauen die Teilnehmer eine Transmission Control Protocol (TCP) Verbindung auf, die so lange bestehen bleibt, bis einer der Teilnehmer die Verbindung aktiv beendet oder ein Teilnehmer nicht mehr erreichbar ist. Die ausgetauschten Daten können Strings oder binäre Daten sein. Beides wird vom Websocket Protokoll unterstützt. Das Protokoll definiert allerdings keine Semantik der übertragenen Daten, weshalb immer ein Subprotokoll nötig ist, um damit produktiv zu arbeiten. Wie auch eine HTTP Verbindung, kann eine Websocket Verbindung verschlüsselt werden. Dies erkennt man am Protokollpräfix des Uniform Resource Locator (URL). Bei einer unverschlüsselten Verbindung lautet der Präfix „*ws://*“ und bei einer verschlüsselten Verbindung „*wss://*“.

3.2 Datenbanken

Der Zweck eines Datenbanksystems ist es, Daten persistent zu speichern und zur Verfügung zu stellen. Ein Datenbanksystem setzt sich aus einer Datenbasis, sowie einem Datenbank Management System (DBMS) zusammen. Dabei stellt die Datenbasis den Speicher der Datenbank dar und das DBMS das Programm durch das der Zugriff auf die Datenbasis ermöglicht wird. Das DBMS ist notwendig, um konkurrierende Zugriffe von mehreren Nutzer auf die selbe Datenbasis zu verwalten [14]. Meistens bietet das DBMS als Interface eine Netzwerkschnittstelle an (Server-Client Architektur), es gibt allerdings auch Datenbanken deren DBMS Teil der Applikation werden (z.B. SQLite).

3.2.1 Relationale Datenbank

Im Falle einer relationalen Datenbank werden Daten in Form von Relationen abgespeichert. Tabellen sind eine Darstellung von Relationen.

Jede Relation hat Attribute mit einem in der Relation einzigartigem Attributnamen. Die Domäne eines Attributs ist die Menge aller Werte, die ein Attribut annehmen kann. Ist der Wert eines Attributs unbekannt oder noch nicht bestimmt, ist der Wert des Attributs „*NULL*“ [16]. Werden Daten nun in einer Datenbank gespeichert, wird ein Wertetupel in eine Relation eingefügt. Die Relationen sind nur das strukturelle theoretische Konzept, das sich hinter einer relationalen Datenbank verbirgt. Anfangs dieses Abschnitts wurde gesagt, dass Relationen in Form einer Tabelle darstellbar sind. Wenn Relationen nun zu ihrer Definition Wertetabellen zu Grunde liegen, ist es möglich zur Vereinfachung statt von Relationen von Tabellen zu sprechen. Das DBMS stellt eine Schnittstelle bereit um dem Nutzer die Daten zugänglich zu machen (Create, Read, Update and Delete (CRUD) Operationen). Die Schnittstelle unterstützt meist die Sprache Structured Query Language (SQL). Diese Sprache ist in Abschnitt 3.2.2 genauer beschrieben. Relationen können nicht nur als Tabelle ausgegeben werden, es ist auch möglich sie zu verknüpfen. Wenn keine Regel angegeben wird wie zwei Relationen verknüpft werden sollen, wird das informatische Kreuzprodukt gebildet. Das bedeutet, dass jedes Wertetuple aus Relation A, mit jedem Wertetupel aus Relation B verknüpft wird. Dadurch entsteht eine neue Relation. In einer Datenbank existieren immer Schlüssel (Keys) innerhalb einer Tabelle. Dabei gibt es drei Typen:

- Primary-Key (Primärschlüssel)
- Unique-Key
- Foreign-Key (Fremdschlüssel)

Der Primary-Key muss als einziger Schlüssel zwingend vorhanden sein. Er bestimmt nach was das DBMS die Datensätze ablegt. Deshalb muss der Wert des Attributes das den Primary-Key bildet, innerhalb einer Tabelle einzigartig sein. Das heißt, es darf maximal ein Wertetupel mit dem selben Wert des Primärschlüssels, innerhalb einer Relation, existieren. Der Primärschlüssel darf auch nicht „*NULL*“ sein. Ein Unique-Key stellt einen zusätzlichen Schlüssel dar, über die jeder Eintrag in einer Tabelle eindeutig identifizierbar ist. Wie auch der Primärschlüssel, darf dieser Schlüssel nicht „*NULL*“ sein. Er ist in jeder Tabelle nur optional vorhanden. Es ist allerdings auch möglich dass mehrere Unique-Keys existieren. Der Foreign-Key (Fremdschlüssel) ist ein Schlüssel, der nur in einem relationalen DBMS unterstützt wird. Er ermöglicht es, einen Verweis auf eine andere Tabelle zu definieren. Zur Veranschaulichung sei folgendes Beispiel einer relationalen Datenstruktur, auf einem SQL Server, gegeben.

| | 123 ID | ABC Bezeichnung | ABC Standort |
|---|--------|-----------------|--------------|
| 1 | 1 | HW-Entwicklung | Rastatt |
| 2 | 2 | SW-Entwicklung | Rastatt |
| 3 | 3 | Vertrieb | Karlsruhe |
| 4 | 4 | Marketing | Karlsruhe |

(a) Tabelle „Abteilung“

| | ABC Vorname | ABC Nachname | ABC Telefonnummer | ABC EmailAdresse | 123 AbteilungID |
|---|-------------|--------------|-------------------|-----------------------|-----------------|
| 1 | Max | Mustermann | +49 7222 16545 | Max.Mustermann@AG.de | 2 |
| 2 | Mirko | Eckermann | +49 7222 15644 | Mirko.Eckermann@AG.de | 1 |
| 3 | Sabine | Maier | +49 7223 456456 | Sabine.Maier@AG.de | 1 |
| 4 | Thomas | Fischer | +49 7223 654631 | Thomas.Fischer@AG.de | 2 |
| 5 | Vanessa | Schmidt | +49 721 646546 | Vanessa.Schmidt@AG.de | 3 |
| 6 | Linda | Kaiser | +49 721 456349 | Linda.Kaiser@AG.de | 4 |

(b) Tabelle „Mitarbeiter“

| | ABC Vorname | ABC Nachname | ABC Telefonnummer | ABC EmailAdresse |
|---|-------------|--------------|-------------------|-----------------------|
| 1 | Mirko | Eckermann | +49 7222 15644 | Mirko.Eckermann@AG.de |
| 2 | Sabine | Maier | +49 7223 456456 | Sabine.Maier@AG.de |

(c) Ergebnis des Querys aus Abbildung 3.2

Abbildung 3.1: Eigene Beispiel Datenstruktur als Tabellen mit Ergebnis des Querys aus Abbildung 3.2

Wie in der Abbildung 3.1 zu sehen ist, besteht die Datenbank aus zwei Tabellen. Die erste Tabelle hat die Bezeichnung „Abteilung“ (Abbildung 3.1a) mit den Spalten „ID“, „Bezeichnung“ sowie „Standort“. Die Spalte „ID“ ist als Primary-Key deklariert. Die zweite Tabelle „Mitarbeiter“ (Abbildung 3.1b) enthält die Spalten „Personalnummer“, „Vorname“, „Nachname“, „Telefonnummer“, „EmailAdresse“ und „AbteilungID“. In dieser Tabelle ist die Personalnummer der Primärschlüssel. Um eine Verknüpfung der Spalte „AbteilungID“ der Tabelle „Mitarbeiter“ zu der Tabelle „Abteilung“ herzustellen, wird ein Fremdschlüssel definiert, der von der Spalte „AbteilungID“ der Tabelle „Mitarbeiter“ auf die Tabelle „Abteilung“, unter Benutzung deren Primärschlüssels, verweist. Die Definition eines Fremdschlüssels ist nicht zwingend notwendig, um die Verknüpfung der zwei Relationen nach dieser Semantik zu ermöglichen. Es ermöglicht aber die selbstständige Erhaltung der referenziellen Integrität durch das DBMS. Dabei hat man bei der Erstellung des Fremdschlüssels die Wahl, was beim Löschen oder beim Ändern eines referenzierten Datensatzes geschehen soll. Der gängigste Umgang damit ist, dass man entweder das Löschen verbietet (*on delete restrict*), oder das beim Löschen des referenzierten Datensatzes auch der referenzierenden Datensatz gelöscht wird (*on delete cascade*). Bei beiden Verfahren bleibt die referenzielle Integrität erhalten. Das heißt es gibt nach dem Löschen keine Referenzen, die nicht aufgelöst werden können.

3.2.2 SQL

SQL ist eine Abkürzung für Structured Query Language. Dabei handelt es sich um eine herstellerunabhängige Sprache, welche das Erzeugen und Verwalten von Datenstrukturen ermöglicht. Außerdem ermöglicht sie das Abfragen, Einfügen, Verändern, sowie Verknüpfen von Datensätzen. Dabei unterscheidet sich SQL sehr von anderen Programmiersprachen. So besteht der Ansatz bei SQL eher darin zu definieren, was man als Ergebnis möchte, sich aber um die konkrete Implementierung der Operation keinerlei Gedanken zu machen braucht. Um dies zu demonstrieren, ist das folgende Beispiel, auf Basis der Beispieldatenbank in Abbildung 3.1, gegeben. Nun möchte man alle Telefonnummern, Namen und E-Mail Adressen einer Abteilung haben, welche den Namen *HW-Entwicklung* trägt. Dazu ist es notwendig die Datensätze der Mitarbeitertabelle mit den Datensätzen der Abteilungstabelle, entsprechend des Fremdschlüssels in der Mitarbeiter Tabelle, zu kombinieren und alle Datensätze der so entstandenen Tabelle auszugeben, welche die Abteilungsbezeichnung *HW-Entwicklung* tragen. Die Query für diese Operation ist in Abbildung 3.2 abgebildet. Die Antwort des Servers ist

```
SELECT
Mitarbeiter.Vorname, Mitarbeiter.Nachname,
Mitarbeiter.Telefonnummer, Mitarbeiter.EmailAdresse
FROM Abteilung
LEFT JOIN Mitarbeiter
ON Mitarbeiter.AbteilungID = Abteilung.AbteilungID
WHERE Abteilung.Bezeichnung = 'HW-Entwicklung';
```

Abbildung 3.2: Eigenes Beispiel SQL Query - Select mit Join

in Abbildung 3.1c zu sehen. Bei Abbildung 3.1a und Abbildung 3.1b sieht man die Datensätze der beiden Quelltabellen des Querys. Wahrscheinlich würde man diesen einfachen Datenbank Join, in C/C++, mit den Daten in Structures gespeichert, mittels verschachtelter For-Schleifen implementieren. Das Problem bei dieser Implementierung ist, dass man durch jedes Element iterieren muss. Das DBMS hat zur Lösung dieses Problems bessere Algorithmen hinterlegt (Stichwort: binärer Suchbaum, Hash-Maps...).

3.2.3 Stored Procedures

Ein SQL Server unterstützt nicht nur das Manipulieren und Ausgeben von Daten mit SQL, sondern auch das Speichern von Funktionen und Prozeduren. Diese Prozeduren und Funktionen sind auch in SQL geschrieben. Sie ermöglichen dem Entwickler das Auslagern komplexer SQL Querys. Der wesentliche Unterschied zwischen einer Prozedur und einer Funktion besteht darin, dass eine Funktion

einen Rückgabewert haben kann, eine Prozedur dagegen nicht. Das Fehlen eines Rückgabewerts einer Prozedur stellt aber, entgegen der allgemeinen Erwartung, keine Einschränkung dar. Prozeduren und Funktionen akzeptieren auch session-bezogene globale Variablen als *OUT* Argument. Desweiteren haben Prozeduren entgegen Funktionen die Möglichkeit, SQL Querys zur Laufzeit zusammenzusetzen und auszuführen. Funktionen können, in SQL Querys benutzt werden, Prozeduren nicht. Prozeduren werden durch ein *CALL* Befehl aufgerufen.

3.3 OPC UA

Open Platform Communications (OPC UA) ist ein Thema, das immer wieder mit Industrie 4.0 in Verbindung gebracht wird. Luber [10] fasst OPC UA in wenigen Worten zusammen:

„OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) ist eine Sammlung von Standards für die Kommunikation und den Datenaustausch im Umfeld der Industrieautomation. Mithilfe von OPC UA werden sowohl der Transport von Machine-to-Machine-Daten als auch Schnittstellen und die Semantik von Daten beschrieben. Die komplette Architektur ist serviceorientiert aufgebaut.“

Eine der großen Herausforderungen der Industrie 4.0 besteht in der Vernetzung aller Geräte in einer Fabrik. Dies ist nur durch die Verwendung eines offenen (herstellerunabhängigen) Standards möglich. Ein solcher Standard ist OPC UA. Er definiert nicht nur wie Daten ausgetauscht werden, sondern auch wie die Daten zu interpretieren sind (Semantik). Dabei bedient sich ein OPC UA Server einem eingebauten Informationsmodell. Dies kann man sich wie Klassen und Objekte in der objektorientierten Programmierung vorstellen. Als Beispiel bietet Hersteller A eine Pumpe am Markt an. Diese Pumpe besitzt eine OPC UA Schnittstelle (Server). Dieser Server hat ein Pumpenobjekt mit der Bezeichnung „*pumpe_xyz_A*“, das eine Menge an Attributen besitzt die man lesen, schreiben, oder lesen und schreiben kann. Jedes Attribut hat einen eindeutigen Datentyp. Das Attribut *Seriennummer* besitzt zum Beispiel den primitiven Typ *String*. Ein OPC UA Server unterstützt aber nicht nur primitive Datentypen, sondern auch Objekte wie das Pumpenobjekt „*pumpe_xyz_A*“ des Herstellers A. Nun möchte man diese Pumpe des Herstellers A durch ein PLC des Herstellers B auslesen beziehungsweise steuern. Bei einer proprietären Schnittstelle, würde dies zu Problemen führen da dem Hersteller B das Informationsmodell der Pumpe nicht bekannt ist. Hersteller A müsste in diesem Fall Dokumente liefern, mit denen Hersteller B die Pumpe ansteuern könnte. Diese wäre zum Beispiel eine Electronic Device Description (EDD) Datei. Der Hersteller wäre also gezwungen, für jeden größeren PLC Hersteller, verschiedene Dokumente zur Verfügung zu stellen.

OPC UA geht an dieser Stelle einen anderen Weg. Der OPC UA Standard stellt eine Menge an OPC UA Klassen zur Verfügung, von denen die Hersteller nun ihre eigenen Klassen ableiten können. Eine solche Klasse gibt es auch für eine Pum-

pe. Diese Klasse besitzt nun die minimalen Attribute einer Pumpe. Hersteller A leitet nun ihre Pumpenklasse („*pumpe_xyz_A*“) von dieser Pumpenklasse ab und erweitert die Klasse um ihre eigenen zusätzlichen Attribute. Wenn jetzt Hersteller B die Pumpe mit ihrem PLC ansprechen möchte, gibt es zwei Möglichkeiten. Es ist bekannt, dass die Pumpenklasse „*pumpe_xyz_A*“ von der allgemeinen Pumpenklasse des Standards abgeleitet wurde. Damit ist es möglich, zumindest die minimalen Funktionen der Pumpe, anzusprechen. Möchte man sich nicht darauf beschränken, sondern den vollen Funktionsumfang nutzen, den die Pumpe bietet, so kann der PLC sich bei dem OPC UA Server nach deren Informationsmodell für die Pumpe erkundigen. Die Attribute sind damit nicht nur in ihrem Typ bekannt, sondern auch in ihrer Bedeutung (Semantik). Als Transportprotokoll benutzt OPC UA das Internet Protocol (IP). Damit ist eine horizontale sowie vertikale Vernetzung innerhalb der Automatisierungspyramide möglich [10]. OPC UA unterstützt dabei ein Konzept bei dem Daten angefragt werden (zyklisches lesen), sowie ein Publish/Subscribe Konzept, bei dem man sich Datenknoten abonnieren kann und fortan von dem Server über Änderungen informiert wird [10].

3.4 Echtzeit

Laut Scholz [13] ist Echtzeit wie folgt definiert:

„Unter Echtzeit versteht man den Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung

Das bedeutet, dass ein System nur dann echtzeitfähig ist, wenn es die folgenden Bedingungen erfüllt:

- Jede Komponente des Systems, die an dem Prozess beteiligt ist, muss selbst echtzeitfähig sein.
- Die Rechenzeit der verwendeten Algorithmen muss endlich sein und deren Maximum kalkulierbar.
- Die Transportprotokolle, die beteiligt sind dem Prozess Daten zuzuführen bzw. Daten zu entnehmen, müssen die Echtzeitfähigkeit unterstützen.

Wenn die obere Definition nun auf das Ethernet oder das TCP Protokoll angewandt wird, fällt schnell auf, dass diese beide normalerweise nicht echtzeitfähig sind. Ethernet verhindert auf dem Bus (physikalischer Layer) keine Kollisionen sondern erkennt diese nur. Wenn eine Kollision erkannt wurde, wird das Senden auf dem Bus abgebrochen und nach einer zufälligen Zeit erneut versucht. Dieses Verfahren nennt man Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection (CSMA/CD). Den Buszugriff erhält immer der Teilnehmer der zuerst sendet. Wann ein anderer Teilnehmer dann den Buszugriff erhält ist Zufall. Deshalb ist nicht garantiert, dass man innerhalb einer definierten Zeitspanne die Daten übertragen kann. Man kann dieses Problem allerdings umgehen, indem man im physikalischen Layer bereits dafür sorgt, dass keine Datenkollision auftreten kann.

Dies ist zum Beispiel durch den Einsatz von Switches möglich. Diese trennen die einzelnen Sender voneinander, sodass innerhalb einer Kollisionsdomäne sich immer nur ein Sender befindet. Damit ist es möglich Kollisionen gezielt zu verhindern. Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass man immernoch nicht vollständig echtzeitfähig Daten übertragen kann, da das Netzwerk auch auf die aufkommende Datenlast ausgelegt sein muss. Dadurch ist es möglich mit Ethernet in einer kontrollierten Umgebung Daten in Echtzeit zu übertragen. Ein weitverbreiteter Irrtum ist, dass Echtzeitfähigkeit bedeutet etwas müsse besonders schnell reagieren, es genügt dass die Reaktionszeit definiert und endlich ist.

4 Systementwurf

4.1 Use-Cases

Aus der Zielsetzung der Arbeit ergeben sich die Anwendungsfalldiagramme in Abbildungen 4.1 und 4.2. Das Diagramm in Abbildung 4.1 beschreibt abstrakt die Anwendungsfälle, die das SCADA System für den Anwender, in der Rolle des Bedieners (Operator), sowie des Programmierers (Programmer) erfüllen muss. Analog dazu beschreibt das Anwendungsfalldiagramm in Abbildung 4.2 die Anwendungsfälle die ein PLC an das SCADA System stellt. Es ist möglich dies in zwei getrennten Diagrammen abzuhandeln, da es keine Anwendungsfälle gibt, die einen Akteur aus beiden Diagrammen benötigt. Jedoch interagieren alle Akteure mit dem selben System.

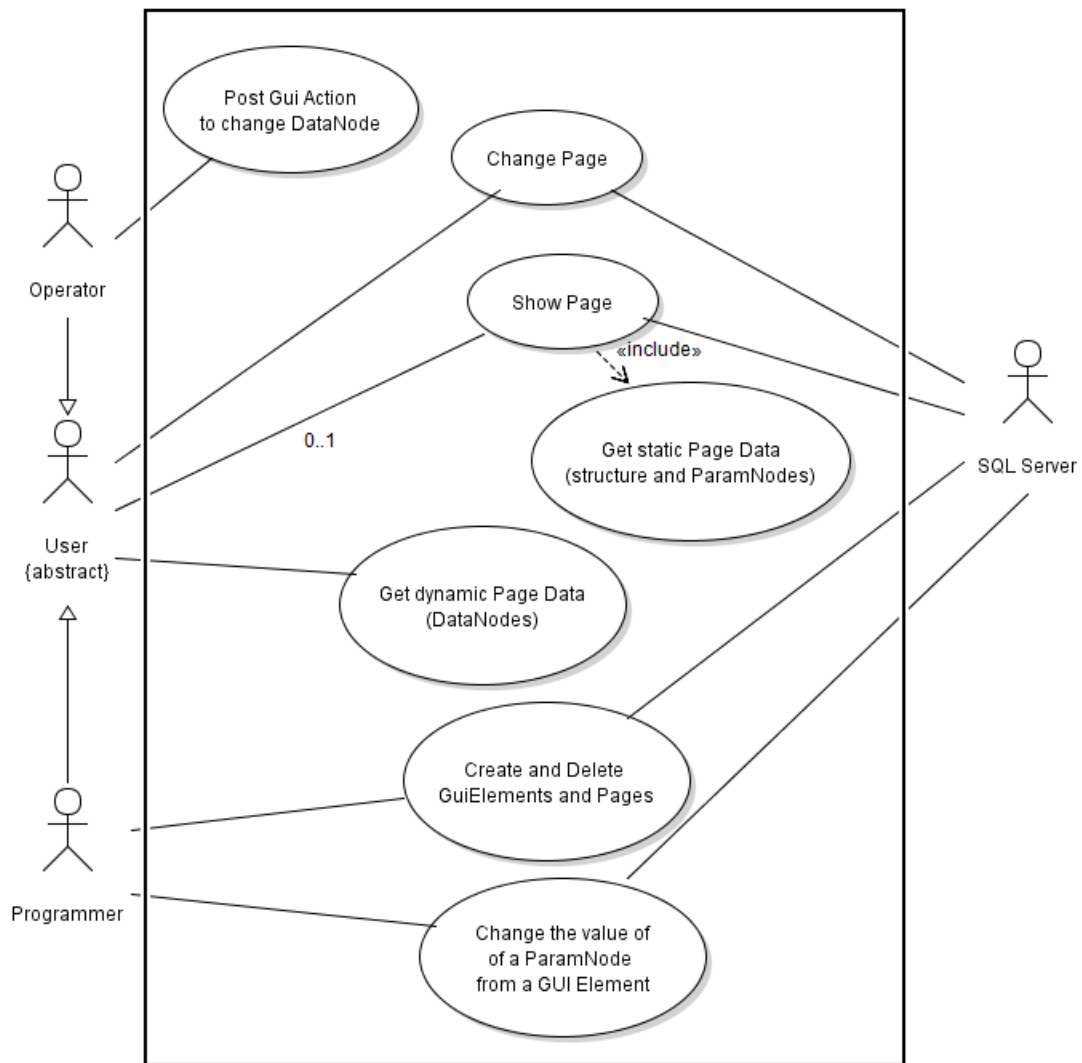


Abbildung 4.1: Anwendungsfalldiagramm des SCADA Systems I

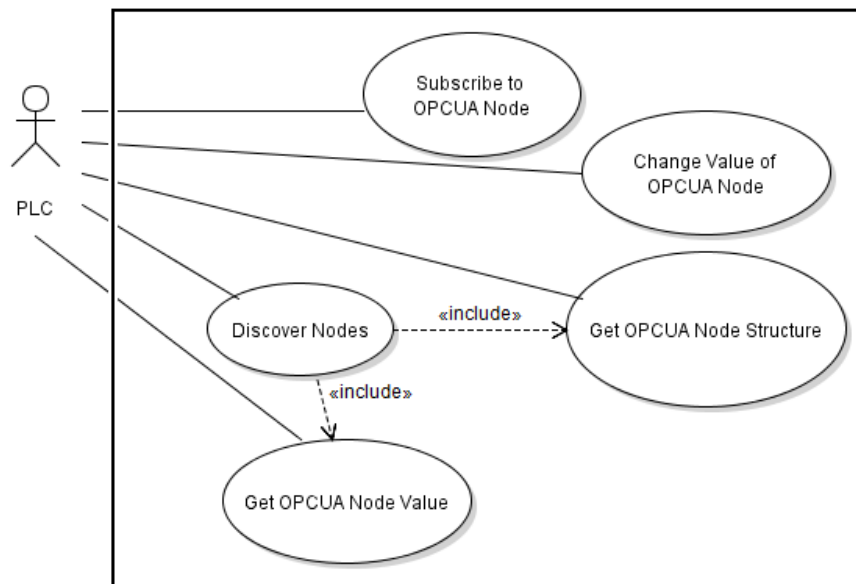


Abbildung 4.2: Use-Case Diagramm des SCADA Systems II

4.2 Architektur

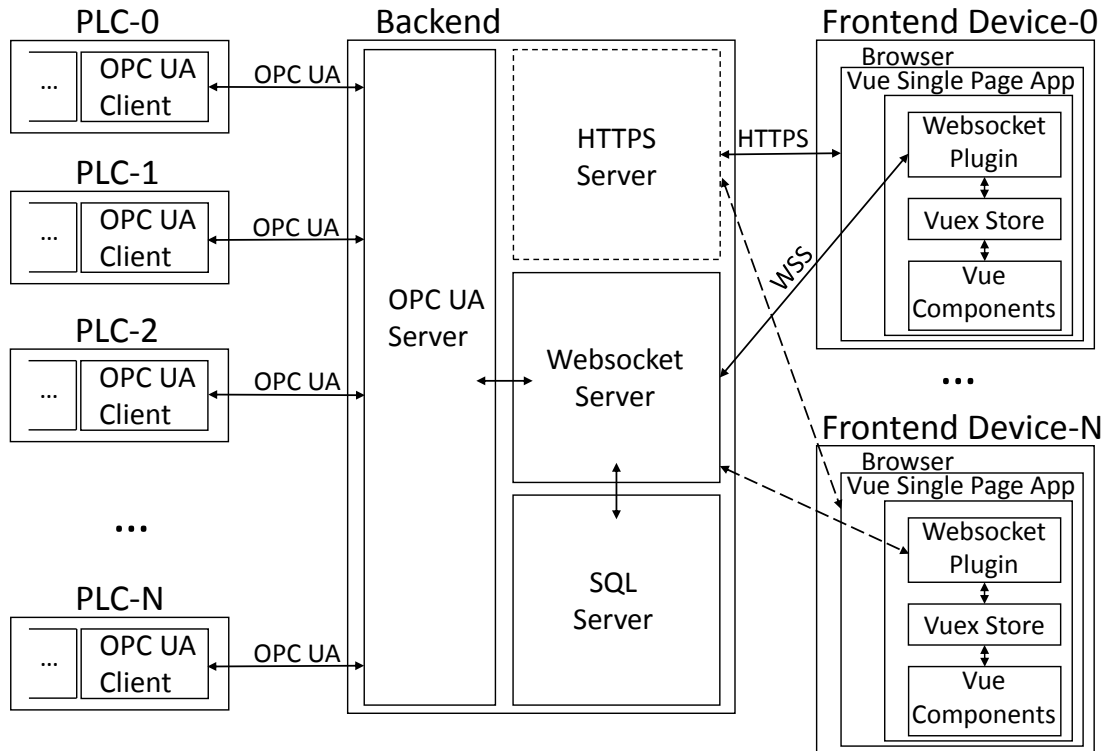


Abbildung 4.3: Kommunikationsmodell des SCADA Systems.

Die CPUs sind per OPC UA an das SCADA System angebunden und haben die Rolle eines OPC UA Clients. Die Webapplikation im Browser kommuniziert über WSS sowie HTTPS verschlüsselt mit dem Backend.

Wie in Abbildung 4.3 dargestellt, lässt sich die Architektur des SCADA Systems in PLCs, Backend und Frontends unterteilen. Unter Frontend (Abschnitt 4.2.2) versteht man die (in diesem Fall) grafische Schnittstelle, die es dem Nutzer ermöglicht, mit dem System zu interagieren. Das Backend (Abschnitt 4.2.1) fasst den Rest des Systems zusammen.

4.2.1 Backend

Das Backend besteht aus den folgenden vier Komponenten:

- Einem Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) Server
- Einem WebSocket Secure (WSS) Server
- Einem SQL Server

- Einem OPC UA Server

Damit ergeben sich, wenn man das Backend von außen betrachtet, als Schnittstellen OPC UA, WSS und HTTPS. Über diese Schnittstellen stellt das Backend den PLCs, sowie dem Frontend, Services zur Verfügung. Eine Sonderrolle unter den Komponenten nimmt dabei der HTTPS Server ein, da er als einzige Komponente keine Verbindung mit dem Rest des Backends hat. Dies ist deshalb möglich, da der HTTPS Server dazu da ist, die Hypertext Markup Language (HTML), die Cascading Style Sheets (CSS), sowie die JavaScript (JS) Dokumente einmalig beim Seitenaufruf an das Endgerät (Frontend Host Device) auszuliefern. Von diesem Zeitpunkt an findet die Kommunikation zwischen Frontend und Backend ausschließlich über den WSS Server statt. Dabei existiert immer genau eine Session für jede Frontendinstanz.

Zwischen dem Websocket Server und dem Frontend können ab diesem Zeitpunkt Strings ausgetauscht werden. Der OPC UA Server hält die variablen Daten des Systems und bietet diese den angeschlossenen PLCs an. Die Parametrierung des Frontends sowie alle anderen Daten, die persistiert werden müssen, werden in einem SQL Server gespeichert.

4.2.2 Frontend

Das Frontend ist eine Webapplikation, mit Vue.js [17] als Webframework. Beim Laden der Seite wird eine WSS Verbindung zum Backend aufgebaut. Ohne Authentifizierung zeigt das Frontend eine Seite an, die es dem Nutzer ermöglicht sich durch individuelle Zugangsdaten (Benutzername und Passwort) zu authentifizieren. Werden auf dieser Seite gültige Zugangsdaten eingegeben, ist die WSS Session authentifiziert und zeigt das Layout in Abbildung 4.4 an. Das Layout beinhaltet oben links einen Button, um die Navigation der Seite ein und auszublenden. Ist die Navigation am linken Rand eingeblendet, so ermöglicht sie es zwischen den einzelnen Seiten der Visualisierung zu navigieren. Dazu zeigt die Navigation immer einen „Zurück“ Button, um in die übergeordnete Seite zu wechseln, sowie Buttons um zu den untergeordneten Seiten zu wechseln. Existieren keine untergeordneten Seiten, oder keine übergeordnete Seite, so existieren auch die Buttons nicht. Schließlich wird im zentralen Fenster die aktuelle Page der Visualisierung angezeigt. Der komplette Seiteninhalt ist eine Repräsentation des Datenobjekts, das global in der Webapplikation vorliegt. Diese Datenstruktur ist eine Kopie der Daten aus dem Backend (Abschnitt 4.3.1), welche die aktuell angezeigte Seite betreffen. Sie ist in Abschnitt 4.3.2 genauer beschrieben und kann nur über die Websocket Schnittstelle verändert werden. So ist sichergestellt, dass die GUI Elemente immer die Daten des Backends darstellen und es keine Unterschiede gibt. Der Zustand ist also über alle Instanzen des Backends und Frontends immer konsistent. Wie Daten verändert werden können, ist genauer in Abschnitt 4.2.3 beschrieben. Innerhalb der Webapplikation existiert eine Page

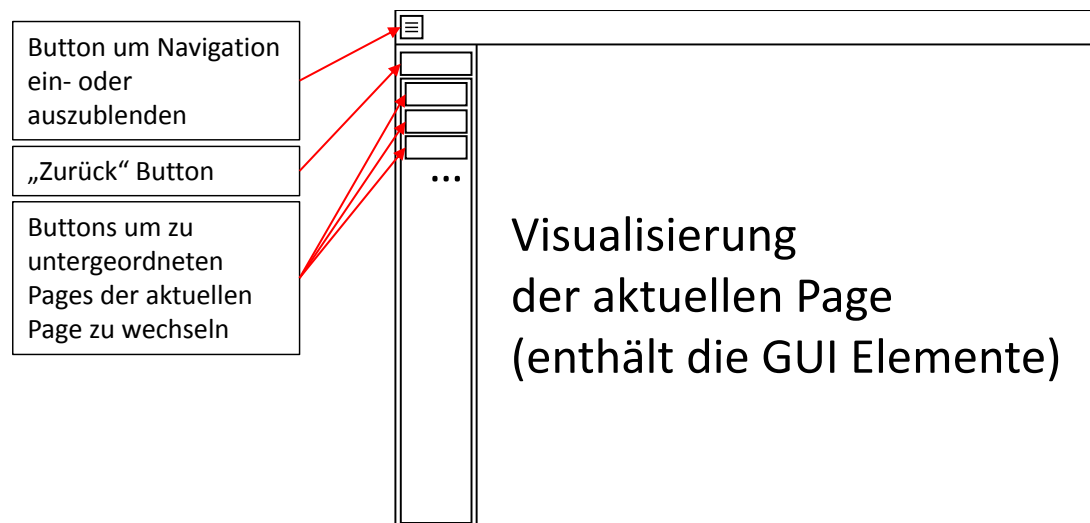


Abbildung 4.4: Layout des Frontends bei einer authentifizierten WSS Session

Komponente die, entsprechend der GUI Elemente in der globalen Datenstruktur, GUI Element Komponenten (*guiElement*) instanziiert und auf der Page anzeigt. Diese GUI Elemente werden entsprechend ihres Typs (zum Beispiel *Button*) weiter in spezialisierte GUI Elemente (z.B. *guiElementButton*) unterteilt. Das Schema, wie innerhalb der Webapplikation auf Daten zugegriffen werden kann, bzw. Daten geändert werden können, ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Die GUI Elemente haben nun Zugriff auf eine Funktion um Datenänderungen anzufordern, sowie auf den ihnen zugeordneten Teil der globalen Datenstruktur. Diese Datenstruktur ist in dem Vue Plugin *Vuex* gespeichert und existiert damit nur einmal pro Webapplikation. Wie der Dispatcher die Struktur des Frontends ändert ist

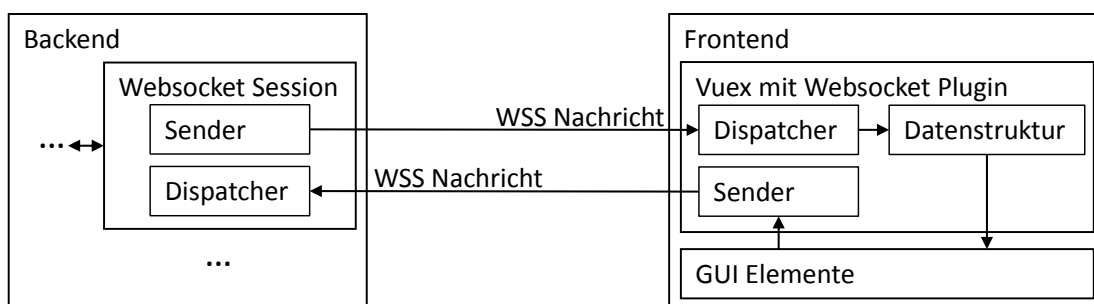


Abbildung 4.5: Schema des Zugriffs auf die Datenstruktur des Frontends

in Abschnitt 4.2.3 beschrieben. Die GUI Elemente können nur lesend auf die Datenstruktur zugreifen.

4.2.3 Protokoll zwischen Frontend und Backend

Websockets bieten die Möglichkeit asynchron Daten zwischen Frontend und Backend auszutauschen, bieten allerdings keinerlei Regeln für die Semantik dieser Daten. Deshalb ist ein weiteres Protokoll in der Applikationsebene erforderlich, welches die Semantik der ausgetauschten Daten definiert. An dieses Protokoll werden folgende Anforderungen gestellt.

Das Protokoll soll

- ... alle Datentypen unterstützen, die das Backend definiert.
- ... weitestgehend symmetrisch sein (Die Nachrichten vom Server zum Client haben eine ähnliche Gestalt wie die vom Client zum Server).
- ... möglichst leichtgewichtig sein.
- ... möglichst frei von Zuständen sein, sodass ein Vertauschen zweier Nachrichten keine Relevanz für die Applikation darstellt.
- ... eine Authentifizierung des Nutzers ermöglichen.

Die meisten Anforderungen können erfüllt werden, allerdings stehen die letzten drei in Konkurrenz zueinander. Um eine Authentifizierung zu ermöglichen gibt es, bei einer Verbindung die ab dem Aufbau dauerhaft besteht, folgende Möglichkeiten:

- Die Zugangsdaten, die die Session authentifizieren, werden einmalig vom Client zum Server gesendet. Die Session ist dann authentifiziert und hat ab diesem Zeitpunkt mehr Rechte.
- Die Zugangsdaten werden bei jeder Nachricht mitgesendet und überprüft.

Die erste Variante ist möglichst leichtgewichtig, da die Zugangsdaten nur einmal gesendet werden. Allerdings ist sie nicht frei von Zuständen, da die Schnittstelle, je nachdem ob eine Session bereits authentifiziert ist, unterschiedlich auf eingehende Nachrichten reagiert. Die zweite Variante reagiert immer identisch (deterministisch) auf die gleiche Nachricht, ist aber weniger performant, da das Verhältnis von Protokoll-Overhead zu Nutzdaten immer größer ist als bei der ersten Variante. Aufgrund dieses Sachverhalts wird bei der Zustandsfreiheit eine Ausnahme gemacht werden.

Das erarbeitete Protokoll tauscht Strings aus, deren Struktur der Klasse in Abbildung 4.6a zugrunde liegt. Diese Klasse besteht aus Nutzdaten (*payload*), sowie einem Header (*event*). Nutzdaten sind nur optional vorhanden, so ist möglich nur ein Event zu verschicken. Der Header ist eine Aufzählung verschiedener Events. Diese Aufzählung (*wsEvent*) ist in Abbildung 4.6b dargestellt und gibt die einzelnen Typen von Nachrichten an. Ein solches Objekt kann seitens

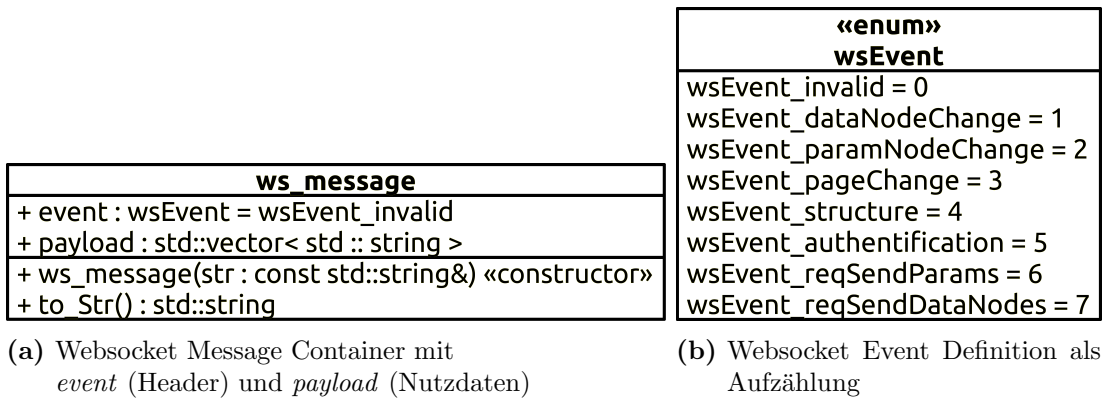


Abbildung 4.6: Websocket Message Container und Event

des Backends aus dem String in einer Websocket Nachricht konstruiert, sowie in einen solchen String übersetzt werden. Die Bildungsvorschrift ist dabei, alle Information welche das *ws_message* Objekt enthält (*event* und *payload*), als String zu kodieren und durch ein Semikolon getrennt zu einem String zusammenzusetzen. Dabei stellt das erste Feld in einem versendeten String immer das kodierte Event dar. Die restlichen Felder entsprechen dem Nutzdatenvektor der *ws_message*. Diese Bildungsvorschrift ist umkehrbar, solange der Nutzdatenvektor kein String mit einem Semikolon enthält. Dieser Fall ist unbedingt zu vermeiden und muss vom Frontend und Backend beim Kodieren des Strings abgefangen werden. Die umgekehrte Bildungsvorschrift implementiert die *ws_message* Klasse als Konstruktor. Das Protokoll unterstützt nun die in Abbildung 4.6b dargestellten Events. Das erste Event (*wsEvent.invalid*) ist der Standartwert des Events in jedem *ws_message* Objekt. Auf eine Nachricht mit diesem Event wird beim Empfang von keiner Seite aus reagiert und die Nachricht verworfen. Dies ist eine Absicherung, um zu verhindern, dass eine Nachricht mit einem zufälligen Event versendet wird. Front- sowie Backend stellen einen Dispatcher zur Verfügung welcher, entsprechend des Events einer empfangenen Nachricht, einen Handler aufruft. Der Dispatcher des Backends unterscheidet sich vom Dispatcher im Frontend, da er die Authentifizierung des Nutzers realisiert. Das Verhalten, ob und wie eine Nachricht vom Dispatcher im Backend dispatcht wird, ist durch das Aktivitätsdiagramm in Abbildung 4.7a definiert. Hier werden nur Nachrichten dispatcht, wenn die Websocketsession bereits authentifiziert wurde oder die Nachricht eine Authentifizierungsnachricht ist. Ist dies der Fall, werden die entsprechenden Handler zu den empfangenen Events aufgerufen.

Die Handler des Backends sind durch die verbleibenden Diagramme in Abbildung 4.7, sowie durch die Diagramme in Abbildung 4.8 definiert.

Das Frontend bedarf keines solchen Authentifizierungsmechanismus, da dies bereits im WSS Protokoll implementiert ist. Wie auch bei HTTPS geschieht das durch ein Serverzertifikat des Backends, dass durch eine externe Certification Au-

thority (CA) beim Verbindungsaufbau verifiziert werden muss. Die Handler des Frontends sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

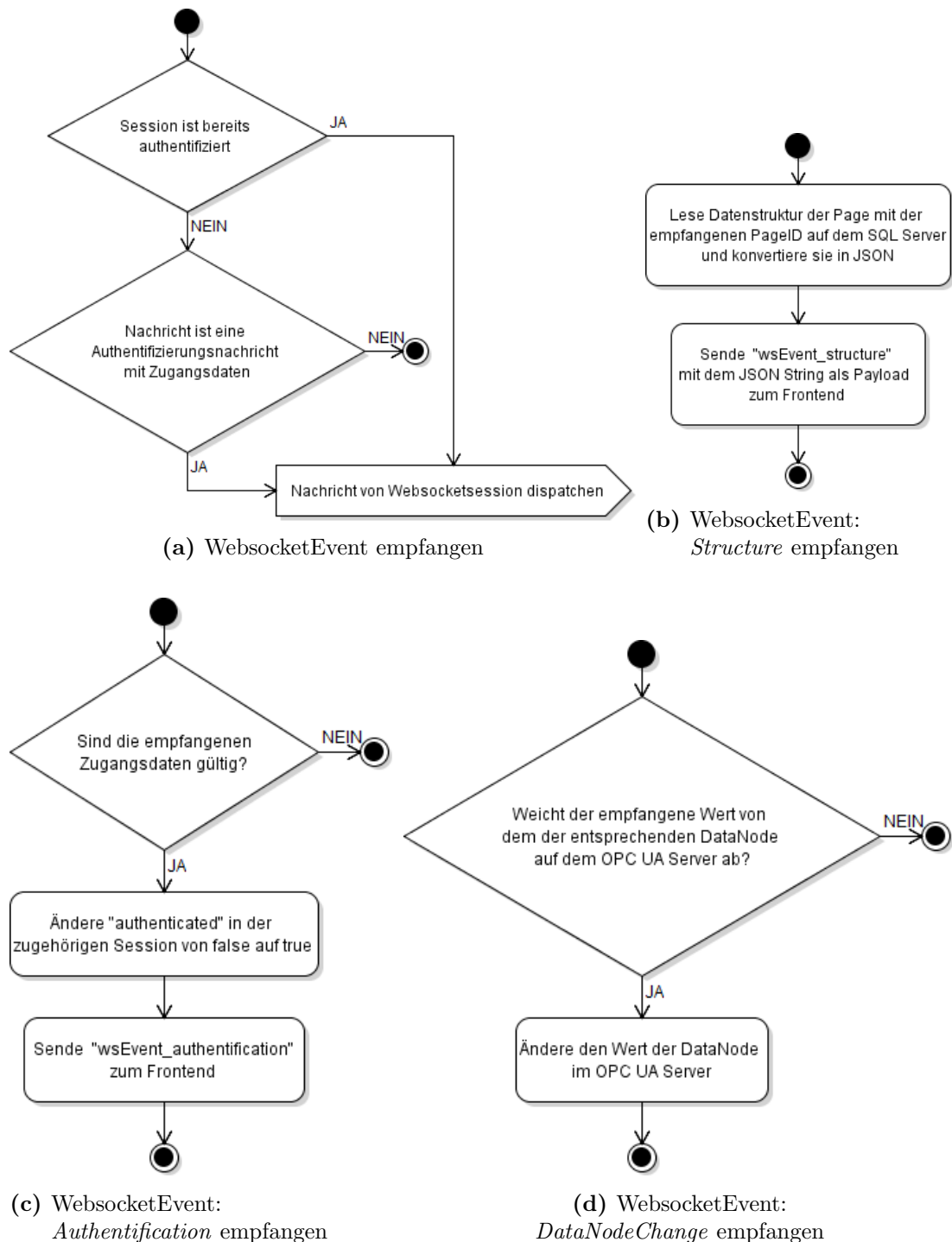
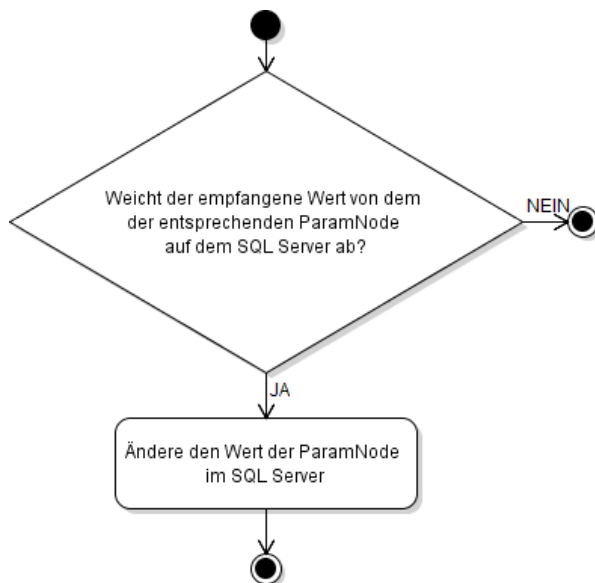
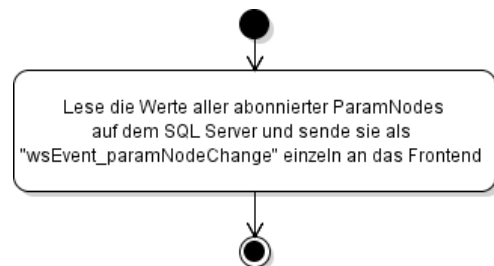


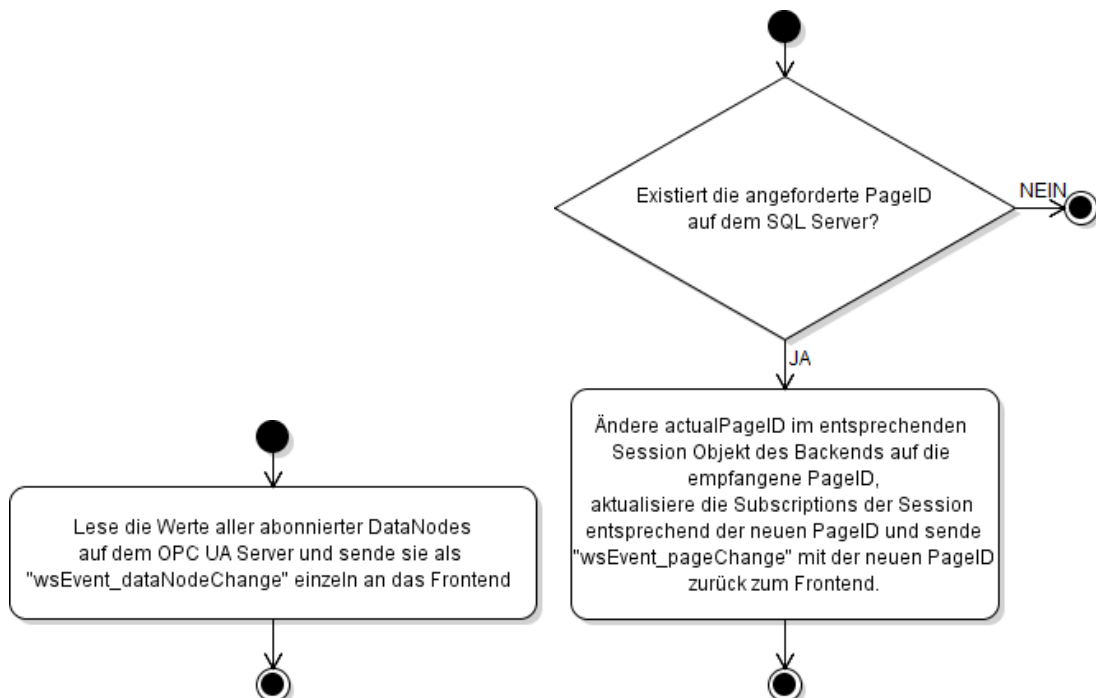
Abbildung 4.7: Aktivitätsdiagramme des Dispatchers im Backend I



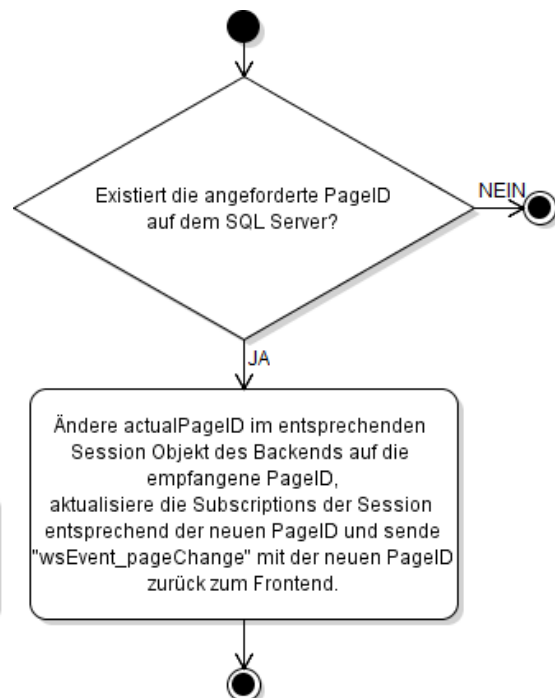
(a) WebsocketEvent:
ParamNodeChange empfangen



(b) WebsocketEvent:
ReqSendParamNodes empfangen

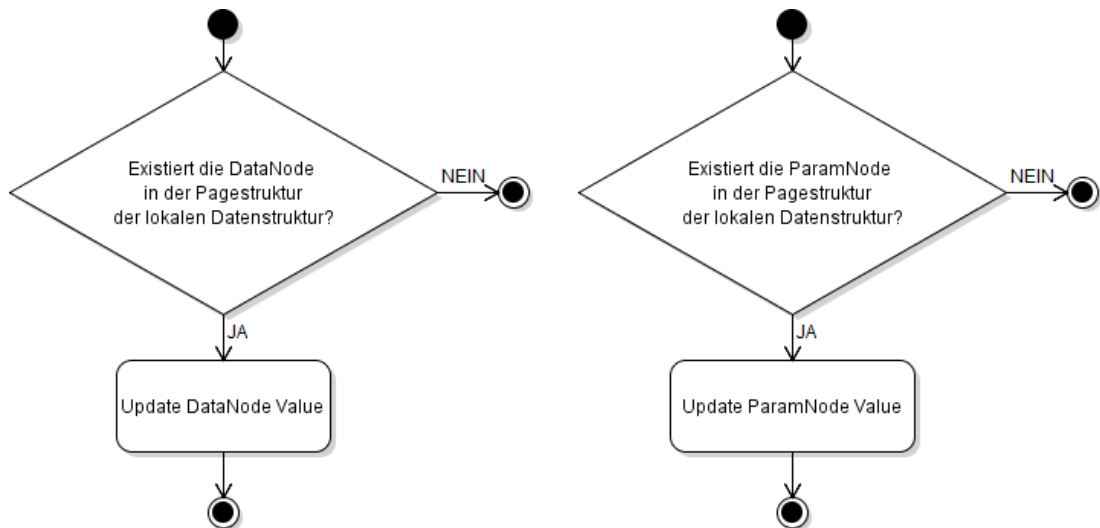


(c) WebsocketEvent:
ReqSendDataNodes empfangen



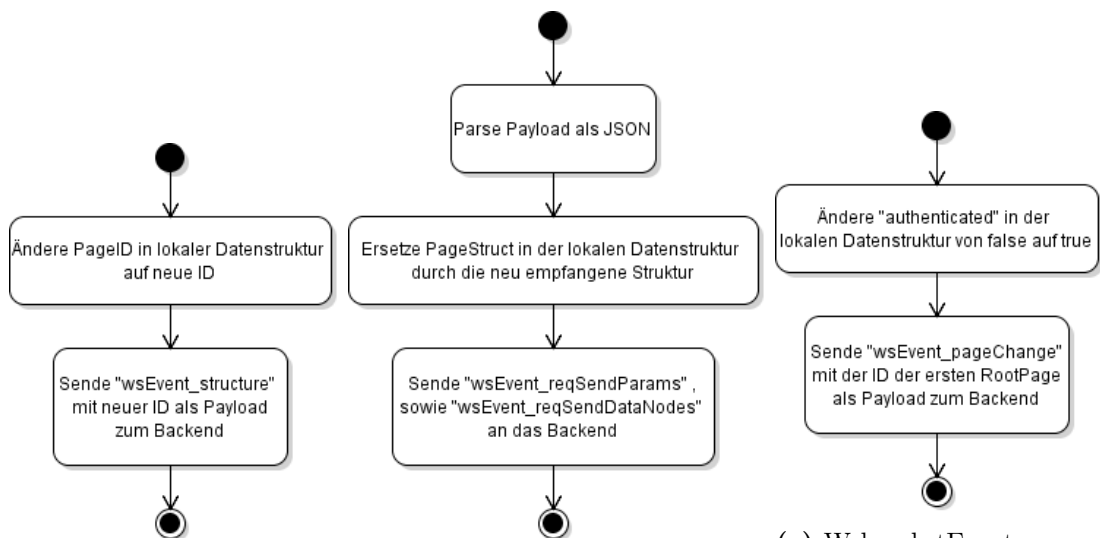
(d) WebsocketEvent:
PageChange empfangen

Abbildung 4.8: Aktivitätsdiagramme des Dispatchers im Backend II



(a) WebSocketEvent:
DataNodeChange empfangen

(b) WebSocketEvent:
ParamNodeChange empfangen



(c) WebSocketEvent:
PageChange empfangen

(d) WebSocketEvent:
Structure empfangen

(e) WebSocketEvent:
Authentication empfangen

Abbildung 4.9: Aktivitätsdiagramme des Dispatchers im Frontend

4.3 Datenstruktur

4.3.1 Backend

Das abgebildete Entity Relationship Diagram (ERD) in Abbildung 4.10, stellt die globale Datenstruktur der Datenbank auf dem SQL Server dar. Sie besteht aus einzelnen Tabellen deren Primärschlüssel, ausgenommen einzelner Hilfstabellen, immer eine ID ist. Zentrale Elemente sind dabei die GUI Elemente (Tabelle *GuiElements*). Jedes GUI Element ist einer Page (Tabelle *Pages*) zugeordnet. Eine Page kann wiederum einer anderen Page zugeordnet sein. Dies wird erreicht indem jeder Page-Datensatz eine ParentID enthält, welche als Fremdschlüssel auf die übergeordnete Page zeigt. So entsteht eine Baumstruktur innerhalb der Entitäten.

Jedes GUI Element hat n Parameter und m Data Nodes (mit $n, m \in \mathbb{N}_0$). Diese werden in den Tabellen *GuiElementParams* sowie *GuiElementDataNodes* verwaltet. Jede DataNode, beziehungsweise jeder Parameter, hat einen Datentyp, einen Namen, eine Beschreibung, sowie einen Wert. Bei den Parametern entspricht dies dem tatsächlichen aktuellen Wert, bei den DataNodes entspricht dies dem initialen Wert beim Starten des Backends. Die zuvor beschriebenen GUI Elemente besitzen außerdem einen Typ (verwaltet in der Tabelle *GuiElementTypes*). Jedem Typ sind nun n DataNodeTemplates (Tabelle *GuiElementDataNodeTemplates*) zugeordnet, aus denen die eigentlichen DataNodes beim Instanzieren erstellt werden. Da eine solche Vorlage für DataNodes auch für mehrere GUI Element Typen verwendet werden kann, ist die Verbindung eine $n : m$ Bindung. Dies ist in einer Datenbank nur durch eine Hilfstabelle, welche die Primärschlüssel zweier Tabellen miteinander verknüpft, erreichbar. Analog zu den DataNodes ist der gleiche Mechanismus für die Parameter vorgesehen.

Um ein sauberes Interface zu schaffen sind zum Instanzieren, sowie zum Löschen der GUI Elemente Stored Procedures vorgesehen. Die komplette Datenstruktur des SQL Servers ist so abgelegt, dass dieser alle relevanten Relationen kennt und entsprechend verwaltet. So werden beispielsweise beim Löschen eines GUI Elements alle zugehörigen DataNodes mitgelöscht und beim Löschen einer kompletten Page werden alle der Page zugeordneten GUI Elemente auch gelöscht (*on delete cascade*, Abbildung 3.2.1).

Der OPC UA Server hält alle DataNodes der GUI Elemente. Diese GUI Elemente werden entsprechen der Pages, denen sie zugeordnet sind, auf dem OPC UA Server abgelegt und sind den PLCs dort zugänglich. Ob eine DataNode von den PLCs nur gelesen oder auch beschrieben werden kann, wird durch das Flag *writePermission* auf dem SQL Server in der *DataNodeTemplate* Tabelle festgelegt. Beim Erstellen der DataNode auf dem OPC UA Server, wird dieses Flag ausgelesen und direkt in die Konfiguration des OPC UA Servers übernommen. Der native Datentyp, mit dem eine DataNode auf dem OPC UA Server abgelegt wird, wird den DataNodeTemplates des SQL Servers entnommen.

Auf dem SQL Server haben die DataNodes, sowie Parameter, immer den nativen SQL Datentyp *VARCHAR*, um ein Speicherfeld zu erhalten, das alle benutzten OPC UA Datentypen unterstützt. Beim Lesen, beziehungsweise beim Schreiben, wird der als String gespeicherte Wert auf dem SQL Server, entsprechend seines explizit abgespeicherten Datentyps, konvertiert. GuiElements und Pages haben als Datentyp auf dem OPC UA Server den Typ *BaseObjectType*. Auf eine Spezialisierung dieser Typdefinition für Pages und GUI Elements auf dem OPC UA Server wird absichtlich verzichtet, da sie nur zur Strukturierung der DataNodes auf dem OPC UA Server genutzt werden.

4.3.2 Frontend

Die Datenstruktur des Frontends wird in dem Vue.js Plugin *VueX* gespeichert. Diese Struktur ist in Abbildung 4.11 als Klassendiagramm dargestellt. Sie existiert nur einmal global im Frontend. Dabei macht *VueX* die Struktur, die im „*state*“ Objekt gespeichert ist, der restlichen Applikation verfügbar. Die angegebenen Datentypen im Diagramm geben nicht die nativen JavaScript Datentypen an, sondern die Typen, die im C++ Backend verwendet werden und als JavaScript Object Notation (JSON) an das Frontend übermittelt werden. Die real im Frontend verwendeten Datentypen sind weniger spezifisch, da JavaScript zum Beispiel alle Zahlen unter dem Typ „*Number*“ abspeichert und dabei keine Unterscheidung des Typs unterstützt.

Das „*state*“ Objekt enthält ein „*socket*“ Objekt, in dem die Daten der Websocket Verbindung gespeichert sind. Zusätzlich speichert es die „*pageID*“, die angibt welche Seite aktuell dargestellt wird, eine Variable „*authenticated*“, als Indikator ob die Websocket Verbindung bereits authentifiziert ist, sowie ein „*pageStruct*“ Objekt, das alle weiteren Daten zur aktuellen Seite beinhaltet. Wird noch keine programmierte Seite des SCADA Systems angezeigt, dann ist die Variable „*pageStruct*“ *null* und es ist keine „*pageStruct*“ vorhanden. Das ist im Diagramm durch die explizite Angabe der Multiplizität (1 : 0..1) bei der Komposition gekennzeichnet. Bei der Initialisierung des „*state*“ Objekts ist das „*pageStruct*“ Objekt immer *null*, bis es gemäß des Protokolls aus Abschnitt 4.2.3 als JSON empfangen wird.

Das „*pageStruct*“ Objekt wird aus den Daten des Backends gebildet, welche eine einzelne Seite des SCADA Systems betreffen. Es enthält die „*parentID*“ der übergeordneten Seite. Ist die dargestellte Seite die Einstiegsseite und hat damit keine übergeordnete Seite, so ist diese Variable *null*. Zusätzlich enthält sie ein Array mit Objekten, welche die wesentlichen Information zu den untergeordneten Seiten beinhalten. Diese Objekte wurden in dem Klassendiagramm als „*page*“ Klasse gekennzeichnet und beinhalten die ID der Seite („*id*“), den Titel („*title*“) sowie die Beschreibung („*description*“). Diese Informationen werden im Frontend benötigt, um eine Navigation durch die einzelnen Seiten des SCADA Systems zu ermöglichen. Die restlichen Attribute des „*pageStruct*“ Objekts stellen die Daten

der aktuell angezeigten Seite dar. Wie auch in der „*page*“ Klasse sind das die ID, der Titel und die Beschreibung.

Zusätzlich enthält das „*pageStruct*“ Objekt beliebig viele GuiElemente („*guiElements*“). Diese werden allerdings nicht als Array gespeichert, sondern als Objekt, indem jedes Attribut des Objekts ein „*guiElement*“ Objekt ist. Die Attributnamen sind dabei die IDs der GUI Elemente, sodass ein Zugriff auf ein einzelnes Element über deren ID möglich ist. Jedes „*guiElement*“ besteht aus einer ID („*id*“), einem Typ („*type*“), einem Namen („*name*“), einer Beschreibung („*description*“), sowie so vielen DataNodes und ParamNodes wie die Vorlage der Backend Datenstruktur (Abbildung 4.10), des entsprechenden „*GuiElementTypes*“, vorgibt. Die Nodes werden dabei in den zwei Attributen „*dataNodes*“ sowie „*paramNodes*“ als Objekt gespeichert. Die Attributnamen bilden dabei die Namen der Nodes, da diese pro „*guiElement*“ Objekt nur einmal vorhanden sind. Jedes „*node*“ Objekt hat, unabhängig ob es eine „*dataNode*“ oder eine „*paramNode*“ repräsentiert, immer eine ID („*id*“), einen Namen („*name*“), einen Typ („*type*“) als String, einen Wert („*value*“) sowie eine Beschreibung („*description*“). Ob eine Node eine „*DataNode*“ (Datenpunkte vom OPC UA Server) oder eine „*ParamNode*“ (auf SQL Server) ist, ist nur durch ihre Zugehörigkeit zu dem entsprechenden Objekt des Attributs „*dataNodes*“ oder „*paramNodes*“, im „*guiElement*“ Objekt, definiert. Der Typ einer Node ist immer der Typ, entsprechend der expliziten Angabe des Typs (Attribut „*type*“), eines einzelnen „*node*“ Objekts.

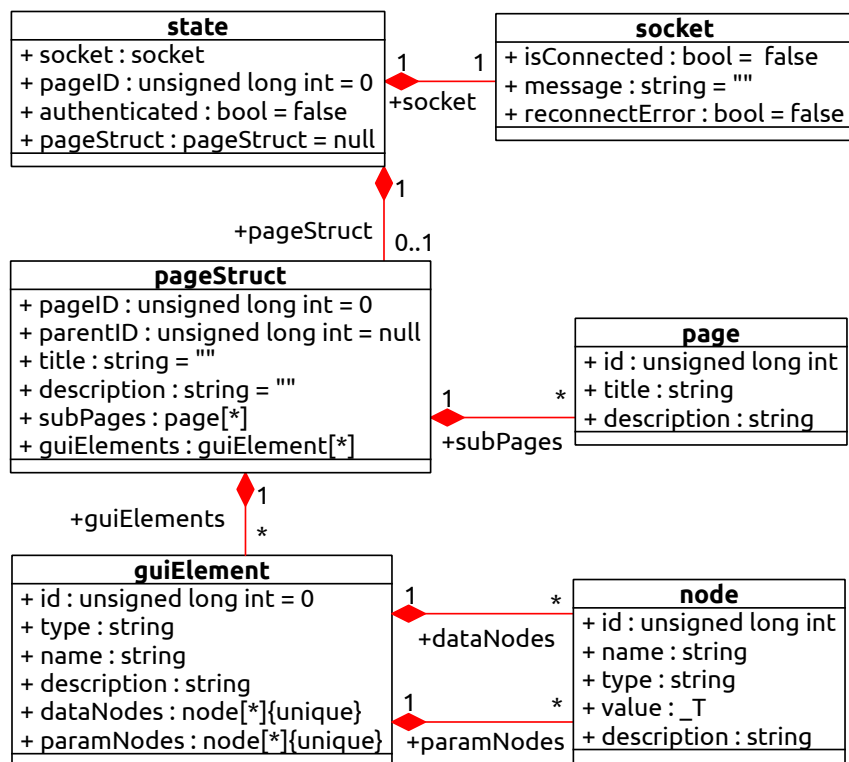


Abbildung 4.11: Frontend Datenstruktur

5 Proof of Concept

Ein PoC ist eine Möglichkeit um die Realisierbarkeit des Systementwurfs aus Kapitel 4 zu belegen. In diesem PoC wird sich auf die wesentliche Funktionalität eines SCADA Systems beschränkt. Dabei wird anhand der Architektur in Abschnitt 4.2 eine Webapplikation auf Basis von *Vue.js* als Frontend, sowie eine ausführbare Anwendung als Backend in C++ programmiert und anschließend zusammen mit einem Webserver und einem SQL Server in Abschnitt 5.3 getestet. Beim Backend sind in der Implementierung einige Besonderheiten vorhanden. Diese sind in dem folgenden Abschnitt 5.1 dokumentiert. Das Frontend ist, wie in der Architektur in Abschnitt 4.2.2 geplant, implementiert. Das Ergebnis ist in dem Abschnitt 5.2 dargestellt.

5.1 Backend

Das Klassendiagramm in Abbildung 5.1 stellt die Grundstruktur des Backends dar. Das Diagramm ist, bis auf die „*Backend*“ Klasse, nicht vollständig und auf die wesentlichen Operationen zur Kommunikation reduziert. Die „*Backend*“ Klasse (abgeleitete Klasse) erbt von den drei Basisklassen „*SqlClient*“, „*OpcuaServer*“ und „*WebsocketServer*“. Jede Basisklasse hat ihre eigene dedizierte Aufgabe die in den einzelnen jeweiligen, gleichnamigen Abschnitten genauer beschrieben ist. Die abgeleitete Klasse steht dabei als Vermittler dazwischen. Möchte eine der Basisklassen etwas ausführen, für das eine der anderen Klassen benötigt wird, so kann diese das anstoßen, indem sie eine virtuelle (genauer: „*pure virtual*“) Methode aufruft, die in der Basisklasse selbst nicht implementiert wird, sondern in der abgeleiteten „*Backend*“ Klasse. Dies ermöglicht es nun indirekt durch eine Basisklasse eine Methode einer anderen Basisklasse aufzurufen. Um zu garantieren, dass dies auch geschieht und nicht durch einen Tippfehler eine falsche Methode aufgerufen wird, ist die Methode in der Basisklasse mit „*= 0*“ definiert, was den Versuch der Dereferenzierung dieser Methode verhindert und mit einem Compilerfehler kennzeichnet. Diese Eigenschaft einer Methode ist im Klassendiagramm durch die kursive Schrift der Operation gekennzeichnet. In der abgeleiteten Klasse („*Backend*“) wird die dort reimplementierte Methode nun mit dem Schlüsselwort „*override*“ am Ende der Deklaration gekennzeichnet. Dies zwingt den Compiler zu überprüfen, ob die dort deklarierte Methode wirklich eine Methode der Basisklasse reimplementiert und nicht eine neue Methode ist. Zusätzlich zu den virtuellen Methoden, die in diesem Fall eine Kommunikation zu anderen Basisklassen,

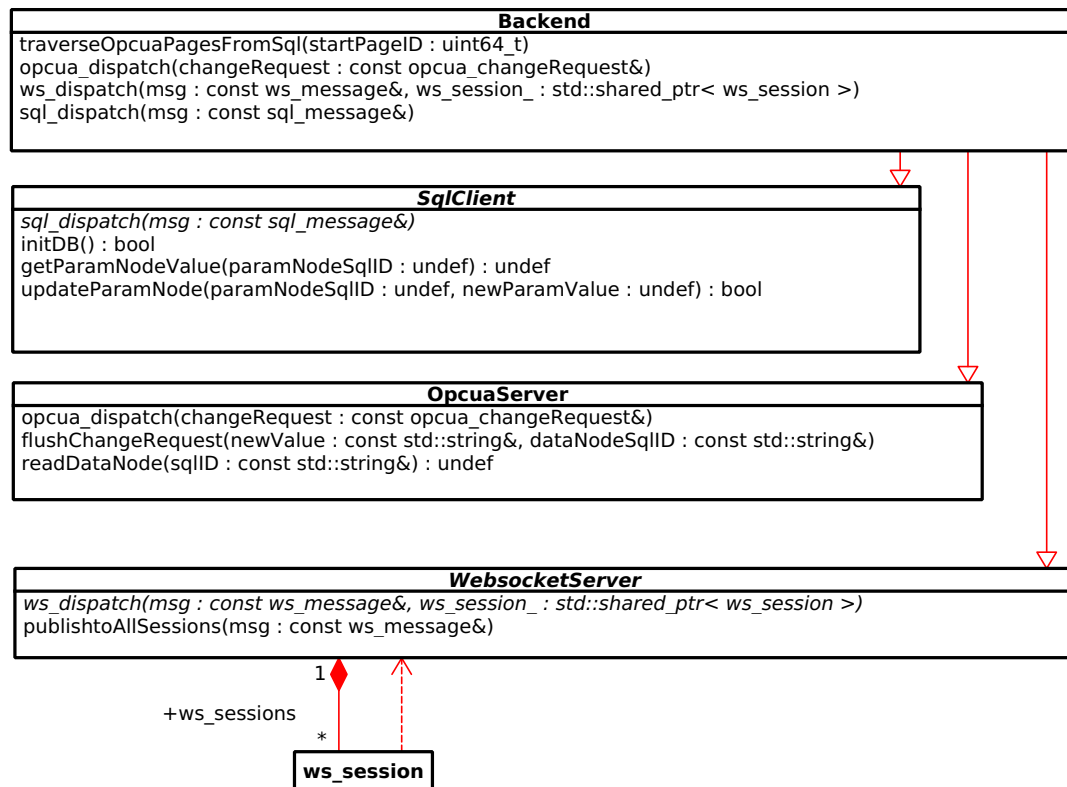


Abbildung 5.1: Klassendiagramm Überblick Backend

indirekt über die abgeleitete Klasse, ermöglichen, existieren noch eine Anzahl an Methoden, über die man mit der Klasse selbst interagieren kann. Die Methode „*traverseOpcuaPagesFromSql(startPageID)*“ erstellt alle notwendigen OPC UA Nodes, auf Basis der Datenstruktur, ab der angegebenen „*startPageID*“.

Eine Sonderrolle nehmen dabei die Operationen ein, die im Klassendiagramm von Abbildung 5.1, außer der bereits beschriebenen noch zusätzlich dargestellt sind. Sie ermöglichen die Änderung oder Abfrage von Daten der jeweiligen Klassen. Die einzelnen Basisklassen sind zusätzlich separat in den Abbildungen 5.2, 5.5 sowie 5.7 vollständig, mit allen Attributen und Operationen, dargestellt.

5.1.1 WebsocketServer

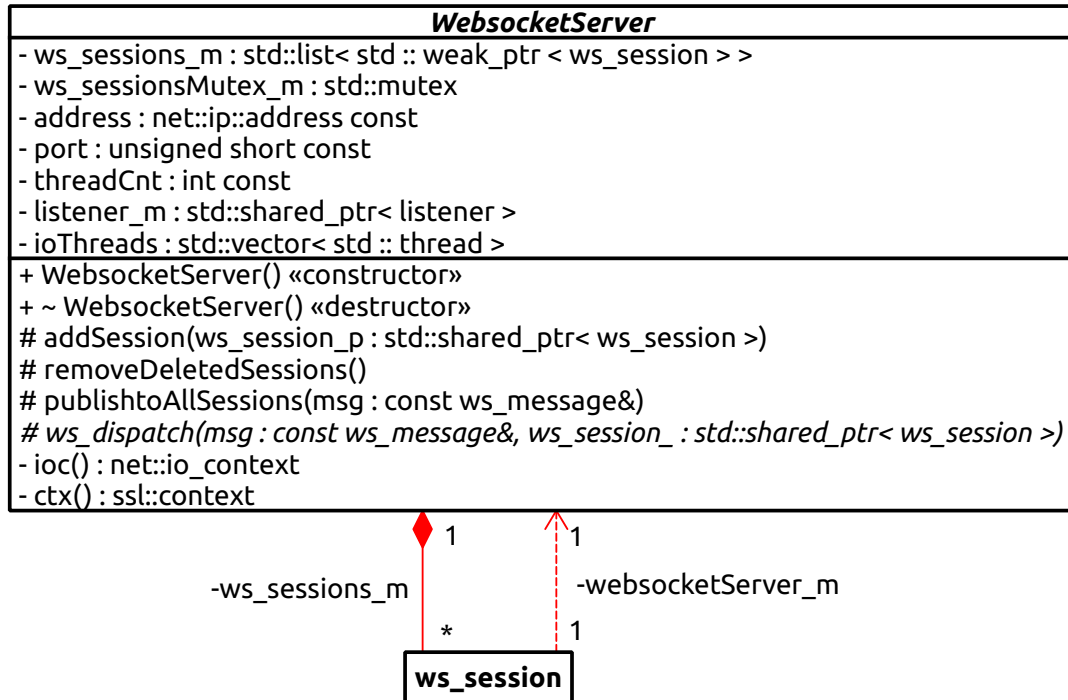


Abbildung 5.2: Klassendiagramm der Klasse „*WebsocketServer*“

Die Klasse „*WebsocketServer*“ (Abbildung 5.2) verwaltet die offenen Websocket Sessions (Objekte der Klasse „*ws_session*“). Sie bedient sich dabei der bekannten C++ Bibliothek „*Boost.Beast*“ [5]. Websocket Sessions sind die einzelnen Verbindungen zwischen Backend und Frontend. Das Aufbauen von Verbindungen ist den Beispielen von Vinnie Falco zur „*Boost.Beast*“ Bibliothek entnommen [6]. Die „*WebsocketServer*“ Klasse speichert dabei, pro aktiver Websocket Session, einen Pointer des zugehörigen „*ws_session*“ Objekts in einer Liste. Diese Liste existiert als das Attribut „*ws_sessions_m*“ in der Klasse „*WebsocketServer*“ und ist zusätzlich durch ein Mutex geschützt. Diese Mutex kann man sich vorstellen wie ein Schloss, das immer zuerst gesperrt werden muss, bevor die Session Liste verfügbar ist (Aufruf von „*std::mutex::lock()*“). Ist das Mutex von einem Thread gesperrt, so kann ein anderer Thread es solange nicht sperren wie es noch gesperrt ist. Damit wird der zeitgleiche Zugriff von mehreren Threads auf eine Datenstruktur verhindert (Race Conditions werden verhindert). Wäre das nicht der Fall könnte es beispielsweise passieren dass ein Element gleichzeitig gelöscht wird, während ein anderer Thread lesend auf das Element zugreift. Solche Race Conditions bedarfen keiner echten Simultanität (mehrere Prozessorkerne die auf den selben Speicherbereich zugreifen), sie können auch durch das Scheduling des Betriebssystems entstehen. Ist ein Thread nun mit der Ar-

beit an der geschützten Ressource fertig, gibt er sie wieder frei indem er die Methode „`std::mutex::unlock()`“ aufruft. Das scheint der einfachste Weg zu sein, aber nicht der sicherste. Wenn im Code zwischen „`lock()`“ und „`unlock()`“ eine Exception eintritt, wird zwar die Ressource danach nicht mehr benötigt, es wird aber auch nicht „`unlock()`“ aufgerufen. Man spricht in diesem Fall von einem *Deadlock*, da das Mutex von einem Thread gesperrt wurde und nie wieder entsperrt wird. Das führt dazu, dass alle anderen Threads, die die Ressource benötigen, endlos auf deren Freigabe warten. Um das zu verhindern bietet die Standard Template Library (STL) eine „*lock_guard*“ Klasse, die bei ihrer Zerstörung das Mutex selbständig wieder frei gibt. Diese Vorgehensweise sieht man in Quellcodeauszug 1, wenn der „*lock_guard*“ in Zeile 354 nicht mehr im Scope ist, wird automatisch „`unlock()`“ aufgerufen. Bei jeder neuen Websocket Ver-

```

348 void WebSocketServer::addSession(std::shared_ptr<ws_session>
    ↪ ws_session_p)
349 {
350     ws_sessionsMutex_m.lock();
351     std::lock_guard<std::mutex> lg(ws_sessionsMutex_m,
    ↪ std::adopt_lock);
352     std::weak_ptr<ws_session> wp = ws_session_p;
353     ws_sessions_m.push_back(wp);
354 }

```

Quellcodeauszug 1: Methode „*addSession*“ der WebSocket Server Klasse

bindung wird ein neues „*ws_session*“ Objekt (Klassendiagramm Abbildung 5.3) instanziiert und bekommt dabei einen Pointer auf das „*WebSocketServer*“ Objekt. Dies ermöglicht dem „*ws_session*“ Objekt sich bei dem „*WebSocketServer*“ Objekt anzumelden. Zusätzlich speichert das „*ws_session*“ Objekt den Pointer unter dem Attribut „*websocketServer_m*“ ab. Dies ermöglicht es beim Empfang eines kodierten Strings durch das „*ws_session*“ Objekt, ein „*ws_message*“ Objekt aus dem String zu konstruieren und die virtuelle Methode „*ws_dispatch*“ der „*WebSocketServer*“ Klasse aufzurufen, welche in der „*Backend*“ Klasse reimplementiert wird. Dort wird das „*ws_message*“ Objekt dann entsprechend seines Events interpretiert und der entsprechende Handler (beschrieben in Abschnitt 4.2.3, implementiert in der Methode „*ws_dispatch*“) ausgeführt. Daten, die in die andere Richtung fließen, werden entweder direkt aus der Dispatcher Methode des Backends in eine einzelne Session geschickt (Aufruf der Methode „*send*“ des „*ws_session*“ Objekts), oder über die Methode „*publishToAllSessions*“ der „*WebSocketServer*“ Klasse. Dabei ist eine Art Publish/Subscribe Mechanismus implementiert, bei dem Änderungen die DataNodes oder ParamNodes betreffen nur dann über die jeweilige Websocket Session an das Frontend gesendet werden, wenn eine entsprechende Seite dargestellt ist, welche die Nodes auch

| ws_session |
|--|
| - ws_ : websocket::stream< beast::ssl_stream< beast::tcp_stream > > - buffer_in : beast::flat_buffer - outQueueMaxSize : const size_t - actualPageID : uint64_t - authenticated_m : bool - outQueue : std::queue< std::shared_ptr< ws_message > > - dnSubscriptions : std::set< std::string > - pnSubscriptions : std::set< std::string > - websocketServer_m : WebSocketServer* |
| + ws_session(: tcp::socket) «constructor» + ~ws_session() «destructor» + run() + on_handshake(ec : beast::error_code) + on_accept(ec : beast::error_code) + after_read(ec : beast::error_code, bytes_transferred : size_t) + on_write(ec : beast::error_code, bytes_transferred : size_t) + on_send(msg : std::shared_ptr< ws_message >, filterEn : bool) + send(msg : std::shared_ptr< ws_message > &) + sendFiltered(msg : std::shared_ptr< ws_message > &) + checkDataNodeSubscription(sqlId : const std::string&) : bool + checkParamNodeSubscription(sqlId : const std::string&) : bool + setAuthenticated() + setSubscriptions(dnSubscriptions : const std::set< std::string > &, pnSubscriptions : const std::set< std::string > &) + setPage(newPageID : const uint64_t&) - asyncReading() - dispatch(msg : const ws_message&, ws_session_ : std::shared_ptr< ws_session >) |

Abbildung 5.3: Klassendiagramm der Klasse „ws_session“

verwendet. Bei der Kommunikation mit dem Frontend werden, entsprechend des

| ws_message |
|---|
| + event : wsEvent + payload : std::vector< std::string > |
| + ws_message(msg : const ws_message&) «constructor» + ws_message(str : const std::string&) «constructor» + ws_message(event_ : const wsEvent&, payload_ : const std::vector< std::string > &) «constructor» + ws_message(event_ : const wsEvent&) «constructor» + ws_message(event_ : const wsEvent&, singlePayload : const std::string&) «constructor» + ws_message(event_ : const wsEvent&, firstPayload : const std::string&, secondPayload : const std::string&) «constructor» + ws_message() «constructor» + to_Str(out : std::string&) + to_Str() : undef |

Abbildung 5.4: Klassendiagramm der Klasse „ws_message“

Abschnitts 4.2.3, Strings ausgetauscht. Diese Strings werden beim Empfang in einem „ws_message“ Objekt (Klassendiagramm in Abbildung 5.4) gespeichert und zum Dispatcher transportiert. Dort kann dann auf die einzelnen Komponenten der Nachricht (Event und Payloadvektor) einzeln zugegriffen werden. Außerdem ermöglicht die Klasse durch die Methode „to_Str“ es ihren Inhalt wieder als String, zum Transport an das Frontend, zu kodieren. Um den Code bei der Verwendung des „ws_message“ Objekts so kurz wie möglich zu halten, stehen zum Konstruieren eine Vielzahl von Konstruktoren zur Verfügung.

5.1.2 SqlClient

Die „*SqlClient*“ Klasse verwaltet die Verbindung zum SQL Server. Auf dem SQL Server sind alle Daten gespeichert, die persistiert werden müssen. Das Klassendiagramm der „*SqlClient*“ Klasse ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Klasse bedient sich dabei der offiziellen Bibliothek „*MariaDB Connector/C API*“ der OpenSource Datenbank-Engine MariaDB [7]. Die Datenstruktur des Servers

| <i>SqlClient</i> |
|---|
| <pre> - mysqlhandle_m : MYSQL* - credentials_m : SqlCredentials - mutex_m : std::mutex - connected_m : bool + SqlClient(credentials : const SqlCredentials&) «constructor» + SqlClient() «constructor» + ~ SqlClient() «destructor» # connected() : bool # initDB() : bool # getParamNodeValue(paramNodeSqlID : undef) : undef # updateParamNode(paramNodeSqlID : undef, newParamValue : undef) : bool # validateCredentials(userName : undef, pw : undef) : bool # pageExists(pageID : undef) : bool # getDataNodeIDs(outDnIds : std::set< std::string >&, pageID : undef) # getParamNodeIDs(outPnIds : std::set< std::string >&, pageID : undef) # sql_dispatch(msg : const sql_message&) # getStructureOfPage(pageID : undef, outDom : rj::Document&) # entryExists(tableName : const std::string&, keyColName : const std::string&, keyVal : const std::string&) : bool # getAllRowsOfTable(tableName : const std::string&, dom_o : rj::Document&) : bool # createInstanceOfGuiElement(type : const std::string&, pageSqlID : uint64_t, name : const std::string&) : bool # getParams(guiElementID : uint64_t) : MYSQL_RES* # getDataNodes(guiElementID : uint64_t) : MYSQL_RES* # getGuiElements(pageID : uint64_t) : MYSQL_RES* # getPages(pageID : uint64_t) : MYSQL_RES* # getParams(guiElementID : const std::string&) : MYSQL_RES* # getDataNodes(guiElementID : const std::string&) : MYSQL_RES* # getGuiElements(pageID : const std::string&) : MYSQL_RES* # getPages(pageID : const std::string&) : MYSQL_RES* # iterateThroughMYSQL_RES(resultSet : MYSQL_RES*, std::function) : bool # sendCommand(sendstring : std::string&, maxReconnectCnt : int) : MYSQL_RES* # sendCUD(sendstring : const std::string&) : bool # sendCUDAlreadyLocked(sendstring : const std::string&) : bool # executeScript(scriptName : const std::string&) : bool # mysqlResToDom(resultset : MYSQL_RES*, keyColNumber : unsigned int, dom_o : rj::Document&) : bool - prepareScript(src : const std::list< std::string >&, dest : std::list< std::string >&) - printSqlError(ErrCode : int, query : const std::string&) - escapeString(str : std::string&) - sendCommandAlreadyLocked(sendstring : std::string&, maxReconnectCnt : int) : MYSQL_RES*</pre> |

Abbildung 5.5: Klassendiagramm der Klasse „*SqlClient*“

ist in Abschnitt 4.3.1 beschrieben und dort in Abbildung 4.10 dargestellt. Diese Struktur ist auf dem SQL Server vorhanden und wird durch das Skript in Quellcodeauszug 2 auf dem externe Server konstruiert. Die „*SqlClient*“ Klasse kann mit der Methode „*executeScript*“ ein SQL Skript als Datei ausführen, indem sie es in einzelne Querys zerteilt und diese dann einzeln an den Server sendet. Das Zerteilen eines Skript und das Vorbereiten zur Ausführung ist in der Methode „*prepareScript*“ implementiert. Beim Testen der Methode hat sich herausgestellt, dass diese Funktionalität der „*sql*“ Client Klasse Skripte auszuführen,

schwieriger zu implementieren ist als anfangs vermutet. Dies liegt daran, dass das Definieren von *stored Procedures* (siehe Abschnitt 3.2.3) es nötig macht das Semikolon als Trennzeichen zu ändern, da in einem Query der Quellcode vorhanden ist, der selbst aus mehreren Querys besteht, die mit einem Semikolon getrennt sind. Ist ein Skript vorbereitet, so können die einzelnen Querys des Skripts durch den Aufruf der Methode „*sendCUD*“ auf dem Server ausgeführt werden. Die Methode „*sendCUD*“ bedient sich dabei der Methode „*sendCommand*“, die die Query an den Server weiterleitet. Da die Verbindung zum SQL Server eine geteilte Ressource ist, ist der Zugriff darauf durch „*sendCommand*“ durch ein Mutex geschützt, sodass immer nur ein Thread gleichzeitig ein Query senden kann. Die Klasse „*SqlClient*“ bietet viele Methoden um die Daten in der Datenbank abzufragen oder zu verändern. Um Daten abzufragen werden meistens Querys ausgeführt, die mit „*Select*“ beginnen. Allerdings sind ein paar komplizierte Querys in *stored Procedures* auf dem Server ausgelagert. Die Prozeduren werden durch das Skript „*createProcedures*“ (siehe Anhang Quellcodeauszug 3) erzeugt. Um ein GUI Element zu instanzieren, sind eine Menge an Operationen notwendig. Diese Operationen sind auch als Prozeduren implementiert und werden durch eine einfache „*Call*“ Query aufgerufen. Immer wenn der Wert einer *ParamNode* auf dem SQL Server durch Aufruf der Methode „*updateParamNode*“ geändert wird, werden alle verbundenen „*ws_session*“ Objekte darüber informiert. Diese Funktionalität ist implementiert, indem in der „*updateParamNode*“ Methode zuerst geprüft wird, ob die Änderung tatsächlich eine Änderung darstellt, oder ob der Wert bereits dem neuen Wert entspricht. Ist das der Fall, wird versucht den Wert auf dem SQL Server zu ändern. War die Änderung erfolgreich, wird ein „*sql_message*“ Objekt (siehe Klassendiagramm in Abbildung 5.6) erstellt und der Methode „*sql_dispatch*“ der Klasse „*SqlClient*“ übergeben. Die Datenstruktur des

| sql_message |
|--|
| + event_m : sqlEvent |
| + payload_m : std::vector< std::string > |
| + sql_message(event : sqlEvent, singlePayload : const std::string&) «constructor» |
| + sql_message(event : sqlEvent, firstPayload : const std::string&, secondPayload : const std::string&) «constructor» |
| + sql_message(event : sqlEvent, payloadVec : const std::vector< std::string >&) «constructor» |
| + sql_message(otherMsg : const sql_message&) «constructor» |

Abbildung 5.6: Klassendiagramm der Klasse „*sql_message*“

„*sql_message*“ Objekts ist dabei ähnlich aufgebaut wie die des „*ws_message*“ Objekts. Es besitzt ein Event und ein Payloadvektor. Die Methode „*sql_dispatch*“ ist in der Klasse „*Backend*“ reimplementiert und reagiert auf das „*sql_message*“ Objekt je nach Event. In diesem Fall ist das Event „*paramNodeChange*“. Hier wird der Payloadvektor so interpretiert, dass das erste Element die NodeID ist und das zweite der neue Wert. Diese Information wird dann schließlich als „*ws_message*“ kodiert und die Methode „*publishToAllSessions*“ der „*WebsocketServer*“ Klasse aufgerufen, welche diese Information dann an alle Sessions weiterleitet. In jeder Methode, in der Daten der Websocket Schnittstelle in Querys verwendet werden,

können diese nicht als „`const std::String &`“ übergeben werden, da diese durch die Methode „*escapeString*“ verändert werden um eine *SQL-Injection* vorzubeugen. Diese Methode bedient sich dazu einer entsprechenden Funktion der verwendeten Bibliothek. Würde die Referenz auf den String als „`const`“ übergeben werden, könnte die Methode den String nicht verändern.

5.1.3 OpcuaServer

Die Klasse „*OpcuaServer*“ (Abbildung 5.7) implementiert einen OPC UA Server, um die *DataNodes* des SCADA Systems einer Menge an PLCs zugänglich zu machen. Sie bedient sich dabei der C Bibliothek „*open62541*“ [12]. Der Entscheidung, diese Bibliothek zu verwenden, liegt die sehr gute Dokumentation der Bibliothek zugrunde. Das Datenmodell des OPC UA Servers beinhaltet

| OpcuaServer |
|--|
| <pre> - server_m : UA_Server* - changeRequestWorkerClock_m : util::Clock* - changeRequests_m : std::list< opcua_changeRequest > - changeRequestMutex_m : std::mutex - serverFktMutex_m : std::mutex - running_m : volatile bool - changeRequestsMaxCnt : const size_t - changeRequestWorkerTimebase : const int64_t - basicTypeMappingReverse : std::map< int8_t, std::string > + OpcuaServer() «constructor» + ~ OpcuaServer() «destructor» # opcua_dispatch(changeRequest : const opcua_changeRequest&) # flushChangeRequest(newValue : const std::string&, type : const std::string&, dataNodeSqlID : uint64_t) # flushChangeRequest(newValue : const std::string&, dataNodeSqlID : uint64_t) # flushChangeRequest(newValue : const std::string&, dataNodeSqlID : const std::string&) # createDataNode(typeStr : const std::string&, initValue : const std::string&, description : const std::string&, name : const std::string&, parentGuiElement : const std::string&) # createGuiElementNode(name : const std::string&, type : const std::string&, description : const std::string&, parentPageSqlID : uint64_t, newGuiElement : const std::string&) # createPageNode(title : const std::string&, description : const std::string&, parentPageSqlID : uint64_t, newPageSqlID : uint64_t) # createDataNode(dataNodeRow : const MYSQL_ROW&) # createGuiElementNode(guiElementDataRow : const MYSQL_ROW&) # createPageNode(pageDataRow : const MYSQL_ROW&) # removeNode(type : const IdType&, sqlID : uint64_t) # readDataNode(sqlID : uint64_t) : undef # readDataNode(sqlID : const std::string&) : undef # start() : bool # stop() : bool # getState() : bool # plotValue(variant : const UA_Variant&, type : int8_t) : undef # NodeIdToSqlId(str : std::string&) - ServerFkt() : UA_StatusCode - ChangeRequestWorker() - performChangeRequest(changeRequest : const opcua_changeRequest&) - parseValue(outVariant : UA_Variant&, valueString : const std::string&, type : int8_t) : bool - parseValue(outVariant : UA_Variant&, valueString : const std::string&, typeString : const std::string&) : bool - parseType(outType : int8_t&, typeString : const std::string&) : bool - plotType(type : int8_t) : undef - to_string(uaString : const UA_String&) : undef - generateNodeId(prefix : std::string&, sqlID : uint64_t) - generateNodeId(type : const IdType&, sqlID : uint64_t) : UA_NodeId - generateNodeId(outNodeId : UA_NodeId&, type : const IdType&, sqlID : uint64_t) - createVariable(attributes : const UA_VariableAttributes&, newNodeId : const UA_NodeId&, parentNodeId : const UA_NodeId&) - createObject(attributes : const UA_ObjectAttributes&, newNodeId : const UA_NodeId&, parentNodeId : const UA_NodeId&) - flushChangeRequest(changeRequest : const opcua_changeRequest&) - flushChangeRequest(newValue : const std::string&, type : int8_t, dataNodeSqlID : uint64_t) - dataChangeDispatcher(nodeId : const UA_NodeId&, data : const UA_DataValue&) - staticDataChangeDispatcher(server : UA_Server*, sessionId : const UA_NodeId*, sessionContext : void*, nodeId : const UA_NodeId*, nodeContext : void*) - basicTypeMapping() : std::map< std::string, int8_t > - customNodeDestructor(server : UA_Server*, sessionId : const UA_NodeId*, sessionContext : void*, nodeId : const UA_NodeId*, nodeContext : void*) </pre> |

Abbildung 5.7: Klassendiagramm der Klasse „*OpcuaServer*“

tet nur die eingebauten Datentypen, also nur primitive Typen (Bool, String, Int ...) und den Typ *Object*. Auf die Erstellung eines Datenmodells für jeden *GuiElement* Typ wurde verzichtet, da diese an dieser Stelle nur zur Strukturierung der *DataNodes* verwendet werden. Die Datenstruktur, die den PLCs zur Verfügung gestellt wird, enthält eine *Page*, die wiederum eine *Page* enthalten kann oder ein oder mehrere *GuiElements*. Jedes *GuiElement* hat *DataNodes* deren Typ, entsprechend der Vorlage des *GuiElement* Typs, in der SQL Datenbank festgelegt ist. Die Übersetzung der Typen ist dabei durch das Attribut „*basicTypeMapping*“ definiert, das die in der Datenbank gespeicher-

ten Typ Strings auf die eingebauten OPC UA Datentypen mappt. Die Umkehrung des Mappings ist in dem Attribut „*basicTypeMappingReverse*“ gespeichert. Die Klasse „*OpcuaServer*“ stellt den anderen Klassen des Backends Methoden zur Verfügung, um *DataNodes*, *GuiElements* und *Pages* auf dem *OpcuaServer* zu erstellen. Die Methode „*readDataNode*“ ermöglicht das Auslesen einer einzelnen *DataNode*. Sie wird verwendet, wenn eine Seite im Frontend neu geladen wird und noch keine Daten vorhanden sind. Daten können entweder über die OPC UA Schnittstelle geändert werden, oder durch eine Anforderung des Backends selbst. Muss der Wert einer *DataNode* geändert werden, so muss ein „*opcua_changeRequest*“ Objekt erstellt werden (siehe Klassendiagramm in Abbildung 5.8), das die „*nodeID*“ und den neuen Wert der *DataNode* beinhaltet. Dieses Objekt wird anschließend an die Methode „*flushChangeRequest*“ übergeben. Das „*OpcuaServer*“ Objekt hat drei Threads. Ein Thread der ex-

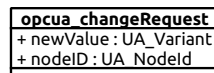


Abbildung 5.8: Klassendiagramm der Klasse „*opcua_changeRequest*“

klusiv dem nativen Server der *opne62541* Bibliothek zugeordnet ist und zwei Threads, mit denen zyklisch geprüft wird, ob „*opcua_changeRequest*“ Objekte in der Warteschlange (Attribut „*changeRequests_m*“) vorhanden sind. Sind in der Warteschlange „*opcua_changeRequest*“ Objekte vorhanden, wird jedes Element an die Methode „*performChangeRequest*“ übergeben und aus der Warteschlange entfernt. In der Methode „*performChangeRequest*“ wird dann die Änderung an der Datenstruktur durchgeführt. Bei der Erstellung jeder *DataNode* wird ein Handler angemeldet, der bei jedem Schreibvorgang auf die Node aufgerufen wird. Dieser Handler ist als die Methode „*dataChangeDispatcher*“ implementiert. In diesem Handler wird verglichen, ob der Schreibvorgang eine Änderung des Werts darstellt. Ist das der Fall, wird die Methode „*opcua_dispatch*“ mit einem „*opcua_changeRequest*“ aufgerufen, der die *NodeID* sowie den neuen Wert der *DataNode* enthält. Diese Methode wird schließlich in der „*Backend*“ Klasse reimplementiert und leitet die Änderung an die „*WebsocketServer*“ Klasse weiter.

5.2 Frontend

Das Frontend ist über einen beliebigen Browser mit Websocket Unterstützung aufrufbar. In Abbildung 5.9 sieht man die Startseite des Frontends.

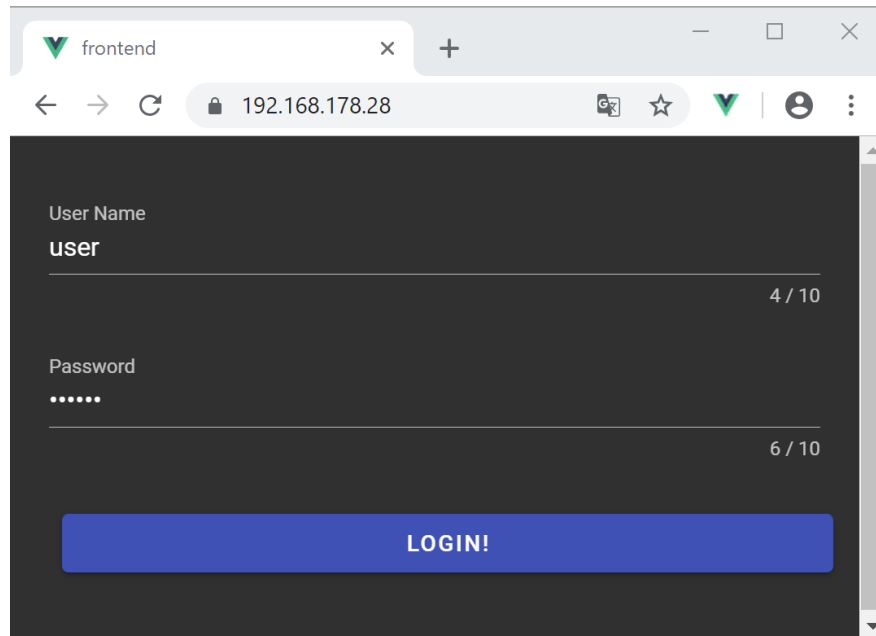


Abbildung 5.9: Screenshot der Login Seite im Browser

Diese Seite ermöglicht die Authentifizierung ohne die eine weitere Interaktion mit dem Backend nicht möglich ist. Hat man sich durch Eingabe, einem gültigen Passworts mit dem zugehörigen Benutzernamen, authentifiziert, so wird die erste Seite („ID = 1“) des SCADA Systems angezeigt. In Abbildung 5.10 ist diese Seite abgebildet. Zur Veranschaulichung ist die Seite mit drei GUI Elementen gefüllt.

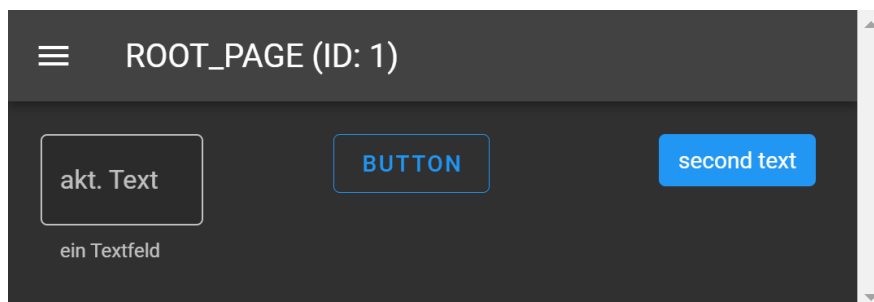


Abbildung 5.10: Screenshot einer Beispielseite

Die Datenstruktur, die dieser Seite zu Grunde liegt ist in Quellcodeauszug 4 im Anhang dargestellt. Diese sind ein Textfelds (links), ein Button (mittig), sowie

ein Label (rechts). Das Textfeld hat die in Abbildung 5.11 dargestellten Darstellungsformen. Da die Architektur in Abschnitt 4.2.2 es verbietet Ist- und Sollzu-

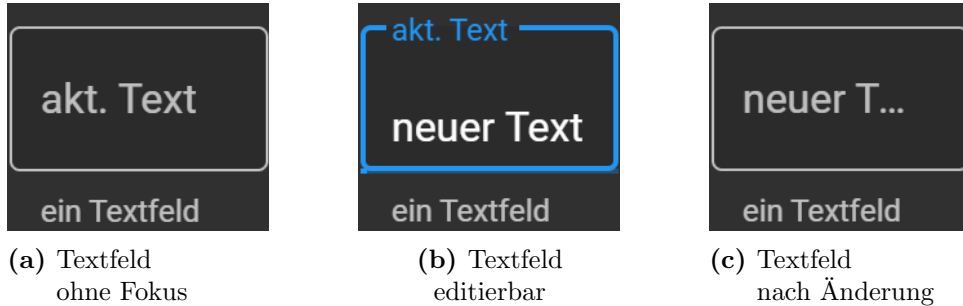


Abbildung 5.11: Screenshot eines Textfelds in drei verschiedenen Zuständen

stand in der selben Variablen zu speichern, sind diese Werte auch im Textfeld getrennt. Wenn es nicht angeklickt wird, hat es nicht den Fokus und zeigt seinen aktuellen Wert an. Diese Darstellung ist in Abbildung 5.11a zu sehen. unter dem Textfeld wird der Name des Felds angezeigt. Wird das Textfeld angeklickt, ist es wie in Abbildung 5.11b abgebildet, dargestellt. In diesem Zustand erlaubt es eine Eingabe durch den Nutzer. Der aktuelle Wert wird dann im Rahmen angezeigt. Wenn das Textfeld abgewählt wird und damit den Fokus verliert, wird die Eingabe verworfen und es zeigt wieder den alten Wert an. Wird die Eingabe mit „Enter“ bestätigt wird der neue Wert an das Backend gesendet. Das Textfeld zeigt diesen allerdings erst nach Bestätigung der Änderung durch das Backend an. In Abbildung 5.11c sieht man den in Abbildung 5.11b eingegebenen neuen Wert „neuer Text“ in der gleichen Darstellungsform wie in Abbildung 5.11a dargestellt. Da der Text länger ist wie das Textfeld, wird dieser mit „...“ abgekürzt. Das GUI Element „Button“ hat die in Abbildung 5.12 abgebildeten zwei Darstellungsformen. Diese werden entsprechend der *DOMNode* *buttonState* ausgewählt.



Abbildung 5.12: Screenshot eines Buttons in zwei verschiedenen Zuständen

Durch das Klicken des Buttons wird der Wert der *DOMNode* in ihren komplementären Wert geändert. Der auf dem Button angezeigte Text, ist in einer *ParamNode* gespeichert. Die Farbe des Buttons ist gemultiplext. In einer *ParamNode* ist ein JSON Array gespeichert, das die einzelnen Farben enthält. Diese können dann mit der „colorSelector“ *DOMNode* ausgewählt werden.

Das dritte GUI Element auf der Beispielseite in Abbildung 5.10 ist ein einfaches

Label. Der Text des Labels ist gemultiplext.

Dieser Mechanismus ist analog zu der Farbe eines Buttons implementiert.

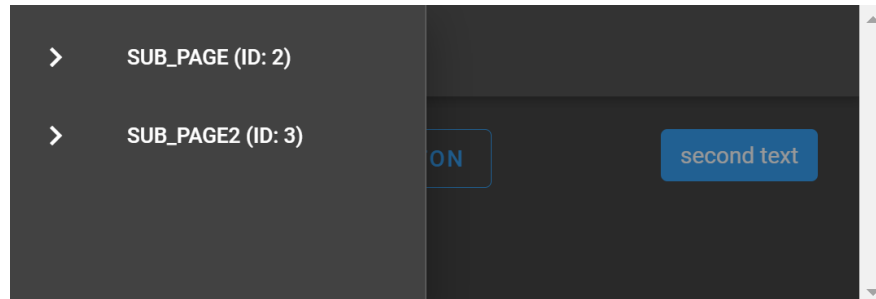


Abbildung 5.13: Screenshot einer Beispielseite mit ausgeklappter Navigation

Um die Seite zu wechseln, kann man sich durch das Aufrufen der Navigationsleiste links, durch die Baumstruktur des SCADA Systems navigieren. Diese Leiste ist in Abbildung 5.13 dargestellt und wird durch den Button oben links in Abbildung 5.10 eingeblendet. Um die Navigation wieder auszublenden, muss in die Seite geklickt werden.

5.3 Test des PoCs

5.3.1 Testaufbau

Das Backend des PoCs ist auf einem Computer mit dem Linux-basierten Betriebssystem Ubuntu installiert. Die statischen Dokumente (JS, HTML und CSS) werden von einem *Apache HTTP Server* [8] ausgeliefert. Die Datenbank ist eine MariaDB Datenbank. Der Zugriff auf das SCADA System erfolgt über einen zweiten Computer. Verschlüsselt wird die Verbindung zwischen Frontend und Backend durch ein selbst ausgestelltes und selbstsigniertes Zertifikat. Das Frontend wird durch den Browser „*Chrome*“ in der Version 77.0.3865.120 von *Google* ausgeführt und angezeigt. Die OPC UA Schnittstelle wird zu Testzwecken mit der Software „*UaExpert*“, in der Version 1.5.1 331 der *Unified Automation*, angesprochen. Das Netzwerk besteht aus dem einen Computer mit dem Backend (IP Adresse: 192.168.178.70), sowie einem weiteren Computer mit Windows 7 (IP Adresse: 192.168.178.160). Auf dem Windows Computer wird die Software „*UaExpert*“ sowie „*Chrome*“ ausgeführt. Beide Rechner sind in einem 1Gbit Ethernet Netzwerk durch ein Switch verbunden.

5.3.2 Test der OPC UA Schnittstelle

Um die OPC UA Schnittstelle des SCADA Systems zu testen, wird in der Software „*UaExpert*“ der Text eines Buttons geändert und die Änderung auf dem geöffneten Frontend, in „*Chrome*“, verfolgt. Anschließend wird der Button betätigt und es wird in der Software „*UaExpert*“ überprüft ob sich der zugehörige Wert des Buttons ändert. Beide Tests waren erfolgreich, der Button ändert wie erwartet seinen Text auf den neuen Wert und die *DataNode* ändert ihren Wert von *true* auf *false*. Da die OPC UA Schnittstelle durch die Bibliothek „*open62541*“ implementiert ist und diese bereits durch die *OPC Foundation* zertifiziert wurde [11], wird deren Verhalten hier nicht weiter untersucht.

5.3.3 Test der Echtzeitfähigkeit

Um die Echtzeitfähigkeit zu belegen, wird die Schnittstelle zum Frontend mit einem Skript getestet. Dieses Skript ist im Anhang unter Quellcodeauszug 5 zu finden.

Es baut eine WSS Verbindung zum Backend auf und ändert so schnell wie möglich die *DataNode* mit der „*ID = 1*“. Es wird also ein Automat etabliert der immer den Wert *true* zu *false* und *false* zu *true* ändert. Die Zeiten, wann eine Änderungsanforderung abgeschickt wird sowie wann die Bestätigung der Änderung im Client eintrifft, werden im Browser als Comma Separated Values (CSV) formatiert ausgegeben. Das Skript wird nach Ablauf einer vorgegeben Zeit gestoppt. Dies wird durch die Variablen in den Zeilen neun bis zwölf konfi-

guriert. Im Falle der Konfiguration im Anhang (Quellcodeauszug 5) sind das vier Stunden. Durch das mitschreiben der Zeitstempel wird das Messen von Latenzzeiten ermöglicht. Nach vier Stunden Testlaufzeit wurde der Verlauf der Latenz in Abbildung 5.14 über die Zeit aufgezeichnet. Es fällt auf, dass die Latenz stetig an-

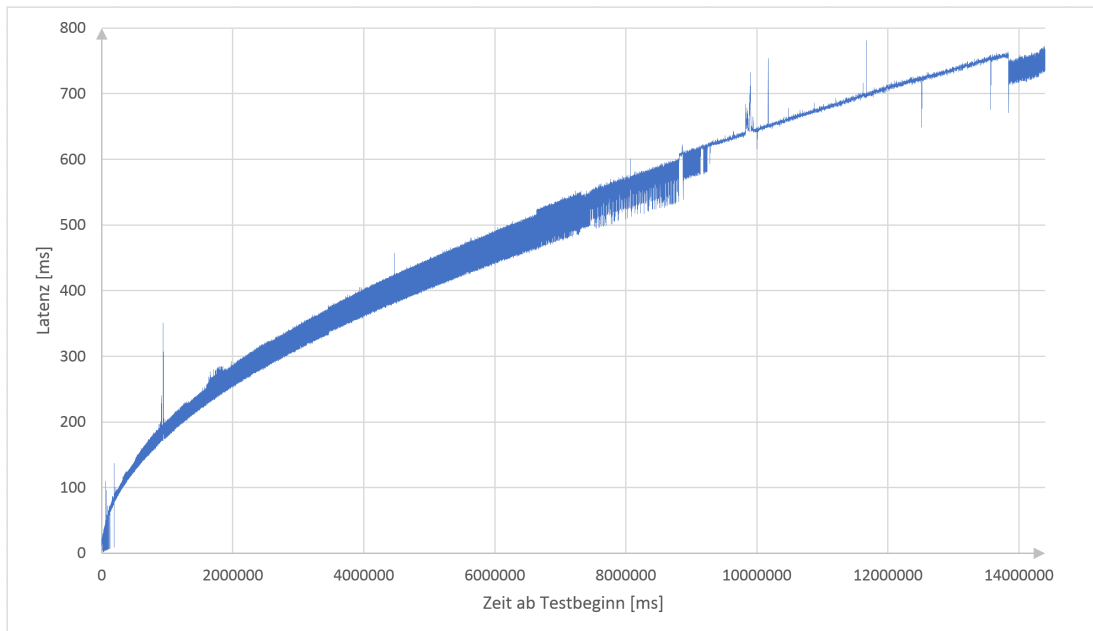


Abbildung 5.14: Latenzzeiten im vier Stunden Dauertest

zusteigen scheint, und sich im gesamten Testverlauf zwischen „0ms“ und „800ms“ befindet. Dieses Verhalten ist nicht erwünscht und wird deshalb genauer untersucht. Dazu werden die Pakete zwischen den zwei Geräten mit dem Netzwerkanalyseprogramm Wireshark [3] mitgeschnitten. In Abbildung 5.15 ist ein Auszug des Mitschnitts dargestellt. In dem Auszug sieht man den Zeitstempel des Computers

| No. | Time | Source | Destination | Protocol | Length | Info |
|-------|--------|-----------------|-----------------|----------|--------|--|
| 13277 | 67.320 | 192.168.178.70 | 192.168.178.160 | TLSv1.2 | 82 | Application Data |
| 13278 | 67.328 | 192.168.178.160 | 192.168.178.70 | TLSv1.2 | 86 | Application Data |
| 13279 | 67.328 | 192.168.178.160 | 192.168.178.70 | TCP | 86 | [TCP Retransmission] 49638 → 18080 [PSH, ACK] Seq=98337 Ack=86073 Win=16138 Len=32 |

Abbildung 5.15: Auszug aus dem Paketmitschnitt während des vierstündigen Dauertests aus dem Programm Wireshark [3]

mit Windows 7, auf dem Wireshark mitschneidet, die Quelladresse (Source), die Zieladresse (Destination), das Protokoll (Protocol), die Länge (Length), sowie wenige Infos über den Inhalt des Pakets. Der In Abbildung 5.15 dargestellte Auszug wiederholt sich den ganzen Test lang. Das Backend (IP Adresse: 192.168.178.70) sendet an das Frontend (IP Adresse: 192.168.178.160) eine Websocket Nachricht. Diese ist klein genug, so dass sie in ein Paket passt (Zeile eins). Die Nachricht kommt im Frontend an. Das ist daran zu erkennen, dass das Frontend darauf

(nach ca acht Millisekunde) auf die Nachricht entsprechend des Testskripts antwortet (Zeile zwei). Daraufhin wird die Nachricht aus Zeile zwei erneut gesendet. Um diesen Sachverhalt zu erklären, benötigt man es tieferes Verständnis für das TCP Protokoll. Genauer wie der Paketaustausch funktioniert und wie Paketverlust verhindert wird. In Abbildung 5.16 ist dargestellt wie der Datenaustausch

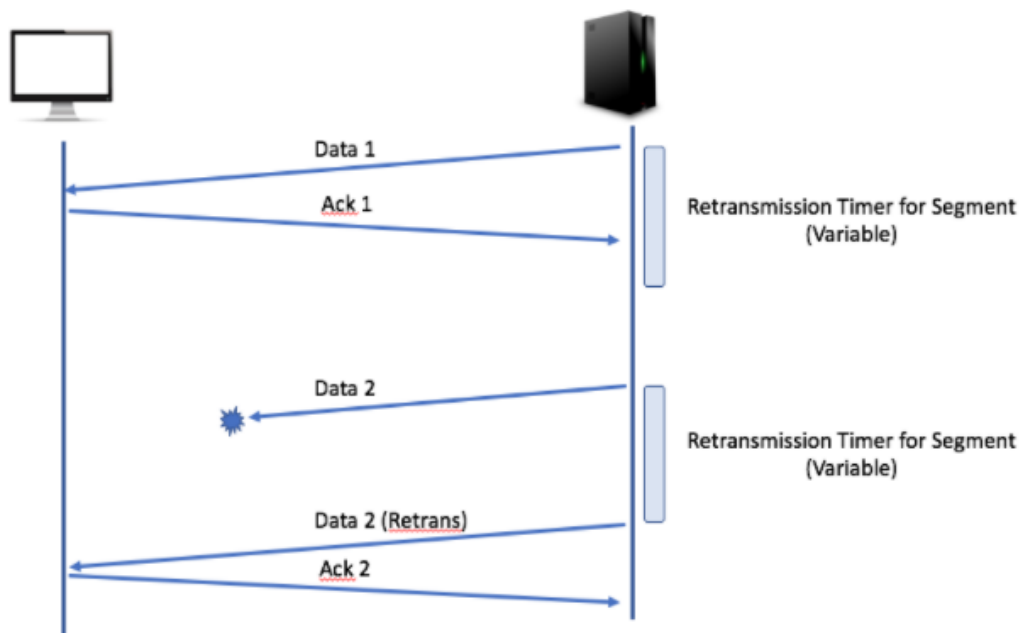


Abbildung 5.16: Verhalten von TCP bei Packetverlust [9]

bei tcp funktioniert. Immer wenn ein Packet empfangen wird, wird der Empfang des Packets vom Empfänger, durch das Senden eines Acknowledgments (ACKs) an den Sender, bestätigt. Wenn der Empfang innerhalb einer definierten Zeit (Retransmission Timer in Abbildung 5.16) nicht bestätigt wird, dann wird das Packet wiederholt gesendet. Diese Zeit in der der Sender auf das ACK wartet ist nicht konstant und wird entsprechend der Häufigkeit des Auftreten eines ausbleibenden ACK angepasst. Bleibt ein ACK aus, so wird die Zeit solange erhöht, bis sie so hoch ist, dass sie der doppelten Laufzeit eines Packets auf dem Netzwerk entspricht. Es ist deshalb die doppelte Zeit, da das gesendete Packet die Zeit des Wegs zum Empfänger braucht und sich dazu die Laufzeit des ACK zurück zum Sender addiert. Diese Zeit nennt man Round Trip Time (RTT). Das gilt allerdings nur bei symetrischen Routen zwischen Empfänger und Sender. Es wird vermutet, dass dieser Regelalgorithmus (congestion control) dafür verantwortlich ist, dass die Latenz stetig ansteigt. In Abbildung 5.17 sind nochmal die selben Rohdaten die Abbildung 5.14 zugrunde liegen dargestellt, allerdings nun nicht über die Zeit, sondern über die Anzahl an vom Frontend an das Backend gesendeten Packeten. Hier kann zu Begin, nach der kurzen Konstante innerhalb der ersten 1000 Werte, einen exponentiellen und zum Schluss einen linearen Anstieg

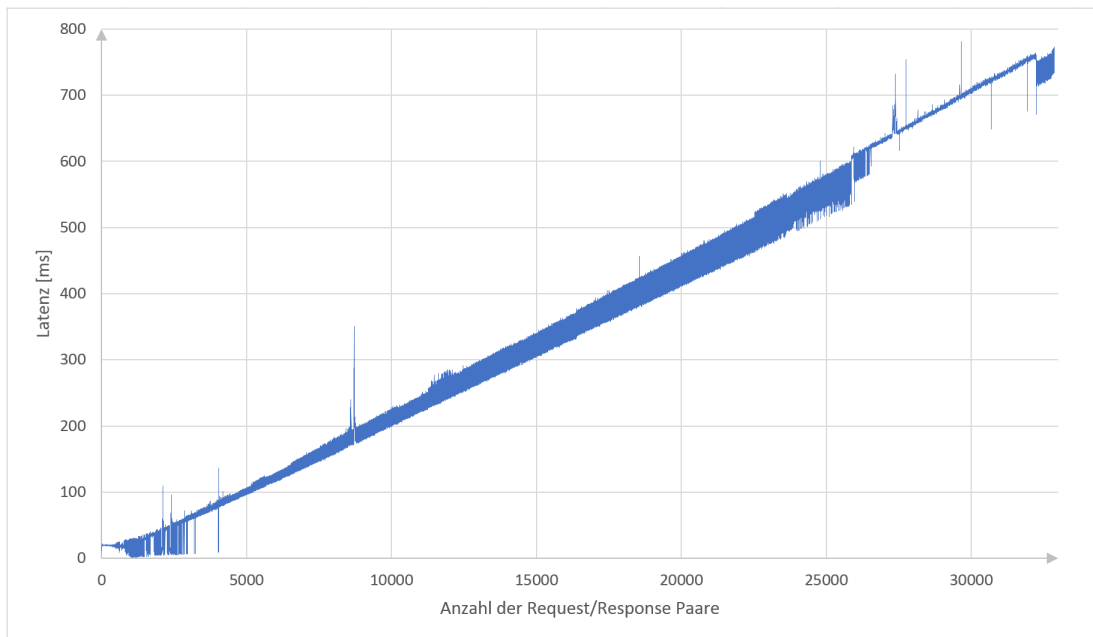


Abbildung 5.17: Latenzzeiten im vier Stunden Dauertest über die Anzahl der vom Backend zum Frontend gesendeten Paketen

erkennen. Es wird vermutet, dass dies der Regelalgorithmus der Wartezeit auf das ACK ist und generell Pakete vom Frontend zum Backend beim ersten Senden nicht vom Backend bestätigt werden. Dies würde den wahrscheinlich endlosen Anstieg der Latenz begründen. Unter der Annahme, dass diese These korrekt ist, vermutet der Autor das Problem in der Implementierung einer WebSocket Session in der sich senden und empfangen den selben Thread teilen. Leider kann dieser Sachverhalt aufgrund Zeitmangels nicht weitergehend untersucht werden. Die Echtzeitfähigkeit der Implementierung des aktuellen PoC ist damit widerlegt, da die Schnittstelle zwischen Backend und Frontend nicht echtzeitfähig ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in der Zielsetzung formulierten wesentliche Ziele sind leider nicht alle erreicht. Die Architektur des SCADA Systems ist entworfen und das PoC ist implementiert. Dabei ist die Datenrate zwischen Frontend und Backend auf ein Minimum reduziert, da nach Aufbau der Seite nur noch die Änderungen der reinen Informationen ausgetauscht werden. Es sind Steuerelemente implementiert, welche Darstellung sowie Änderung eines Prozesswerts ermöglichen. Die Webapplikation (das Frontend) ist entsprechend ihres Datenmodells hinreichend modular um das Instanzieren oder das Löschen von Steuerelementen zu Laufzeit zu ermöglichen. Ein Neustart des Frontends ist dazu nicht notwendig, allerdings ist diese Funktionalität wegen Zeitmangels im Backend nicht implementiert.

Literaturverzeichnis

- [1] ABB [o. J.]. Compact hmi 6.0 overview.
URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/276935/umfrage/wichtigste-unternehmen-weltweit-im-bereich-automatisierungstechnik/>
- [2] Breitkopf, A. [o. J.]. Größte unternehmen der automatisierungstechnik weltweit nach umsatz im jahr 2017.
URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/276935/umfrage/wichtigste-unternehmen-weltweit-im-bereich-automatisierungstechnik/>
- [3] Combs, G. [o. J.]. Wireshark.
URL: <https://www.wireshark.org/>
- [4] Emerson [o. J.]. Openenterprise v3.3.
URL: <https://c4b.gss.siemens.com/resources/images/articles/dffa-b10453-00-7600.pdf>
- [5] Falco, V. [o. J.a]. Boost.beast.
URL: https://www.boost.org/doc/libs/1_71_0/libs/beast/doc/html/index.html
- [6] Falco, V. [o. J.b]. Boost.beast - examples.
URL: https://www.boost.org/doc/libs/1_71_0/libs/beast/doc/html/beast/examples.html
- [7] Foundation, M. [o. J.a]. Mariadb.
URL: <https://mariadb.org/>
- [8] Foundation, T. A. S. [o. J.b]. Apache http server.
URL: <https://httpd.apache.org/>
- [9] Greer, C. [2017]. Tcp series #3: Network packet loss, retransmissions, and duplicate acknowledgements.
URL: <https://blog.catchpoint.com/2014/04/29/understanding-rtt-impact-on-tcp-retransmissions/>
- [10] Luber, S. [2018]. Definition: Was ist OPC UA?
URL: <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-opc-ua-a-698144/>
- [11] open62541 Community [o. J.a]. Certified sdk.
URL: <https://open62541.org/certified-sdk.html>

- [12] open62541 Community [o. J.b]. open62541.
URL: <https://open62541.org>
- [13] Scholz, P. [2005]. *Echtzeit, Echtzeitsysteme, Echtzeitbetriebssysteme*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, chapter 3, S. 39–73.
URL: https://doi.org/10.1007/3-540-27522-3_3
- [14] Schubert, M. [2007]. „Das wird teuer“ — *der EDV-Spezialist tritt auf*, Teubner, Wiesbaden, chapter 3, S. 40–49.
URL: https://doi.org/10.1007/978-3-8351-9108-2_3
- [15] Siemens [o. J.]. Simatic wincc v7.
URL: <https://c4b.gss.siemens.com/resources/images/articles/dffa-b10453-00-7600.pdf>
- [16] Studer, T. [2016]. *Das Relationenmodell*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, chapter 2, S. 9–21.
URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-46571-4_2
- [17] You, E. [o. J.]. Vue.js.
URL: <https://vuejs.org/>

Anhang

Quellcodeauszug 2: SQL Skript um die Datenstruktur der Datenbank zu erzeugen

```
1 USE WebVisu;
2 -- Pages
3 CREATE TABLE IF NOT EXISTS `Pages` (
4   `ID` bigint(20) unsigned NOT NULL AUTO_INCREMENT,
5   `parentID` bigint(20) unsigned DEFAULT NULL,
6   `title` varchar(30) NOT NULL,
7   `description` varchar(250) NOT NULL,
8   PRIMARY KEY (`ID`),
9   KEY `Pages_Pages_FK` (`ParentID`),
10  CONSTRAINT `Pages_Pages_FK` FOREIGN KEY (`parentID`) REFERENCES
    ↳ `Pages` (`ID`) ON DELETE CASCADE
11 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
12 -- GuiElementTypes
13 CREATE TABLE `GuiElementTypes` (
14   `ID` int(10) unsigned NOT NULL AUTO_INCREMENT,
15   `type` varchar(32) NOT NULL,
16   `description` varchar(250) NOT NULL,
17   PRIMARY KEY (`ID`),
18   UNIQUE KEY `GuiElementTypes_UN` (`type`)
19 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
20 -- GuiElement
21 CREATE TABLE IF NOT EXISTS `GuiElements` (
22   `ID` bigint(20) unsigned NOT NULL AUTO_INCREMENT,
23   `pageID` bigint(20) unsigned DEFAULT NULL,
24   `typeID` int(10) unsigned NOT NULL,
25   `name` varchar(30) NOT NULL,
26   PRIMARY KEY (`ID`),
27   KEY `GuiElement_Pages_FK` (`pageID`),
28   KEY `GuiElement_GuiElementTypes_FK` (`typeID`),
29   CONSTRAINT `GuiElement_GuiElementTypes_FK` FOREIGN KEY
    ↳ (`typeID`) REFERENCES `GuiElementTypes` (`ID`),
30   CONSTRAINT `GuiElement_Pages_FK` FOREIGN KEY (`pageID`)
    ↳ REFERENCES `Pages` (`ID`) ON DELETE CASCADE
```

```

31 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
32 -- DataTypes
33 CREATE TABLE `DataTypes` (
34   `type` varchar(100) NOT NULL,
35   PRIMARY KEY (`type`)
36 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
37 -- GuiElementDataNodeTemplates
38 CREATE TABLE `GuiElementDataNodeTemplates` (
39   `ID` int(10) unsigned NOT NULL AUTO_INCREMENT,
40   `writePermission` tinyint(1) DEFAULT false,
41   `type` varchar(100) NOT NULL,
42   `qualifiedName` varchar(100) DEFAULT 'unnamed',
43   `defaultValue` varchar(100) DEFAULT NULL,
44   `description` varchar(250) DEFAULT NULL,
45   PRIMARY KEY (`ID`),
46   KEY `GuiElementDataNodeTemplates_FK` (`type`),
47   CONSTRAINT `GuiElementDataNodeTemplates_FK` FOREIGN KEY (`type`)
48     → REFERENCES `DataTypes` (`type`)
49 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
50 -- GuiElementTypesDataNodesRel
51 CREATE TABLE `GuiElementTypesDataNodesRel` (
52   `guiElementTypeID` int(10) unsigned NOT NULL,
53   `dataNodeTemplateID` int(10) unsigned NOT NULL,
54   PRIMARY KEY (`guiElementTypeID`,`dataNodeTemplateID`),
55   KEY `GuiElementTypesDataNodesRel_FK_1` (`dataNodeTemplateID`),
56   CONSTRAINT `GuiElementTypesDataNodesRel_FK` FOREIGN KEY
57     → (`guiElementTypeID`) REFERENCES `GuiElementTypes` (`ID`) ON
58     → DELETE CASCADE,
59   CONSTRAINT `GuiElementTypesDataNodesRel_FK_1` FOREIGN KEY
60     → (`dataNodeTemplateID`) REFERENCES
61     → `GuiElementDataNodeTemplates` (`ID`) ON DELETE CASCADE
62 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
63 -- GuiElementDataNodes
64 CREATE TABLE `GuiElementDataNodes` (
65   `ID` bigint(20) unsigned NOT NULL AUTO_INCREMENT,
66   `guiElementID` bigint(20) unsigned NOT NULL,
67   `typeID` int(10) unsigned NOT NULL,
68   `initValue` varchar(100) NOT NULL,
69   PRIMARY KEY (`ID`),
70   KEY `GuiElementDataNodes_GuiElement_FK` (`guiElementID`),
71   KEY `GuiElementDataNodes_FK` (`typeID`),

```



```

67     CONSTRAINT `GuiElementDataNodes_FK` FOREIGN KEY (`typeID`)
        ↳ REFERENCES `GuiElementDataNodeTemplates` (`ID`) ON DELETE
        ↳ CASCADE,
68     CONSTRAINT `GuiElementDataNodes_GuiElement_FK` FOREIGN KEY
        ↳ (`guiElementID`) REFERENCES `GuiElements` (`ID`) ON DELETE
        ↳ CASCADE
69 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
70 -- GuiElementParamTemplates
71 CREATE TABLE `GuiElementParamTemplates` (
72     `ID` int(10) unsigned NOT NULL AUTO_INCREMENT,
73     `type` varchar(100) NOT NULL,
74     `qualifiedName` varchar(100) DEFAULT 'unnamed',
75     `defaultValue` varchar(100) DEFAULT NULL,
76     `description` varchar(250) DEFAULT NULL,
77     PRIMARY KEY (`ID`),
78     KEY `GuiElementParamTemplates_FK` (`type`),
79     CONSTRAINT `GuiElementParamTemplates_FK` FOREIGN KEY (`type`)
        ↳ REFERENCES `DataTypes` (`type`)
80 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
81 -- GuiElementTypesParamsRel
82 CREATE TABLE `GuiElementTypesParamsRel` (
83     `guiElementTypeID` int(10) unsigned NOT NULL,
84     `paramTemplateID` int(10) unsigned NOT NULL,
85     PRIMARY KEY (`GuiElementTypeID`,`ParamTemplateID`),
86     KEY `GuiElementTypesParamsRel_FK` (`paramTemplateID`),
87     CONSTRAINT `GuiElementTypesParamsRel_FK` FOREIGN KEY
        ↳ (`paramTemplateID`) REFERENCES `GuiElementParamTemplates`
        ↳ (`ID`) ON DELETE CASCADE,
88     CONSTRAINT `GuiElementTypesParamsRel_FK_1` FOREIGN KEY
        ↳ (`guiElementTypeID`) REFERENCES `GuiElementTypes` (`ID`) ON
        ↳ DELETE CASCADE
89 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
90 -- GuiElementParams
91 CREATE TABLE `GuiElementParams` (
92     `ID` bigint(20) unsigned NOT NULL AUTO_INCREMENT,
93     `guiElementID` bigint(20) unsigned NOT NULL,
94     `typeID` int(10) unsigned NOT NULL,
95     `value` varchar(100) NOT NULL,
96     PRIMARY KEY (`ID`),
97     KEY `GuiElementParams_GuiElement_FK` (`guiElementID`),
98     KEY `GuiElementParams_FK` (`typeID`),

```

```

99     CONSTRAINT `GuiElementParams_FK` FOREIGN KEY (`typeID`)
    ↪ REFERENCES `GuiElementParamTemplates` (`ID`) ON DELETE
    ↪ CASCADE,
100    CONSTRAINT `GuiElementParams_GuiElement_FK` FOREIGN KEY
    ↪ (`guiElementID`) REFERENCES `GuiElements` (`ID`)
101 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;
102 CREATE TABLE `Credentials` (
103     userName varchar(100) NOT NULL,
104     pwHash varchar(100) NOT NULL,
105     PRIMARY KEY (`userName`)
106 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=utf8mb4;

```

Quellcodeauszug 3: SQL Skript um die gespeicherten Prozeduren der Datenbank zu erstellen

```

1  DELIMITER $$
2  CREATE OR REPLACE PROCEDURE CreateInstanceOfGuiElement(
3      IN inType varchar(32),
4      IN inPageID BIGINT(20) UNSIGNED,
5      IN inName varchar(32)
6  )
7  BEGIN
8      DECLARE typeID TYPE OF GuiElementTypes.ID;
9      DECLARE insertedGuiElementID TYPE OF GuiElements.ID;
10     set typeID = NULL;
11     SELECT DISTINCT ID into typeID from GuiElementTypes WHERE
    ↪ GuiElementTypes.`type` = inType;
12     IF(typeID IS Not NULL) THEN
13         INSERT INTO GuiElements (GuiElements.PageID,
    ↪ GuiElements.TypeID, GuiElements.name) VALUES
    ↪ (InPageID, typeID, inName);
14         set insertedGuiElementID = LAST_INSERT_ID();
15         INSERT INTO GuiElementDataNodes
    ↪ (GuiElementID, typeID, initValue)
16         Select insertedGuiElementID,
    ↪ A.DataNodeTemplateID, B.defaultValue
    ↪ from GuiElementTypesDataNodesRel AS A
    ↪ left Join GuiElementDataNodeTemplates
    ↪ AS B ON B.ID = A.DataNodeTemplateID
    ↪ where GuiElementTypeID = typeID;
17     INSERT INTO GuiElementParams (GuiElementID,
    ↪ typeID, value)

```

```

18             Select insertedGuiElementID,
               ↳ A.ParamTemplateID, B.defaultValue
               ↳ from GuiElementTypesParamsRel AS A
               ↳ left Join GuiElementParamTemplates AS
               ↳ B ON B.ID = A.ParamTemplateID where
               ↳ GuiElementTypeID = typeID;

19     END IF;
20 END; $$
21
22 CREATE OR REPLACE PROCEDURE WebVisu.getDataNodesByGuiElementID(IN
   ↳ inGuiElementID BIGINT(20) UNSIGNED)
23 BEGIN
24     select
25     B.`type` as `type`,
26     A.initValue as initValue,
27     B.description as description,
28     B.qualifiedName as name,
29     A.guiElementID as parentguiElementSqlID,
30     A.ID as newDataNodeSqlID,
31     B.writePermission as writePermission
32     from GuiElementDataNodes AS A
33 LEFT JOIN GuiElementDataNodeTemplates AS B ON B.ID = A.typeID
   ↳ WHERE A.guiElementID = inGuiElementID;
34 END; $$
35
36 CREATE OR REPLACE PROCEDURE WebVisu.getParamsByGuiElementID(IN
   ↳ inGuiElementID BIGINT(20) UNSIGNED)
37 BEGIN
38     select
39     A.ID,
40     B.qualifiedName as name,
41     B.`type`,
42     A.value,
43     B.description
44 from WebVisu.GuiElementParams AS A
45     LEFT JOIN WebVisu.GuiElementParamTemplates AS B
46         ON B.ID = A.typeID
47 WHERE guiElementID = inGuiElementID;
48 END; $$
49
50 CREATE OR REPLACE PROCEDURE WebVisu.getGuiElementsByPageID(IN
   ↳ inPageID BIGINT(20) UNSIGNED)

```

```

51 BEGIN
52 SELECT
53   A.name as name,
54   B.`type` as `type`,
55   B.description as description,
56   A.pageID as parentPageSqlID,
57   A.ID as newGuiElementSqlID
58 FROM GuiElements A
59 LEFT JOIN GuiElementTypes AS B ON B.ID = A.typeID
60 WHERE A.pageID = inPageID;
61 END; $$
62
63 CREATE OR REPLACE PROCEDURE WebVisu.getPagesByParentPageID(IN
64   ↪ inParentPageID BIGINT(20) UNSIGNED)
65 BEGIN
66     IF(inParentPageID IS NULL) THEN
67         select title, description, parentID as
68         ↪ parentPageSqlID, ID as newPageSqlID from Pages
69         ↪ where parentID is NULL;
70     ELSE
71         select title, description, parentID as
72         ↪ parentPageSqlID, ID as newPageSqlID from Pages
73         ↪ where parentID = inParentPageID;
74     END IF;
75 END; $$
76
77 CREATE OR REPLACE PROCEDURE WebVisu.getDataNodesIDsByPageID(IN
78   ↪ inPageID BIGINT(20) UNSIGNED)
79 BEGIN
80     IF(inPageID IS NULL) THEN
81         SELECT B.ID as ID
82         FROM GuiElements A
83         LEFT JOIN GuiElementDataNodes AS B ON
84         ↪ B.guiElementID = A.ID
85         where A.pageID IS NULL;
86     ELSE
87         SELECT B.ID as ID
88         FROM GuiElements A
89         LEFT JOIN GuiElementDataNodes AS B ON
90         ↪ B.guiElementID = A.ID
91         where A.pageID = inPageID;
92     END IF;

```

```

85  END; $$
86
87  CREATE OR REPLACE PROCEDURE WebVisu.getParamsIDsByPageID(IN
    ↪  inPageID BIGINT(20) UNSIGNED)
88  BEGIN
89      IF(inPageID IS NULL) THEN
90          SELECT B.ID as ID
91          FROM GuiElements A
92          LEFT JOIN GuiElementParams AS B ON B.guiElementID
    ↪      = A.ID
93          where A.pageID IS NULL;
94      ELSE
95          SELECT B.ID as ID
96          FROM GuiElements A
97          LEFT JOIN GuiElementParams AS B ON B.guiElementID
    ↪      = A.ID
98          where A.pageID = inPageID;
99      END IF;
100 END; $$
101
102 DELIMITER ;

```

Quellcodeauszug 4: Beispiel BDO (Datenstruktur) des Frontends

```

1  {
2    "socket": {
3      "isConnected": true,
4      "message": "",
5      "reconnectError": false
6    },
7    "pageID": 1,
8    "authenticated": true,
9    "pageStruct": {
10     "pageID": 1,
11     "parentId": null,
12     "title": "ROOT_PAGE",
13     "description": "the landing Page of the Visu",
14     "subPages": [{
15       "id": 2,
16       "title": "SUB_PAGE",
17       "description": "first sub page"
18     }],
19     {

```

```

20     "id": 3,
21     "title": "SUB_PAGE2",
22     "description": "second sub page"
23 }
24 ],
25 "guiElements": {
26     "1": {
27         "id": 1,
28         "type": "button",
29         "name": "der erste Button",
30         "description": "just a stupid Button",
31         "dataNodes": {
32             "buttonState": {
33                 "id": 1,
34                 "name": "buttonState",
35                 "type": "Bool",
36                 "value": false,
37                 "description": "DataNode which holds the value of the
↪ Button a Button"
38             },
39             "colorSelector": {
40                 "id": 2,
41                 "name": "colorSelector",
42                 "type": "UInt8",
43                 "value": 0,
44                 "description": "DataNode to mux different colors to
↪ display a state"
45             },
46             "text": {
47                 "id": 3,
48                 "name": "text",
49                 "type": "String",
50                 "value": "ButtonText",
51                 "description": "text which is be displayed on the
↪ Button"
52             }
53         },
54         "paramNodes": {
55             "colorEnum": {
56                 "id": 1,
57                 "name": "colorEnum",
58                 "type": "String",
59                 "value": "[\"red\", \"green\", \"blue\", \"#FF00FF\"]",

```

```

60         "description": "JSON Array with the colors that are
        ↪ selectable with the \"colorSelector DataNode\""
61     },
62     "sizeX": {
63         "id": 2,
64         "name": "sizeX",
65         "type": "UInt16",
66         "value": 100,
67         "description": "maximum Size of the GuiElement in X"
68     },
69     "sizeY": {
70         "id": 3,
71         "name": "sizeY",
72         "type": "UInt16",
73         "value": 50,
74         "description": "maximum Size of the GuiElement in Y"
75     },
76     "posX": {
77         "id": 4,
78         "name": "posX",
79         "type": "UInt16",
80         "value": 0,
81         "description": "position of the GuiElement in X
        ↪ counted from the left side in px"
82     },
83     "posY": {
84         "id": 5,
85         "name": "posY",
86         "type": "UInt16",
87         "value": 0,
88         "description": "position of the GuiElement in Y
        ↪ counted from the top of the Page in px"
89     }
90 }
91 },
92 "2": {
93     "id": 2,
94     "type": "textInput",
95     "name": "ein Textfeld",
96     "description": "input Field for inserting a text",
97     "dataNodes": {
98         "colorSelector": {
99             "id": 4,

```

```

100     "name": "colorSelector",
101     "type": "UInt8",
102     "value": 0,
103     "description": "DataNode to mux different colors to
    ↪ display a state"
104 },
105 "text": {
106     "id": 5,
107     "name": "text",
108     "type": "String",
109     "value": "",
110     "description": "text which was typed into and
    ↪ displayed on the Text input field"
111 },
112 },
113 "paramNodes": {
114     "colorEnum": {
115         "id": 8,
116         "name": "colorEnum",
117         "type": "String",
118         "value": "[\"red\", \"green\", \"blue\", \"#FF00FF\"]",
119         "description": "JSON Array with the colors that are
    ↪ selectable with the \"colorSelector DataNode\""
120     },
121     "sizeX": {
122         "id": 9,
123         "name": "sizeX",
124         "type": "UInt16",
125         "value": 100,
126         "description": "maximum Size of the GuiElement in X"
127     },
128     "sizeY": {
129         "id": 10,
130         "name": "sizeY",
131         "type": "UInt16",
132         "value": 50,
133         "description": "maximum Size of the GuiElement in Y"
134     },
135     "posX": {
136         "id": 11,
137         "name": "posX",
138         "type": "UInt16",
139         "value": 0,

```



```

140         "description": "position of the GuiElement in X
        ↪ counted from the left side in px"
141     },
142     "posY": {
143         "id": 12,
144         "name": "posY",
145         "type": "UInt16",
146         "value": 0,
147         "description": "position of the GuiElement in Y
        ↪ counted from the top of the Page in px"
148     }
149 }
150 },
151 "3": {
152     "id": 3,
153     "type": "label",
154     "name": "ein Label",
155     "description": "label for showing constant Text",
156     "dataNodes": {
157         "textSelector": {
158             "id": 7,
159             "name": "textSelector",
160             "type": "UInt8",
161             "value": 0,
162             "description": "DataNode to mux different texts to
            ↪ display"
163         }
164     },
165     "paramNodes": {
166         "sizeX": {
167             "id": 15,
168             "name": "sizeX",
169             "type": "UInt16",
170             "value": 100,
171             "description": "maximum Size of the GuiElement in X"
172         },
173         "sizeY": {
174             "id": 16,
175             "name": "sizeY",
176             "type": "UInt16",
177             "value": 50,
178             "description": "maximum Size of the GuiElement in Y"
179         },

```

```

180     "posX": {
181         "id": 17,
182         "name": "posX",
183         "type": "UInt16",
184         "value": 0,
185         "description": "position of the GuiElement in X
        ↳ counted from the left side in px"
186     },
187     "posY": {
188         "id": 18,
189         "name": "posY",
190         "type": "UInt16",
191         "value": 0,
192         "description": "position of the GuiElement in Y
        ↳ counted from the top of the Page in px"
193     },
194     "color": {
195         "id": 19,
196         "name": "color",
197         "type": "String",
198         "value": "blue",
199         "description": "primary color"
200     },
201     "textColor": {
202         "id": 20,
203         "name": "textColor",
204         "type": "String",
205         "value": "white",
206         "description": "the color of the text"
207     },
208     "textEnum": {
209         "id": 21,
210         "name": "textEnum",
211         "type": "String",
212         "value": "[\"first Text\", \"second text\", \"third
        ↳ text\"]",
213         "description": "JSON Array with the different texts
        ↳ which can selected with the \"textSelector
        ↳ DataNode\""
214     }
215 }
216 }
217 }

```

```
218     }
219 }
```

Quellcodeauszug 5: Test Skript zur Latenz Messung

```
1  <!DOCTYPE html>
2  <meta charset="utf-8" />
3  <title>WebSocket Test</title>
4  <script language="javascript" type="text/javascript">
5      var wsUri = "wss://192.168.178.70:18080";
6      var output;
7      var startTime = new Date();
8      var startms = startTime.getTime();
9      var stoptimeHours = 4;
10     var stoptimeMinutes = stoptimeHours * 60;
11     var stoptimeSeconds = stoptimeMinutes * 60;
12     var stoptimems = stoptimeSeconds * 1000;
13
14     function init() {
15         output = document.getElementById("output");
16         testWebSocket();
17     }
18
19     function testWebSocket() {
20         websocket = new WebSocket(wsUri);
21         websocket.onopen = function (evt) {
22             onOpen(evt);
23         };
24         websocket.onclose = function (evt) {
25             onClose(evt);
26         };
27         websocket.onmessage = function (evt) {
28             onMessage(evt);
29         };
30         websocket.onerror = function (evt) {
31             onError(evt);
32         };
33     }
34
35     function onOpen(evt) {
36         //writeToScreen("CONNECTED");
37         doSend("5;user;testPW");
38     }
```

```

39
40 function onClose(evt) {
41     writeToScreen("DISCONNECTED");
42 }
43
44 function onMessage(evt) {
45     switch (evt.data) {
46         case "5": {
47             doSend("3;1");
48         }
49         break;
50         case "3;1": {
51             writeToScreen("started to send for " + stoptimems + "
↵ ms<br>");
52             doSend("1;1;0");
53             writeToScreen("0;" + getTimestamp() + ";"");
54         }
55         break;
56         case "1;1;1": {
57             writeToScreen("1;" + getTimestamp() + "<br>");
58             doSend("1;1;0");
59             writeToScreen("0;" + getTimestamp() + ";"");
60         }
61         break;
62         case "1;1;0": {
63             let timestamp = getTimestamp();
64             writeToScreen("0;" + timestamp + "<br>");
65             if (timestamp < stoptimems) {
66                 doSend("1;1;1");
67                 writeToScreen("1;" + getTimestamp() + ";"");
68             }
69         }
70         break;
71     }
72 }
73
74 function onError(evt) {
75     writeToScreen('<span style="color: red;">ERROR:</span> ' +
↵ evt.data);
76 }
77
78 function doSend(message) {
79     websocket.send(message);

```

```
80     }
81
82     function writeToScreen(message) {
83         document.getElementById("output").innerHTML += message;
84     }
85
86     window.addEventListener("load", init, false);
87
88     function getTimeStamp() {
89         let actualTime = new Date();
90         let actualms = actualTime.getTime();
91         let diff = actualms - startms;
92         return diff;
93     }
94 </script>
95
96 <h2>WebSocket Test</h2>
97
98 <div id="output"></div>
```