

AUTOMATISIERTE LICHTMESSUNG MIT INDOOR-LOKALISIERUNGSSYSTEM

TECHNISCHER BERICHT

Bachelorarbeit

Autoren

Patrick Scherler
Esteban Luchsinger

Betreuer

Prof. Dr. Farhad Mehta

Industriepartner

Tobias Hofer
HSi Elektronik AG

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK RAPPERSWIL
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil, Switzerland

1.	Inhaltsverzeichnis	
1	Abstract	5
2	Management Summary.....	6
2.1	Ausgangslage.....	6
2.2	Vorgehen, Technologien.....	6
2.3	Ergebnisse	6
2.4	Ausblick	6
3	Ausgangslage und Zielsetzung.....	7
3.1	Motivation	7
3.2	Zweck und Ziel.....	7
3.3	Lieferumfang.....	8
3.4	Annahmen und Abgrenzungen.....	8
3.5	Einschränkungen.....	8
3.6	Abgrenzung zu anderen bestehenden Lösungen.....	8
3.7	Stand der Technik	9
3.7.1	Lichtmessung.....	9
3.7.2	Positionsbestimmung	9
4	Anforderungsanalyse	10
4.1	Systemkontext.....	10
4.2	Rollen	11
4.3	Szenario einer Messdurchführung.....	11
4.4	Funktionale Anforderungen	13
4.5	Nicht funktionale Anforderungen	14
4.6	Mockups	15
5	Domainanalyse	17
5.1	Visualisierung der Messwerte	17
5.2	Domain-Modell	18
5.3	Lösungsentwurf.....	20
6	Architektur.....	21
6.1	Ziele der Architektur	21
6.2	Einschränkungen.....	21
6.3	Container Aufteilung	22
6.3.1	Flux-Frontend	23
6.3.2	Flux-Server.....	23
6.3.3	Flux-Sensors	24

6.3.4	Flux-Database.....	24
6.4	Deployment.....	24
7	Realisierung.....	26
7.1	Flux-Frontend.....	26
7.1.1	Technologieevaluation	26
7.1.2	User Experience Framework.....	29
7.1.3	Containers und Components	30
7.1.4	Heatmap Library.....	31
7.1.5	Anzeigen der Heatmap.....	32
7.1.6	Transformation der Koordinaten.....	33
7.2	Flux-Server	35
7.2.1	Technologieevaluation	35
7.2.2	Kompression der übertragenen Nutzlast	37
7.2.3	Übertragung neu einkommender Messwerte mittels WebSockets	39
7.2.4	Asynchronität von Flux-Server.....	39
7.3	Flux-Sensors.....	41
7.3.1	Technologieevaluation	41
7.3.2	Synchronisierung der Sensordaten	42
7.3.3	Übertragung der Messwerte	43
7.3.4	Kommunikation.....	45
7.4	Datenbank	48
7.4.1	Technologieevaluation	48
7.4.2	Modellierung.....	50
7.5	Herausforderungen & Lösungsansätze	52
7.5.1	Verfügbarkeit der verteilten Systeme	52
7.5.2	Optimierung der Positionsbestimmung mit Pozyx.....	52
7.5.3	Konsequenzen einer öffentlich verfügbaren Applikation.....	53
7.5.4	Raspberry Pi als Hotspot	54
8	Versuche.....	55
8.1	Simulation.....	55
8.2	Hardware	55
8.3	HSR Labor	56
8.4	HSR Forschungszentrum Lichtraum	59
9	Schlussfolgerung und Ausblick.....	60
9.1	Beurteilung der Ergebnisse	60

9.1.1	Entwickelte Komponenten und Features	60
9.1.2	Offene Probleme	60
9.2	Einsatz und Weiterverwendung	61
9.2.1	Mögliche Erweiterungen.....	61
9.2.2	Anforderungen an das Hilfsmittel zur Traversierung.....	61
10	Literaturverzeichnis	63
Anhang		66
A.	Glossar.....	66
B.	Grundsätze der Verwendung des Positionierungssystems Pozyx.....	67
C.	Installation Raspberry Pi.....	69

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Systemkontextdiagramm des Flux-Coordinator	10
Abbildung 2 Mockup der Detailansicht einer Messung	15
Abbildung 3 Mockup der Detailansicht eines Raumes	16
Abbildung 4 Screenshot einer Lichtsimulation in Relux als Visualisierungsbeispiel	17
Abbildung 5 Domainmodell des Flux-Coordinator Systems	18
Abbildung 6 High-Level Skizze des Flux-Coordinator Systems	20
Abbildung 7 Container Diagramm des Flux-Coordinator	22
Abbildung 8 Deployment Diagramm mit Paas Cloud Provider	25
Abbildung 9 Deployment Diagramm mit Single-board Computer	25
Abbildung 10 Container-Component Pattern Veranschaulichung	30
Abbildung 11 Beispiel einer Heatmap-Visualisierung als Raster	31
Abbildung 12 Sequenzdiagramm mit der Kommunikation für das Anzeigen der Heatmap	32
Abbildung 13 Ablauf der Heatmap Transformation im Flux-Frontend	33
Abbildung 14 Transformieren der Messung auf den Gebäudeplan (Rot: Anchors)	34
Abbildung 15 Vergleiche der Kompressionen mit und ohne Messwerte	38
Abbildung 16 Dauer von Requests mit und ohne Kompression	38
Abbildung 17 Sequenzdiagramm der Übertragung der Messwerte	43
Abbildung 18 UML Sequenzdiagramm der Polling Interaktion des Flux-Sensors	45
Abbildung 19 UML Sequenzdiagramm der Messdurchführung	47
Abbildung 20 Datenbankmodell des Flux-Coordinator Systems	51
Abbildung 21 Streuung der drei Dimensionen des Positionierungssystems	52
Abbildung 22 Zufällig generierte Heatmaps des Flux-Coordinator	55
Abbildung 23 Hardware der Flux-Coordinator Sensoreinheit ohne Gehäuse	56
Abbildung 24 Grundriss des HSR Labors mit den Antennen des Positionierungssystems	57
Abbildung 25 Screenshot einer Lux-Messung im HSR Labor	58
Abbildung 26 Screenshot einer Lux-Messung im Lichthof des HSR Forschungsgebäudes	59
Abbildung 27 PiBakery mit importierter Konfiguration	71

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Funktionale Anforderungen des Flux-Coordinator	13
Tabelle 2 Nichtfunktionale Anforderungen des Flux-Coordinator	14
Tabelle 3 Definition der Ubiquitous Language	19
Tabelle 4 Messung der Anzahl übertragener Messwerte pro Minute in drei Varianten	44

1 Abstract

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Automatisierung von Lichtmessungen mit Hilfe eines Indoor-Positionierungssystems. In Zusammenarbeit mit der Firma HSi Elektronik AG in Gossau SG wurde eine praxistaugliche Lösung zur Überprüfung der Normkonformität von neuen oder bereits bestehenden Lichtinstallationen entwickelt.

Vergleichbare Anwendungen existieren derzeit lediglich in Form von spezialisierter Simulations-Software zur Berechnung und Prognose von Beleuchtungssituationen. Der Unterschied zu dieser Arbeit besteht darin, dass die resultierende Visualisierung hier nicht simuliert wird, sondern auf tatsächlich gemessenen Lux-Werten basiert.

Mit einer möglichst hohen Messfrequenz von bis zu 850 Messwerten pro Minute stehen dem System bereits in kurzer Zeit genügend Daten zur Verfügung, um eine Heatmap-Darstellung auf einen zweidimensionalen Querschnitt eines Raumes zu interpolieren.

Die Lösung ist ein verteiltes System aus drei voneinander unabhängigen Komponenten: einer Sensoreinheit zur Synchronisierung und Übertragung der Sensorwerte, ein Backend-Server zur Persistierung und Bereitstellung der Daten sowie ein Frontend als User Interface und zur Darstellung der Heatmap-Visualisierung. In der Praxis ist das System sowohl für den Einsatz als Büro-Anwendung aus der Cloud als auch für die Durchführung von Messungen bei Kunden ohne Internetverbindung einsetzbar.

Mit dieser innovativen Lösung lässt sich eine neue Lichtinstallation somit auch nach Fertigstellung in der Realität auf die Konformität mit geltenden Normen und Richtlinien überprüfen oder mit zuvor erstellten Lichtsimulationen vergleichen.

2 Management Summary

2.1 Ausgangslage

Gerade im öffentlichen Bereich gelten für die Installation von Beleuchtungen diverse Normen und Richtlinien, um entsprechende Sicherheit- und Energiestandards einzuhalten. Aus diesem Grund müssen umfangreiche Messungen erstellt werden, um die Konformität neuer und bestehender Installationen zu gewährleisten.

Dazu werden über einem gleichmässigen Raster von Hand kontinuierliche Messungen durchgeführt. Solche Messungen verursachen hohe Zeitaufwände und sind durch die menschliche Ungenauigkeit auch anfällig auf Fehler. Eine Optimierung und Automatisierung dieses Ablaufs würde die Prüfung wesentlich erleichtern.

2.2 Vorgehen, Technologien

In Zusammenarbeit mit der Firma HSi Elektronik AG wurde der Flux-Coordinator entwickelt: eine innovative Lösung, die Lichtmessungen genauer und gleichzeitig schneller durchführen kann.

Nach einer Analyse der gängigsten Einsatzszenarien wurde schliesslich ein flexibel einsetzbares, verteiltes Softwaresystem entwickelt. Nebst der lokalen Installation lässt sich das System auch als Cloud Anwendung bereitstellen.

Die Messungen werden von einer Sensoreinheit bestehend aus einem Lichtsensor, einem Positionierungssystem und einem Raspberry Pi Einplatinencomputer durchgeführt. Die gesammelten Messwerte werden live in einer React-Web-Anwendung als Heatmap visualisiert. Als zentrale Schnittstelle für die Kommunikation und Persistierung dient eine auf dem Play-Framework aufbauende Server-Anwendung.

2.3 Ergebnisse

Mit dem Flux-Coordinator wurde ein System geschaffen, das auch in der Praxis für umfangreiche Lichtmessungen eingesetzt werden kann. Im Verlaufe der Arbeit wurden Leistungstests mit bis zu 50'000 Messwerten durchgeführt und dabei ein Durchsatz von 850 Messungen pro Minute erzielt.

Das System kann sowohl im Büro und unterwegs zum Betrachten bisheriger Projekte als auch beim Kunden zur Erstellung neuer Messungen ohne eine feste Internetverbindung eingesetzt werden. Für eine spätere Nachbearbeitung der Visualisierung am Arbeitsplatz kann das System auf der Cloud bereitgestellt und neue Messungen per Import-Funktion hinzugefügt werden.

2.4 Ausblick

Durch den Flux-Coordinator schreitet die Digitalisierung auch im Bereich der Lichtmessungen weiter voran. Das System bietet eine gute Grundlage für zusätzliche Erweiterungen in verschiedenen Bereichen: weitere Sensoren, erleichterte Aufstellung und Konfiguration oder eine fortgeschrittene Automatisierung mit Hilfe von Drohnen.

Für eine Messung wird zwar noch immer menschliche Unterstützung benötigt, um die Sensoreinheit im Raum zu bewegen. Auch dieser letzte Schritt der Automatisierung dürfte in Zukunft jedoch gelöst werden. So könnten schliesslich der gesamte Prozess der Lichtmessung und die Überprüfung geltender Richtlinien per Knopfdruck erledigt werden.

3 Ausgangslage und Zielsetzung

Dieses Kapitel befasst sich mit der beim Projektstart bestehenden Ausgangslage beim Auftraggeber und der daraus entstandenen Motivation für diese Arbeit.

3.1 Motivation

Die Firma HSi Elektronik AG (Auftraggeber) führt unter anderem Lichtinstallationen bei Kunden im öffentlichen Bereich durch. Um die geforderten Helligkeitswerte der geltenden Standards garantieren zu können, werden entsprechende Analysen durchgeführt. Dabei setzt der Auftraggeber auf innovative Technologien, wie die Simulation der Lichtverhältnisse vor einer Installation und stichprobenartige Lichtmessungen danach. Die effektiven Messungen werden allerdings noch immer von Hand mit einem Luxmeter durchgeführt und anschliessend manuell dokumentiert.

Gemäss den Standards müssten für die Überprüfung eines einzelnen Raumes Messungen in vordefinierten Abständen und Höhen ausgeführt werden. Manuelle Messungen verursachen hohe Zeitaufwände und sind durch die menschliche Ungenauigkeit fehleranfällig. Aus diesem Grund werden in der Praxis meist stichprobenartig Messungen erstellt, um die Daten der Simulation zu bestätigen.

Eine automatisierte und zuverlässige Lösung für die Lichtmessung würde diesen Prozess nicht nur verkürzen, sondern auch die Qualität und Aussagekraft der Messungen verbessern. Dies könnte in Zukunft auch eine regelkonforme Prüfung der geltenden Standards ermöglichen.

3.2 Zweck und Ziel

Ziel dieser Bachelorarbeit ist das Entwickeln einer praxistauglichen Lösung zur lokationsbasierten Ausführung von Lichtmessungen innerhalb eines Raumes. Die Lösung soll weitestgehend automatisiert sein und zwar vor allem dort, wo menschliche Fehler geschehen können. Dem Vermesser, der die Luxmessungen durchführt, sollen möglichst alle benötigten Informationen über eine einfache Benutzerschnittstelle angezeigt werden.

Eine detaillierte Beschreibung mit den einzuhaltenden Punkten und einer Abgrenzung ist in der Aufgabenstellung ausgeführt. Nachfolgend sind als Ergänzung dazu alle Abweichungen der Aufgabenstellung aufgelistet, die zu Beginn der Arbeit wie folgt definiert wurden:

- Anstatt** *Beim Erreichen der Punkte im vordefinierten Raster sollen automatisch Lux-Messungen ausgeführt werden.*
- Folgendes** *Es werden permanent Lux-Messungen ausgeführt und mit den entsprechenden Positionsdaten verknüpft. Die Messwerte können anschliessend im User Interface gefiltert oder kombiniert werden.*
- Grund** *Während einer Messung sollen so viele Messwerte wie möglich gesammelt und erst anschliessend bei der Analyse im User Interface gefiltert werden. So können in Zukunft auch weitere Auswertungen auf bestehenden Daten durchgeführt werden.*

3.3 Lieferumfang

Der Lieferumfang dieser Arbeit umfasst folgende Punkte:

- System zur lokationsbasierten Ausführung von Lichtmessungen innerhalb eines Raumes (Siehe Aufgabenstellung)
- Technischer Bericht mit Architekturdokumentation
- Source Code Repository inkl. Dokumentation
- Zwischen- und Abschlusspräsentation inkl. Live-Demonstration der Applikation

3.4 Annahmen und Abgrenzungen

Zusätzlich zur Abgrenzung in der Aufgabenstellung wurden zu Beginn der Arbeit mit dem Auftraggeber und dem Betreuer folgende Punkte definiert:

Ansteuerung Die Ansteuerung des Sensors kann im Notfall vom Auftraggeber erledigt oder simuliert werden. In dieser Arbeit soll hauptsächlich das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten, die Visualisierung der Sensordaten und die Positionsbestimmung behandelt werden.

Standards Die in der Motivation erwähnten Standards dienen lediglich als Referenz und müssen von der entwickelten Software nicht zwingend eingehalten werden. Eine entsprechende Lösung zur Einhaltung der Standards wäre in Zukunft allerdings denkbar und könnte vom Auftraggeber an seine Kunden als weiteren Service angeboten werden.

3.5 Einschränkungen

Für dieses Projekt gibt es vor allem Einschränkungen im Bereich der Grösse und Verfügbarkeit des Systems.

- Das komplette System soll mobil sein, damit es ein Vermesser jederzeit zum Kunden mitnehmen kann.
- Die Sensorkomponente muss möglichst portabel sein, damit diese später auf ein Hilfsmittel, wie beispielsweise eine Drohne, passt.
- Eine Messung bei einem Kunden muss offline durchgeführt werden können und nicht auf Services aus dem Internet angewiesen sein.

3.6 Abgrenzung zu anderen bestehenden Lösungen

Vergleichbare Lösungen existieren derzeit lediglich in Form von spezialisierter Simulations-Software zur Prognose von Beleuchtungssituationen. Solche Berechnungen werden allerdings vorgängig durchgeführt, um eine Lichtinstallation zu planen oder dem Kunden verschiedene Varianten aufzuzeigen. Bekannte Vertreter dieser Kategorie sind Relux¹ in der Schweiz und DIALux² in Deutschland.

In dieser Arbeit sollen die Messwerte jedoch nicht simuliert, sondern von einem realen Lichtsensor ausgelesen werden. So baut die resultierende Visualisierung auf tatsächlich gemessenen Lux-Werten auf. Je nach gewählter Art der Darstellung kann es jedoch auch hier notwendig werden, zusätzliche Daten zu interpolieren.

¹ <https://relux.com/de/relux-desktop.html>

² <https://www.dial.de/de/dialux/>

3.7 Stand der Technik

Eine vergleichbare Lösung zur automatisierten Lichtmessung wurde auf dem Markt nicht gefunden. Die Problemstellung scheint zu spezifisch zu sein oder die Anwendungsfälle dafür noch zu gering. Eine Zerlegung in Einzelprobleme bringt jedoch die nachfolgenden Lösungen hervor.

3.7.1 Lichtmessung

Für Lichtmessungen gibt es bereits diverse Lösungen auf dem Markt. Im professionellen Bereich werden Beleuchtungsstärkemessgeräte (Luxmeter) mit Genauigkeitsklassen und rückführbarer Kalibrierung eingesetzt. Zur Ansteuerung per Software, wie es auch in dieser Arbeit benötigt wird, können Lichtsensoren eingesetzt werden.

Zusätzlich gibt es seit einiger Zeit diverse Luxmeter-Apps, mit denen ein Smartphone als Luxmeter verwendet werden kann. Eine weitere Recherche auf diesem Gebiet scheint allerdings zwecklos, da die Mobiltelefone bereits aufgrund der verbauten Hardware nicht an die Genauigkeit von professionellen Geräten herankommen [1].

3.7.2 Positionsbestimmung

Für die Positionsbestimmung in geschlossenen Räumen wird Pozyx verwendet. Dieses verspricht laut Hersteller zentimetergenaue Positionsbestimmung per UWB [2]. Die Technologie wurde bereits vor der Arbeit als vielversprechender Kandidat evaluiert.

Aktuelle Navigationssatellitensysteme, wie GPS kommen für die Positionsbestimmung nicht in Frage, da der Empfang in Gebäuden meistens stark reduziert bis unmöglich ist.

4 Anforderungsanalyse

Die Anforderungsanalyse beschreibt die Vorgaben der zu implementierenden Lösung und definiert eine Skizze des Systems sowie den zu erwartenden Funktionsumfang.

4.1 Systemkontext

Das in Abbildung 1 gezeigte Systemkontextdiagramm³ ist ein guter Ausgangspunkt, um das Softwaresystem als Gesamtbild darzustellen. Das zu entwickelnde System, der Flux-Coordinator⁴, befindet sich als Blackbox in der Mitte, umgeben von seinen Benutzern und den Sensoren, mit denen es interagiert.

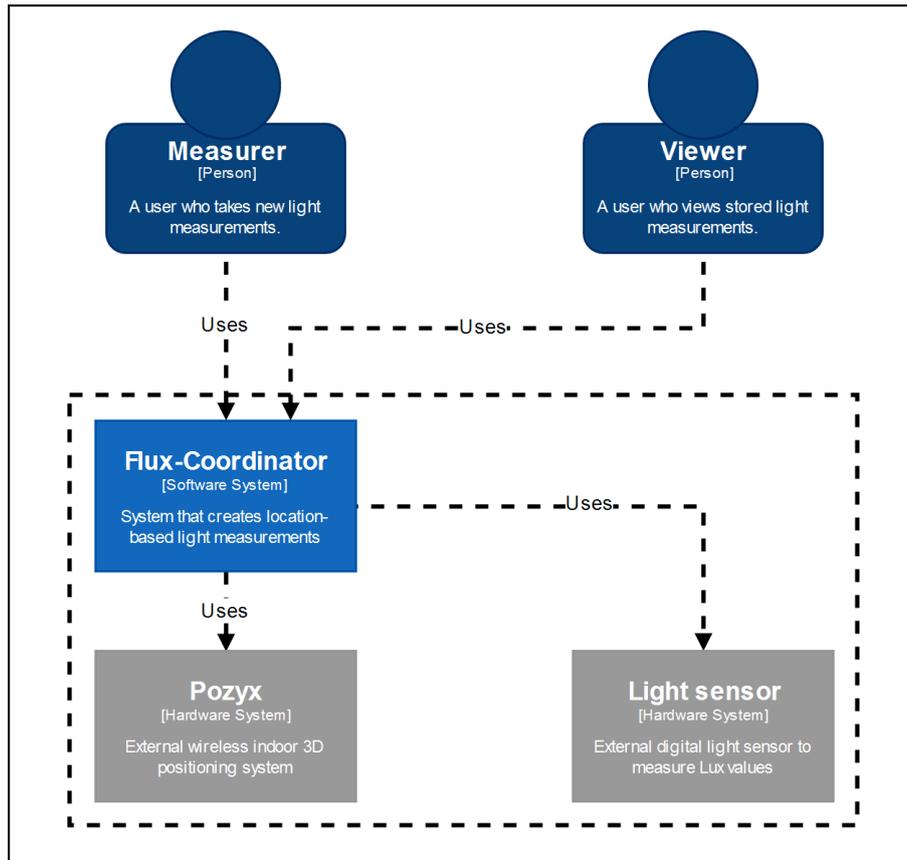


Abbildung 1 Systemkontextdiagramm des Flux-Coordinator

³ <https://c4model.com/>

⁴ Der Präfix Flux ist eine Kombination aus Flux (lateinisch Fluss) und Lux (SI-Einheit der Beleuchtungsstärke) und soll den physikalischen Hintergrund der Arbeit symbolisieren. Der Name Flux-Coordinator ist zudem eine Anlehnung an den «Flux Capacitor» aus der Filmreihe «Back to the Future».

4.2 Rollen

Folgende Rollen wurden während der Anforderungsanalyse identifiziert:

- **Betrachter (Viewer):** Greift auf die Anwendung zu, um bereits erstellte Aufzeichnungen anzuzeigen, zu importieren oder zu exportieren.
- **Vermesser (Measurer):** Kalibriert die Sensoren, startet die Messungen und überwacht diese während der Durchführung. Der Vermesser ist ein Benutzer mit erweiterten Anforderungen.

4.3 Szenario einer Messdurchführung

Die folgende Szenario-Beschreibung soll dabei helfen, eine High-Level-Perspektive über das System Flux-Coordinator und über die nötigen Schritte zur Durchführung einer Messung zu erhalten. Das Entwickeln eines Szenarios garantiert, dass alle nötigen Interaktionsschritte einer Aufgabe aufgenommen und analysiert werden. Die einzelnen Schritte werden anschliessend als User Stories formuliert. Auf das Modellieren eines formalisierten Use Cases für das Szenario wird verzichtet, da noch zu wenige Details über die zu erwartende Implementierung bekannt sind.

Der folgende Ablauf einer Messdurchführung stellt die Kernaufgabe des Systems dar.

Zweck	Szenario, das die Durchführung einer Lichtmessung mit dem System Flux-Coordinator beschreibt.
Personen	Mitarbeiter A, Bachelor of Science in Elektrotechnik
Ausrüstung	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilgerät (Smartphone/Tablet/Laptop) mit unterstütztem Web-Browser und WLAN-Funktionalität • Flux-Coordinator Sensoreinheit, bestehend aus: <ul style="list-style-type: none"> ○ Indoor Positionierungssystem «Pozyx», bestehend aus einem «Tag» und vier «Anchors» ○ Lichtsensor ○ Einplatinencomputer mit mobiler Stromversorgung
Szenario	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiter A startet die Sensoreinheit mit dem vorinstallierten Flux-Coordinator System. • Das System startet automatisch und stellt einen WLAN-Hotspot zur Verfügung. • Mitarbeiter A verbindet sein Mobilgerät mit dem WLAN und ruft per vordefinierter URL im Webbrowser das User Interface des Systems auf. • Mitarbeiter A erstellt ein neues Projekt mit Name und Beschreibung. • Mitarbeiter A erstellt für das Projekt einen zugehörigen Raum mit Name, Beschreibung, Gebäudeplan und Fläche. • Mitarbeiter A verteilt die zur Verfügung stehenden «Anchors» des Positionierungssystems gemäss den Richtlinien von Pozyx im Raum und vermisst diese anschliessend auf einen Millimeter genau relativ zu einem vorher frei gewählten Nullpunkt. • Mitarbeiter A erstellt für den Raum eine Messung mit Name, Beschreibung und dem Namen oder Kürzel des Vermessers. • Mitarbeiter A trägt alle verteilten «Anchors» mit ihrer Pozyx-ID und Position in die vorher erstellte Messung ein. • Mitarbeiter A definiert im User Interface den Skalierungsfaktor sowie die Horizontal- und Vertikalverschiebung der «Anchors» auf dem hochgeladenen Gebäudeplan, sodass die Positionierung der Realität entspricht. • Mitarbeiter A startet die Messung über das User Interface. • Das System trägt die Startzeit in die Messung ein. • Das System initialisiert und startet die Sensoren. • Das System zeichnet im User Interface eine Visualisierung mit allen gemessenen Lichtwerten und aktualisiert die Ansicht fortlaufend. • Mitarbeiter A bewegt sich mit der Sensoreinheit im Raum umher, bis die Messabdeckung im User Interface als ausreichend bewertet wird. • Mitarbeiter A stoppt die Messung über das User Interface. • Das System stoppt die Sensoren und trägt die Endzeit in die Messung ein. • Mitarbeiter A kann die generierte Visualisierung der Messung betrachten und bei Bedarf die Messwerte als Datei exportieren.

4.4 Funktionale Anforderungen

Die nachfolgende Tabelle 1 listet alle Funktionen auf, die die Anwendung unterstützen soll:

#	Anforderung	Beschreibung	Rolle
1	Messung visualisieren	Als Benutzer möchte ich alle Messwerte einer Messung als Visualisierung anzeigen können, um deren Zusammenhänge zu verstehen.	Betrachter
2	Messwerte filtern	Als Benutzer möchte ich in der Visualisierung einen Filter setzen können, um die Messwerte nach ihren Abständen zu gruppieren.	Betrachter
3	Messung speichern	Als Benutzer möchte ich eine Messung speichern können, um die gesammelten Daten zu einem späteren Zeitpunkt zu betrachten.	Betrachter
4	Messung starten	Als Vermesser möchte ich eine Messung über die Benutzerschnittstelle starten können, damit die Messwerte aufgezeichnet werden.	Vermesser
5	Messung abschliessen	Als Vermesser möchte ich eine laufende Messung über die Benutzerschnittstelle abschliessen können, um die Aufzeichnung weiterer Messwerte zu beenden.	Vermesser
6	Messung fortfahren	Als Vermesser möchte ich eine bereits abgeschlossene Messung über die Benutzerschnittstelle fortfahren können, um sie durch weitere Messwerte zu erweitern.	Vermesser
7	Messung exportieren	Als Benutzer möchte ich im System vorhandene Messungen in einem textbasierten Format exportieren können, um sie extern zu sichern.	Betrachter
8	Messung importieren	Als Benutzer möchte ich eine nicht mehr im System vorhandene Messung importieren können, um sie wieder anzuzeigen.	Betrachter
9	Positionierungssystem konfigurieren	Als Vermesser möchte ich das Positionierungssystem über die Benutzerschnittstelle konfigurieren können, um die Messung schneller aufzusetzen.	Vermesser
10	Lichtsensor kalibrieren	Als Vermesser möchte ich den Lichtsensor über die Benutzerschnittstelle kalibrieren können, um ungenaue Messungen zu vermeiden und Korrekturen vorzunehmen.	Vermesser
11	Anmeldung durchführen	Als Benutzer möchte ich mich anmelden können, um auf die Daten meiner Installationen zugreifen zu können.	Betrachter
12	Abmeldung durchführen	Als Benutzer möchte ich mich nach der Anmeldung abmelden können, um die Daten meiner Installationen für unbefugte unzugänglich zu machen.	Betrachter
13	Instrumente testen	Als Vermesser möchte ich die Konfiguration und Kalibrierung der Sensoren vor Beginn der Messung testen können, um fehlerhafte Messungen zu vermeiden.	Vermesser

Tabelle 1 Funktionale Anforderungen des Flux-Coordinates

Das Formulieren der CRUD-Methoden (Create, Read, Update, Delete) wurde der Einfachheit halber weggelassen. Diese werden bei Bedarf implementiert.

Die Priorisierung der Anforderungen entspricht der Reihenfolge in der Tabelle. Es gibt keine optionalen Anforderungen, sondern lediglich die Priorisierung und eine zeitlich begrenzte Entwicklungszeit.

4.5 Nicht funktionale Anforderungen

Die folgenden nichtfunktionalen Anforderungen in Tabelle 2 sind nach ISO 9126 [3] gruppiert.

#	Anforderung	Kategorie
1	Sensoren lassen sich austauschen, ohne dafür die Serverkomponente anpassen zu müssen.	Maintainability
2	Ein Benutzer muss auf das User Interface mit Hilfe seines Browsers zugreifen können, solange die Version des Browsers nicht älter als sechs Monate ist.	Usability
3	Die ersten 10000 Messwerte müssen bei einer Round-Trip-Time von unter 25 ms in mindestens 90% der Anfragen in weniger als 1 Sekunde angezeigt werden.	Efficiency
4	Die Server-Komponente muss auf einer von den Sensoren getrennten Plattform ausgeführt werden können.	Portability
5	Das User Interface soll auf den gängigen Plattformen (PC, Laptop, Tablet) verwendet werden können.	Portability
6	Die Funktionalität des Systems muss vor nicht-autorisierten Zugriffen geschützt sein.	Security
7	Die aufgezeichneten Messwerte müssen unverändert persistiert werden. Eventuelle Faktoren oder Filter müssen zusätzlich zu den Rohdaten abgelegt werden.	Functionality

Tabelle 2 Nichtfunktionale Anforderungen des Flux-Coordinator

4.6 Mockups

Zur Visualisierung der Anforderungen und zur einfacheren Kommunikation mit dem Kunden und dem Betreuer wurden Mockups zu allen Ansichten erstellt. Nachfolgend sind zur Übersicht die wichtigsten Ansichten aufgeführt. Die Mockups stellen nur eine frühe Version des Frontends dar und stimmen zum Teil nicht mehr genau mit den implementierten Sichten überein.

Das Frontend wurde von Beginn weg als Webapplikation geplant, um den Anforderungen gerecht zu werden. Detaillierte Analysen der Technologie-Anforderungen und -Evaluation des Frontends werden im Kapitel 6.3.1 *Flux-Frontend* der Architektur und im Kapitel 7.1 *Flux-Frontend* der Realisierung durchgeführt.

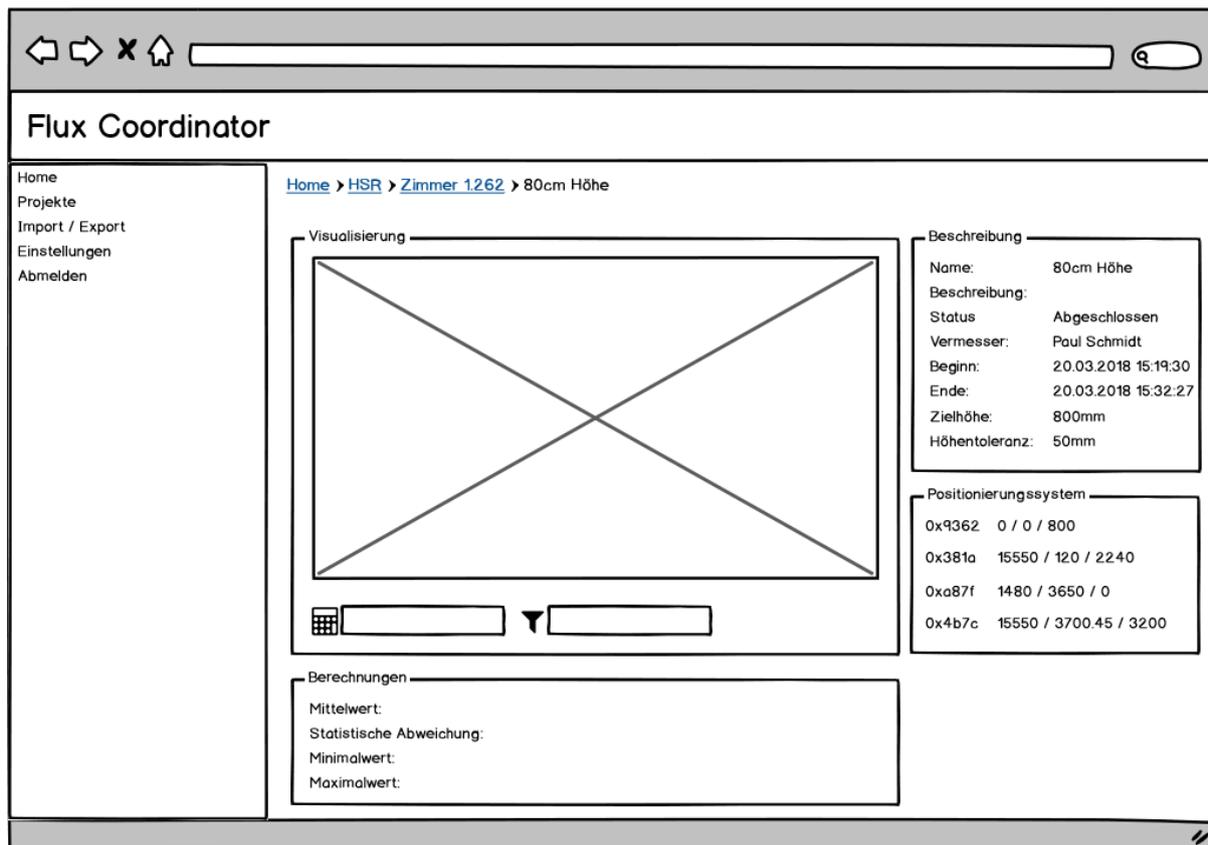


Abbildung 2 Mockup der Detailansicht einer Messung

Die Detailansicht einer Messung gemäss Abbildung 2 stellt den Kern der Anwendung, die Visualisierung der Messwerte, dar. Die genaue Visualisierung kann im Mockup schlecht dargestellt werden. An dieser Stelle ist auf das Kapitel 5.1 *Visualisierung der Messwerte* verwiesen.

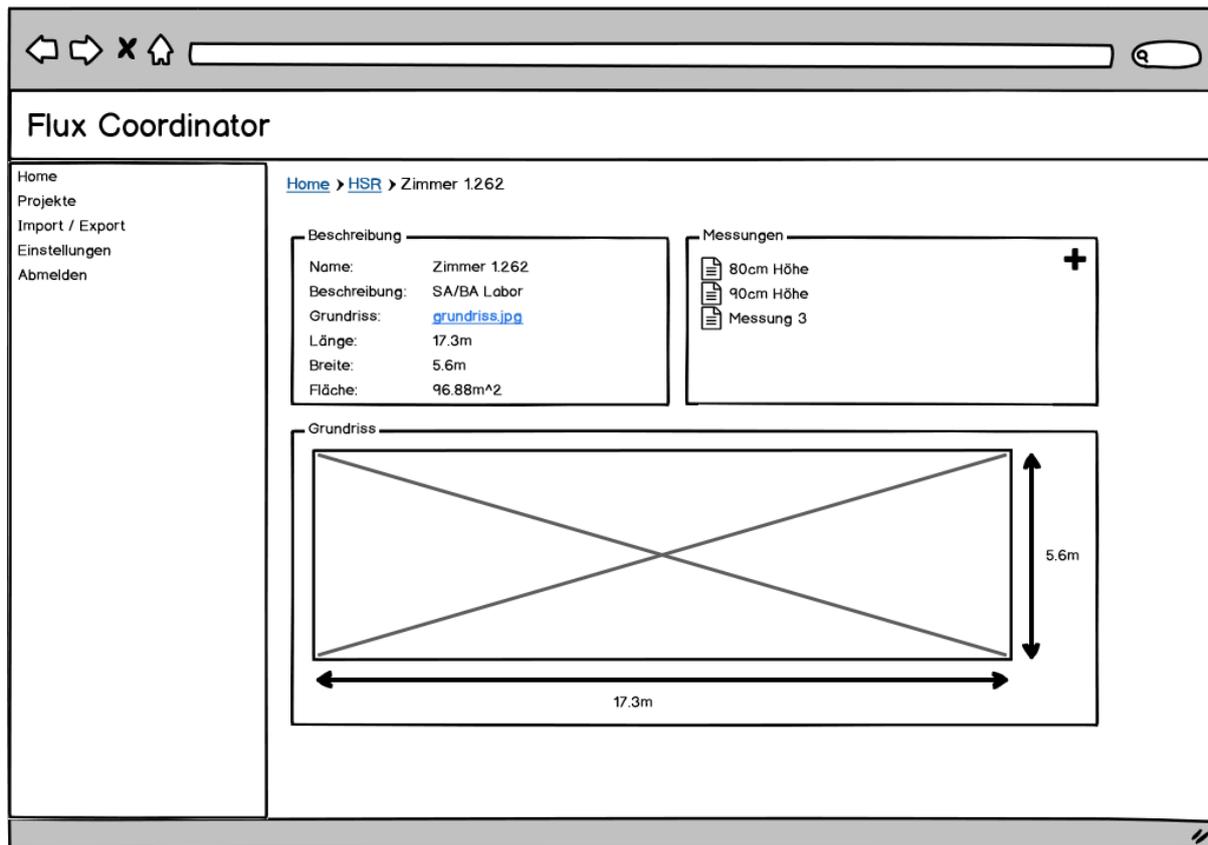


Abbildung 3 Mockup der Detailansicht eines Raumes

Der Raum ist einer Messung übergeordnet und besitzt wie in Abbildung 3 zu erkennen eine eigene Ansicht mit den Metadaten, dem Gebäudeplan sowie einer Liste aller durchgeführten Messungen. Im Gespräch mit dem Auftraggeber wurde klar, dass diese Ansicht überflüssig ist und die Informationen in die Ansicht der Messung integriert werden können. So kommt der Benutzer schneller zu seinem eigentlichen Ziel: Die Visualisierung einer Messung.

5 Domainanalyse

In der Domainanalyse werden Hintergrundinformationen zur Problemdomäne recherchiert. Es müssen ausreichend Informationen gesammelt werden, um das Problem zu verstehen und ist eine Voraussetzung, um im weiteren Projektverlauf gute Entscheidungen treffen zu können. Die Domäne bedeutet in diesem Fall das allgemeine Geschäfts- oder Technologiefeld, in dem der Kunde die Software einsetzen wird.

5.1 Visualisierung der Messwerte

Für die in den funktionalen Anforderungen genannte Visualisierung der Messwerte soll eine geeignete Darstellung analysiert werden. Als Hauptziel sollen die Zusammenhänge der einzelnen Messwerte, wie beispielsweise Anhäufungen von tieferen Lux-Werten (dunkle Stellen im Raum), schnell und einfach vom Betrachter erkannt werden. Zudem soll das System eine Aussage über die aktuelle Messabdeckung machen können.

Im Gespräch mit dem Auftraggeber wurde eine Heatmap-Visualisierung, in Anlehnung an die Darstellung einer Lichtsimulation in Relux, angedacht. Abbildung 4 zeigt ein solches Beispiel einer Lichtsimulation über einem zuvor definierten Gebäudeplan. Die verschiedenen Farben stehen für einzelne Helligkeitskategorien, die in der Legende im unteren Bereich festgelegt sind. Es ist im Beispiel gut zu erkennen, dass drei helle Bahnen durch den Raum führen und die Ränder und Ecken dunkler sind als der restliche Raum.

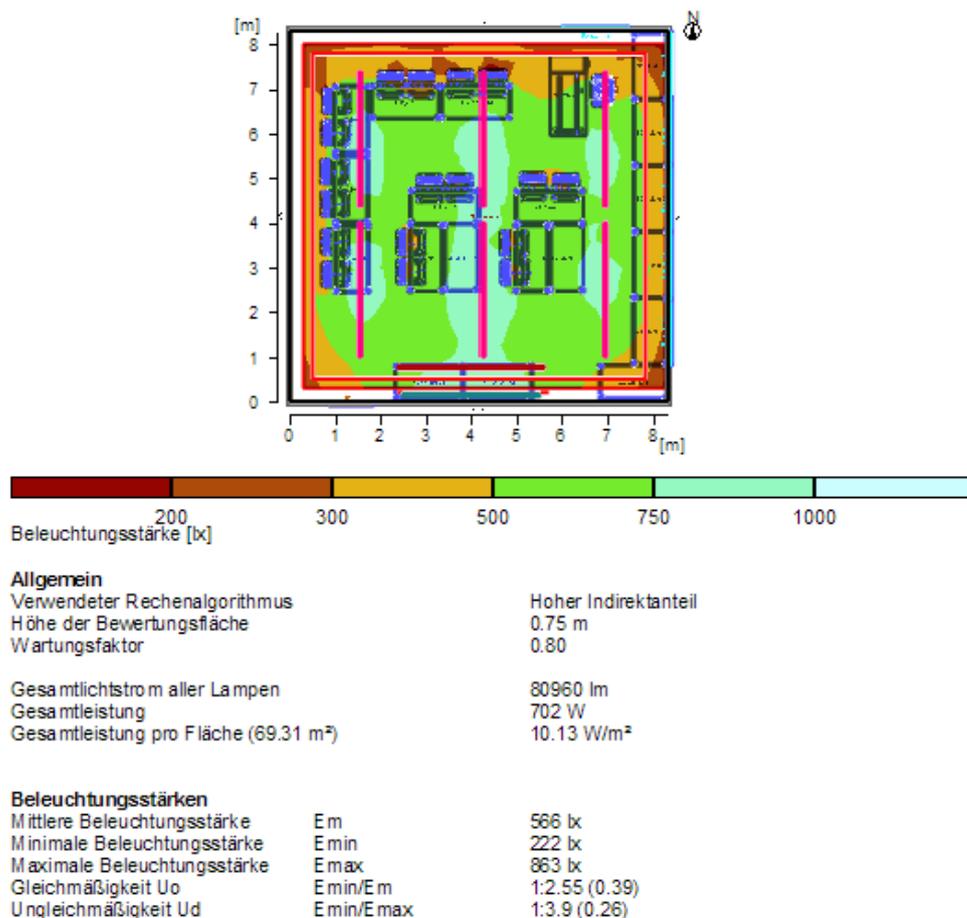


Abbildung 4 Screenshot einer Lichtsimulation in Relux als Visualisierungsbeispiel

5.2 Domain-Modell

Das nachfolgende Domain-Modell in Abbildung 5 zeigt die wesentlichen konzeptionellen Klassen und ihre Zusammenhänge. Es soll einen Überblick über die Problemdomäne schaffen.

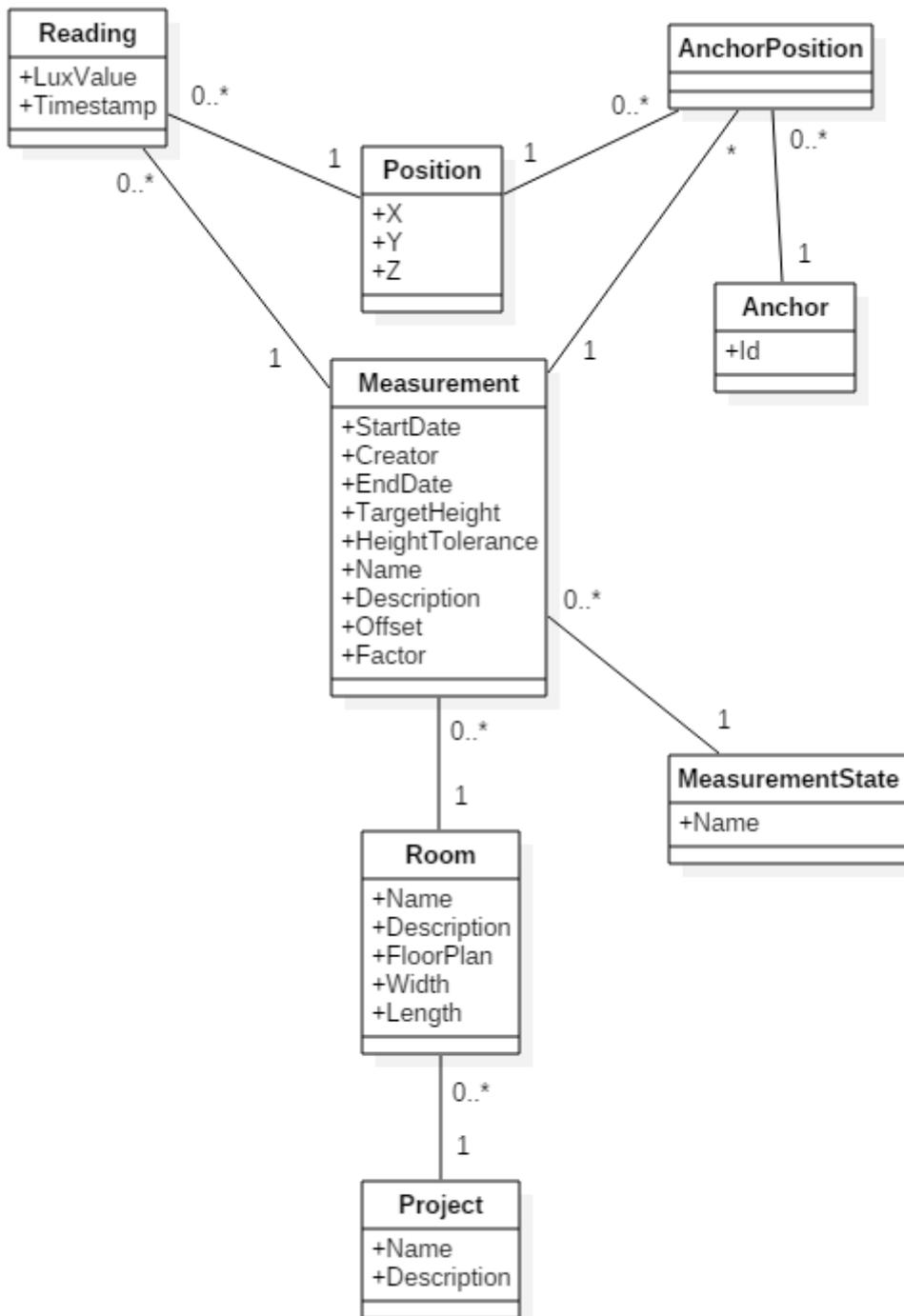


Abbildung 5 Domainmodell des Flux-Coordinator Systems

Nachfolgend sind einige Klassen und Beziehungen des Domainmodells genauer beschrieben:

Auf den ersten Blick ist das Attribut *TargetHeight* der Klasse *Measurement* identisch mit dem *Z*-Attribut der Klasse *Position*. *TargetHeight* muss jedoch zu Beginn einer Messung definiert werden und beschreibt somit die Soll-Höhe der auszuführenden Messung. Der *Z*-Wert beschreibt hingegen den effektiv von der Positionierungssoftware gemessenen Wert.

Das Attribut *HeightTolerance* definiert die Toleranz für Abweichungen von der gewünschten Messhöhe (*TargetHeight*). Dieser Wert muss bei unterschiedlichen Traversierungs-Hilfsmitteln gegebenenfalls angepasst werden, da nicht immer dieselbe Präzision erreicht werden kann. Eine zu kleine Toleranz bedeutet das Wegwerfen vieler Messwerte und würde die Kartierung des Raumes verlangsamen. Eine zu grosse Toleranz ergibt Messwerte, die sich in der aufgenommenen Höhe stark unterscheiden. Dies könnte die Aussagekraft der Messung verschlechtern.

Die Beziehung zwischen *Measurement* und *AnchorPosition* definiert für eine Messung beliebig viele Anchors des Positionierungssystems. Laut Pozyx, dem Hersteller des Systems, sind mit entsprechender Programmierung unbegrenzt viele Anchors möglich [4].

Um eine Messung auf dem zugehörigen Gebäudeplan korrekt anzuzeigen, muss das Koordinatensystem der Messwerte mit dem Bild des Gebäudeplans übereinstimmen. Dafür wird mit den Werten der Feldern *Offset* und *Factor* der Messung eine Transformation durchgeführt.

Ubiquitous Language

Nachfolgend sind in Tabelle 3 die wichtigsten Begriffe der Problemdomäne für den Kontext dieser Arbeit definiert. Dies ist ein bewährtes Vorgehen im Domain-Driven Design (DDD) [5].

Besonders hervorzuheben sind die Begriffe *Measurement* und *Reading*, da sie schnell verwechselt werden können aber der Unterschied sehr wichtig im Rahmen dieser Arbeit ist.

Begriff	Erklärung
Project	Logische Gruppierung von Messungen (<i>Measurement</i>) und deren Räumen (<i>Room</i>) die zu einem gemeinsamen Auftrag gehören
Room	Zu vermessender Raum oder Bereich eines Raumes innerhalb eines Gebäudes
Measurement	Einzelne Messdurchführung innerhalb eines Raumes (<i>Room</i>) mit beliebig vielen Messwerten (<i>Readings</i>)
Reading	Einzelner Messwert als Kombination aus Helligkeitswert in Lux und relativer Position innerhalb des Raumes als kartesische Koordinaten
Anchor	Referenzpunkt des Positionierungssystems innerhalb des Raumes
Floor Plan	Der Grundriss des zu vermessenden Raumes.

Tabelle 3 Definition der Ubiquitous Language

5.3 Lösungsentwurf

Aus den Vorgaben der Aufgabenstellung und der Anforderungsanalyse sowie den Erkenntnissen aus der Domainanalyse lässt sich für das System Flux-Coordinator die High-Level Darstellung in Abbildung 6 skizzieren.

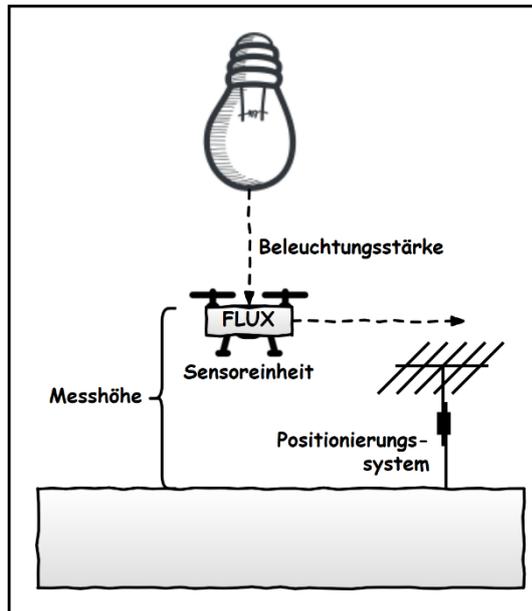


Abbildung 6 High-Level Skizze des Flux-Coordinator Systems

6 Architektur

Die meisten der nachfolgenden Architekturdiagramme sind dem C4 Model von Simon Brown [6] nachempfunden. Dieses soll es Softwareentwicklern vereinfachen, die Funktionsweise eines Softwaresystems zu beschreiben sowie die Lücke zwischen der Software Architektur und dem Programmcode minimieren. Das Systemkontextdiagramm aus Kapitel 4.1 *Systemkontext* entspricht dabei dem ersten «C» (Context).

Die Anforderungen an die Architektur ergeben sich zum einen aus der Aufgabenstellung und zum anderen aus den im Bericht festgehaltenen Projekteinschränkungen aus Kapitel 3.5 *Einschränkungen* sowie den nicht funktionalen Anforderungen aus Kapitel 4.5 *Nicht funktionale Anforderungen*.

6.1 Ziele der Architektur

Mit folgender Architektur sollen von zwei unabhängigen Sensoren aufgezeichnete Licht- und Positionswerte kombiniert und an einen Server übertragen werden. Anschliessend sollen die Messwerte für den Benutzer visualisiert und zum Exportieren angeboten werden.

Die Kommunikation mit dem Server soll sowohl von den Sensoren (Messdurchführung) als auch von der Benutzerschnittstelle (Betrachtung der Visualisierung) initiiert werden können. Zudem sollen diese beiden Kommunikationsabläufe komplett unabhängig voneinander funktionieren. Bei Bedarf soll auch ein Push-Mechanismus vom Server zu den Clients möglich sein.

6.2 Einschränkungen

Das Indoor-Lokalisierungssystem zur Bestimmung der Positionswerte wurde bereits im Vorfeld dieser Arbeit zusammen mit dem betreuenden Dozenten evaluiert und muss in die Architektur integriert werden. Als Lösung wurde folgende Technologie bestimmt: *Pozyx UWB - Indoor Positionierung System*⁵.

Der zu verwendende Lichtsensor ist ebenfalls vorgegeben. Vom Auftraggeber wurde folgender Sensor bestimmt: *TCS3430 Tristimulus Color Sensor*⁶.

⁵ Bestellt wurde das «Pozyx Ready to Localize» Set mit 4 Anchors: <https://www.pozyx.io/store/detail/2>

⁶ <https://ams.com/TCS3430>

6.3 Container Aufteilung

In Abbildung 7 wird das System Flux-Coordinator in einzelne Container zerlegt. Container sind das zweite «C» des C4 Model und beschreiben logische Behältnisse, die Code oder Daten enthalten.

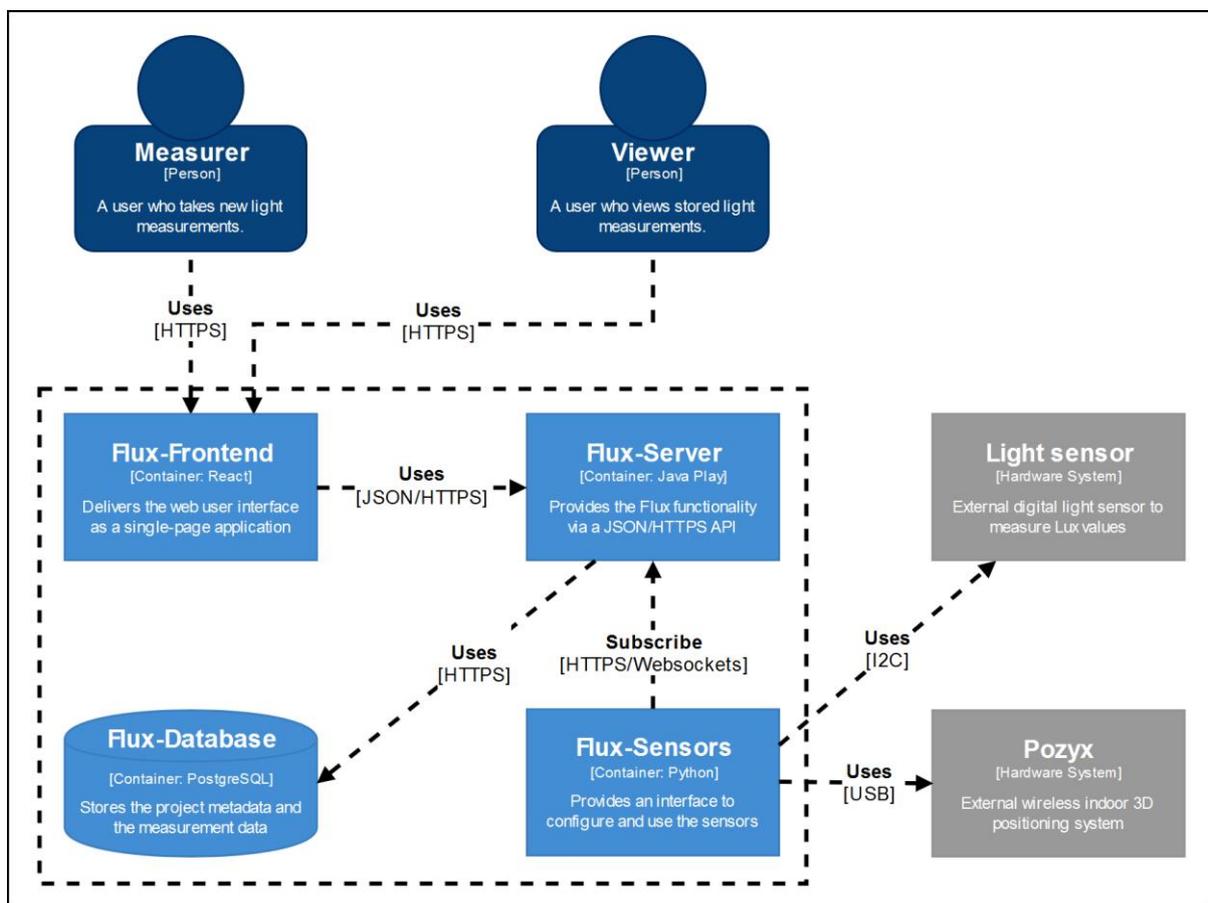


Abbildung 7 Container Diagramm des Flux-Coordinator

Die Architektur soll so aufgebaut werden, dass das System auch in verschiedenen Situationen optimal eingesetzt werden kann. Es sollte dafür jedoch nicht komplexer werden als nötig, damit die Bereitstellung, Administration und Bedienung des Systems nicht darunter leiden.

Die folgenden drei Situationen sind in den Anforderungen definiert oder aus Gesprächen mit dem Auftraggeber und in eigenen Versuchen entstanden:

- Eine Messdurchführung beim Kunden muss komplett offline durchgeführt werden können und darf nicht auf Services aus dem Internet angewiesen sein. Dabei steuert der Vermesser die Sensoreinheit und sieht die gesammelten Messwerte in Echtzeit in einer Visualisierung.
- Bereits abgeschlossene Messungen können auch ohne eingeschaltete Sensoreinheit und ohne Installation von zusätzlicher Software unterwegs auf einem Mobilgerät betrachtet werden.
- Das System kann auch von mehreren Benutzern gleichzeitig auf Büro-PCs eingesetzt werden, um neuen Messungen zu erstellen oder bereits abgeschlossene Messungen zu betrachten. Die gespeicherten Daten können bei Bedarf von jedem PC im selben Netzwerk exportiert werden.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird ein verteiltes Softwaresystem aus verschiedenen, unabhängigen Containern entworfen. Nachfolgend sind die vier Container und ihre Aufgaben genauer beschrieben. Dem Namen wird jeweils das Präfix «Flux» vorangestellt, um zu verdeutlichen, dass damit ein Container innerhalb des Systems Flux-Coordinator gemeint ist.

6.3.1 Flux-Frontend

Die Hauptaufgabe des Flux-Frontend ist das Visualisieren der Messwerte, um dem Benutzer eine optimale Auswertung zu erlauben.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an den Container:

- Bereitstellung einer geeigneten Visualisierung der Messwerte
- Automatische Aktualisierung bei neuen Messwerten
- Bedienung der Applikation durch den Benutzer
 - Login
 - Starten und Stoppen von Messungen
 - Import und Export von Messungen
 - CRUD Funktionalitäten
 - Filtern von Messwerten und Feineinstellung der Visualisierung

Als Technologie wird ein modernes Frontend-Framework, wie beispielsweise Angular⁷ oder React⁸ in Betracht gezogen. Dadurch könnte von bereits bestehenden Framework-Features profitiert werden und der Fokus bei der Entwicklung auf die Kernaufgabe des User Interfaces, der Visualisierung der Messwerte, gelegt werden. Bei der Evaluation des Frameworks sollte daher speziell auf die Möglichkeiten der Datenvisualisierung geachtet werden.

6.3.2 Flux-Server

Der Flux-Server stellt den Mittelpunkt des Systems dar, an dem die Daten zusammenkommen und auch wieder verteilt werden. Seine Hauptaufgabe ist somit die Vermittlung und Bereitstellung der Messdaten für die anderen Container.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an den Container:

- Bietet eine Schnittstelle für Flux-Frontend
 - zur Abfrage von Messwerten
 - zur Benachrichtigung bei neuen Messwerten
 - zur Bedienung der Applikation (siehe Anforderungen von Flux-Frontend)
- Bietet eine Schnittstelle für Flux-Sensors
 - zum Starten und Stoppen der Sensoren
 - zur Übergabe von neuen Messwerten
- Sendet die zu persistierenden Daten an die Datenbank
- Gibt in der Datenbank gespeicherte Daten zurück

Für den Flux-Server ist als Technologie ein modernes Backend Web-Framework, wie Spring, Play Framework oder Express angedacht. Der Backend Server hat in diesem Projekt nebst den Speichern und Bereitstellen der Daten keine speziellen Berechnungen, wie beispielsweise das Filtern

⁷ <https://angular.io/>

⁸ <https://reactjs.org/>

von Messwerten, zu implementieren. Es sollte also ein Framework evaluiert werden, dass im Umgang mit Daten stark ist und die Standardfunktionalität eines Web Backends bereits erfüllt.

6.3.3 Flux-Sensors

Dies ist die Sensoreinheit, die die beiden Sensoren für die Licht- und Positionsbestimmung verbindet. Die Hauptaufgabe ist das Auslesen, Synchronisieren und Übermitteln der Sensordaten. Zum Synchronisieren gehört auch dazu, dass zu jeder Lichtmessung die jeweilige Position und die aktuelle Zeit hinzugefügt wird. Die Technologie wird in diesem Container massgeblich von der verwendeten Hardware bestimmt.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an den Container:

- Registriert sich beim Flux-Server und wartet darauf, dass eine Messung gestartet wird
- Kommuniziert mit den beiden Sensoren und fragt deren Messwerte ab
- Synchronisiert die Messwerte und fügt die aktuelle Zeit hinzu
- Sendet die kombinierten Messwerte der Sensoren an den Flux-Server
- Beendet den Messvorgang, sobald der Flux-Server dies signalisiert

6.3.4 Flux-Database

Die Datenbank ist sicherlich der simpelste Container. Seine Hauptaufgabe ist das Persistieren der Messdaten.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an den Container:

- Persistiert Messwerte und dazugehörige Metadaten, wie Projekt-, Raum- und Messdetails
- Stellt die persistierten Daten auf Anfrage des Flux-Servers zur Verfügung

6.4 Deployment

Bei der bisherigen Planung des Systems wurde stets auf eine tiefe Kopplung der einzelnen Container Wert gelegt, um den Einschränkungen und Anforderungen des Projekts gerecht zu werden. Nachfolgend sind zwei Deployment-Szenarien abgebildet, in denen der Flux-Coordinator am ehesten zum Einsatz kommen wird. Durch die Unabhängigkeit der einzelnen Container sind jedoch diverse weitere Variationen möglich. So lässt sich das System in Zukunft optimal erweitern.

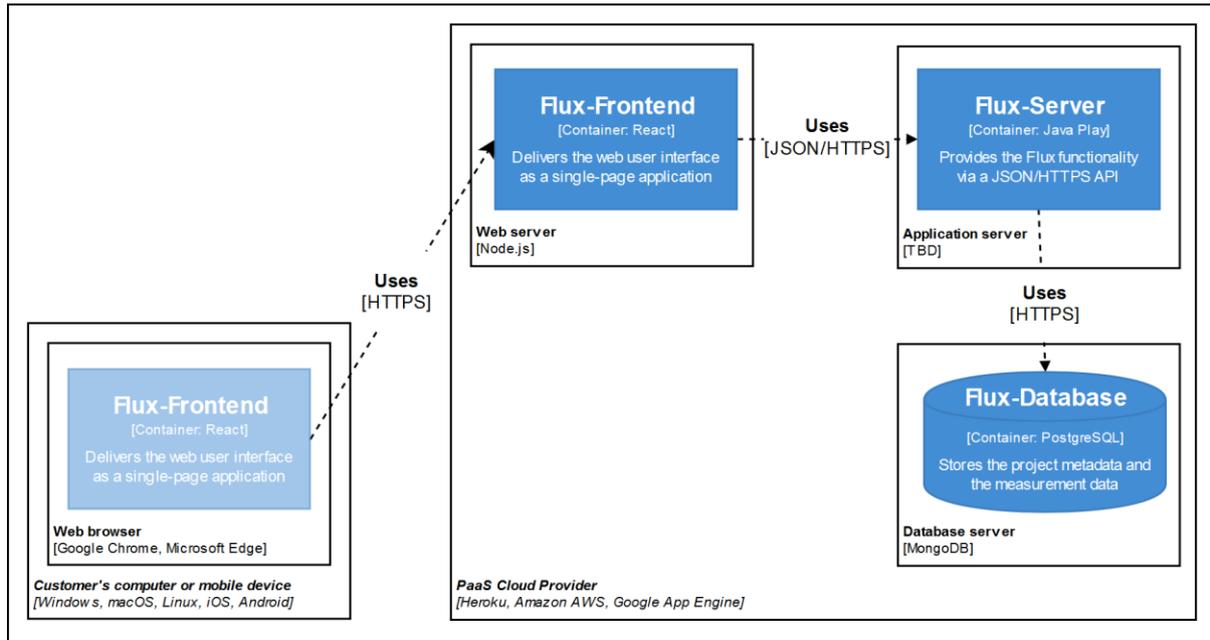


Abbildung 8 Deployment Diagramm mit PaaS Cloud Provider

Die erste Variante in Abbildung 8 zeigt eine mögliche Anwendung für den Einsatz im Büro. Die einzelnen Container werden auf einem PaaS Cloud Provider ausgeführt und die Sensorkomponente wurde ganz weggelassen. So können bereits erstellte Messungen betrachtet und exportiert werden.

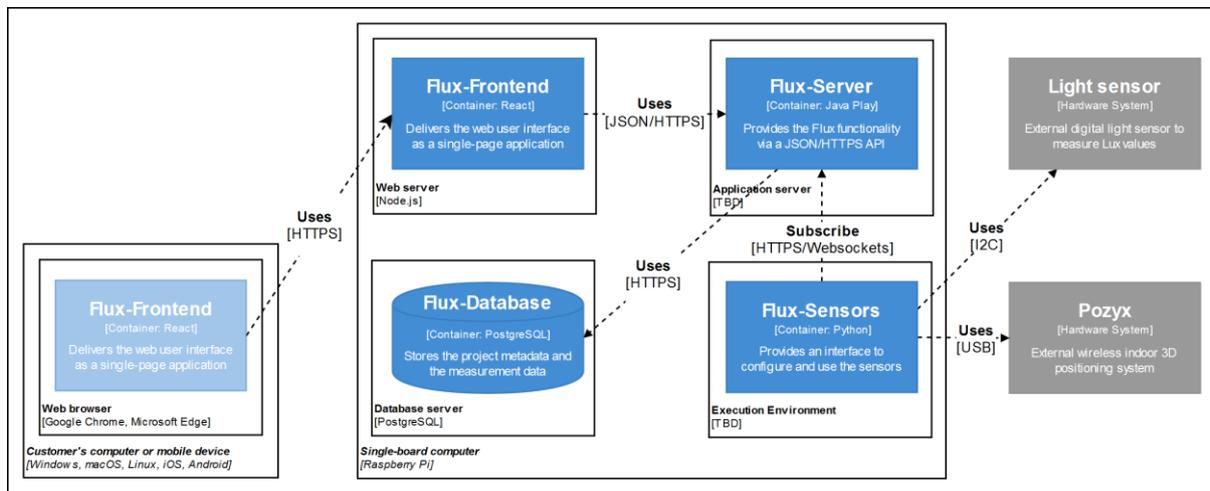


Abbildung 9 Deployment Diagramm mit Single-board Computer

Die zweite Variante in Abbildung 9 zeigt eine mögliche Anwendung für die Durchführung von Messungen bei einem Kunden. Die einzelnen Container werden auf einem Single-board Computer, wie beispielsweise dem Raspberry Pi ausgeführt, wo auch die Sensoren per USB und I2C angeschlossen sind. So können auch ohne Verbindung zum Internet neue Messungen erstellt und bereits abgelegte Messungen betrachtet werden.

7 Realisierung

Das Kapitel Realisierung beschreibt und begründet wichtige Entscheidungen, die während der Entwicklung des Flux-Coordinator vom Projektteam getroffen wurden. Es ist gegliedert in die einzelnen Container, die in der Architektur vorgestellt wurden, und zeigt am Ende auch einige Herausforderungen, welche die Implementierung entscheidend beeinflussten.

Die Unterkapitel zu den einzelnen Containern beginnen jeweils mit einer kurzen Zusammenfassung der darauffolgenden Technologie- und Implementierungsentscheidungen.

7.1 Flux-Frontend

Das Frontend ist die Schnittstelle für den Benutzer des Flux Coordinator Systems und ist für das Rendern der von Flux-Server gelieferten Daten zuständig. Als Haupttechnologie wurde für ds Frontend React verwendet. Durch das Lokale Rendern auf dem Client, lässt sich die Reaktionszeit des UIs vermindern, was zu einem besseren Anwendererlebnis führt.

7.1.1 Technologieevaluation

Um ein Anwendererlebnis ähnlich dem einer Desktop Anwendung zu gewährleisten und gleichzeitig Plattformunabhängig zu bleiben, wurde schon früh der Einsatz eines modernen Frontend-Frameworks entschieden. Es kamen drei Technologien in Frage: React, Angular und VueJS. Ausschlaggebend für den Entscheid war die Qualität der Dokumentation, die Verbreitung und die voraussichtlich benötigte Einarbeitungszeit in das Framework.

React

Im Gegensatz zu den anderen Kandidaten (im Speziellen Angular), positioniert sich React als Library und nicht als Framework [7]. Das Hauptargument dafür ist, dass React sich hauptsächlich mit dem User Interface befasst und das Architekturdesign weitgehend dem Entwickler überlässt. Dies kann zugleich Vor- und Nachteil sein, da die Erfahrung des Entwicklungsteams ausschlaggebend ist, um eine funktionierende und längerfristig skalierende Architektur zu entwerfen. Die Lernkurve – ähnlich wie die Einarbeitungszeit – ist durch die wenigen Einschränkungen und Vorgaben der Library viel geringer, als bei einem Framework. Der Umfang des APIs von React ist überschaubar und relativ einfach zu verstehen. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die nicht vorhandene Trennung von UI-Komponenten und Business-Logik. Das gesetzte Ziel der Library ist eine hohe Kohäsion von UI und der dazugehörigen, spezialisierten Logik [8].

React kann mit Vanilla-JavaScript verwendet werden, eine Verwendung von einer Typisierungstechnologie wird jedoch empfohlen. Facebook hat als Entwickler von React «Flow» als Alternative zu Microsoft's TypeScript entwickelt. Es ist zu erwarten, dass die Flow Typisierungssprache stärker unterstützt wird, als TypeScript, wobei die Kritik an Flow (zum Teil berechtigt) stark ist. Viele Libraries, wie die beliebte Material-UI Library haben Flow den Rücken gekehrt und setzen TypeScript ein [9]. Eine breite Unterstützung von Flow ist nicht gegeben, da die Community stark gespalten ist.

React bietet eine Starthilfe mit dem Namen «create-react-app» für neue Projekte. Es handelt sich hierbei um eine Dependency, die viele Befehle bereitstellt und die komplizierten Build-Einstellungen einer React Anwendung abstrahiert. Speziell bei den Webpack Einstellungen werden dabei viele best-practice Einstellungen gesetzt, die für die meisten Projekte funktionieren. Leider lässt sich durch die Abstraktion das Tooling nicht mehr auf eine einfache Weise auf spezifische Anforderungen anpassen. Auch können die Dependencies nicht mehr beliebig aktualisiert werden, da diese zum Teil von create-react-app verwaltet werden. Falls sich eine der gewählten Einstellungen

aus dem create-react-app Projekt als inkompatibel mit den Anforderungen des Projektes herausstellt, muss oft ein «Eject» durchgeführt werden. Ein Eject bedeutet, dass sich das create-react-app Tool aus dem Projekt löscht und dabei die komplette Konfiguration offenlegt. Das Entwickler-team muss sich ab diesem Zeitpunkt selber um die Konfiguration der Anwendung bemühen, was den Komplexitätsgrad der Anwendung enorm erhöht. Ein Eject ist nicht umkehrbar und sollte deshalb so weit, wie möglich vermieden werden. Eine Anleitung mit Workarounds zu häufig auftretenden Problemen mit create-react-app ist auf dem GitHub Repository von create-react-app verfügbar [10].

Angular

Das zweitgrösste Frontend-Framework nach React ist Angular [11]. Das Framework wird wie die anderen Kandidaten ebenfalls Open Source entwickelt. Geführt wird das Projekt unter Google's Aufsicht. Angular sollte nicht mit dem Vorgänger AngularJS verwechselt werden, denn ausser dem Namen und dem Prinzip der Templates haben diese zwei Frameworks nicht viel gemeinsam. Verglichen mit React bietet Angular ein komplettes Framework mit Workflow und einer etablierten Architektur. Der einzelne Entwickler ist hier viel stärker an die Vorgaben des Frameworks gebunden und hat somit weniger Spielraum. Dies ist in diesem Fall nur selten ein Nachteil, denn das Framework bietet eine solide und mittlerweile geprüfte Architektur, die für die allermeisten Fälle genügt.

Angular wurde komplett in TypeScript entwickelt [12] und empfiehlt auch die Verwendung von TypeScript für Angular Anwendungen [13]. Diese Typisierungstechnologie scheint sich dabei im Gegensatz zu Flow in React bei den meisten Entwicklern durchgesetzt zu haben. Im Zweifelsfall ist auch eine Verwendung von JavaScript möglich, doch alle Beispiele in der Dokumentation von Angular sind in TypeScript geschrieben.

Die Zielanwendungen von Angular sind primär grosse, komplexe Anwendungen und das Framework bietet dafür eine solide Ausgangslage. Die Komplexität des Frameworks hat eine steile Lernkurve zur Folge. Bevor angefangen werden kann, produktiven Code zu schreiben, sollte ein Entwickler sich ausgiebig mit den Konzepten von Angular auseinandersetzen. Die Architektur der entstehenden Anwendung ist dafür oft sauberer und durchdachter, als ohne ein so strenges Framework.

Durch die AngularCLI wird ein mächtiges Tool geliefert, um die Entwicklung von Angular zu vereinfachen. So können unter Anderem das Erstellen von Projekten und Komponenten mit den Befehlen `ng new` oder `ng generate` automatisiert werden.

VueJS

Dieses Framework stellt eine dritte Alternative zu den bekannteren zwei Frontend Frameworks React und Angular dar. Es ist sehr interessant, dass Vue viele Ähnlichkeiten mit React und mit Angular besitzt [14]. Im Gegensatz zu React und Angular, wird Vue jedoch nicht von grossen Unternehmen unterstützt. Der Erfinder Evan You wurde während seiner Zeit bei Google durch AngularJS inspiriert und entschied sich, die für ihn besten Eigenschaften von AngularJS in einem neuen Framework zu implementieren [15].

Das Ziel des Frameworks ist, schlank und einfach zu lernen zu sein. Die Syntax sieht teilweise der von AngularJS sehr ähnlich. Die Performance ist mit der von React vergleichbar. Eine Typisierungstechnologie ist nicht inbegriffen. Die Entwickler, die Vue verwenden müssen sich bewusst für eine Typisierungstechnologie entscheiden, wenn sie eine einsetzen möchten.

Ähnlich wie Angular bietet Vue eine CLI für das Erstellen von neuen Projekten. Die Einstellungen der eingesetzten Werkzeuge, wie Webpack sind in Vue komplett einstellbar. Ein Ejecten, wie in React ist nicht nötig [16]. Als Alternative für die CLI, gibt es eine graphische Oberfläche für das Erstellen von neuen Projekten. Dieses extensive Tooling zeugt von einer guten Organisation der VueJS Community und vom Potential des Frameworks.

Fazit

Erfahrungen mit Angular im Rahmen des Modules Web Entwicklung und Design 3 haben gezeigt, dass die Lernkurve sehr steil ist im Vergleich zu React. Diese Evaluation unterstützte dieses Argument gegen Angular. Der Zeitaufwand für eine Einarbeitung in Angular hätte dieses Projekt mit einem sehr strengen Zeitplan zu stark aufgehalten.

VueJS mit seiner AngularJS Inspiration, stellt einen guten Mittelweg zwischen dem Template-Orientierten Design einer Angular Anwendung und dem auf JSX aufbauenden Design von React Anwendungen. Das Team konnte mit diesem Framework jedoch noch keine Erfahrungen sammeln, weshalb das Risiko bestand, die Schwächen des Frameworks im Voraus nicht gut genug zu erkennen. Auch ist das Framework zu jung, um einen eindeutigen Trend zu entdecken, wie es mit der Stabilität in Zukunft ausschauen wird.

React hat sich bei der Evaluation durchgesetzt, indem es einen einfacheren Einstieg, als die anderen Kandidaten angeboten hat. Gekoppelt mit agilem Vorgehen, lassen sich mit Hilfe von React schnell Prototypen erstellen und danach erweitern. Falls sich ein Prototyp als Fehlentwicklung herausstellt, kann dieser ohne grosse Änderungen der Architektur gelöscht werden. Mit Angular wäre dies schwieriger, weil die Architektur einen grösseren Teil der Anwendung ausmacht und zusammen mit dem UI wächst. So müssen bei Angular neue Komponenten zum Beispiel über den Dependency Container bereitgestellt werden. Durch die Verwendung von React konnte die benötigte Entwicklungsgeschwindigkeit für das pünktliche Erreichen der Projektziele erreicht werden. Ebenfalls sind die Voraussetzungen für die Weiterentwicklung der Arbeit durch die flachere Lernkurve von React besser, als für eine komplexere Angular Anwendung. Auch die zu diesem Zeitpunkt wesentlich geringere Ausbreitung von VueJS wäre in dieser Hinsicht negativ zu bewerten.

Hinweis: Der grosse Unterschied zwischen klassischen Server-Side Rendering und Frontend-Rendern einer Webseite liegt darin, dass die Webseite bei Frontend-Rendern besser auf Benutzereingaben reagieren kann. Eine Webseite, die im Frontend gerendert wird (auch Single-Page-Application genannt) wird nur einmal geladen. Danach geschieht die gesamte Navigation der Anwendung lokal auf dem Client des Benutzers. Wenn die Anwendung Daten aus einer Schnittstelle lädt, kann diese dem Benutzer angemessenes Feedback geben, zum Beispiel in Form eines Ladebalkens. Bei klassischen Webseiten, würde hier die gesamte Seite neu geladen.

7.1.2 User Experience Framework

Der Erfolg einer Anwendung hängt nicht zuletzt von einer guten User-Experience ab. Dadurch, dass das Frontend von Grund auf neu entwickelt wurde, stand dem Projektteam freie Wahl bezüglich des verwendeten UX-Frameworks. Folgende – zugegebenermaßen zum Teil subjektive – Anforderungen waren für die Auswahl wichtig:

- Das Framework muss einen optisch gutaussehenden Stil anbieten.
- Das Framework sollte für React optimiert sein. Möglicherweise grenzt diese Anforderung viele «style-only» Frameworks, wie Bootstrap aus.
- Die Komponenten des Frameworks müssen heutigen UX-Beispielen folgen. Am besten Designvorgaben von befolgen die sich auf mehreren Plattformen durchgesetzt und geprüft haben (z.B. Material Design).

Im Verlaufe des Projektes kamen zwei UX Frameworks zum Einsatz. Zuerst wurde MaterialUI (Beta) verwendet⁹. Dieses Framework setzt die Material Design Vorgaben von Google spezifisch für React um. Die Verwendung des Frameworks war zwar anfangs angenehm, doch mit der Zeit stellte sich eine Inkompatibilität mit den anderen verwendeten Technologien heraus. Das Framework hat nämlich die Unterstützung der im Flux-Frontend Projekt verwendeten Typisierungstechnologie Flow entfernt [9] und unterstützt nur TypeScript. Da das Framework stark auf Higher-Order-Components setzt (und die Komponenten dadurch stark verschachtelt waren), wurde das Testen von Komponenten ebenfalls stark erschwert. Auch beim Styling setzt das Framework auf neue Technologien, in dem sie die CSS Styles in JavaScript schreiben (JSS). Diese Lösung hat den Vorteil, dass das Styling pro Komponente isoliert wird, jedoch erfordert es in jeder Komponente speziellen Code, um die Stylings einzusetzen. Da das sich das Flux-Frontend Projekt noch in einem jungen Entwicklungsstand befand und erst kleine Prototype erstellt worden waren, wurde entschieden ein anderes UX-Framework einzusetzen, welches weniger Risiken und Komplexität mit sich bringt.

Dieses Framework wurde in Grommet¹⁰ gefunden. Das Framework wird von HP Enterprise Development entwickelt und bietet in Version 1.0 simple React Komponenten in ansprechendem Design. Das Styling wird in klassischem SCSS gehalten und es wird kein spezifisches Typisierungsframework verwendet. Die Dokumentation des Frameworks ist gut ausgebaut und bietet in den meisten Fällen gute Beispiele und Vorlagen für das Einbinden und konfigurieren der React Komponenten. Auch die Schnittstelle des Frameworks ist sauber und simpel gehalten. Die richtige Auswahl des UX-Frameworks lässt sich nicht zuletzt auch deshalb bezeugen, dass nur zwei CSS State-ments für das Frontend geschrieben werden mussten.

⁹ <https://material-ui.com/>

¹⁰ <http://grommet.io/>

7.1.3 Containers und Components

Um den Datenfluss von React Applikationen besser zu ordnen, wird oft das Container-Component Pattern verwendet [17]. Die übergeordneten Container stellen dabei die Daten für die untergeordneten Components bereit. Sie können die Daten aus einer beliebigen Quelle, wie einem REST-Service oder einer Datei holen. Sobald die Daten vorhanden – und möglicherweise bearbeitet – sind, werden sie der untergeordneten Component weitergegeben.

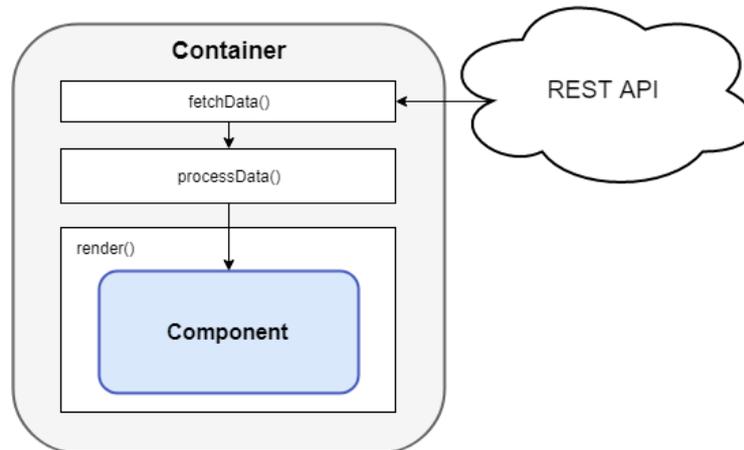


Abbildung 10 Container-Component Pattern Veranschaulichung

Im objektorientierten Sinne verfolgt diese Abstraktion das gleiche Ziel, wie ein Interface. Die Component soll unabhängig davon funktionieren, woher die Daten geholt werden. Meistens sind Components stateless, weshalb sie als in React als einfache Funktion erstellt werden können. In React sind Komponenten, die als Funktion definiert werden «Pure» und können deshalb erhebliche Performance-Gewinne erzielen. Container hingegen speichern die geholten Daten in einem State. Aus diesem Grund müssen Container als Klasse definiert werden. Durch dieses Pattern werden zwei Ziele erreicht: Vereinfachung von Testen durch die Trennung von UI und Business Logik und verhindern von zu grossen und komplizierten Komponenten, was die Weiterentwicklung und die Wartung der Software vereinfacht.

7.1.4 Heatmap Library

Um die Heatmap-Visualisierung nicht von Grund auf selber zu entwickeln, werden nachfolgend einige Libraries und React Erweiterungen analysiert.

Es gibt einige kostenpflichtige Lösungen, wie Vaadin¹¹ oder Highcharts¹² sowie diverse React Erweiterungen, wie react-heatmap-grid¹³ und @vx/heatmap¹⁴. Das Problem dieser Lösungen ist nicht unbedingt der Preis oder die Framework-Abhängigkeit, sondern vor allem die Art der Darstellung: Die meisten gefundenen Heatmap-Visualisierungen sind als Raster aufgebaut, wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Das Referenzbild der Lichtsimulation aus Kapitel 5.1 *Visualisierung der Messwerte* zeigt allerdings fließende Farbübergänge, was eine feinere Auswertung der Messung erlaubt.

33	11	20	12	17	32
38	34	22	39	25	18
25	21	13	26	10	23
14	32	25	24	27	35

Abbildung 11 Beispiel einer Heatmap-Visualisierung als Raster

Weiter gibt es einige Lösungen, die auf die Verwendung mit Karten spezialisiert sind, was für die Arbeit mit Gebäudeplänen vorerst naheliegend erscheint. Die verbreitetsten Vertreter dieser Kategorie sind Google Maps Layer Heatmap¹⁵ und Erweiterungen für den Open Source Dienst Leaflet¹⁶, wie beispielsweise Leaflet.heat¹⁷. Das Problem dieser Lösungen ist allerdings, dass die meisten auf Outdoor-Karten spezialisiert sind. Auch wenn Angebote für Indoor-Karten, wie beispielsweise Google Maps Indoor¹⁸ existieren, ist das Kartenmaterial noch stark begrenzt. Oftmals steht für einen Raum, in dem eine Lichtmessung durchgeführt werden soll, lediglich ein Bild oder PDF des Grundrisses zur Verfügung. Der nötige Aufwand für das Erstellen einer entsprechenden Indoor-Map wäre in diesem Fall zu gross.

Als Lösung wurde schliesslich die JavaScript Library heatmap.js¹⁹ gewählt, da diese nicht auf einem Raster basiert und unabhängig von der Kartendarstellung im Hintergrund ist. Zudem ist die Library sehr schlank und wurde laut Entwickler mit dem Fokus auf eine optimale Performance

¹¹ <https://vaadin.com/components/vaadin-heatmap-chart>

¹² <https://www.highcharts.com/demo/heatmap>

¹³ <https://www.npmjs.com/package/react-heatmap-grid>

¹⁴ <https://www.npmjs.com/package/@vx/heatmap>

¹⁵ <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/examples/layer-heatmap?hl=de>

¹⁶ <https://leafletjs.com/>

¹⁷ <https://github.com/Leaflet/Leaflet.heat>

¹⁸ <https://www.google.com/maps/about/partners/indoormap/>

¹⁹ <https://www.patrick-wied.at/static/heatmapjs/de/>

implementiert. Ausserdem werden diverse Einstellungsmöglichkeiten zur Veränderung der Darstellung unterstützt. So kann beispielsweise der Radius oder der Gradient mit den Farbübergängen verändert werden.

Aufgrund einiger Anpassungen, die für eine korrekte Darstellung nötig waren, wurde die Library auf GitHub «geforked»²⁰ und über als eigenständiges NPM-Package bereitgestellt²¹, um sie besser in die React Anwendung einbinden zu können.

7.1.5 Anzeigen der Heatmap

Das folgende Sequenzdiagramm in Abbildung 12 zeigt den Ablauf für das Darstellen der Heatmap im Flux-Frontend.

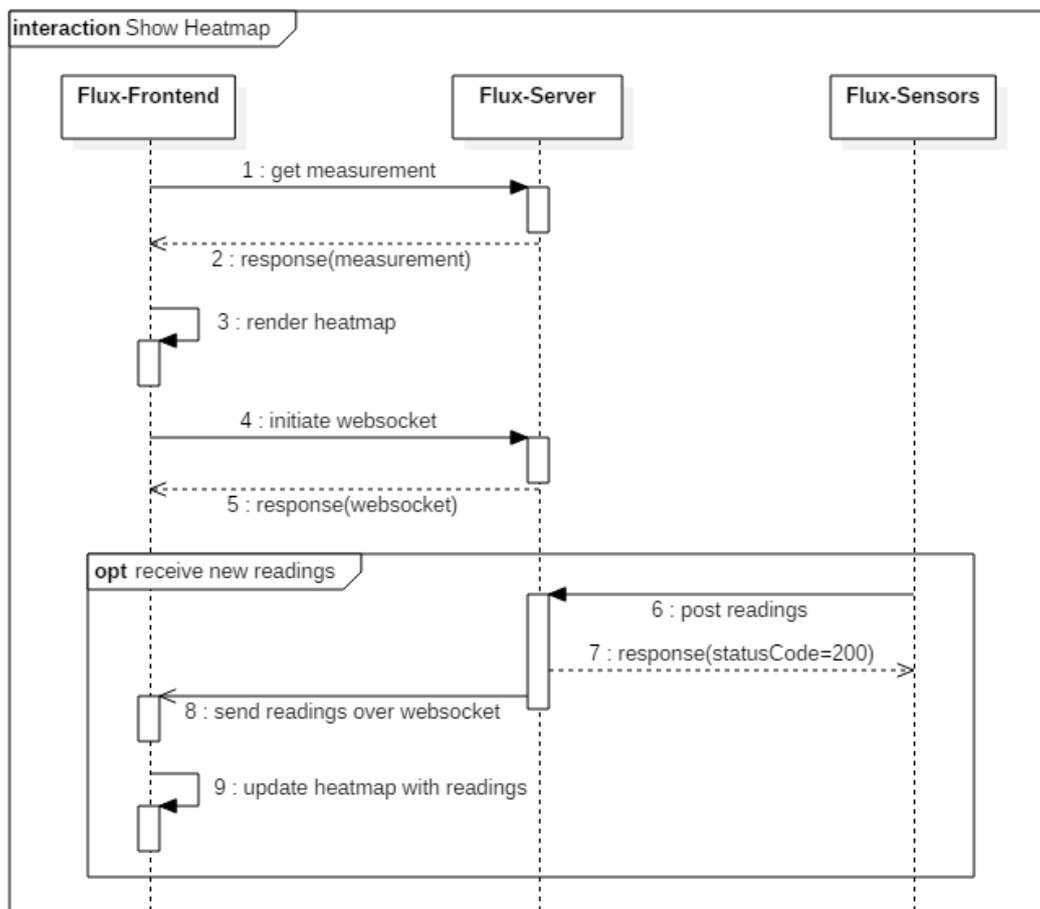


Abbildung 12 Sequenzdiagramm mit der Kommunikation für das Anzeigen der Heatmap

Zu Beginn stellt Flux-Frontend eine Anfrage an Flux-Server, der dann die bereits vorhandenen Messwerte aus der Datenbank lädt. Anschliessend öffnet Flux-Frontend eine WebSocket Verbindung zum Flux-Server. Diese Verbindung ermöglicht das Pushen von neu im Server eintreffenden Messwerten an das Frontend. Der WebSocket muss mit Hilfe eines Keep-Alive Pings offen gehalten werden, bis der Benutzer die Heatmap-Ansicht wieder verlässt oder eine andere Messung auswählt.

²⁰ <https://github.com/Flux-Coordinator/heatmapjs>

²¹ <https://www.npmjs.com/package/@flux-coordinator/heatmapjs>

7.1.6 Transformation der Koordinaten

Alle gemessenen Lux-Werte werden von Flux-Sensor mit Hilfe des Positionierungssystems jeweils durch die relative Position im Raum ergänzt. Dieser Positionswert besteht aus dreidimensionalen Koordinaten und wird in Millimetern angegeben. Um die Koordinaten auch in der Heatmap im User Interface anzuzeigen, müssen sie zuvor in Pixel transformiert werden. Dieser Ablauf ist in Abbildung 13 schematisch dargestellt.

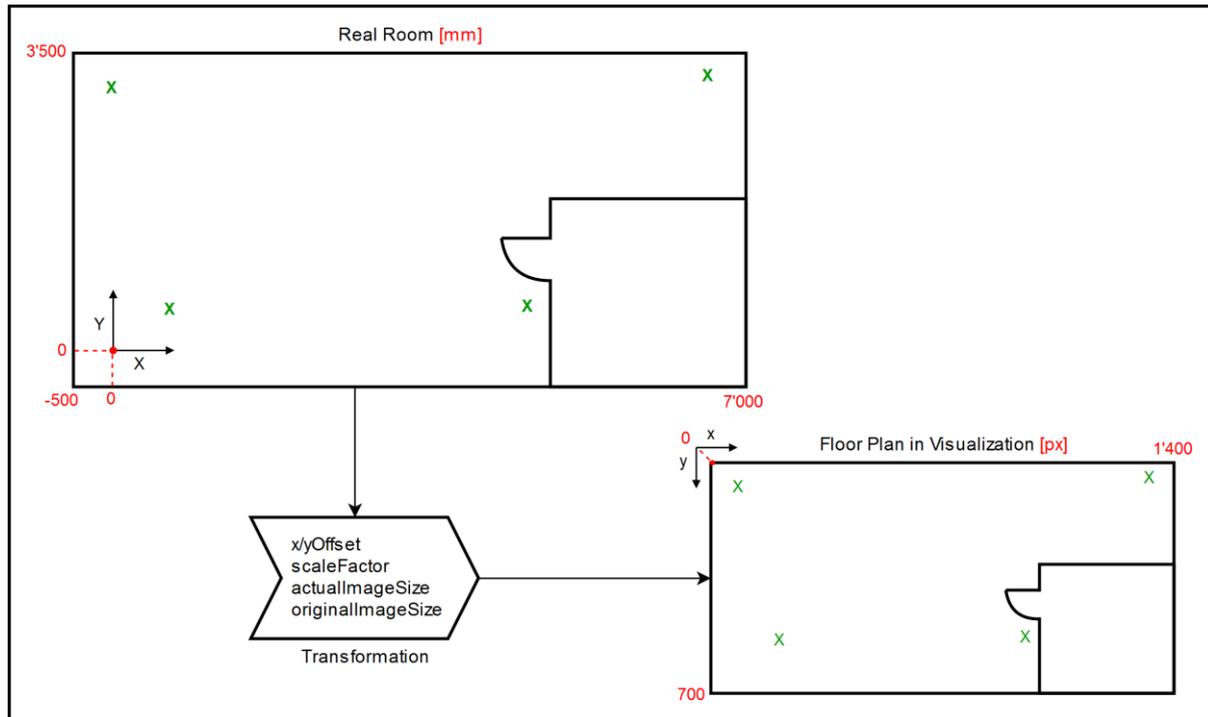


Abbildung 13 Ablauf der Heatmap Transformation im Flux-Frontend

Die aktuelle und die originale Bildgröße werden benötigt, um auf Größenänderungen des User Interfaces, wie beispielsweise das Verkleinern des Browserfensters oder das Kippen von Mobilgeräten reagieren zu können. Die dafür benötigten Werte müssen gar nicht gespeichert werden, sondern können zur Laufzeit aus den Bildinformationen des geladenen Gebäudeplans ausgelesen werden.

Der Skalierungsfaktor (*scaleFactor*) sowie der horizontale und vertikale Versatz (*x/y - Offset*) können im Frontend durch den Benutzer festgelegt werden (siehe Abbildung 14). So kann die Heatmap-Visualisierung auf jeden Gebäudeplan angepasst werden, vorausgesetzt die Seitenverhältnisse des Plans stimmen mit der Realität überein.

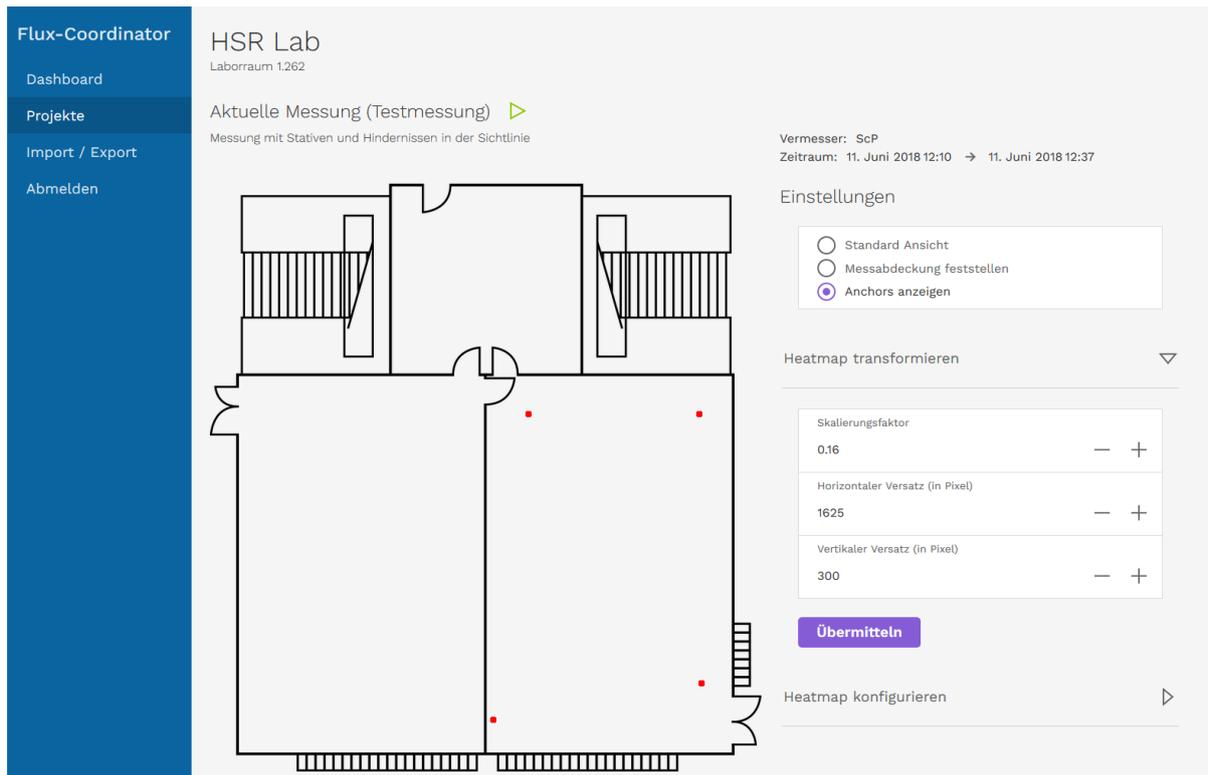


Abbildung 14 Transformieren der Messung auf den Gebäudeplan (Rot: Anchors)

Bei der Transformation wird die Koordinate erst mit dem Skalierungsfaktor multipliziert und mit dem Horizontal- bzw. Vertikalversatz addiert. Diese Summe wird anschliessend noch mit dem Quotienten aus der aktuellen Bildbreite dividiert durch die originale Bildbreite multipliziert:

$$\begin{pmatrix} x_{px} \\ y_{px} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x_{mm} \cdot scaleFactor + x_{offset}) \cdot \frac{imageWidth}{originalImageWidth} \\ imageHeight - \left((y_{mm} \cdot scaleFactor + y_{offset}) \cdot \frac{imageWidth}{originalImageWidth} \right) \end{pmatrix}$$

Der Y-Wert muss zusätzlich noch von der aktuellen Bildhöhe subtrahiert werden, da der Nullpunkt auf Bildern immer in der oberen linken Ecke liegt. Der Z-Wert zur Höhenangabe kann bei der Transformation weggelassen werden, da er sowieso nicht in der Heatmap dargestellt wird.

7.2 Flux-Server

Als Knotenpunkt für alle verteilten Komponenten dient eine Applikationsschnittstelle (API). Diese soll auf einem Application Server bereitgestellt werden und als HTTP-Schnittstelle aufgebaut sein, sodass die Kommunikation zwischen den Komponenten und der Schnittstelle über ein einzelnes Protokoll stattfindet. Als Datenformat soll JSON dienen, da sich dieses Format bei ähnlichen Schnittstellen als geeignet erwiesen hat und sich in der Technologiewelt durchzusetzen scheint. Das Datenformat XML wäre zwar prinzipiell möglich, würde jedoch keinen Vorteil bringen und deutlich mehr Datenverkehr erzeugen. Weitere Vorteile sind die einfache Objektserialisierung von JSON in die vom Flux-Frontend verwendete Programmiersprache JavaScript.

7.2.1 Technologieevaluation

Für den Flux-Server kamen mehrere Technologien in Frage. Die Kandidaten müssen Multi-Plattform fähig sein, gute Möglichkeiten bieten, um Hilfe zu holen, sowie auch einigermaßen etabliert sein. Natürlich spielen die bereits gesammelten Erfahrungen der Teammitglieder ebenfalls eine grosse Rolle bei der Auswahl der Technologie.

In den folgenden Abschnitten werden die Kandidaten vorgestellt, die evaluiert worden sind.

Play Framework

Dieses relativ moderne Framework wurde in der Programmiersprache Scala entwickelt und unterstützt die Entwicklung von Web Applikationen sowohl mit Java, wie auch mit Scala. Ein wichtiges Ziel des Frameworks ist es, die Arbeit der Entwickler schneller und einfacher zu gestalten. Dies ist den Entwicklern des Play Frameworks auch erfolgreich gelungen. Eine Anwendung lässt sich mit sehr wenig Aufwand erstellen und die Entwicklung der eigentlichen Anwendung kann sofort anfangen. Durch den «Convention over Configuration» Ansatz, welcher das Entwicklerteam des Frameworks fährt, muss der Entwickler wenig einstellen und kann sich auf die ganz Entwicklung der Software konzentrieren.

Da das Framework in Scala entwickelt wurde, wird das Scala Build Tool (SBT) verwendet, um den Buildprozess zu automatisieren. SBT ist hochautomatisiert und der Entwickler muss nach dem Starten des Entwicklungsmodus mit dem Befehl `sbt run` (oder über IntelliJ IDEA's Run Button) keine Befehle mehr eingeben. Bei Änderungen des Sourcecodes, wird die Anwendung automatisch kompiliert und ein Browser Refresh durchgeführt.

Nicht zuletzt, weil Play Framework von Lightbend – die Firma der Erfinder von Scala und Akka – entwickelt wird, setzt das Framework im Backend auf die Technologie Akka HTTP und Akka Streams und ist daher komplett asynchron aufgebaut. Da Flux-Server viele I/O handeln muss, ist dies ein wichtiger Pluspunkt in der Auswahl der Technologie für Flux-Server.

Spring Boot

Spring ist wohl das traditionellste Application Framework für die Java Plattform. Es ist bereits 15 Jahre alt und ist die reifste Technologie, die für dieses Projekt evaluiert wurde. Die Spring Boot Variante bietet einen «Convention over Configuration» Ansatz, welcher den normalerweise beträchtlichen Konfigurationsaufwand einer Spring Anwendung enorm vermindert. Die Idee ist – ähnlich wie beim Play Framework –, dass der Entwickler sich auf die Entwicklung konzentrieren kann, anstatt Zeit mit der Konfiguration von Spring zu verbringen. Dieser Entwicklungsansatz wird auch Rapid Application Development (RAD) genannt. Tatsächlich ist es so, dass im Hintergrund das normale Spring Framework verwendet wird, es jedoch mit einer bestmöglichen Konfiguration vorkonfiguriert wird, die sich in der Vergangenheit bewährt hat. Ebenfalls sind bereits

ausgewählte Libraries von Drittanbietern eingebunden. Aus diesem Grund bezeichnet sich Spring Boot auch als «opinionated», also «voreingenommen».

Als Build Tools werden von Spring Boot sowohl Maven (ab 3.2), wie auch Gradle (ab 4.0) unterstützt. Andere Build Tools, wie Ant sind prinzipiell möglich, werden jedoch offiziell nicht unterstützt und werden auch nicht empfohlen. Es wird empfohlen, dass die Build Systeme dependency management unterstützen und Artefakte vom Maven Repository «Maven Central» konsumieren können [18].

Spring Boot befand sich beim Start dieses Projektes gerade in einer transitiven Phase von Version 1.5 zu Version 2.0. Da es sich hierbei um einen Major Release handelt, wäre eine Migration zu Version 2.0 wahrscheinlich mit einem grösseren Aufwand verbunden gewesen. Die grösste Änderung bei diesem Update ist die Verwendung der neuen Spring 5.0 Version.

.NET Core Web API

Dies ist die jüngste Technologie, die evaluiert wurde. .NET Core ist eine neue quelloffene Version des älteren .NET Frameworks. Sie wurde entwickelt, um die neu entstehenden Anforderungen der Cloud zu entsprechen. Im Gegensatz zum .NET Framework, ist .NET Core dabei auf Plattformunabhängigkeit ausgelegt. Hauptentwicklungssprache ist C#. Seit Version 2.0 unterstützt .NET Core die meisten APIs, die das .NET Framework anbietet. Unterstützte Plattformen sind Windows (ab Windows 7), MacOS (ab 10.12) und verschiedene Linux Distributionen [19]. Es werden ebenfalls ARM Architekturen unterstützt, was einen Einsatz auf einem mobilen Gerät (z.B. Raspberry Pi) ermöglicht.

Bei .NET Projekten wird meistens die Entwicklungsumgebung Visual Studio verwendet, wobei bei Core Projekten auch andere Entwicklungsumgebung (z.B. Atom, VSCode) unterstützt werden. Die .NET Core SDK bietet eine CLI, um Prozesse, wie das Erstellen eines Projektes oder das Builden der Anwendung zu automatisieren. Als Package Manager wird das ebenfalls von Microsoft angebotene Tool Nuget verwendet. Dieses Werkzeug bezieht die Dependencies aus einem öffentlichen Nuget Respository.

Der in Frage kommende Projekttyp ist das ASP.NET Core Web API Template und beinhaltet eine einfache Struktur ähnlich der Struktur von Play Framework. Im Vergleich zum Play Framework oder Spring Boot, sind die bereits eingebundenen Module auf ein Minimum gehalten. Durch den stark modularen Aufbau von .NET Core, lassen sich die benötigten Funktionalitäten als Module einfach durch die CLI einbinden. Die vorwiegend verwendete Sprache C# ist im Vergleich zu Java sehr modern.

ExpressJS (NodeJS)

Ein relativ einfach gehaltenes Web-Framework für Node.js. Im Vergleich zu den anderen evaluierten Frameworks, ist Express relativ nüchtern und bietet eine nur kleine API an. Eine Struktur der Anwendung ist nicht wirklich gegeben, weshalb hier die Erfahrung der Entwickler noch stärker zum Tragen kommt, als wenn eine grundlegende Struktur vorgeschlagen wird. Die erstellte Architektur liegt also fast komplett in den Händen der Entwickler.

Der verwendete Package Manager ist normalerweise Node Package Manager (npm), wobei hier eine grosse Menge an Alternativen besteht. Wie bei NodeJS Anwendungen üblich, ist JavaScript die einzig praktikable Entwicklungssprache. Dies bringt natürlich das – für das Team als Nachteil empfundene – Fehlen eines Typsystems für die Flux-Server Komponente. Das Verwenden von TypeScript wird von NodeJS nicht von Haus aus Unterstützt (obwohl es einige Templates gibt, die eine Unterstützung implementieren).

Eine mit den anderen Technologien vergleichbare Performance ist wohl erst mit viel Erfahrung und Aufwand zu erreichen. Das Implementieren einer guten Architektur auf einem ExpressJS Server ist vor allem durch die grosse und offene Auswahl von Middlewares schwieriger zu bewerkstelligen, als bei den anderen Frameworks.

Fazit

Die Evaluation ergab im Entwicklungsteam eine gewisse Richtung mit Technologien, auf die nicht verzichtet werden sollte. Zum einen war ein typisiertes System eine must-have Anforderung für das Backend. Andererseits soll die für das Backend verwendete Technologie sich bereits bei möglichst vielen kommerziellen Anwendungen bewährt haben, da das Projekt für einen produktiven Einsatz gedacht ist. Damit sollten unbekannte Risiken vermieden werden. Eine NodeJS Anwendung fiel wegen diesen zwei Kriterien durch. Es gibt zwar kommerzielle Express Anwendungen mit NodeJS, jedoch hatten diese noch zu wenig Zeit, um sich zu bewähren.

.NET Core ist ebenfalls eine relativ neue Technologie (neuer, als Express), jedoch baut sie auf das bewährte .NET Framework auf. Durch den traditionell starken Einfluss von Microsoft bei kommerziellen Anwendungen, scheint sich .NET Core schnell auch in produktiven Umgebungen durchzusetzen. Dennoch entschied sich das Team gegen .NET Core, da das Framework noch zu jung ist und erst seit .NET Core 2.0 überhaupt eine ähnliche Funktionalität anbieten kann, wie das ältere .NET Framework. Für dieses Projekt kommen nur stabile Frameworks in Frage, weshalb .NET Core durch die Evaluation durchfiel.

Die Auswahl zwischen Spring Boot und Playframework war sehr eng und wahrscheinlich hätten beide Technologien zu einem Erfolg des Projektes geführt. Beide Teammitglieder hatten bereits Erfahrungen mit den jeweiligen Frameworks gesammelt und waren zufrieden. Die Entscheidung fiel schlussendlich auf das Play Framework, weil es ein gutes Verhältnis zwischen einem modernen Framework und Stabilität bietet. Durch den Einsatz von Akka als Technologie im Backend, wurde zudem ein starkes Argument für die Multithreading-Eigenschaften des Frameworks gesetzt, welches sich später durch den Projektverlauf auch bewahrheiten sollte. Weitere Argumente für das Framework waren die einfache Konfiguration, der bequeme Entwicklungsworkflow mit automatisiertem Kompilieren und die zentrale Routing Konfiguration in einer einzelnen Datei.

7.2.2 Kompression der übertragenen Nutzlast

Das Flux-Coordinator System soll auf möglichst vielen Plattformen bereitgestellt werden können. Die einzelnen Komponenten müssen dabei nicht unbedingt auf der gleichen Hardware ausgeführt werden, sondern könnten sehr gut auch bei zwei unterschiedlichen Cloud Anbietern bereitgestellt werden. Auch die Qualität der Netzwerkverbindung zwischen Flux-Frontend und Flux-Server kann variieren. Wenn die Komponenten entfernt von einander sind, oder zum Beispiel über einen Hotspot verbunden sind, kann davon ausgegangen sein, dass die Latenz der Verbindung relativ hoch sein wird. Um die übertragene Nutzlast und damit verbunden auch die Anzahl der Pakete und der benötigten Requests gering zu halten, wurde eine Kompression der Nutzlast evaluiert und später auch eingeführt.

Die Einführung einer Kompression (in diesem Fall mit dem gzip Codec), geht mit einem Performance Impact beim Server und Client einher. In unserem Fall versuchen wir mit dem Server relativ schlank zu bleiben und deshalb ist das Verwenden einer Kompression nicht eine einfache Entscheidung. Es wurden verschiedene Tests durchgeführt, um eine begründete Entscheidung zu fällen.

Vergleich der übertragenen Datenmengen

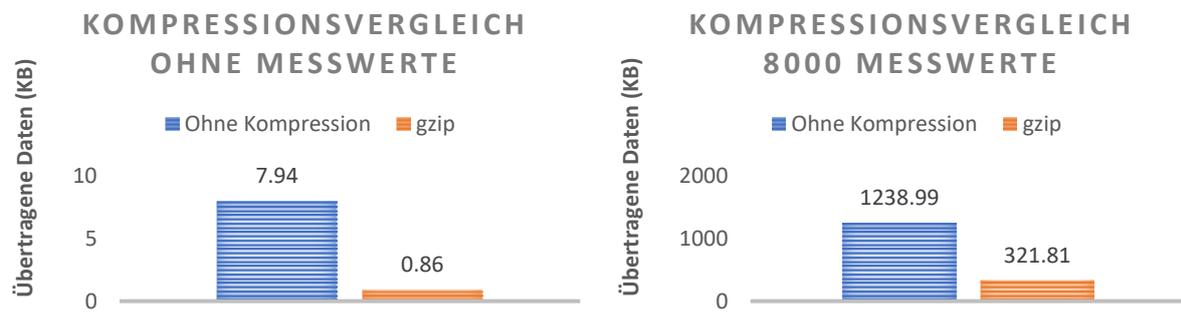


Abbildung 15 Vergleiche der Kompressionen mit und ohne Messwerte

Durch die Verwendung der gzip-Kompression, zeigt sich eine Verminderung der übertragenen Daten ohne Messwerte um bis zu 90%. Mit Messwerten ergibt sich noch eine Kompression auf knapp 25% der ursprünglichen Grösse (siehe Abbildung 15).

Zeitaufwand vor und nach der Kompression

Die Kompression macht zwar einen grossen Unterschied in der Grösse der übertragenen Daten, doch auch im für die Kompression benötigten Rechenaufwand gibt es grosse Unterschiede. Der höhere Rechenaufwand macht sich durch eine längere Reaktionszeit auf Anfragen bemerkbar. Die längeren Antwortzeiten werden erst dann sichtbar, wenn die komprimierte Datenmenge steigt. Bei 8000 übertragenen Messwerten zeigt sich eine Verdopplung der Antwortzeit (siehe Abbildung 16).

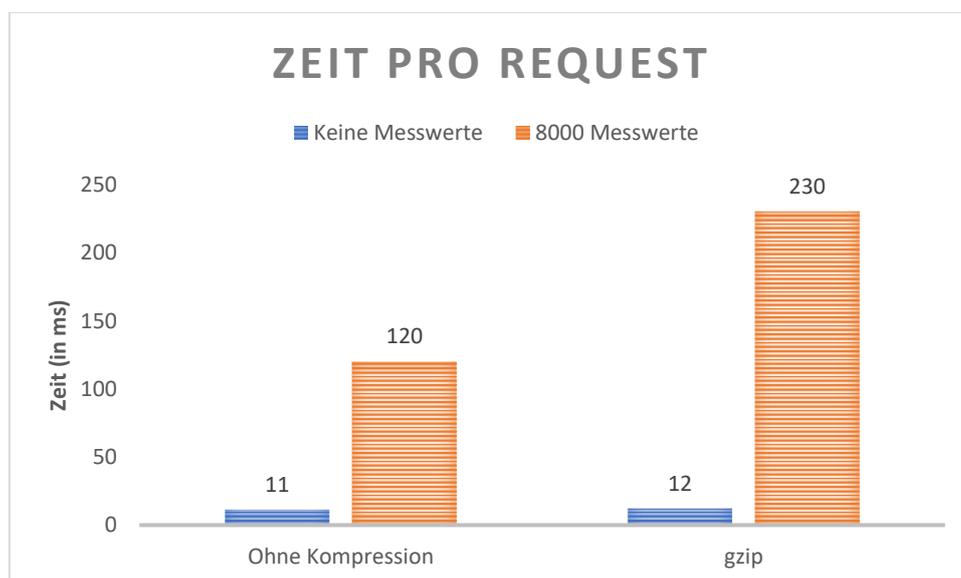


Abbildung 16 Dauer von Requests mit und ohne Kompression

Fazit

Die Evaluation zeigt, dass die Kompression der zu sendenden Daten einen beträchtlich höheren Rechenaufwand nach sich zieht. Dieser wird sich vor allem bei grösseren Datenmengen bemerkbar machen. Dennoch ist anzunehmen, dass die Übertragung der vierfachen Menge an Bytes (8000 Messwerte ohne Kompression, Abbildung 15) über ein drahtloses Netzwerk ein Vielfaches der Zeit aufwenden würde. Bei einer Verbindung über einen Cloud Provider, würde sich die Latenzzeit der Anfrage wiederum um ein Vielfaches verlängern, da die geographische Distanz die Latenz

amplifiziert. Bei kleinen Datenmengen ist der Unterschied mit, oder ohne Kompression verschwindend klein und macht keinen praktischen Unterschied.

Ein Einsatz von gzip als Kompressionsalgorithmus ist aus den obigen Gründen wohl meistens die richtige Wahl, weshalb entschieden wurde, es als Default von Flux-Server einzusetzen. Möglicherweise ist eine Deaktivierung von Kompressionen angebracht, wenn die Flux-Server Komponente auf einem CPU-Schwachen Rechner (wie ein Raspberry Pi) ausgeführt wird. Die beste Lösung wäre eine automatische Erkennung der verfügbaren Ressourcen und das dynamische ein oder abschalten der Kompression je, nach verfügbarer Leistung.

Anmerkungen zu den Messungen

Die empirischen Messungen, die für diese Auswertung durchgeführt wurden, zeigen die durchschnittlichen Antwortzeiten von 100 Requests in einer «localhost» Umgebung. Die Flux-Server Instanz wurde dabei auf einer Workstation der HSR²² im Development Modus ausgeführt. Die aufgezeigten Resultate können natürlich je nach Hardware variieren und sollten als Richtwert genommen werden. Die durchgeführten Abfragen von 8000 Messwerten sind im produktiven Einsatz eher selten anzutreffen. Eine Abfrage von 8000 Messwerten würde nur geschehen, wenn der Benutzer eine bereits durchgeführte Messung lädt. Dies ist ein Schritt, welcher voraussichtlich nicht in schneller Abfolge mehrmals durchgeführt werden wird und deshalb ist die Akzeptanz des Benutzers gegenüber der Reaktionszeit der Anwendung in diesem Fall auch automatisch höher.

7.2.3 Übertragung neu einkommender Messwerte mittels WebSockets

Flux-Frontend bietet eine Heatmap an, die den aktuellen Stand der Messungen – für die Wahrnehmung des Benutzers – «live» anzeigen soll. Um diesen Effekt zu erreichen, muss die Flux-Frontend Komponente stets die letzten verfügbaren Messwerte anzeigen können. Deshalb wurde entschieden, die bei Flux-Server neu eintreffenden Messwerte über die WebSocket Technologie vom zum Frontend zu pushen.

Der gewählte Ablauf besteht aus einem Mix von GET Abfragen und dem öffnen und offen halten des WebSockets während sich der Benutzer in der Ansicht der Heatmap befindet. Da die WebSocket Verbindung ein Timeout besitzt, muss vom Client regelmässig ein keep-alive gesendet werden. Dieser hat keine inhaltliche Bedeutung und wird vom Server verworfen.

Sobald das Frontend die Verbindung erstellt hat, wird die Verbindung im Server zwischengespeichert. Wenn der Server neue Messungen erhält, werden diese zuerst in die Datenbank gesichert und direkt danach an den offenen WebSocket gesendet.

Play Framework setzt für WebSockets eine auf Akka Streams basierende Lösung ein. WebSockets werden dabei als Flows (dt. Datenflüsse) modelliert und werden wie ein Stream behandelt. Solange die Flows «pure» sind, d.h. keine Nebeneffekte, wie I/O haben, entsteht eine saubere und sichere asynchrone Abarbeitung der einkommenden Messwerte. Das Schlagwort ist bei dieser Technologie (und dem Java Standard Reactive Flows) «Backpressure». Dabei gibt die Quelle des Datenflusses, also in diesem Fall Flux-Sensors den Takt an und pusht die Daten in den Verarbeitungsmechanismus. Das Ergebnis ist, dass der Server keine Zeit mit dem Warten auf Daten verliert und diese dann beim tatsächlichen Eintreffen sofort verarbeiten kann.

7.2.4 Asynchronität von Flux-Server

Beim Entwickeln von Flux-Server wurde viel Wert auf Effizienz gelegt, mit dem Ziel, dass die Anwendung auf möglichst vielen Plattformen – auch auf nicht sehr leistungsstarke Plattformen,

²² Intel Xeon CPU E3-1245 v3 mit 4 physischen Kernen (8 logischen Kernen), 16 GB RAM

wie ein Raspberry – funktioniert. Obwohl speziell die Prozessoren für den mobilen Einsatz keine hohen Taktraten besitzen, besitzen sie mehrere Kerne. Um die volle Leistung der Hardware verwenden zu können, ist Flux-Server auf eine sehr hohe Parallelität ausgelegt.

Das dem Flux-Server zugrundeliegende Play Framework setzt für die angestrebte Asynchronität schon gute Voraussetzungen, da es von Grund auf asynchron aufgebaut ist [20]. Die Controller, die die einkommenden Requests abarbeiten sind dabei asynchron. Beim Eintreffen einer Abfrage, wird diese zunächst von einem Thread aus dem sogenannten «Default Execution Context» bearbeitet. Der Default Execution Context beinhaltet einen begrenzten Threadpool. Ein Blockieren des Controller Threads ist nicht erwünscht, da in dieser Zeit keine anderen Abfragen von diesem Thread behandelt werden können und die Anwendung deshalb nicht gut skalieren würde.

Aufgrund der Architektur des Projektes, werden von den Controller-Klassen oft Funktionen des Data Access Layers (ab jetzt DAL) aufgerufen. Da sich diese Funktionen mit dem Lesen und Schreiben in die Datenbank befassen, können sie für eine längere Zeit blockieren. Für ein gutes Skalieren der Anwendung ist es deshalb wichtig, dass diese besonders lange dauernde Operationen ausserhalb des Default Execution Context ausgeführt werden. Ein neuer Ausführungskontext mit dem Namen «Database Execution Context» wurde für das DAL erstellt. Dieser besitzt einen eigenen Threadpool, welches über die Konfigurationsdatei jederzeit angepasst werden kann.

Alle Methoden des DAL's geben eine Promise (in Java `CompletableFuture`²³) zurück, die der Controller danach an das Backend des Play Frameworks übergibt. Das Framework wartet dann, bis die Promise fertiggestellt ist. Beim Aufruf einer DAL-Methode durch einen Controller, wird die Ausführung der DAL-Methode in den Database Execution Context verschoben und der Thread des Default Execution Context wird für weitere Abfragen freigegeben. Sobald die DAL-Methode abgeschlossen ist, erhält der Controller den Rückgabewert über die Promise der DAL-Methode. Der Rückgabewert wird dabei wieder in den Default Execution Context gewechselt, damit der Controller den Kontext des Aufrufes nicht verliert. In diesem Schritt ist allenfalls eine Nachbearbeitung des Rückgabewertes der DAL-Methode möglich – was aber wiederum mit einem negativen Impact der Skalierbarkeit der Anwendung daherkommt. Die Promise des DAL's kann ansonsten direkt zum Play Framework zurückgegeben werden, damit der Request vom Framework beantwortet werden kann.

Hinweis: Die Anzahl der Threads in einem Ausführungskontext ist entscheidend für die Performance der Anwendung. Die Grösse des ThreadPools des Database Execution Context sollte der Grösse des Connection Pools für die Datenbank entsprechen, damit der Connection Pool voll ausgereizt werden kann, aber gleichzeitig keine Threads verschwendet werden. Der Connection Pool sollte gemäss dem ConnectionPool Provider (HikariCP) wie folgt berechnet werden [25]:

*Datenbankverbindungen = ((Physische Prozessorkerne * 2) + Spindelanzahl der Festplatte)*

Für einen Raspberry Pi mit vier physischen Prozessorkernen ergibt sich also ein Connection Pool von 9, das heisst der Database Execution Context sollte ebenso viele Threads beinhalten.

²³ <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/java/util/concurrent/CompletableFuture.html>

7.3 Flux-Sensors

Flux-Sensors ist eine Python Applikation, die auf der Sensoreinheit, einem Raspberry Pi Einplatinencomputer, ausgeführt wird. Sie sucht zu Beginn per Polling einen aktiven Flux-Server und wartet auf ein Zeichen zur Aktivierung der Sensoren. Während einer Messung übermittelt sie die gesammelten Messwerte fortlaufend in Batches an den Flux-Server. Wichtig ist dabei, dass die Werte des Lichtsensors und des Positionierungssystems noch lokal kombiniert und mit einem Zeitstempel versehen werden.

7.3.1 Technologieevaluation

Die nachfolgende Technologieevaluation des Flux-Sensors ist in die zwei Teile Hardware und Software gegliedert.

Hardware

Zur Evaluation der möglichen Hardware für die Sensoreinheit ist die Anbindung der Sensoren das Hauptkriterium. Zusätzlich sollten die im Kapitel 3.5 *Einschränkungen* definierten Vorgaben erfüllt werden. Das heisst, dass die Sensorkomponente möglichst portabel sein sollte, um auf ein Hilfsmittel, wie beispielsweise eine Drohne, zu passen.

Für den Lichtsensor existiert zwar ein Zusatzboard mit USB-Anschluss, jedoch kommuniziert dieses in einem unbekanntem Format und kann nur mit der proprietären Windows-Applikation des Herstellers ausgelesen werden. Als einzige Alternative bietet der Sensor eine programmierbare I2C-Schnittstelle, die auf ein entsprechendes Register zeigt.

Das Positionierungssystem Pozyx kann zum einen als Adapter für den Mikrocontroller Arduino verwendet werden oder zum anderen per USB angeschlossen werden. Für letzteres wird von Pozyx der Einplatinencomputer Raspberry Pi empfohlen.

Der grosse Unterschied dieser beiden Systeme ist, dass der Einplatinencomputer ein vollwertiges Computersystem darstellt und auch ein Betriebssystem darauf ausgeführt wird. Wohingegen der Mikrocontroller lediglich den darauf gespeicherten Code ausführt. Dies kann nun je nach Sichtweise als Vor- oder Nachteil ausgelegt werden.

Mit einem Einplatinencomputer könnten theoretisch alle Container auf der Sensoreinheit ausgeführt werden und es würde lediglich noch ein Client-Gerät mit einem Webbrowser benötigt werden (siehe Kapitel 6.4 Deployment). Der Vorteil wäre also eine höhere Flexibilität und eine verbesserte Mobilität. Der Mikrocontroller hingegen bietet Vorteile in der Performance und im Energieverbrauch.

Da die Vorteile des Einplatinencomputers die Projektvorgaben nach einer möglichst portablen Sensoreinheit am besten erfüllen, wird auf den Einsatz eines Mikrocontrollers verzichtet. Sollte allerdings der erreichte Durchsatz an Messungen nicht ausreichen, muss die Hardware nochmals neu evaluiert werden.

Software

Bei der Auswahl der möglichen Technologien ist bei der Software ebenfalls die Unterstützung der Sensor-Hardware das Hauptkriterium.

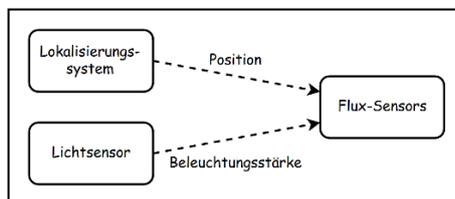
Das Positionierungssystem Pozyx bietet eine Arduino-Library²⁴ in C++ und eine allgemeine Library²⁵ in Python. Da auf den Arduino verzichtet wird, ist die Auswahl bereits klar.

Der Lichtsensor bietet keine Library, sondern lediglich ein Datenblatt mit einer Beschreibung der verfügbaren I2C-Register. Die Anbindung muss also komplett selber entwickelt werden. Hier würde sich ebenfalls Python anbieten, da auch die Open Source Library Pozyx intern mit I2C-Registern arbeitet und somit als Vorlage dienen könnte.

Da die Messwerte der beiden Sensoren am Ende sowieso noch von Flux-Sensors kombiniert und mit einem Zeitstempel versehen werden müssen, empfiehlt es sich hier die selbe Technologie einzusetzen. Aus diesen Gründen fiel die Entscheidung auf Python.

7.3.2 Synchronisierung der Sensordaten

Die gemessenen Werte für die Beleuchtungsstärke müssen mit den Positionsdaten, bei denen sie erfasst wurden, übereinstimmen. Trotz der Synchronisierung soll die mögliche Anzahl Messwerte nicht zu stark vermindert werden.



Lösungsansatz

Beim langsameren Sensor, in unserem Fall Pozyx, wird per Polling ein neuer Messwert abgefragt. Dazu wird die Library-Funktion `doPositioning()`²⁶ aufgerufen, welche jeweils ca. 70ms dauert²⁷.

Anschliessend wird der letzte gemessene Lux-Wert im Register des Lichtsensors ausgelesen. Durch angleichen der Taktfrequenz des Lichtsensors auf die 70ms wird garantiert, dass in der Zwischenzeit auch jeweils ein neuer Lichtwert gemessen wurde.

Folgen

Als Anforderung an den Lichtsensor ergibt sich somit eine «Messzeit» von maximal 70ms. Andernfalls müsste eine zusätzliche Wartezeit beim Positionierungssystem hinzugefügt werden. Durch den eher aufwändigen Positionierungsalgorithmus²⁸ von Pozyx im Gegensatz zur Messung der Helligkeit sollte diese Anforderung in den meisten Fällen gegeben sein.

Daraus resultiert eine maximale Zeitliche Differenz der beiden Messwerte von 70 ms. Dies entspricht bei einer durchschnittlichen Schrittgeschwindigkeit von 5 km/h

$$5 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1000}{3.6 \cdot 10^6} \cdot 70\text{ms} = 0.097\bar{2}\text{m} \approx 10\text{cm}$$

einer Distanz von ungefähr 10 cm.

²⁴ <https://www.pozyx.io/Documentation/Datasheet/arduino>

²⁵ <https://www.pozyx.io/Documentation/Datasheet/python>

²⁶ <https://www.pozyx.io/Documentation/Datasheet/python>

²⁷ https://www.pozyx.io/Documentation/Datasheet/RegisterOverview#POZYX_DO_POSITIONING

²⁸ https://www.pozyx.io/Documentation/how_does_positioning_work

7.3.3 Übertragung der Messwerte

In einem ersten Prototyp wurden die Messwerte synchron an den Server übertragen und erst nach einer positiven Antwort mit einer weiteren Messung begonnen. Dies entspricht der Abfolge ganz links aus Abbildung 17. Um den Durchsatz zu verbessern, wurde nachfolgend eine Optimierung vorgenommen.

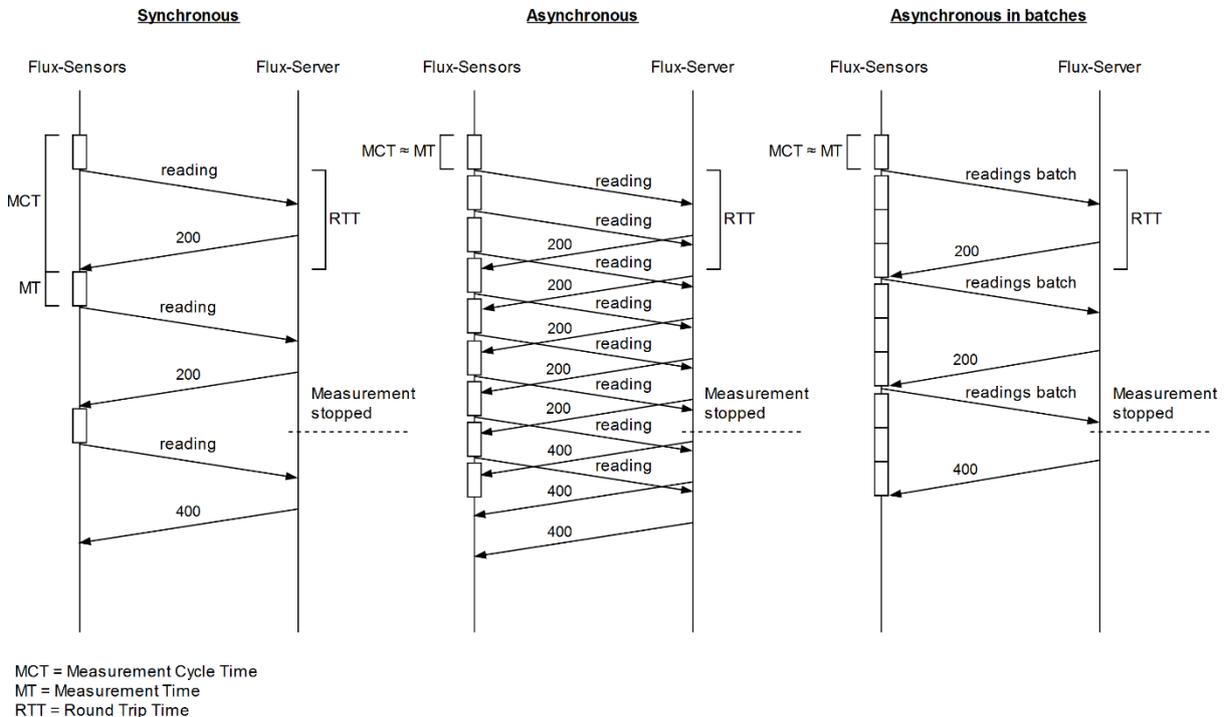


Abbildung 17 Sequenzdiagramm der Übertragung der Messwerte

Durch eine asynchrone Übertragung der Messwerte, wie in der mittleren Abfolge ersichtlich, kann in der Theorie beinahe der maximal mögliche Durchsatz erreicht werden. Es ist jedoch auch schnell zu erkennen, dass dabei im Gegensatz zur ersten Variante ein Vielfaches an Nachrichten zusätzlich versendet werden. Dieses Problem wird durch Variante drei gelöst, indem wie zu Beginn eine positive Antwort des Servers abgewartet wird und erst dann eine Liste mit den neuen Messwerten als Batch übertragen wird. So können die Vorteile beider Lösungen kombiniert werden.

Grundsätzlich gilt bei allen Varianten, dass die Paketumlaufzeit (RTT) und die Zeit für eine Messung (MT) konstant bleiben. Das Ziel der Optimierung ist also die Zeit für einen vollen Messzyklus (MCT) von Beginn einer Messung bis zum Beginn der nächsten Messung zu senken.

Als Technologie für die asynchronen Nachrichten wurde die Python Library `requests-futures`²⁹ gewählt, da sie besonders leichtgewichtig ist und gemeinsam mit der für die synchronen Abfragen verwendeten Library `Requests`³⁰ eingesetzt werden kann. So müssen die bisherigen Abfragen nicht geändert werden.

Um die Theorie zu bestätigen, wurden mit allen drei Varianten Messungen durchgeführt. Dabei wurde die Sensoreinheit einmal mit einem lokal installierten Flux-Server und einmal mit einem in der Heroku Cloud instanziierten Flux-Server verbunden und genau eine Minute lang gemessen.

²⁹ <https://github.com/ross/requests-futures>

³⁰ <http://docs.python-requests.org/en/master/>

Variante	Synchron		Asynchron		Asynchron in Batches	
	Lokal	Cloud	Lokal	Cloud	Lokal	Cloud
Messungen pro Minute	500	119	714	224	754	853

Tabelle 4 Messung der Anzahl übertragener Messwerte pro Minute in drei Varianten

Die gewonnenen Resultate bestätigen die zuvor aufgestellte Theorie. Es fallen jedoch zwei widersprüchliche Resultate auf: Die asynchrone Übertragung in die Cloud ist fast um ein Vierfaches langsamer, als die Variante mit den Batches. Dabei sollte der Unterschied lediglich bei den zusätzlichen Verbindungsaufbauten liegen. Als zweites fällt auf, dass die dritte Variante mit der Cloud noch schneller ist als Lokal, wobei die RTT um ein Vielfaches grösser ist.

Der erste Widerspruch lässt sich durch die maximale Anzahl Worker Threads erklären. Diese ist standardmässig auf zwei begrenzt und erklärt somit das Resultat. Um dem obigen Diagramm gerecht zu werden, müssten also weitere Worker Threads zur Verfügung gestellt werden.

Das zweite Paradoxon mit der vermeintlich schnelleren Cloud-Verbindung wird dadurch verursacht, dass die lokale RTT kleiner ist, als die Zeit für eine Messung, und somit für jeden Messwert wieder eine neue Nachricht gesendet wird. Durch Festlegung einer minimalen Batch-Grösse konnte das Problem gelöst und die gleichen Resultate erzielt werden. Dies zeigt auch, dass die Grösse der RTT nun keinen Einfluss mehr auf den möglichen Durchsatz hat.

Als Überprüfung, ob das Optimum erreicht wurde, kann die Versuchszeit von einer Minute durch die 70ms der Positionsbestimmung dividiert werden:

$$\frac{60s}{7 \cdot 10^{-2}s} = 857.14$$

Dies entspricht ziemlich genau dem mit Variante drei maximal gemessenen Wert. Somit liegt der Flaschenhals nun bei der Positionsbestimmung von Pozyx.

7.3.4 Kommunikation

Die nachfolgenden Kommunikationsabläufe zwischen Flux-Sensors und Flux-Server sind als vereinfachte UML Sequenzdiagramme dargestellt.

Polling Flux-Server

Die Interaktion *Polling* in Abbildung 18 visualisiert den Wartezustand der Sensoreinheit, wenn ein Verbindungsversuch mit dem Flux-Server stattfindet oder auf die Aktivierung einer Messung gewartet wird.

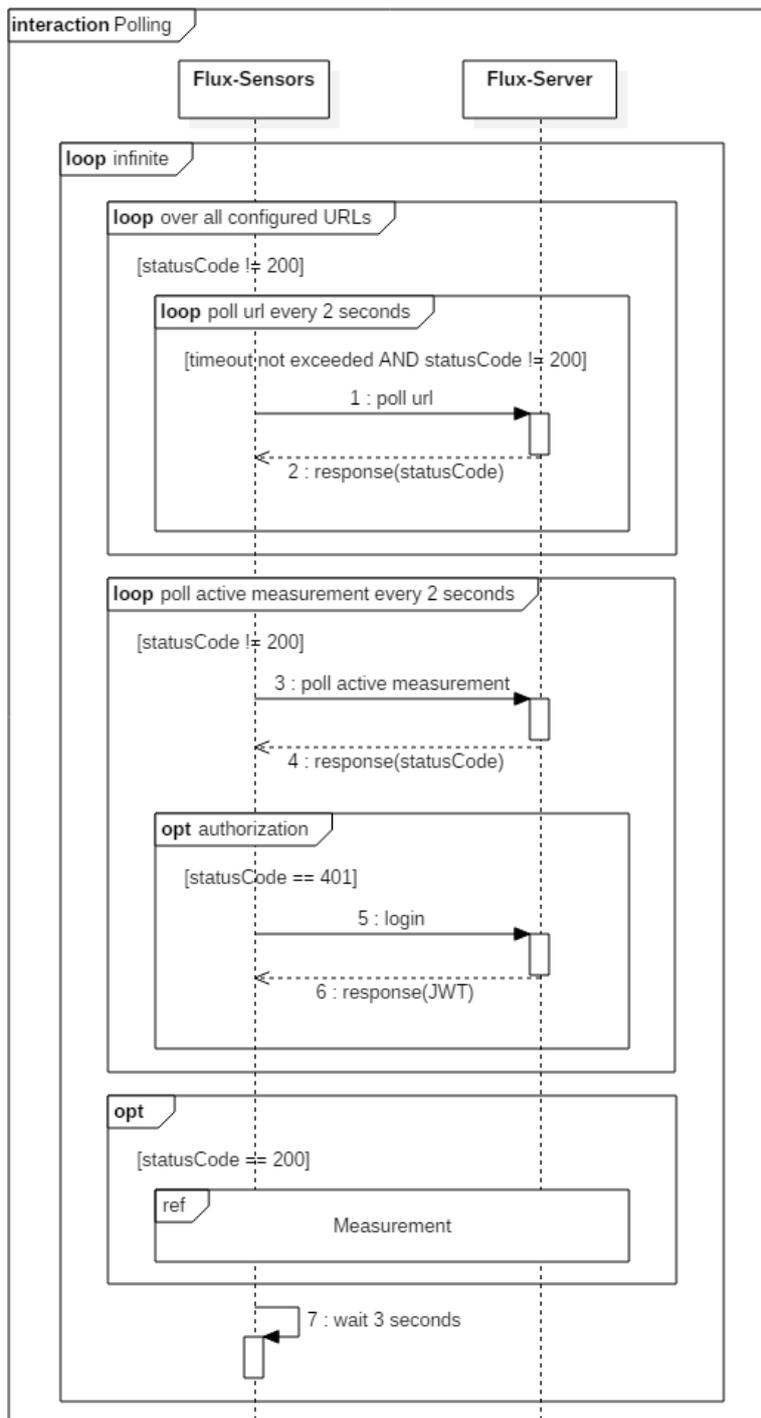


Abbildung 18 UML Sequenzdiagramm der Polling Interaktion des Flux-Sensors

Die Interaktion Polling kann in drei Teile unterteilt werden. Dies sind die beiden aufeinanderfolgenden Loop-Blöcke in der zweiten Ebene und der Opt-Block am Ende des Diagramms. Im ersten Teil werden alle per Konfigurationsdatei geladenen Server URLs nach ihrer Erreichbarkeit geprüft. Bei der ersten positiven Antwort wird die URL zwischengespeichert und in Phase zwei übergegangen. Hier wird nun der Server nach einer aktiven Messung abgefragt und erneut auf eine positive Antwort gewartet. Da die Route vor unbefugtem Zugriff geschützt ist, muss zuerst eine Autorisierung durchgeführt werden. Im dritten und letzten Teil der Interaktion wird die Messung schliesslich gestartet. Das Starten und Stoppen wird lediglich über den Rückgabewert der Route zur aktiven Messung realisiert. Für den Ablauf der Messdurchführung ist nachfolgend ein eigenes Sequenzdiagramm aufgeführt.

Der Übersichtlichkeit halber wurde auf die Darstellung der weiteren möglichen Server-Instanzen verzichtet. In der oben beschriebenen ersten Phase werden in der Realität zumeist verschiedene Server URLs kontaktiert, bis eine entsprechende Antwort zurückgegeben wird.

Messdurchführung

Das Sequenzdiagramm der Messdurchführung in Abbildung 19 zeigt nun auch die Kommunikation mit den beiden Sensoren für die Lichtmessung und die Positionsbestimmung (Pozyx).

Zu Beginn wird die aktive Messung abgefragt und daraus die Positionen der Pozyx Anchors und die Zielhöhe der Messung ausgelesen, um anschliessend die Sensoren mit diesen Daten zu initialisieren und für die Messung vorzubereiten. Dann startet der Loop mit den tatsächlichen Messungen. Die Schleife kann nur durch Erreichen des Timeouts oder durch Stoppen der Messung, mit einem HTTP Response Code 404, beendet werden. Der Ablauf startet mit der Positionsbestimmung über Pozyx und dem Auslesen des zuletzt gemessenen Lux-Werts. Einzelheiten zum Abfragen und Synchronisieren der Messwerte sind im Kapitel 7.3.2 *Synchronisierung der Sensordaten* aufgeführt.

Am Ende des Loops wird der letzte erhaltene Response Code abgefragt und ausgewertet, ob bereits eine Antwort vorliegt. Sollte dies der Fall sein, so wird ein neuer Batch von Messwerten an den Server gesendet. Ist die Antwort ein 404-Code, so wurde die Messung vom Server beendet. Da die Übermittlung der Messwerte asynchron geschieht, ist der Zeitpunkt des Eintreffens der Antwort nicht eindeutig bestimmt. Es kann zu Beginn oder am Ende passieren oder auch über mehrere Durchläufe der Schleife hinweg ausbleiben. Die gemessenen Werte werden in diesem Fall in einer Liste zwischengespeichert und gemeinsam als Batch an den Server übertragen. Der implementierte Ablauf zur Übertragung der Messwerte ist im Kapitel 7.3.3 *Übertragung der Messwerte* beschrieben.

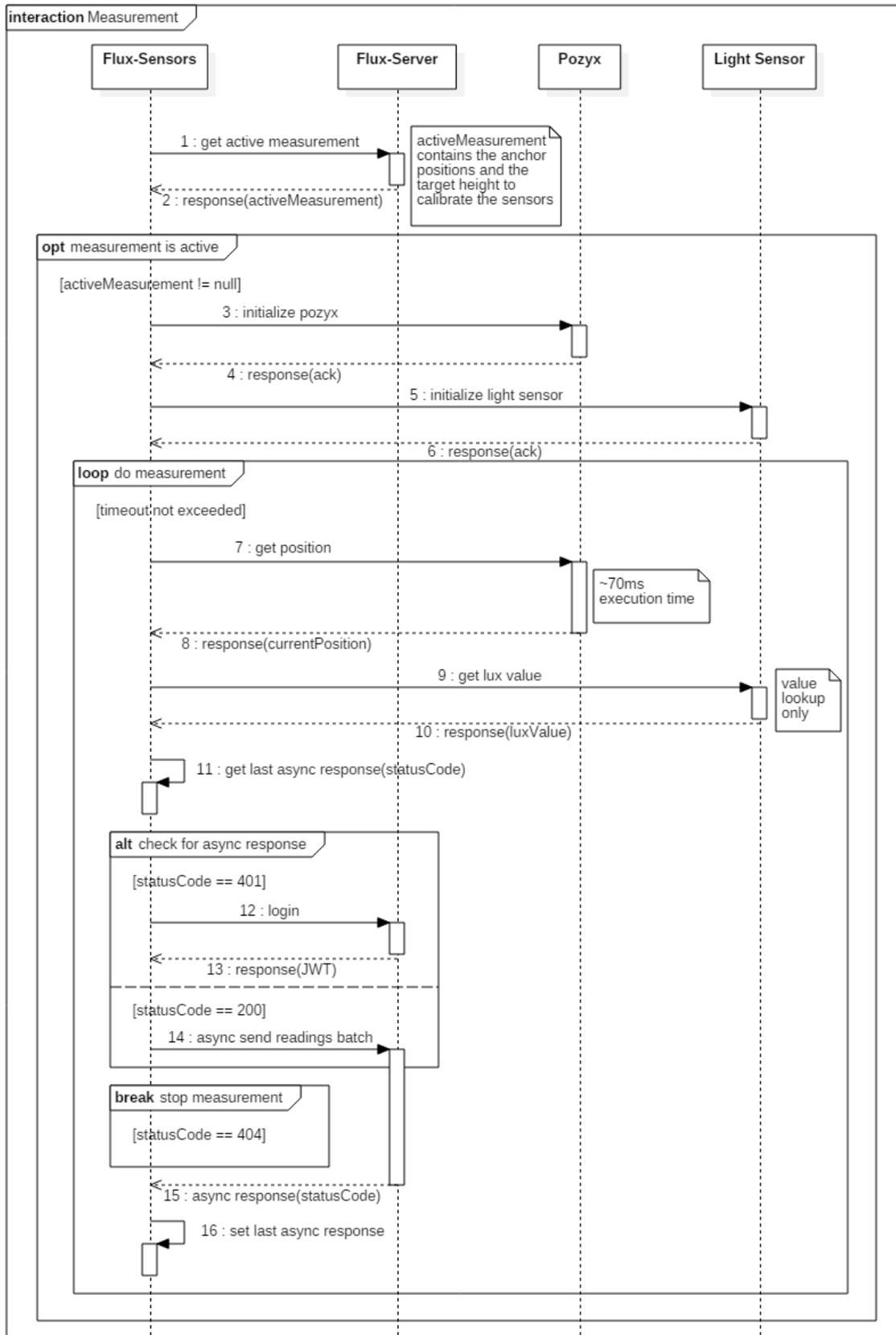


Abbildung 19 UML Sequenzdiagramm der Messdurchführung

7.4 Datenbank

Die gemessenen Sensordaten und die dazugehörigen Metadaten, wie Projekte, Räume und Messungen werden in einer Datenbank gespeichert. Aufgrund der baumartigen Struktur und dem Wesen von Sensorapplikationen werden sich die Daten so aufteilen, dass einigen wenigen Projekten, Räumen und Messungen sehr viele Messwerte zugeordnet werden. Diese projektspezifische Struktur sollte bei der Implementierung der Datenbank stets beachtet werden.

7.4.1 Technologieevaluation

Die Auswahl der richtigen Technologie für die Datenbank war ein längerer Prozess. Das System hat die spezielle Anforderung, dass es auf mehreren Plattformen lauffähig sein muss. Eine x86 Architektur soll genauso unterstützt werden, wie die ARM Architektur des Raspberry Pi. Zudem muss die Datenbank auf einer Cloudplattform bereitgestellt werden können. Nebst der Multiplattformfähigkeit gelten auch Anforderungen an die Performance. Die Datenbank sollte auch effiziente Abfragen von tausenden von Messwerten ermöglichen.

Die Erfahrung der Teammitglieder war ebenfalls ausschlaggebend für die Auswahl der evaluierten Technologien. Völlig unbekannte Technologien stellen ein grosses Risiko für das Projekt dar, speziell weil das System am Ende der Arbeit produktiv eingesetzt werden soll. Als zwei mögliche Datenbankkategorien kamen die traditionellen relationalen sowie auch dokumentbasierte NoSQL Datenbanksysteme in Frage. Für das Abspeichern der Messwerte wäre auch eine Key-Value Storage Technologie, wie Redis denkbar gewesen. Der Zugriff auf Messwerte würde hierbei eine konstante Zeit ($O(1)$) benötigen [21]. Für die restlichen Metadaten müsste aber dennoch eine andere Datenbanktechnologie verwendet werden. Da das System bereits in mehrere Komponenten unterteilt wurde und die Zugriffszeit der anderen evaluierten DBMS ausreicht, wurde entschieden auf eine solche Hybridlösung zu verzichten.

Als Implementationen der zwei Datenbankkategorien wurden PostgreSQL und MongoDB ausgewählt. PostgreSQL wurde im Rahmen der Datenbankmodule DBMS I und II intensiv verwendet. MongoDB wurde von den Teammitgliedern schon in anderen Projekten eingesetzt. Wichtig für die Auswahl war ausserdem, dass die Software, auch im produktiven Einsatz, frei von Lizenzkosten bleibt. In den folgenden Unterkapiteln wird detailliert auf die Eigenschaften der zwei DBMS eingegangen.

PostgreSQL (Relationales DBMS)

Genau genommen ist PostgreSQL eine Objektrelationale Datenbank [22]. Objektrelationale Funktionen, wie Vererbung, werden für dieses Projekt jedoch nicht benötigt. Verwendet wird wie bei RDBMS gewohnt die Sprache SQL, wobei für Stored Procedures auch andere Sprachen wie Python möglich sind. Die Datenbank ist konform mit dem SQL Standard ISO/IEC 9075:2011 (SQL: 2011) [23]. Die Verwendung einer anderen Datenbank sollte somit möglich sein, soweit sich die Schema-Scripts an den Standard halten.

Für die Ansteuerung von PostgreSQL wird die Java Database Connectivity (JDBC) Schnittstelle verwendet. Als objektrelationales Mapping (ORM) kann die JPA Spezifikation in der Version 2.1 verwendet werden. Diese Version lässt die Nutzung von Entity Graphs zu, was das Verwenden von Lazy Loading erleichtern kann [24]. Datenbankabfragen können die zurückgegebenen Daten schon beim Holen aus der Datenbank filtern. So könnte eine Abfrage einer Messung über einen JOIN³¹ auch die Messwerte zurückgeben. Wenn der JOIN allerdings weggelassen wird, wird tatsächlich nur die Messung (ohne Messwerte) geholt. Diese starken Abfragemöglichkeiten sind vor

³¹ https://www.w3schools.com/sql/sql_join.asp

allem dann ein Vorteil, wenn die Abfrage über ein Netzwerk stattfindet oder die Ressourcen hardwaretechnisch begrenzt sind.

Ein nicht zu vernachlässigender Nachteil ist, dass die Datenbank manuell installiert werden muss. Der Benutzer muss anschliessend zur Installation das Schema durch ein SQL Script manuell in die Datenbank importieren. Wenn die benötigten Tabellen nicht erstellt werden oder ein Datentyp nicht stimmt, kann dies Fehler während der Ausführung verursachen. Das automatische Erstellen des Schemas wäre zwar prinzipiell durch JPA möglich, doch das Risiko eines Datenverlustes ist dabei beträchtlich. Deshalb wird ein automatisches Erstellen von Datenbankschemas während eines produktiven Einsatzes nicht empfohlen.

MongoDB (Dokumentbasiertes DBMS)

MongoDB ist eine relativ junge Datenbank aus dem Jahr 2009 und hat seitdem – wohl durch die simplen Konzepte hinter der Datenmodellierung – stark an Beliebtheit gewonnen. Sie verwaltet die Daten in Binary-JSON (BSON) Dokumenten. Die Struktur lässt sich deshalb nicht mit der einer relationalen Datenbank vergleichen. Auf den ersten Blick entspricht eine Zeile in einer relationalen Datenbank einem Dokument, doch das Dokument kann eine tiefe Hierarchie besitzen. Die Hierarchie der Dokumente lässt sich besser in Objekte einer objektorientierten Programmiersprache mappen, als die relational abgespeicherten Werte eines RDBMS. Aus diesen Gründen entfällt ein ORM und die damit einhergehende Komplexität.

Die MongoDB Instanzen werden mit dem vom gleichnamigen Unternehmen veröffentlichten Java Driver angesteuert. Hierfür steht der ältere MongoDB Driver, wie auch der neuere MongoDB Async Driver zur Verfügung. Wie schon der Name darauf schliessen lässt, funktioniert der neuere Driver asynchron und würde sich dadurch für den Flux-Server besser eignen. Ein asynchrones Verwenden des älteren Drivers wäre – ähnlich wie beim JDBC-Driver – zwar möglich, würde aber zu viel mehr Threads führen.

Durch die gewählte Architektur von MongoDB werden viele Daten im Arbeitsspeicher gehalten. Um einen übermässigen Konsum von Arbeitsspeicher zu verhindern, wurde eine Beschränkung der Dokumentgrösse auf 16 MB eingeführt [25]. Eine naheliegende Lösung ist das Aufteilen von Dokumenten und wird von MongoDB in Form der GridFS Spezifikation unterstützt [26]. Die GridFS Schnittstelle wählt einen anderen Ansatz als die des restlichen MongoDB Drivers. Die Daten werden über Streams geladen und erfordern spezifische manuell implementierte Operationen. Die Abstraktionsstufe ist verglichen mit JPA oder der normalen MongoDB Schnittstelle viel tiefer.

Zwar entfällt bei einer dokumentbasierten Datenbank das Erstellen eines Schemas im traditionellen Sinn, doch die optimale Aufteilung der Daten spielt dennoch eine grosse Rolle. Ein Dokument in MongoDB kann eingebettete Dokumente mit verwandten Daten enthalten. Generell ist es besser, Dokumente in andere Dokumente einzubetten, anstatt eine Referenz zu einem anderen Dokument (möglicherweise in einer anderen Collection) zu speichern. Es gibt aber neben der maximalen Grösse auch andere Nachteile von grossen Dokumenten, nämlich machen grosse Dokumente Schreibvorgänge langsamer [27]. Wenn ein grosses Dokument mit vielen Einbettungen zu umständlich wird, lässt sich durch Aufteilen eines Dokumentes in zwei Dokumente Flexibilität zurückgewinnen. Das neue Dokument wird dann über eine Referenz mit dem Elternteil verbunden. Das Aufteilen eines grossen Dokumentes kann auch helfen, unter der 16 MB Grenze zu bleiben. Es ist dabei zu beachten, dass MongoDB nur innerhalb eines Dokumentes atomare Operationen unterstützt. Beim Bearbeiten von zwei Dokumenten geschieht dies in zwei Schritten, was durch nebenläufige Zugriffe zu inkonsistente Daten führen kann.

Abfragen in MongoDB geben – falls die Query ein Ergebnis findet – stets ein komplettes Dokument zurück. Falls sich die Daten der Anwendung in einem einzigen Dokument befinden, so werden bei einer Query stets alle Daten der Anwendung zurückgegeben. Ein Laden aller Messwerte wäre also in diesem Fall nicht zu verhindern. Das Laden aller Daten bei beliebigen Datenbankabfragen würde sich speziell dann negativ auswirken, wenn die Datenbankabfragen über ein Netzwerk stattfinden. In diesem Fall würde der Benutzer dies als höhere Latenz empfinden. Wenn die Messwerte in einem eigenen Dokument ausgelagert werden, liessen sich die Abfragen also etwas besser steuern. Beim Aufteilen der Dokumente ergeben sich jedoch zwei Nachteile. Einerseits werden die Abfragen mit jedem neuen Dokument komplizierter, nicht zuletzt, weil Fremdschlüssel vom Entwickler manuell geladen werden müssen (JPA holt diese Referenzen automatisch). Andererseits leidet die Performance der Datenbank darunter, weil die Datenbank für das Holen einzelner Dokumente optimiert ist.

Fazit

Die grössten Nachteile bei PostgreSQL sind die Bereitstellung und das komplexe objektrelationale Mapping mit JPA. Bei MongoDB ist die Installation durch das Fehlen eines Schemas einfacher durch Skripte automatisierbar. Durch die Verwendung JSON-ähnlicher Dokumente, lassen sich aus MongoDB Dokumenten direkt Objekte deserialisieren.

Die grössten Nachteile von MongoDB sind die maximale Grösse eines Dokumentes, sowie die kleine Flexibilität bei Abfragen. Eine Begrenzung der Dokumentgrösse stellt dabei ein absolutes Killerkriterium dar, da dies die Dauer einer Messung entscheidend eingrenzen würde. Ein Mechanismus für das Erkennen einer sich füllenden Datenbank – und spezifischer auch die Behandlung dieser Situation – gestaltet sich als schwierig. Die Architektur der Anwendung müsste sich durch die kleine Anzahl an Dokumenten zur einen Hälfte nach den Vorgaben von MongoDB's GridFS richten, zur anderen Hälfte nach den Richtlinien der klassischen MongoDB API. Diese zwei Schnittstellen sind so unterschiedlich, dass der Aufwand vergleichbar wäre mit dem Verwenden von zwei verschiedenen Datenbanktechnologien.

Aus den obigen Gründen wurde entschieden, PostgreSQL als Datenbank zu verwenden.

7.4.2 Modellierung

Durch die Auswahl einer relationalen Datenbank, muss im Voraus ein Datenbankschema modelliert werden. Für den produktiven Einsatz des Systems wird ein Database-First Ansatz verwendet, bei dem das Schema der Datenbank durch ein Script manuell erstellt wird. Ein sogenannter Code-First Ansatz, bei dem die Anwendung selber beim Start die Datenbank erstellt (oder anpasst) wäre im produktiven Einsatz des Systems zu riskant.

Im Gegensatz zu der bei dokumentbasierten Datenbanken oft gewünschten Denormalisierung von Daten, sind die Daten im Modell viel stärker normalisiert. Eine der wenigen Ausnahmen bilden die Positionen in den Tabellen `reading` und `anchorposition`. Diese Positionen wurden bewusst nicht normalisiert, weil dies keine Vorteile, dafür eine höhere Komplexität brächte. Eine Abfrage der Readings müsste beispielsweise stets die Position beinhalten und beim Hinzufügen neuer Readings in die Datenbank müsste eine zusätzliche Operation die Position des neuen Readings hinzufügen. Die Erhaltung der Konsistenz der Daten wird durch diese Entscheidung kein Problem darstellen, da die Messwerte sowieso immutable sind. Die Beziehung zwischen der Position und den Readings und Anchorpositions wäre zudem stets 1:1 gewesen, weshalb ein Normalisieren auch bezüglich der Datenmenge keine Vorteile mit sich bringen würde. Dasselbe gilt auch für den `measurementstate` oder die Spalte `creator` in der Tabelle `measurement`.

Ein weiterer Punkt, der angesprochen werden sollte ist die Speicherung des Raumplans in der Spalte `floorplan` der Tabelle `Room`. Das Bild wird als Base64 String in der Spalte gespeichert, um den Import und Export der Daten zu vereinfachen. Dies entspricht nicht unbedingt den «Best-Practices» der Datenbank-Entwicklung. Besser wäre das Abspeichern der Bilder im Filesystem, jedoch müsste dafür das Backend entsprechend erweitert werden, damit der Import und Export von Räumen auch den Raumplan beinhaltet. Ausserdem würde die Komplexität des Systems durch das Einbeziehen des Filesystems als weitere Schnittstelle verglichen mit der dazugewonnenen Funktionalität unverhältnismässig stark ansteigen.

Das daraus resultierende Schema ist in Abbildung 20 dargestellt.

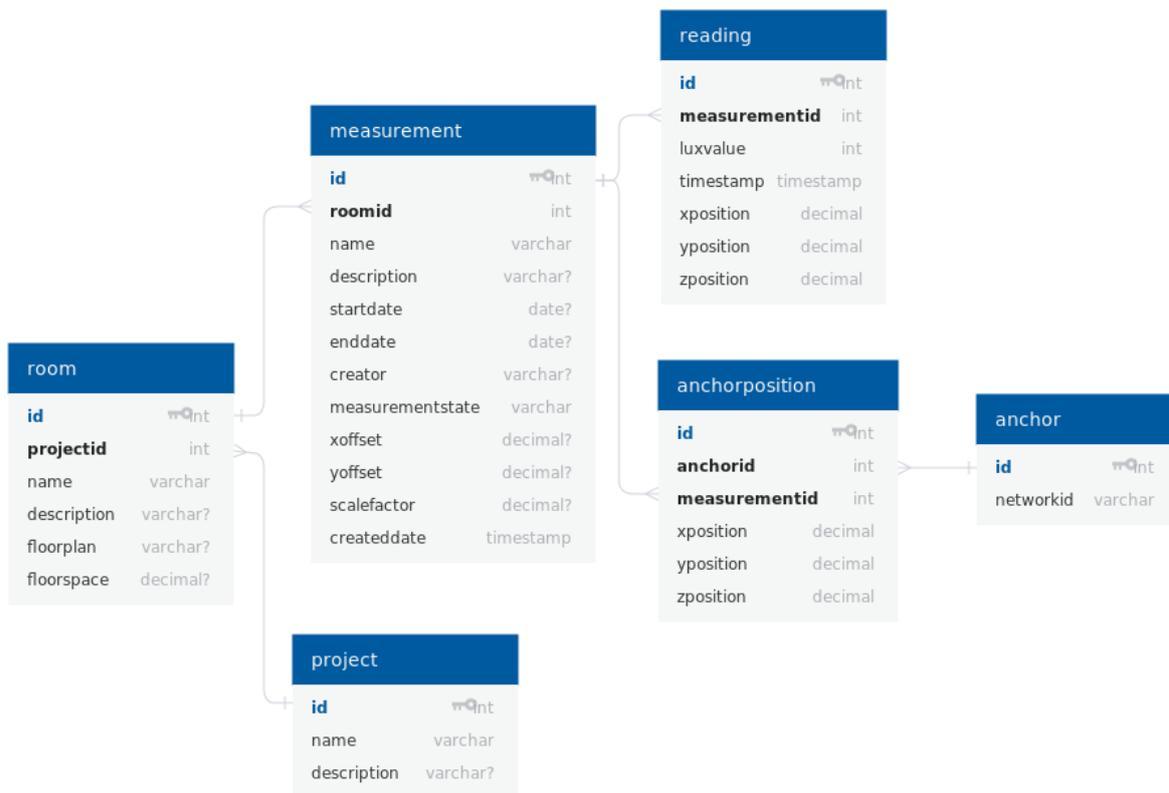


Abbildung 20 Datenbankmodell des Flux-Coordinator Systems

7.5 Herausforderungen & Lösungsansätze

Während der Realisierung ergaben sich zahlreiche Herausforderungen, die gelöst werden mussten. Die wichtigsten dieser Herausforderungen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in den folgenden Kapiteln näher betrachtet.

7.5.1 Verfügbarkeit der verteilten Systeme

Das auszuliefernde System besteht aus mehreren voneinander unabhängig ausführbaren Komponenten. Einige der Komponenten sind jedoch von anderen abhängig, um voll funktionsfähig zu sein. Dies stellt auch während der Entwicklung eine Herausforderung dar, die es zu lösen gilt. Um effizient entwickeln zu können, muss zum Beispiel der Flux-Server verfügbar sein, damit die Sensoren ihre Daten übermitteln können. Die Flux-Server Komponente ihrerseits ist von der Datenbank abhängig, da sie sonst die Daten nicht abspeichern kann.

Um diese Abhängigkeiten möglichst einfach zu erfüllen, wurde entschieden, auf Continuous Delivery zu setzen. Nach Durchlaufen und Bestehen der Tests einer Komponente im Continuous Integration Dienst, wird diese automatisch als Heroku Dyno bereitgestellt und ist somit über das Internet erreichbar. Durch diese ständige Verfügbarkeit müssen keine eigenen Instanzen manuell bereitgestellt werden und der Fokus kann auf die eigentliche Arbeit gelegt werden.

7.5.2 Optimierung der Positionsbestimmung mit Pozyx

Bei ersten Messungen mit dem Positionierungssystem Pozyx wurde festgestellt, dass die Messwerte zum Teil relativ stark schwanken. Vor allem die Z-Werte für die Angabe der relativen Höhe im Raum gehen regelmässig auf sehr tiefe Werte oder gar in den negativen Bereich. Um dieses Problem genauer analysieren zu können, wurden diverse Messungen durchgeführt.

Abbildung 21 zeigt die Auswertung einer Messung mit 500 Positionswerten. Die Streuung der grau dargestellten Z-Werte ist wesentlich grösser als die der anderen Dimensionen. Die Sollwerte liegen bei x: 1650, y: 1400 und z: 870.

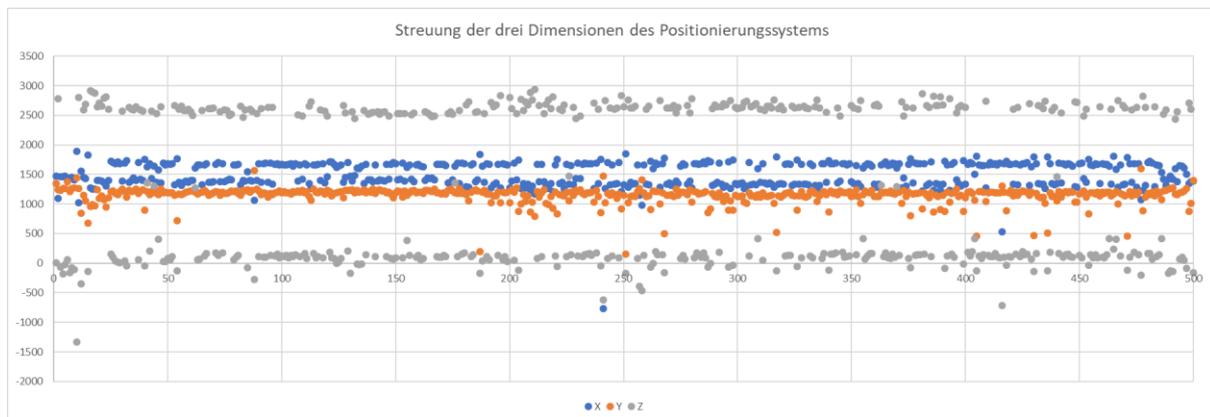


Abbildung 21 Streuung der drei Dimensionen des Positionierungssystems

Die Analyse ergab Optimierungsbedarf bei der Aufstellung der Anchors von Pozyx sowie verschiedene externe Störfaktoren im Laborraum und mögliche Verbesserungen im Code von Flux-Sensors.

Im Kontakt mit Pozyx ergaben sich einige Optimierungen für die Aufstellung und Verwendung des Positionierungssystems. Diese sind im Anhang B unter *Grundsätze der Verwendung des Positionierungssystems Pozyx* aufgeführt.

Im Code wird neu ein alternativer Algorithmus von Pozyx angewendet³², der auch vergangene Messwerte in die aktuelle Positionsbestimmung miteinbezieht. Weitere Versuche zeigten, dass dieser Algorithmus erst durch einige leere Messungen initialisiert werden sollte, um Ausreisser zu Beginn der richtigen Messung zu verhindern. Zusätzlich wird zur Glättung noch der gleitende Mittelwert über die letzten drei Messwerte bestimmt.

Die Genauigkeit der X- und Y-Werte konnten so im Laufe der Arbeit wesentlich verbessert werden. Die Z-Werte blieben jedoch leider zu ungenau, um sie in der Applikation verwenden zu können. Im Zuge der Recherche wurde uns vom Pozyx-Support auch mitgeteilt, dass für 3D-Messungen 6 oder 8 Anchors empfohlen werden. Leider war es zu diesem Zeitpunkt für eine Neuanschaffung bereits zu spät.

So konnte das Feature zur Eingrenzung der Messung auf einer bestimmten Höhe nicht realisiert werden. Dies muss weiterhin vom Benutzer, beispielsweise mit einem Stativ, erledigt werden.

7.5.3 Konsequenzen einer öffentlich verfügbaren Applikation

Dadurch, dass die Anwendung unter anderem über die Cloud bereitgestellt wird, ist sie öffentlich über das Internet erreichbar. Der Industriepartner hat aber ein Interesse daran, dass seine Daten und die Daten seiner Kunden stets geschützt sind. Um diesen Schutz zu gewährleisten, wurden mehrere Sicherheitsfeatures implementiert, die nachfolgend erklärt werden.

Eine Authentifizierungsfunktion wurde implementiert, um unbefugten Zugriff auf die Routen und Daten zu verhindern. Die Flux-Frontend und Flux-Sensors Komponenten müssen sich bei der Flux-Server Komponente authentifizieren. Beim Frontend geschieht dies über ein Login-Formular und bei der Sensoreinheit über die in der Konfigurationsdatei angegebenen Benutzerdaten. Falls der Benutzername und das Passwort stimmen, sendet die Flux-Server Komponente ein JWT Token³³ mit einer Ablaufzeit von zwei Wochen zurück.

Alle Abfragen auf die vom Flux-Server bereitgestellten HTTP-Routen (mit Ausnahme von Login und Index) sind nur mit einem autorisierten JWT Token verfügbar. Dieses muss im Authorization-Header der HTTP-Abfrage übertragen werden.

Um einen Logout auszuführen, reicht es, wenn die Anwendungen den JWT Token im Session- oder Local-Storage löschen. Dadurch können sie sich beim nächsten Request nicht mehr authentifizieren und müssen sich erneut einloggen.

Hinweis: Um das Login sicher zu gestalten, sollte unbedingt mittels HTTPS auf die Anwendungen zugegriffen werden. Das Leaken von persönlichen Daten kann über eine nicht-gesicherte Verbindung nicht verhindert werden.

Weitere implementierte Sicherheitsfeatures:

- Cross-Site-Request-Forgery Schutz
- CORS Einschränkungen
- Blockieren von Suchmaschinenindexierung

³² Aufgrund der höheren Genauigkeit bei kontinuierlichen Messungen wird der TRACKING-Algorithmus von Pozyx verwendet [1].

³³ <https://jwt.io/>

7.5.4 Raspberry Pi als Hotspot

Die Idee war, den bei der Vermessung notwendigen WLAN-Router durch das eingebaute Wifi-Modul im Raspberry Pi zu ersetzen.

Es wurden zwei verschiedene Open Source Lösungen^{34,35} evaluiert, allerdings scheint die Verwendung als Wifi Client und Hotspot gleichzeitig nicht möglich zu sein³⁶. Auch die Verbindung war in diversen Versuchen nicht gleich stabil, wie mit einem dedizierten WLAN Router.

Als Lösung wird weiterhin ein WLAN Router eingesetzt, um eine bessere Verfügbarkeit des Systems zu garantieren.

³⁴ <https://github.com/sabhiram/raspberry-wifi-conf>

³⁵ <https://github.com/billz/raspap-webgui>

³⁶ <https://github.com/billz/raspap-webgui/issues/151>

8 Versuche

Um das System in jedem Stadium der Entwicklung intensiv testen zu können, wurden im Laufe der Arbeit diverse Messungen durchgeführt. Besonders zu Beginn des Projekts, als die Sensoreinheit noch in Entwicklung war, wurde vor allem mit simulierten Testdaten gearbeitet.

8.1 Simulation

Für die Entwicklung der Frontend- und Server-Container des Flux-Coordinator Systems wurde eigens ein Algorithmus zur Generierung von Heatmaps mit künstlichen Lichtquellen implementiert. Die Anzahl, Intensität und der Radius dieser Lichtquellen variiert zufallsbasiert und die totale Anzahl an generierten Messwerten kann anfangs festgelegt werden. Nachfolgend sind in Abbildung 22 einige Beispiele solcher künstlichen Visualisierungen aufgeführt.

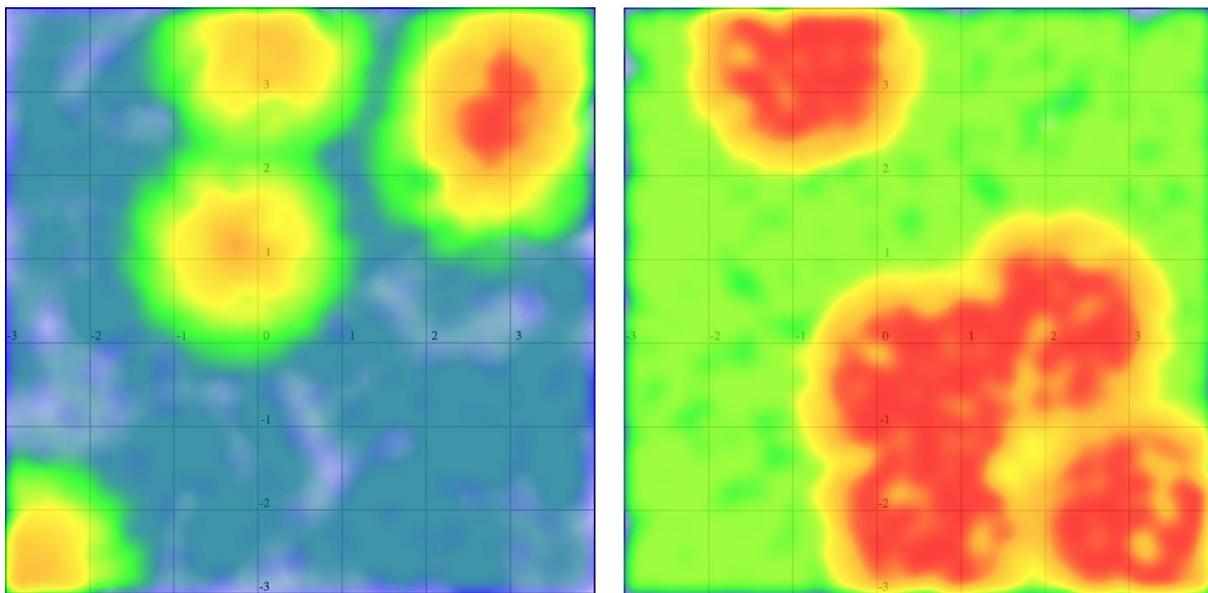


Abbildung 22 Zufällig generierte Heatmaps des Flux-Coordinator

Dank diesem Algorithmus konnte das Frontend und der Server unabhängig von der Sensoreinheit entwickelt und mit realistischen Daten getestet werden. Es konnten schnell auch Leistungstests mit grossen Datenmengen, wie beispielsweise einer Messung mit 50'000 Messwerten, durchgeführt werden. So konnten die anfangs getroffenen Architekturentscheidungen bereits frühzeitig validiert werden.

8.2 Hardware

Als Hardware für die nachfolgenden Versuche wurden folgende Komponenten eingesetzt:

- Raspberry Pi 3 Model B+³⁷
- Pozyx «Ready to Localize» Set³⁸ mit 4 Anchors
- Lichtsensor AMS TCS3430 Tristimulus Color Sensor³⁹
- PiJuice HAT⁴⁰
- WLAN Access Point

³⁷ <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>

³⁸ <https://www.pozyx.io/store/detail/2>

³⁹ <https://ams.com/TCS3430>

⁴⁰ <https://uk.pi-supply.com/products/pijuice-standard>

Abbildung 23 zeigt die komplette Hardware der Sensoreinheit ohne Gehäuse: oben links der Raspberry Pi mit aufgesetztem PiJuice HAT zur portablen Stromversorgung, rechts der Pozyx Tag zur Positionsbestimmung und unten links der Lichtsensor von AMS.

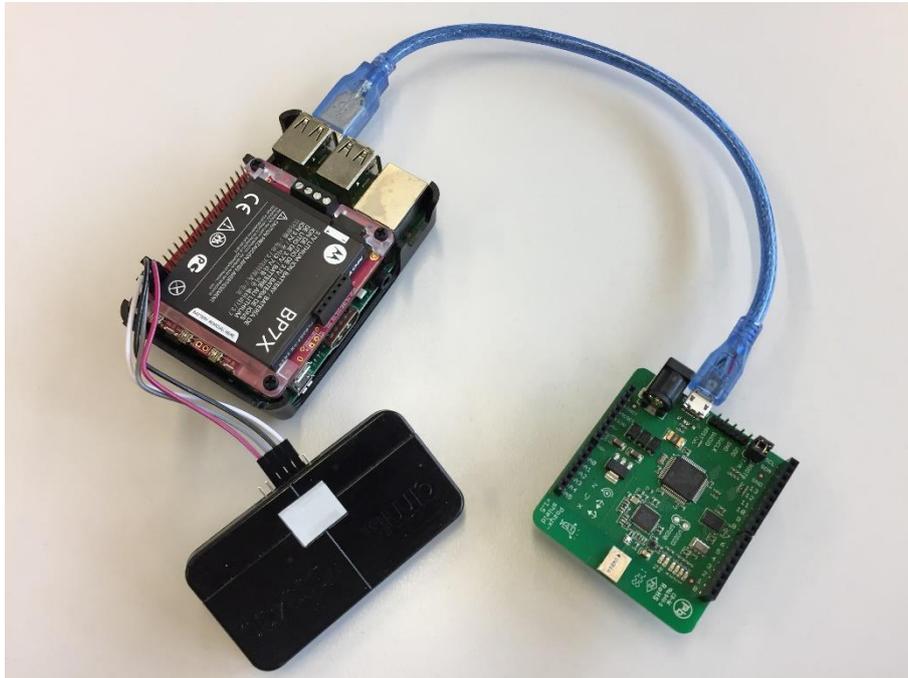


Abbildung 23 Hardware der Flux-Coordinator Sensoreinheit ohne Gehäuse

Der PiJuice HAT erwies sich im Laufe diverser Testmessungen als nützliche Ergänzung des Systems. Er diente nicht nur als Akku, sondern konnte auch als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) für den Raspberry Pi eingesetzt werden. Dies war besonders nützlich, wenn zwischen einer stationären Messung und der portablen Nutzung der Sensoreinheit gewechselt wurde.

8.3 HSR Labor

Schon früh wurden die Antennen des Positionierungssystems im Laborraum verteilt und ausgemessen. Der Raum stellte durch die meist vielen Menschen und elektronischen Geräten mit diversen Störsignalen und blockierenden Objekten eher das Worst Case Szenario dar. Dennoch wurden dort am Ende wohl die meisten Messungen durchgeführt und die Entwicklung des ganzen Systems entscheidend unterstützt.

In Abbildung 24 sind die Positionen der Pozyx Anchors mit ihren Koordinaten auf dem Grundriss aufgeführt. Die festen Koordinaten des Pozyx Tags wurden nur für die stationären Tests benötigt. Der untere rechte Teil zeigt das Labor, in dem der Flux-Coordinator entwickelt und die meisten Tests durchgeführt wurden.

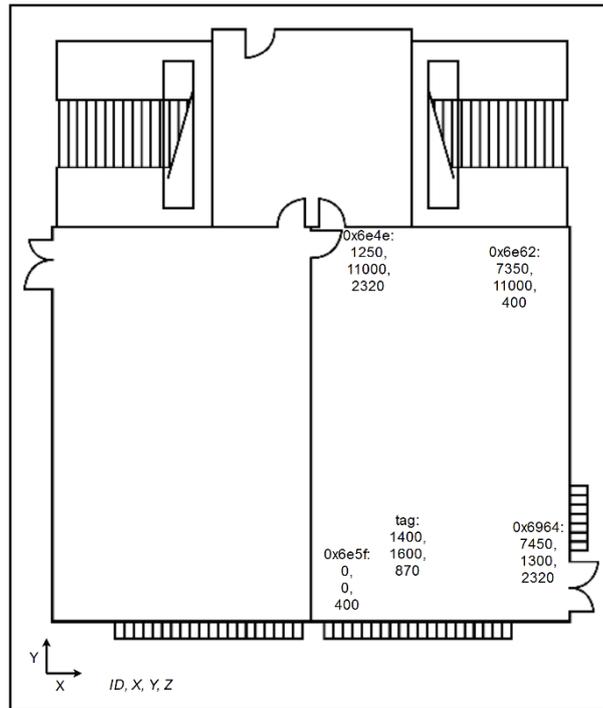


Abbildung 24 Grundriss des HSR Labors mit den Antennen des Positionierungssystems

Abbildung 25 zeigt die Visualisierung einer Lux-Messung mit 16'899 Messwerten über den Zeitraum von 20 Minuten. Die roten Stellen im vorderen Bereich des Raumes deuten auf hellere Lichtverhältnisse hin. Diese Unterschiede sind beabsichtigt, da zur Kontrolle der Ergebnisse im hinteren Bereich des Raumes die Beleuchtung abgeschaltet wurde.

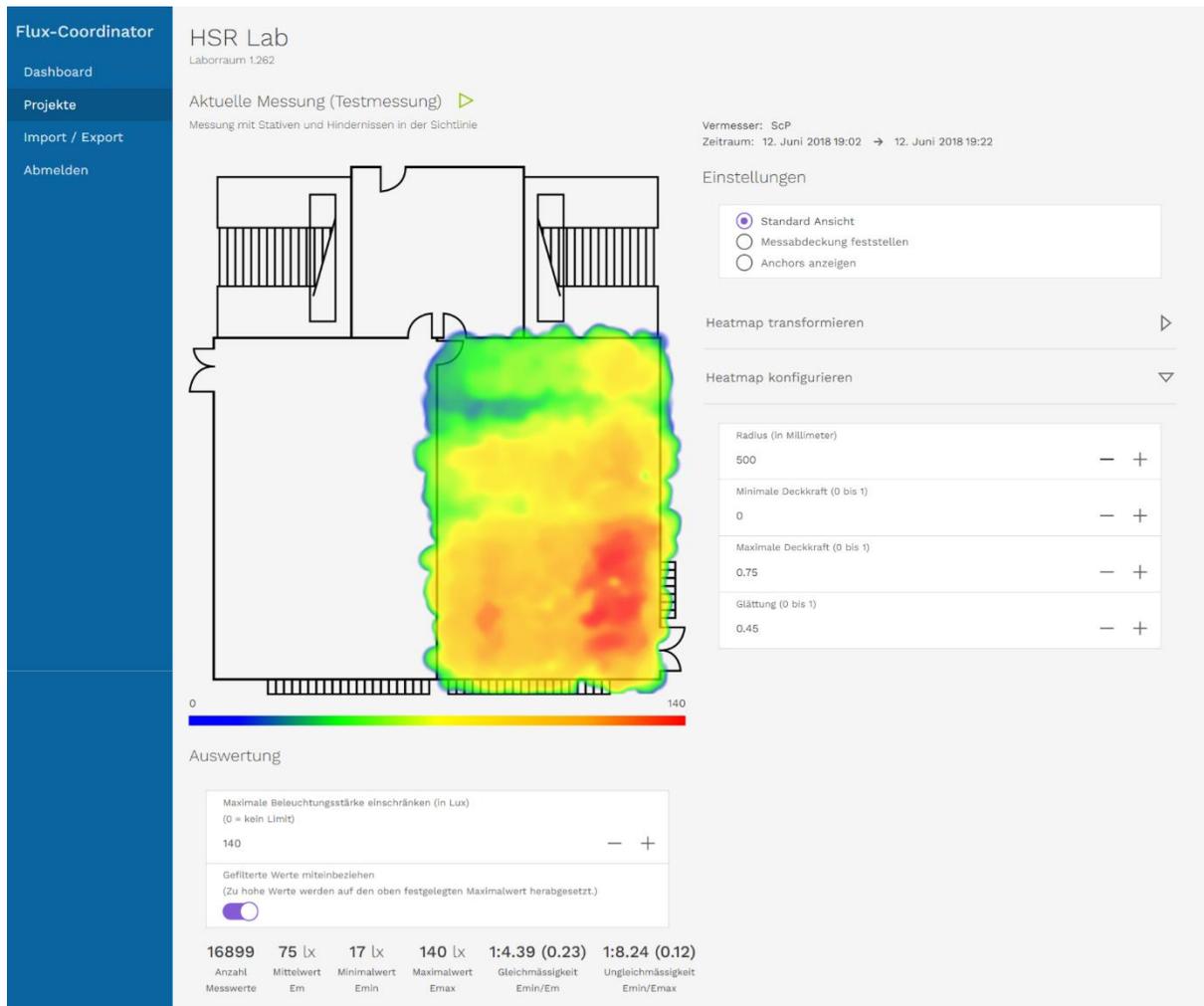


Abbildung 25 Screenshot einer Lux-Messung im HSR Labor

Hinweis: Die gezeigten Lux-Werte entsprechen nicht unbedingt den realen Lichtverhältnissen, da der Lichtsensor vorgängig mit einem geeichten Luxmeter kalibriert werden müsste. Nichtsdestotrotz sind die gemessenen Lux-Werte relativ zueinander korrekt.

8.4 HSR Forschungszentrum Lichtraum

Gegen Ende der Arbeit wurde im Lichthof des Forschungsgebäudes der HSR probiert, eine Messung unter Idealbedingungen durchzuführen. Dies half vor allem in der Optimierung der Sensoreinheit und im Feintuning der Heatmap-Visualisierung.

Da der Boden des Raumes mit quadratischen Platten ausgelegt ist, konnte als vereinfachten Grundriss ein Raster verwendet werden.

Abbildung 26 zeigt das Resultat der Messung. Das User Interface ist noch in einer früheren Version.

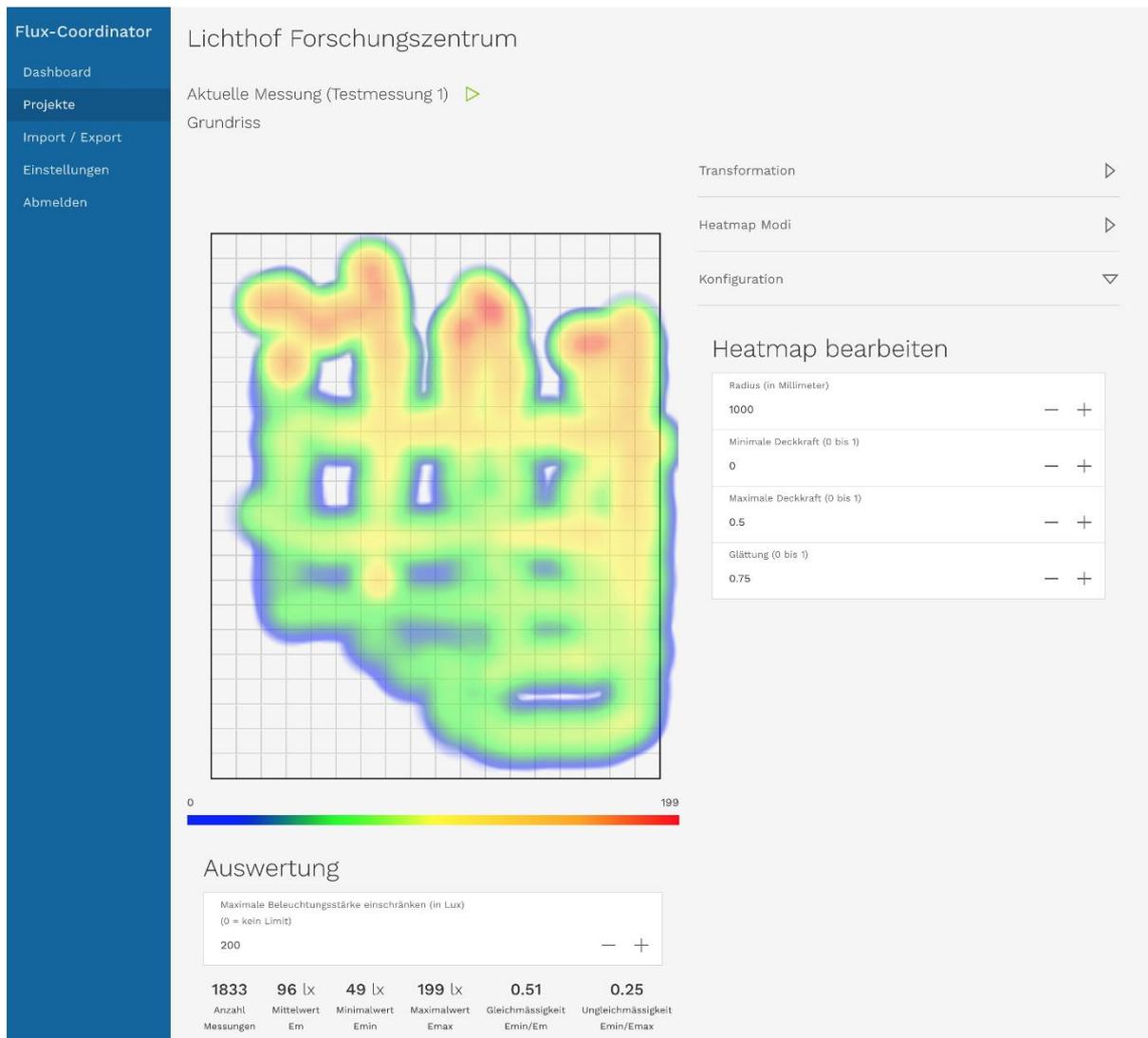


Abbildung 26 Screenshot einer Lux-Messung im Lichthof des HSR Forschungsgebäudes

9 Schlussfolgerung und Ausblick

Der Abschluss dieser Arbeit lässt eine Schlussfolgerung über das Ergebnis und die gesammelten Erkenntnisse zu. Dieses Kapitel zeigt die erreichten Ergebnisse und gibt einen Ausblick wie und mit welchen Erweiterungen der Flux-Coordinator in Zukunft eingesetzt werden könnte.

9.1 Beurteilung der Ergebnisse

Mit dem Flux-Coordinator wurde ein System geschaffen, das auch in der Praxis für umfangreiche Lichtmessungen eingesetzt werden kann. Im Verlauf der Arbeit wurden Leistungstests mit bis zu 50'000 Messwerten durchgeführt und es konnte stets die geforderte Leistung der nicht funktionalen Anforderungen eingehalten werden.

9.1.1 Entwickelte Komponenten und Features

Folgende wesentlichen Komponenten und Features wurden implementiert:

- Auslesen, Synchronisieren und Übermitteln der Sensordaten über die Python-Anwendung Flux-Sensors
- Vermittlung und Bereitstellung der Messdaten über das Java Play Backend Flux-Server
- Visualisierung der Messwerte in einer Heatmap-Darstellung und User Interface zur Steuerung des Systems in der React-Anwendung Flux-Frontend
- Filtern von zu hohen Lux-Werten aus der Visualisierung oder Begrenzung auf einen festen Maximalwert
- Verschiedene Heatmap-Modi zur Anzeige der konfigurierten Anchor-Positionen und zur Beurteilung der erreichten Messabdeckung
- Einstellungsmöglichkeiten der Heatmap-Darstellung, wie Radius, Deckkraft oder Glättung
- CRUD-Funktionalitäten für Projekte, Räume und Messungen
- Import und Export von Projekten, Räumen und Messungen im JSON-Format
- Sicherung des Systems durch Authentifizierung und Autorisierung im Backend

9.1.2 Offene Probleme

Folgende Punkte blieben ganz oder teilweise offen:

- Die Kalibrierung des Lichtsensors musste aus Zeitgründen leider weggelassen werden. Diese Anforderung belegte jedoch eine tiefere Priorität, da für die Darstellung einer Heatmap relative Werte grundsätzlich genügen.
- Eine Eingrenzung der Messhöhe konnte nicht realisiert werden. Die Resultate der Positionsbestimmung konnten im Laufe der Arbeit zwar wesentlich verbessert werden, jedoch weisen die Z-Werte noch immer eine zu grosse Streuung auf.
- Aus Performancegründen können nicht alle Container auf dem Raspberry Pi ausgeführt werden. Als Alternative können Frontend und Server auf einem separaten Notebook installiert werden und die Sensoreinheit verbindet sich automatisch darauf.

9.2 Einsatz und Weiterverwendung

Aufgrund der Anforderung nach einer praxistauglichen Lösung, steht dem produktiven Einsatz des Flux-Coordinator's grundsätzlich nichts mehr im Wege.

Ein Aspekt dieser Praxistauglichkeit war das Analysieren aller Einsatzbereiche und -szenarien. So wurde schliesslich ein verteiltes System entwickelt, das sowohl im Büro oder unterwegs zum Betrachten bisheriger Projekte als auch beim Kunden zur Erstellung neuer Messungen ohne eine feste Internetverbindung eingesetzt werden kann.

Durch die Aufteilung in unabhängige und separat ausführbare Komponenten, kann die Software in Zukunft modular weiterentwickelt oder einzelne Komponenten bei Bedarf gar komplett ersetzt werden.

9.2.1 Mögliche Erweiterungen

Folgende Features wurden im Verlaufe dieser Arbeit angedacht, um die Lösung weiter zu automatisieren oder auch um die Usability zu verbessern:

- Generische vordefinierte Setups der Pozyx Anchors, z.B. als quadratische Flächen mit einstellbarer Seitenlänge, um das Ausmessen und Eintragen der Anchors zu erleichtern
- Automatisches berechnen eines passenden Skalierungsfaktors, sodass bereits beim Erstellen einer neuen Messung alle Anchors innerhalb der Visualisierung des Grundrisses sind und vom Benutzer nur noch eine Feineinstellung vorgenommen werden muss
- Einblenden eines Punkts am Ort der letzten Messung in der Heatmap, um das Erreichen der Coverage zu erleichtern

9.2.2 Anforderungen an das Hilfsmittel zur Traversierung

Für eine Messung wird nun noch immer menschliche Unterstützung benötigt, um die Sensoreinheit im Raum zu bewegen, bis die erforderliche Messabdeckung erreicht ist. Auch dieser letzte Schritt der Automatisierung dürfte in Zukunft noch gelöst werden.

Ein Hilfsmittel, dass diese Traversierung durchführen könnte, müsste folgende Anforderungen erfüllen:

- Je nach gewünschter Genauigkeit sollte die Maximalgeschwindigkeit entsprechend der Berechnung im Kapitel 7.3.2 *Synchronisierung der Sensordaten* eingestellt werden können.
- Das Hilfsmittel sollte eine entsprechende Ladefläche für die Sensoreinheit bieten und das zusätzliche Gewicht tragen können. Wichtig dabei ist, dass die Sensoreinheit nach oben schauen muss und keine Hindernisse darüberliegen sollten.
- Da das Feature mit der Eingrenzung der Messhöhe nicht implementiert wurde, sollte das Hilfsmittel eine fest einstellbare Höhe anbieten.

Durch die Aufteilung des Systems in einzelne Container, könnte ein solches Hilfsmittel eine Verbindung zum Backend-Server aufbauen und dadurch Informationen zur aktuellen Messabdeckung abfragen.

Als pragmatische Lösung könnte die Hardware eines Roboter-Staubsaugers zur Traversierung verwendet werden. Dieser wäre zwar etwas langsam, würde dafür aber systematisch und komplett autonom die gesamte Fläche des Raumes abdecken. Die meisten Modelle bieten auch eine ausreichend grosse Deckplatte, auf der die Sensoreinheit befestigt werden könnte. Der einzige Nachteil,

nebst der niedrigen Geschwindigkeit, liegt in der Einschränkung auf flache Böden. Zur Zeit gibt es keinen Roboter-Staubsauger auf dem Markt, der eine Treppe hochsteigen könnte.

Eine weitere Lösung wäre eine autonom fliegende Drohne. Der Vorteil liegt klar in der Unabhängigkeit des Untergrunds und der höheren Geschwindigkeit. Die wenigsten Drohnen bieten allerdings eine genügend grosse Ladefläche für die Sensoreinheit, und dann erst noch auf der Oberseite bei den Propellern.

Durch eine Erweiterung solcher Hilfsmittel könnte schliesslich der gesamte Prozess der Lichtmessung automatisiert werden und die Überprüfung geltender Normen und Richtlinien wäre lediglich noch das Drücken eines Startknopfs.

10 Literaturverzeichnis

- [1 «dial.de» DIAL, 11 November 2015. [Online]. Available:
] <https://www.dial.de/de/article/luxmeter-app-vs-messgeraetsind-smartphones-zum-messen-geeignet/>. [Zugriff am 11 Juni 2018].
- [2 Pozyx BVBA, «System Performance,» Pozyx BVBA, April 2017. [Online]. Available:
] <https://www.pozyx.io/Documentation/Datasheet/SystemPerformance>. [Zugriff am 13 Juni 2018].
- [3 International Organization for Standardization, «Software engineering -- Product quality --
] Part 1: Quality model,» 2001.
- [4 Pozyx, «Pozyx - centimeter positioning for Arduino,» Pozyx, [Online]. Available:
] https://www.pozyx.io/Documentation/where_to_place_the_anchors. [Zugriff am 11 Juni 2018].
- [5 E. Evans, Domain-Driven Design. Tackling Complexity in the Heart of Software, Addison-
] Wesley, 2003.
- [6 S. Brown, «The C4 model for software architecture,» [Online]. Available:
] <https://c4model.com/>. [Zugriff am 8 April 2018].
- [7 Facebook Inc, «React - A JavaScript library for building user interfaces,» Facebook Inc,
] [Online]. Available: <https://reactjs.org/>. [Zugriff am 13 Juni 2018].
- [8 P. Hunt, «React: Rethinking best practices - YouTube,» JSConf, 30 October 2013. [Online].
] Available: <https://youtu.be/x7cQ3mrcKaY?t=2m>. [Zugriff am 13 Juni 2018].
- [9 K. Ross, «Flow support is broken as of 0.57.0,» 27 November 2017. [Online]. Available:
] <https://github.com/mui-org/material-ui/issues/9312>. [Zugriff am 08 Juni 2018].
- [1 Facebook Inc., «create-react-app/README,» Facebook Inc., 23 März 2018. [Online].
0] Available: <https://github.com/facebook/create-react-app/blob/master/packages/react-scripts/template/README.md>. [Zugriff am 09 Juni 2018].
- [1 L. Voss, «The State of JavaScript Frameworks, 2017,» npm Inc., 3 Januar 2018. [Online].
1] Available: <https://www.npmjs.com/npm/state-of-javascript-frameworks-2017-part-1#>.
[Zugriff am 13 Juni 2018].
- [1 «angular/angular,» 09 Juni 2018. [Online]. Available: <https://github.com/angular/angular>.
2] [Zugriff am 09 Juni 2018].
- [1 «Angular - Angular Glossary,» Google, [Online]. Available:
3] <https://angular.io/guide/glossary#typescript>. [Zugriff am 09 Juni 2018].
- [1 Vue.js, «Comparison with Other Frameworks,» Vue.js, 3 Juni 2018. [Online]. Available:
4] <https://vuejs.org/v2/guide/comparison.html>. [Zugriff am 09 Juni 2018].

- [1 V. Cromwell, «Between the Wires: An interview with Vue.js creator Evan You,» 30 Mai 2017. 5] [Online]. Available: <https://medium.freecodecamp.org/between-the-wires-an-interview-with-vue-js-creator-evan-you-e383cbf57cc4>. [Zugriff am 09 Juni 2018].
- [1 «Vue CLI | Overview,» 08 Juni 2018. [Online]. Available: <https://cli.vuejs.org/guide/>. 6] [Zugriff am 09 Juni 2018].
- [1 L. R. w. chantastic, «Container Components,» 7 März 2015. [Online]. Available: 7] <https://medium.com/@learnreact/container-components-c0e67432e005>. [Zugriff am 09 Juni 2018].
- [1 P. Webb, D. Syer, J. Long, S. Nicoll, R. Winch, A. Wilkinson, M. Overdijk, C. Dupuis, S. 8] Deleuze, M. Simons, V. Pavić, J. Bryant und M. Bhave, «Spring Boot Reference,» [Online]. Available: <https://docs.spring.io/spring-boot/docs/2.0.2.RELEASE/reference/htmlsingle/#using-boot-build-systems>. [Zugriff am 06 06 2018].
- [1 L. Coward und R. Lander, «core/2.1-supported-os,» 1 Juni 2018. [Online]. Available: 9] <https://github.com/dotnet/core/blob/master/release-notes/2.1/2.1-supported-os.md>. [Zugriff am 06 Juni 2018].
- [2 Lightbend Inc., «Handling asynchronous results,» 3 Mai 2018. [Online]. Available: 0] <https://www.playframework.com/documentation/2.6.x/JavaAsync>. [Zugriff am 08 Juni 2018].
- [2 «Redis,» [Online]. Available: <https://redis.io/topics/memory-optimization>. [Zugriff am 10 1] Juni 2018].
- [2 PostgreSQL Global Development Group, «PostgreSQL: About,» [Online]. Available: 2] <https://www.postgresql.org/about/>. [Zugriff am 10 Juni 2018].
- [2 The PostgreSQL Global Development Group, «Appendix D. SQL Conformance,» [Online]. 3] Available: <https://www.postgresql.org/docs/current/static/features.html>. [Zugriff am 11 Juni 2018].
- [2 IBM Corporation, «Java Persistence API 2.1 behavior changes,» IBM Corporation, 22 März 4] 2018. [Online]. Available: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSAW57_liberty/com.ibm.websphere.wlp.nd.multiplatform.doc/ae/cwlp_jpa21_behavior.html. [Zugriff am 11 Juni 2018].
- [2 MongoDB Inc, «MongoDB Limits and Thresholds,» [Online]. Available: 5] <https://docs.mongodb.com/manual/reference/limits/>. [Zugriff am 11 Juni 2018].
- [2 MongoDB Inc., «GridFS,» MongoDB Inc, [Online]. Available: 6] <https://docs.mongodb.com/manual/core/gridfs/>. [Zugriff am 11 Juni 2018].
- [2 Countly Ltd., «Document Splitting,» [Online]. Available: 7] <https://resources.count.ly/docs/document-splitting>. [Zugriff am 11 Juni 2018].

- [2 MongoDB Inc, "JSON and BSON," MongoDB Inc, [Online]. Available: 8] <https://www.mongodb.com/json-and-bson>. [Accessed 11 03 2018].
- [2 B. Wooldridge, «About Pool Sizing» HikariCP, 8 Januar 2017. [Online]. Available: 9] <https://github.com/brettwooldridge/HikariCP/wiki/About-Pool-Sizing>. [Zugriff am 08 Juni 2018].
- [3 T. Olivier, «Material-UI,» 29 Mai 2018. [Online]. Available: <https://material-ui.com/>. [Zugriff 0] am 12 Juni 2018].

Anhang

A. Glossar

DBMS

Installierte Software für die Verwendung des Datenbanksystems (Datenbankmanagementsystem) 48

Einplatinencomputer

Vollwertiger Computer, bei dem alle elektronischen Komponenten in eine einzige Leiterplatte integriert sind..... 41

Heatmap

Visualisierung von Messwerten oder einer mathematischen Funktion, in der die Daten als Farbwerte einer Skala dargestellt werden..... 17

I2C

Serieller Datenbus zur Kommunikation unter Hardware Bausteinen (Inter-Integrated Circuit) 41

Lazy Loading

Bedeutet spezifisch im Kontext von JPA, dass ein Objekt erst geladen wird, wenn es verwendet wird. 48

Lux

SI-Einheit der Beleuchtungsstärke 17

NoSQL

Datenbanktechnologie mit einer nicht-relationalen Implementierung (english Not only SQL) 48

RTT

Paketumlaufzeit in der Netzwerkkommunikation (Round Trip Time) 43

stateless

Komponenten oder Protokolle, die keinen Zustand besitzen. Die benötigten Informationen werden mit dem Aufruf mitgeliefert. 30

Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Alternative Stromversorgung, die bei einer Umschaltung oder einem Ausfall der primären Stromversorgung als Überbrückung dient und ein Abschalten des angeschlossenen Geräts verhindert. 56

B. Grundsätze der Verwendung des Positionierungssystems Pozyx

Folgende Begriffe von Pozyx werden für die einzelnen Komponenten verwendet:

- Anchor (UWB-Antenne als Referenzpunkt zur Positionsbestimmung im Raum)
- Tag (Per USB an die Sensoreinheit angeschlossene Hardware zur Positionsbestimmung)

Aus der offiziellen Dokumentation [4] auf der Website von Pozyx und im Kontakt mit deren Supportabteilung ergaben sich verschiedene Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung, die nachfolgend entsprechend ihrer Wichtigkeit absteigend sortiert aufgelistet sind:

- Position der Anchors
- Kalibrierung der Anchors
- Wahl des Algorithmus und Filters im Code

Position der Anchors

Hinter der Positionierung der Anchors stehen folgende Grundsätze und «Best Practices»:

- Für dreidimensionalen Messungen werden mindestens vier Anchors benötigt.
- Die Anchors sollten immer mit der Antenne nach oben platziert werden. (In diesem Fall liegt der Netzanschluss unten.)
- Die Anchors sollten möglichst weit entfernt voneinander und gleichmässig um den zu vermessenden Bereich aufgestellt werden. Die maximale Distanz liegt in sehr offenen Umgebungen bei freier Sichtlinie bei 50 Metern.
- Hindernisse in der Sichtlinie der Anchors zum Tag sind unbedingt zu vermeiden, da sie die UWB-Verbindung stören können. Besonders problematisch sind metallische Objekte oder Flüssigkeiten.
- Anchors sollen einen Abstand von mindestens 30 Zentimeter zu grösseren metallischen Objekten und zum Boden einhalten.
- Für dreidimensionale Messungen sollten die verfügbaren Anchors aufgeteilt und sowohl möglichst tief als auch möglichst hoch im Raum platziert werden

Das Erreichen von guten Z-Werten stellt die grösste Herausforderung dar, da die Abstände der Anchors üblicherweise auf den X- und Y-Achsen wesentlich grösser ausfallen. Idealerweise sollten bei vier Anchors jeweils zwei gegenüberliegende Anchors möglichst hoch und die anderen beiden möglichst tief im Raum platziert werden.

Hinweis: Pozyx empfiehlt für 3D-Messungen 6 oder 8 Anchors zu verwenden, da das Aufrechterhalten einer freien Sichtlinie auf alle Anchors unter den obenstehenden Bedingungen in der Realität schwierig ist.

Kalibrierung der Anchors

Die Kalibrierung beschreibt das Vermessen der Anchor-Position im Raum relativ zu einem vorher frei gewählten Nullpunkt. Ein gutes Beispiel hierfür findet sich im offiziellen Tutorial⁴¹ von Pozyx.

⁴¹ https://www.pozyx.io/Documentation/Tutorials/ready_to_localize

Die Anchors sollten mit Millimetergenauigkeit ausgemessen werden, optimalerweise mit einem Laser-Entfernungsmesser.

Wahl des Algorithmus und Filters im Code

Die Wahl des optimalen Algorithmus und Filters wurde bereits in der Realisierung beschrieben und muss während der Benützung des Flux-Coordinator Systems nicht mehr angepasst werden.

C. Installation Raspberry Pi

Für die Installation des Raspberry Pi sind nachfolgend eine manuelle und eine automatisierte Variante beschrieben. Um Fehler zu vermeiden wird die automatisierte Installation empfohlen. Die manuelle Installation kann als Checkliste zur Fehlersuche oder bei der Verwendung einer anderen Hardware verwendet werden. Die Resultate der beiden Vorgehensweisen sind identisch und wurden mit folgenden Raspberry Pi Modellen getestet:

- Raspberry Pi 3 Model B+⁴²

Manuelle Installation

Als erstes muss das Betriebssystem des Raspberry Pi heruntergeladen werden. Die Installation wurde getestet mit dem aktuell empfohlenen Raspbian Stretch in der Version Lite ohne grafische Benutzeroberfläche.

Das Image kann unter folgender Quelle bezogen werden: <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>

Anschliessend muss das Image auf die SD-Karte geladen werden. Dieser Vorgang ist abhängig vom lokal installierten Betriebssystem. Es kann die offizielle Anleitung befolgt werden: <https://www.raspberrypi.org/documentation/installation/installing-images/>.

Bevor die SD-Karte in den Raspberry Pi eingefügt wird, müssen noch zwei Dateien hinzugefügt werden, um das System im «Headless Mode» ohne Monitor und Tastatur betreiben zu können.

Folgende Dateien müssen ins Root-Verzeichnis der SD-Karte hinzugefügt werden:

- Leere Datei mit dem Namen **ssh**, um den ssh Service automatisch zu aktivieren
- Konfigurationsdatei mit dem Namen **wpa_supplicant.conf** und folgendem Inhalt:

```
1 country=CH
2 ctrl_interface=DIR=/var/run/wpa_supplicant GROUP=netdev
3 update_config=1
4
5 network={
6     ssid="flux-network"
7     scan_ssid=1
8     psk="fcwFCKLKVa5C7j6R3Jrt"
9     key_mgmt=WPA-PSK
10 }
```

Hinweis: Dateiname, -endung und Inhalt müssen genau der Beschreibung oben übereinstimmen, damit sie vom Raspberry Pi korrekt geladen und verarbeitet werden. Die Datei *ssh* hat keine Dateiendung.

Nun kann die SD-Karte ausgeworfen und in den Raspberry Pi eingefügt werden. Nach Abschluss des Boot-Vorgangs kann eine SSH-Verbindung aufgebaut werden:

```
$ ssh pi@192.168.1.147
```

⁴² <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>

Hinweise:

- Der verwendete Computer und der Raspberry Pi müssen sich im selben WLAN-Netzwerk mit der oben beschriebenen Konfiguration befinden (Datei *npa_supplicant.conf*).
- Die IP-Adresse des SSH-Befehls muss mit der Adresse des Raspberry Pi übereinstimmen. Diese kann beispielsweise im WLAN-Router ausgelesen werden.
- Das Default Passwort des Benutzers *pi* ist *raspberry*.
- Unter Windows kann eine SSH Client Software, wie z.B. PuTTY verwendet werden.

Nach der Anmeldung kann der Raspberry Pi über folgenden Befehl konfiguriert werden:

```
sudo raspi-config
```

Es müssen folgende Einstellungen vorgenommen werden:

- Dateisystem erweitern
- Hostname: fluxpi
- User-Passwort: fluxPiUser
- I2C aktivieren
- Zeitzone einstellen

Nach diesen Einstellungen muss der Raspberry Pi neugestartet werden und anschliessend erneut eine SSH-Verbindung aufgebaut werden.

Nun soll das Betriebssystem mit folgenden Befehlen aktualisiert werden:

```
sudo apt-get update  
sudo apt-get upgrade
```

Und anschliessend das Flux-Sensors GitHub Repository⁴³ herunterladen und nach folgender Anleitung installieren: <https://github.com/Flux-Coordinator/flux-sensors#install-productive>

Automatisierte Installation

Für die automatisierte Installation des Raspberry Pi wird die Software PiBakery⁴⁴ benötigt. Nach der lokalen Installation und Ausführung von PiBakery kann unter *Import* die Konfigurationsdatei `\Ressourcen\RaspberryPi\PiBakery\fluxpi.xml` geladen werden.

⁴³ <https://github.com/Flux-Coordinator/flux-sensors>

⁴⁴ <http://www.pibakery.org/>



Abbildung 27 PiBakery mit importierter Konfiguration

Sofern die SD-Karte am Computer angeschlossen ist, kann die Konfiguration unter *Write* auf die SD-Karte geschrieben werden. Als Betriebssystem sollte ebenfalls Raspbian-lite gewählt werden.

Warnung: Das gewählte Laufwerk wird gelöscht und überschrieben, das heisst alle Daten, die darauf gespeichert sind, werden dauerhaft gelöscht.

Hinweis: Für das Herunterladen der GitHub Repositories (git clone) wurde ein PiBakery Block der Community verwendet, der zur Zeit dieser Bachelorarbeit noch nicht zu PiBakery hinzugefügt wurde. Dazu muss lediglich der Unterordner `\gitclone` im selben Ordner der Konfigurationsdatei in das Fenster der Applikation gezogen werden.

Pull Request: <https://github.com/davidferguson/pibakery/pull/127>

Installationsanleitung: <http://www.pibakery.org/docs/contribute.html>

Nach Abschluss des Schreibvorgangs kann die SD-Karte ausgeworfen und in den Raspberry Pi eingefügt werden. Direkt nach dem Einschalten des Raspberry Pi werden die Scripts ausgeführt und das System vorbereitet. Dieser Vorgang kann einige Minuten dauern.

Analog zur manuellen Installation kann nun per SSH auf den Raspberry Pi verbunden werden. Als erstes sollten die Logs von PiBakery unter `/boot/PiBakery/` überprüft werden, um festzustellen, ob die Installation erfolgreich abgeschlossen wurde. Mit dem Befehl `tail -f /boot/PiBakery/firstboot.log` kann die Installation überwacht werden.

Danach müssen über den Raspbian Wizard noch einige letzte Einstellungen manuell konfiguriert werden:

```
sudo raspi-config
```

Es müssen folgende Einstellungen vorgenommen werden:

- Dateisystem erweitern
- Zeitzone einstellen

Installation von PiJuice

PiJuice⁴⁵ ist eine portable Stromversorgung für den Raspberry Pi. Die Installation der Management Software `pijuice-base`⁴⁶ ist optional, wird jedoch empfohlen, falls die PiJuice Hardware verwendet wird:

```
sudo apt-get install pijuice-base
```

Anschliessend sollte geprüft werden, ob der PiJuice Service korrekt ausgeführt wird:

```
systemctl status pijuice.service
```

Über den Befehl `pijuice_cli.py` kann PiJuice anschliessend auf der Kommandozeile konfiguriert werden. Weitere Informationen sind in der Dokumentation⁴⁷ im GitHub Repository zu finden.

An drei benutzerdefinierten Buttons können Standardfunktionen oder eigene Scripts zugewiesen werden. Die Werkseinstellung kann ebenfalls in der Dokumentation im GitHub Repository gefunden werden⁴⁸.

⁴⁵ <https://uk.pi-supply.com/products/pijuice-standard>

⁴⁶ <https://github.com/PiSupply/PiJuice>

⁴⁷ <https://github.com/PiSupply/PiJuice/tree/master/Software#pijuice-cli>

⁴⁸ <https://github.com/PiSupply/PiJuice/tree/master/Software#buttons>