

Bachelorarbeit

**Design und Entwicklung geeigneter
Visualisierungen für
Feinstaub-Sensordaten**

Anne Reuter

Studiengang:	Informatik
Prüfer/in:	Prof. Dr. Thomas Ertl
Betreuer/in:	Dr. Tanja Blascheck, Dr. Tobias Isenberg
Beginn am:	21. Oktober 2019
Beendet am:	29. Juni 2020

Kurzfassung

Obwohl Luftverschmutzung durch Feinstaub eine große Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellt, gibt es für diese Thematik noch kein ausgeprägtes Bewusstsein in der deutschen Bevölkerung. In den letzten Jahren gab es vermehrt Projekte und Initiativen, die verfügbare Messdaten aufbereiten, hauptsächlich in Form von Web-Karten und Apps. Eines davon ist das Projekt luftdaten.info des Stuttgarter OK Labs, das zusätzlich Anleitungen zum Eigenbau von Messstationen anbietet und mithilfe dieser Daten stellenweise ein bereits sehr engmaschiges Messnetz aufgebaut hat. Web- und Smartphone-Applikationen benötigen jedoch eine Form der Interaktion, die ein Informationsbedürfnis voraussetzt, das womöglich noch gar nicht gegeben ist. In dieser Arbeit soll deswegen die Möglichkeit eines kleinen Feinstaub-Monitors untersucht werden, der ähnlich einer Wetterstation in der Wohnung aufgestellt wird und durch die dauerhafte Präsenz tiefgehend für Feinstaub sensibilisiert. Dafür wurde eine Visualisierung entwickelt, die auf einen Blick alle wichtigen aktuellen Werte bereitstellt, als auch Verläufe unterschiedlicher Granularitäten und Vergleichswerte aus der Umgebung darstellt. Diese Visualisierung wird auf einem, aus preisgünstiger Hardware zusammengebauten, Monitor angezeigt und mit Daten aus einer lokalen Datenbank befüllt, die alle benötigten Werte aus den Schnittstellen von luftdaten.info abfragt und speichert. Dieser Monitor wurde im Zuge einer kleinen Pilotstudie in einem Haushalt aufgestellt, um die Verwendung und die entwickelte Visualisierung zu evaluieren.

Abstract

Although air pollution by particulate matter poses a major threat to human health, there is not yet a pronounced awareness of this issue among the German population. In recent years, there have been an increasing number of projects and initiatives that process available measuring data, mainly in the form of web maps and apps. One of these is the luftdaten.info project of the Stuttgart-based OK Labs, which also offers instructions on how to build measuring stations yourself and, with the help of this data, has built up an already very dense measuring network in places. Web and smartphone applications, however, require a form of interaction that presupposes a need for information that may not yet exist. Therefore, in this thesis the possibility of a small particulate matter monitor is investigated, which is installed in the apartment similar to a weather station and sensitizes more deeply for particulate matter by its permanent presence. For this purpose a visualization was developed, which provides all important current values at a glance, as well as showing the course of different granularities and comparative values from the environment. This visualisation is displayed on a monitor assembled from low-cost hardware and filled with data from a local database, which queries and stores all required values from the luftdaten.info interfaces. This monitor was installed in a small pilot study in a household to evaluate the use and the developed visualization.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	17
2	Grundlagen	19
2.1	Visualisierung	19
2.2	Luftqualität und Feinstaub	31
3	Verwandte Arbeiten	41
3.1	Wissenschaftliche Arbeiten zur Visualisierung von Feinstaubdaten und Visualisierung auf kleinen Displays	41
3.2	Feinstaub-Karten	42
3.3	Feinstaub-Apps	46
3.4	Feinstaub-Heimmonitore	51
3.5	Zusammenfassung der existierenden Visualisierungen	51
4	Visualisierungskonzept	55
4.1	Prämissen	55
4.2	Erste Entwürfe	55
4.3	Verfeinerung	61
4.4	Auswahl	62
5	Implementierung	65
5.1	Messstation	66
5.2	Datenbank	67
5.3	Visualisierung	70
6	Evaluierung	83
6.1	Vorinterview und Durchführung	84
6.2	Nachinterview und Ergebnisse	84
6.3	Fazit	85
7	Zusammenfassung und Ausblick	87
	Literaturverzeichnis	89

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispiele für Visualisierungen.	19
2.2	Beispiele für präattentive und nicht-präattentive Aufgaben.	22
2.3	Die grundlegende Struktur des Visualisierungsprozesses, von Rohdaten bis zum endgültigen Bild beim Betrachter. Basierend auf [CMS99, p. 17] und [CMS99, p. 25].	24
2.4	Die Ausprägung des Fokus zeitbasierter Daten ist entweder punkt- oder intervallbasiert.	24
2.5	Aufgaben nach Keller et al. [KKM+94] und die Aufteilung in Unteraufgaben für zeitorientierte Daten nach MacEachren [Mac95].	26
2.6	Die beispielhafte, statische Abbildung von Zeit auf Raum mithilfe unterschiedlicher Liniendiagramme [AMST11, p. 153, Figure 7.2]. Abbildung lizenziert unter Nr. 4816611239379 durch Springer Nature.	26
2.7	Schematische Darstellung von einfachen Beispieldaten als Tabelle (links), Scatterplot-Matrix (mittig) und mit parallelen Koordinaten (rechts) [Mun14, p. 163, Figure 7.12].	28
2.8	Um zyklische Abfolgen zu analysieren, kann es hilfreich sein, diese statt auf linearen auf radialen Achsen anzuordnen [Mun14, Figure 7.15c]	28
2.9	multivariate Daten können auch in Balkendiagrammen dargestellt werden, wie hier durch nebeneinander angeordnete Balken pro Kategorie. [Mun14, Figure 12.8a] .	29
2.10	Beispiele für Glyphen. Links (a) an Linie-, Flächen-, Balken- und Säulendiagramme angelehnte Glyphen. Rechts (b) Beispiele für sternförmige und netzförmige Glyphen [War02, p. 3, Figure 1].	30
2.11	Mittlere PM10-Konzentration in Deutschland seit 1995. Quelle: Umweltbundesamt 2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_trend-pm10-jmw/2019-II-01.pdf , Lizenz: CC BY-SA 4.0 .	35
2.12	Quellen der Feinstaubbelastung an der Messtelle “Am Neckartor” durch das Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg, Quelle: https://www.stadtlima-stuttgart.de/Quellen-der-Feinstaubbelastung.htm mit freundlicher Genehmigung der Stadt Stuttgart.	35
2.13	Der Sensor SDS011 als schematische Zeichnung und Foto. Quelle: [SMD18, p. 3, Figure 1], Abbildung lizenziert unter Nr. 4811781481492 durch John Wiley and Sons.	36
3.1	Die Browservisualisierung der Daten bei Chanthakit et al. [CR18] (links und mittig), sowie die Visualisierung von häuslichen Feinstaubdaten durch Kim und Paulos [KP09].	42
3.2	Übersicht und Detailansicht der Feinstaubkarte von luftdaten.info des Stuttgarter OK Labs [Stu19b]. Quelle: Screenshot.	43

3.3	Übersicht und Detailansicht des World Air Quality Index [Pro20]. Die Detailsicht zeigt den aktuellen AQI (Markierung a), Balkendiagramme der Verläufe vom PM2.5, PM10, O ₃ und NO ₂ der letzten 24 Stunden (Markierung b), eine Vorhersage der nächsten fünf Tage (Markierung c) und eine Heatmap der letzten zwölf Monate (Markierung d). Quelle: Screenshot.	44
3.4	Übersichtskarte von openaq.org [Ope20]. Die Messstationen werden durch entsprechend der momentanen Feinstaubkonzentration eingefärbte Punkte repräsentiert. Quelle: Screenshot	45
3.5	Detailwerte einer Messstation bei OpenAQ: Der Verlauf aller Werte über die letzten sieben Tage kann eingesehen werden. Da für Baden-Württemberg keine Messstationen verzeichnet sind, hier der Verlauf der Messstation in Ulm [Ope20]. Quelle: Screenshot	45
3.6	Übersichtskarte der Luftqualität in Europa der Europäischen Umweltagentur [Umw19a]. Messstationen werden durch entsprechend dem Messwert eingefärbte und größenskalierte Kreise dargestellt. Quelle: Screenshot	47
3.7	Auswahl der Messstation Stuttgart am Neckartor auf der Seite der Europäischen Umweltagentur [Umw19a]. Ein kurzer Steckbrief (Markierung a) bietet Detailinformationen zur Messstation, beispielsweise ihrer Lage. Ein Kreisdiagramm zeigt die Anteile verschiedener AQI-Einstufungen im Verlauf der letzten 365 Tage (Markierung b). Einzeilige Heatmaps bieten den PM2.5-, den PM10- und den daraus resultierenden Gesamt-AQI Verlauf der letzten sieben Tage (Markierung c). Quelle: Screenshot	47
3.8	Übersichtskarte des Umweltundesamt mit ausgewählter Station Stuttgart am Neckartor [Umw19b]. Quelle: Screenshot	48
3.9	Übersichtskarte der Region Stuttgart auf der Karte der Firma Breezometer [Bre19]. Die Messstation wird durch ein kreisförmiges Popup angezeigt, mit einer Markierung des momentanen Wertes auf einer kreisförmigen Skala. Der Wert wird zudem mittig angezeigt. Die Karte ist kontinuierlich eingefärbt gemäß der berechneten Konzentration am jeweiligen Ort. Quelle: Screenshot	48
3.10	Weltübersicht mit den Messstationen von PurpleAir [Pur19]. Die Messstationen werden durch Kreise repräsentiert, die gemäß ihrem Wert beschriftet und eingefärbt sind. Quelle: Screenshot	49
3.11	Liniendiagramm einer einzelnen Messstation von PurpleAir [Pur19] über die letzten sieben Tage der ausgewählten Konzentration. Daneben der aktuelle Werte der Station. Quelle: Screenshot	50
3.12	Verwendete Glyphen zur Enkodierung des aktuellen AQI in verschiedenen Apps.	51
3.13	Verwendete Balkendiagramme für Konzentrationsverläufe von Feinstaub in verschiedenen Apps.	52
3.14	Verwendete Liniendiagramme für NO ₂ in verschiedenen Apps.	52
3.15	Anzeige der aktuellen Luftschadstoffkonzentrationen als Kreisdiagramme in der App Air Quality Checker. Quelle: Screenshot	53
4.1	Entwürfe der Designphase.	56
4.2	Entwürfe der Designphase.	57
4.3	Entwürfe der Designphase.	58
4.4	Entwürfe der Designphase.	59
4.5	Entwürfe der Designphase.	60

4.6	Verfeinerungen der ersten Entwürfe.	63
4.7	Die dritte Verfeinerung orientiert sich an nichtlinearen Darstellungen der Verläufe. In der oberen Darstellung befindet sich der aktuelle PM2.5-Wert in einer Box in der linken oberen Ecke, weitere aktuelle Werte werden in Textboxen am rechten Rand angezeigt. Der Verlauf der PM2.5-Konzentration wird durch gemäß dem Wert skalierte und eingefärbte Quadrate repräsentiert, die sich je näher an der linken oberen Ecke befinden, desto aktueller der repräsentierte Wert ist. In der unteren Variante befindet sich der aktuelle PM2.5-Wert mittig, während der Verlauf der PM2.5-Konzentration als skalierte und eingefärbte Kreise nach dem Prinzip einer Wordcloud um das Zentrum eingeordnet werden. Weitere aktuelle Werte befinden sich in Textboxen am unteren Displayrand.	64
5.1	Die eigene Messstation ist im Messnetz von luftdaten.info registriert. Luftdaten.info fragt deren Daten ab und stellt sie über eine API zur Verfügung. Über diese API fragen Skripte die Daten des eigenen und der umgebenden Sensoren ab und schreiben sie in die lokale Datenbank. Innerhalb des lokalen Netzwerks fragt die Implementierung der Visualisierung die Daten aus der Datenbank ab und stellt sie dar.	65
5.2	Die Messstation: links mit geöffnetem Deckel und beschrifteten Hauptkomponenten (Entwicklerboard (ESP8266), Feinstaubsensor (SDS011) und Temperatur-/Luftfeuchtesensor (BME280)), rechts mit geschlossenem Deckel. Die Verteilerdose ist auf zwei Metallschienen geschraubt, die mit doppelseitigem Klebeband an der Fensterscheibe befestigt sind. Die Stromversorgung wird unten aus der Dose heraus und durch die Fensterdichtung in den Innenraum geführt.	66
5.3	Der Standort der Messstation ist an einer asphaltierten Einfahrt zur Kirche, die zu Stoßzeiten häufig frequentierte Straße ist wenige Meter entfernt.	67
5.4	Standort des angemeldeten Sensors auf der Übersichtskarte von luftdaten.info. . .	68
5.5	Der verwendete Raspberry Pi. Links der Stromanschluss und die SD-Karte mit dem Betriebssystem, unten der HDMI-Anschluss zum Bildschirm. Rechts der USB-Stick, der die Datenbank speichert und die Verbindung zu einem USB-Hub, um Maus und Tastatur anschließen zu können.	69
5.6	Ausschnitt aus der influxdb.conf-Datei mit den abgeänderten Speicherpfaden. Alle von InfluxDB produzierten Daten werden jetzt auf dem USB-Stick gespeichert. . .	70
5.7	Ausschnitt aus der influxdb.conf-Datei mit den entkommentierten Zeilen, die die Authentifizierung aktivieren. Ein Abrufen der InfluxDB-Daten ist danach nur mit der Eingabe von Username und Passwort möglich.	71
5.8	Übersicht über die Standorte und IDs von Sensoren, die für die Visualisierung herangezogen wurden (Screenshot der Karte von luftdaten.info).	72
5.9	Links das JSON-Gerüst für zwei Datenpunkte (PM2.5 und PM10) und rechts ein Auszug aus der Datenbank. Es wurde nach dem "measurement" gefiltert, die Spalten der Tabelle sind dann der Zeitstempel, die Sensor-ID, der Wertetyp (dementsprechend "P2") und der entsprechende Wert.	72
5.10	Schematische Beschriftung für die Pins auf der Rückseite des 4-Inch-Displays. . .	74
5.11	Ausschnitt aus der Datei User_Setup_Select.h der TFT_eSPI-Bibliothek zur Verwendung des 4-Inch-Displays mit dem ILI9486-Treiberchip. Die markierte Zeile muss entkommentiert sein. Die Datei User_Setup.h darf dabei kein Setup aktiviert haben.	75

5.12	Ausschnitt aus der Datei User_Setup.h der TFT_eSPI-Bibliothek zur Verwendung des 2,4-Inch-Displays mit dem ILI9341-Treiberchip. Die markierten Zeilen müssen entkommentiert sein. Die Datei User_Setup_Select.h darf dabei kein Setup aktiviert haben.	75
5.13	Ein erster Entwurf für die Textboxen und eine schematische Darstellung des Balkendiagramms mit zufälligen Balkenhöhen und Farben.	77
5.14	Eine erste Verbindung von Linien- und Balkendiagramm. Darunter sieht man die ersten Züge der Heatmap.	77
5.15	Die Balkendiagramme werden gestapelt, um sowohl die PM2.5- als auch die PM10-Konzentration darzustellen. Der Anteil an PM2.5 in der Menge an PM10 wird dabei am unteren Ende des Balkens dunkler schattiert.	78
5.16	Oben das Balkendiagramm der letzten 24 Stunden in halbstündigen Intervallen, darunter das Balkendiagramm der letzten sieben Tage in 12-Stunden-Intervallen. Ganz unten die Heatmap des PM2.5-Mittelwerts aller Sensoren der letzten 14 Tage.	78
5.17	Die zu konfigurierenden Variablen im Arduino-Programm. Zum einen die SSID und Passwort des WLANs, als auch die IP des Raspberry Pis im Netzwerk. Dazu noch die ID des nächsten Sensors und die ID des Temperatur- und Luftfeuchtesensors.	80
5.18	Die finale Visualisierung auf dem 4-Inch-Display. Rechts die vier Textfelder. Oben das Balken-/Liniendiagramm für die letzten 24 Stunden, darunter das Balken-/Liniendiagramm für die letzten sieben Tage. Ganz unten die Heatmap für die letzten 28 Tage.	80
5.19	Die zwei finalen Ansichten auf dem 2,4-Inch-Display.	82
6.1	Für die Evaluierung wurde für das 4-Inch-Display und das angeschlossene Entwicklungsboard ein Pappgehäuse gebaut.	83

Tabellenverzeichnis

2.1	Die Effektivität von visuellen Variablen bei unterschiedlichen Attributtypen, absteigend geordnet von oben nach unten. Basierend auf McKinlay [McK99]. Nicht vorhandene visuelle Variablen sind für den Attributtyp unerheblich. Bewegung als visuelle Variable wurde nicht berücksichtigt.	23
2.2	Einteilung von Feinstaubkonzentrationen in Indexklassen gemäß dem Luftqualitätsindex für langfristige Auswirkungen der Landesanstalt für Umweltschutz des Landes Baden-Württemberg [Umw05, p. 10].	37
2.3	Einteilung von Feinstaubkonzentrationen in Indexklassen gemäß der Übersichtskarte für Luftqualität des Umweltbundesamts [Umw19b].	37
2.4	Einteilung von Feinstaubkonzentrationen in Indexklassen gemäß des European Air Quality Index der Europäischen Umweltagentur [Umw19a].	37
2.5	Einteilung von Feinstaubkonzentrationen in Indexklassen gemäß des CAQI [CIT07], jeweils als (maximaler) stündlicher Wert oder gleitender Tagesmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	38
2.6	Einteilung des AQI in Gefahrenklassen gemäß der Environmental Protection Agency (EPA) [CIT07].	39
3.1	Vergleich der Luftqualitätskarten der vorgestellten Open-Science-Projekte.	46
3.2	Vergleich der Luftqualitätskarten der Europäischen Umweltagentur und dem Umweltbundesamt.	49
3.3	Vergleich der Luftqualitätskarten der Firmen Breezometer und PurpleAir.	50
4.1	Übersicht über die ersten zehn Entwürfe.	61
5.1	Spezifikationen des ESP32-NodeMCU-Entwicklerboards [Joy].	73
5.2	Entscheidungsmatrix zur Auswahl des Displaytyps.	73
5.3	Spezifikationen der ausgewählten Displays [QIT; Wav20].	73
5.4	Wiring für das 2.4-Inch-Display und die NodeMCU.	74
5.5	Wiring für den Touchscreen des 2.4-Inch-Display und die NodeMCU.	74
5.6	Wiring für das 4-Inch-Display und die NodeMCU.	75
5.7	Verwendete Einteilung in Indexklassen, angelehnt an die Indexklassen der European Environment Agency.	76

Abkürzungsverzeichnis

AQI Luftqualitätsindex (engl. air quality index). 10

PM Feinstaub (engl. particulate matter). 9

TSP Schwebstaub (engl. total suspended particles). 32

UFP Ultrafeine Partikel (engl. ultra fine particles). 32

WHO Weltgesundheitsorganisation (engl. world health organisation). 31

1 Einleitung

Obwohl die Luftverschmutzung laut der WHO als eine der globalen Hauptursachen für Erkrankungen und vorzeitige Tode eingestuft wird, ist das Bewusstsein für Luftqualität bei vielen Menschen in Deutschland noch nicht im alltäglichen Bewusstsein angekommen. Im Gegensatz zu Ländern wie China ist die Luftqualität in deutschen Städten vergleichsweise gut, trotzdem hat vor allem der Faktor des Feinstaubes in letzter Zeit zu neuen politischen Diskussionen geführt. Aufgrund ihrer Kessellage hat die Stadt Stuttgart zusätzliche Maßnahmen ergriffen, um für die Luftreinhaltung zu sorgen. Als erste Stadt in Deutschland hatte die Landeshauptstadt bis April 2020 einen Feinstaubalarm eingeführt, der bei drohenden hohen Belastungen bestimmte Empfehlungen aussprach und Verbote vorschrieb. Diese und weitere Maßnahmen werden kontrovers diskutiert – oftmals jedoch auf abstrakten Grundlagen. Obwohl die Feinstaubbelastungen in Deutschland seit Jahren durch ein nationales Messnetz ermittelt werden und öffentlich zugänglich sind, ist das Bewusstsein für konkrete Belastungen und Beobachten von Verläufen im Alltag eher die Ausnahme. In letzter Zeit haben vor allem Open-Science-Projekte versucht, diese Lücke zu schließen. Mithilfe von Smartphone- und Webapplikationen, die interaktive Karten und aufbereitete Daten anbieten, soll das Bewusstsein für Luftqualität im Alltag verankert werden.

Das Open-Science-Projekt luftdaten.info, das vom Stuttgarter OK Lab gegründet wurde, geht hier noch einen Schritt weiter. Es bietet Anleitungen zum preisgünstigen Eigenbau von Messstationen, deren Daten dann in ihr Messnetz eingespeist werden können. Dies bietet vor allem einen großen Vorteil: Da Feinstaubkonzentrationen oft punktuell erhöht sind, können hohe Belastungen durch ein engmaschiges Messnetz besser dargestellt werden und auch Bereiche, in denen das nationale Messnetz keine Sensoren besitzt, mit Daten gefüllt werden. Die aktuellen Daten aus dem Messnetz von luftdaten.info können online auf einer Karte eingesehen werden, zudem gibt es Informationen über die Konzentrationsverläufe der letzten 24 Stunden der einzelnen Sensoren.

Diese Visualisierungsmethode ist allerdings unpraktisch für den Hausgebrauch. Die Konzentrationsverläufe mehrerer Sensoren können nur umständlich miteinander verglichen werden, und ältere Daten als die der letzten 24 Stunden müssen aus CSVs ausgelesen werden. Um ein alltägliches Bewusstsein für Feinstaubbelastungen zu entwickeln, ist es zudem förderlich, die Daten möglichst oft vor Augen zu haben. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit eine Visualisierung von Feinstaubdaten auf einem kleinen Display entwickelt werden, das ähnlich einer Wetterstation dauerhaft in Haushalten installiert werden kann und Daten anzeigt. Es soll ein Vergleich von Sensoren im Umkreis ermöglichen, als auch Daten unterschiedlicher Granularitäten anzeigen und neben aktuellen Daten auch eine Übersicht bis zu einem Monat bieten. Anhand einer kleinen Studie soll dann sowohl die Visualisierung evaluiert als auch der Effekt eines solchen dauerhaft installierten Displays untersucht werden.

Diese Arbeit umfasst demnach zuerst die Recherche bereits vorhandener Visualisierungen, sowie der Strukturierung und Auswahl geeigneter Hard- und Software. Dann soll ein Konzept für eine geeignete Visualisierung auf einem kleinen Display erarbeitet werden, die sowohl unterschiedliche

zeitliche Granularitäten als auch unterschiedliche Sensorstandorte berücksichtigt. Dieses Konzept soll dann auf geeigneter Hardware implementiert werden und die nötige Infrastruktur geschaffen werden, um die Daten aus den gegebenen Schnittstellen abzufragen. Diese Implementierung soll dann anhand der oben genannten Studie evaluiert werden, um herauszufinden, ob deren Gebrauch eine tiefere Sensibilisierung bezüglich Feinstaubbelastungen erwirken kann.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für die weitere Arbeit verwendeten Grundlagen erläutert. Dafür wird zuerst der Fokus auf das Hauptthema – die Visualisierung – gelegt, um darauf später die Entwicklung einer geeigneten Visualisierung für Feinstaubdaten aufzubauen. Um die Feinstaubdaten in den richtigen Kontext setzen zu können, wird dann auf die Definition und Herkunft von Feinstaub eingegangen, als auch auf die aktuelle Luftqualitätslage weltweit und in Deutschland, sowie die gesundheitlichen Effekte von Feinstaub auf den Menschen erläutert. Zuletzt wird auch der Bereich der Sensorik grob angerissen, um die Wirkungsweise der später verwendeten Sensoren zu verstehen.

2.1 Visualisierung

Um die Grundlagen der Visualisierung darzulegen, wird deren Definition und Geschichte betrachtet. Des Weiteren werden der Visualisierungsprozess und der Zusammenhang von Visualisierung und der menschlichen Wahrnehmung behandelt. Da im Verlauf dieser Arbeit multivariate, zeitorientierte Daten verarbeitet werden, wird tiefer auf deren Eigenschaften und Visualisierungsmöglichkeiten eingegangen.

2.1.1 Definition und Geschichte

Unter dem Begriff der Visualisierung wird eine computerbasierte, interaktive, visuelle Darstellung von Daten verstanden, die der Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung dient [CMS99, p. 7]. In unserem Alltag sind wir von vielen verschiedenen visuellen Repräsentationen umgeben,



(a) Höhlenmalereien aus der Höhle Pont d'Arc in Frankreich [Val19].



(b) Schematische Darstellung eines U-Bahn-Netzes, designed by Freepik.

Abb. 2.1: Beispiele für Visualisierungen.

beispielweise Diagrammen in Zeitungsartikeln oder Linienpläne der U-Bahn (vgl. Abbildung 2.1b). Deren übergreifende Gemeinsamkeit ist, dass sie eine Alternative zu textueller oder verbaler Information darstellen [WGK10, pp. 2–3].

Die Geschichte der Visualisierung reicht dabei weit zurück. Die ersten visuellen Repräsentationen tauchen als Höhlenmalereien vor etwa 30.000 Jahren auf (vgl. Abbildung 2.1a). Schon hier wird vermutet, dass diese Bilder der Informationsübermittlung an spätere Generationen dienten. Den nächsten Schritt bildeten die ersten Schriftsysteme, die Bilder verwendeten, um ganze Wörter zu enkodieren [WGK10, p. 7]. Weitere frühe Abbildungen entwickelten sich aus Notwendigkeiten heraus, zum Beispiel als Karten für Reisende und Händler. Um 1600 entstanden die ersten Diagramme, die Zeitfolgen berücksichtigten, wie Darstellungen der Mondphasen oder Planetenbewegungen. Der Durchbruch in der Informationsrepräsentation stellte die Entwicklung von abstrakten Achsendarstellungen im 18. Jahrhundert dar, die es erlaubte, Inhalte über den planaren, geospatialen Raum hinaus darzustellen [WGK10, pp. 9–13]. Von dort aus entwickelten sich die heute verwendeten, klassischen Methoden der Datendarstellung [CMS99, p. 8].

Der Aspekt der Computerunterstützung in der Visualisierung entstand erst im 20. Jahrhundert, ist aber heute fester Bestandteil der Definition. Die Unterstützung durch Computer ermöglicht es, die riesige Anzahl an Daten und Datensätzen zu verarbeiten, die das Zeitalter des Internets produziert. Die Visualisierung wird hier umso wichtiger, da sie es ermöglicht, die Daten zeiteffizient aufzubereiten und zu nutzen, als auch auf sich ändernde Datensätze zu reagieren [WGK10, p. 6]. Auch der Bezug auf Interaktivität ist erst durch Computer möglich. Interaktivität erlaubt es, mit einer Visualisierung nicht nur eine Frage zu beantworten, sondern diese dynamisch zu erweitern. Es kann beispielweise von einem Überblick ins Detail gewechselt werden [Mun14, p. 9].

Dabei kann eine Visualisierung für drei übergeordnete Zwecke verwendet werden: dem Entdecken, dem Bestätigen und dem Präsentieren. Gegenüber anderen datenanalysierenden Bereichen wie der Statistik und des Machine Learnings, kann eine Visualisierung verwendet werden, wenn das Analyseproblem noch nicht genau definiert ist. Hier kommt der Aspekt der Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung zum Tragen. Eine Visualisierung ist kein Werkzeug, um eine menschliche Bewertung zu ersetzen, sondern soll eine menschliche Bewertung unterstützen, indem sie es erst ermöglicht Datensätze näher zu untersuchen, Muster, Strukturen und Anomalien zu erkennen und damit die Entscheidungsfindung verbessert. Daneben kann eine Visualisierung auch dem Stützen und Bestätigen einer Hypothese dienen [Mun14, pp. 2–3]. Zuletzt ist eine Visualisierung auch immer eine Art der Kommunikation von Information und wird deswegen in den unterschiedlichsten Bereichen als Werkzeug verwendet [WGK10, p. 6].

Die Visualisierung selbst kann in die Visualisierung räumlicher Daten und die Visualisierung abstrakter Daten unterteilt werden. Die Visualisierung räumlicher Daten basiert dabei auf physikalischen Daten, die bereits eine inhärente räumliche Abbildung besitzen. Dazu zählen unter anderem auch geospatiale Daten. Bei der Visualisierung abstrakter Daten wiederum werden Daten behandelt, die keine inhärente räumliche Abbildung besitzen. Hier gibt es mehrere mögliche Abbildungen, die je nach Zweck gegeneinander abgewogen werden müssen [CMS99, pp. 6–7].

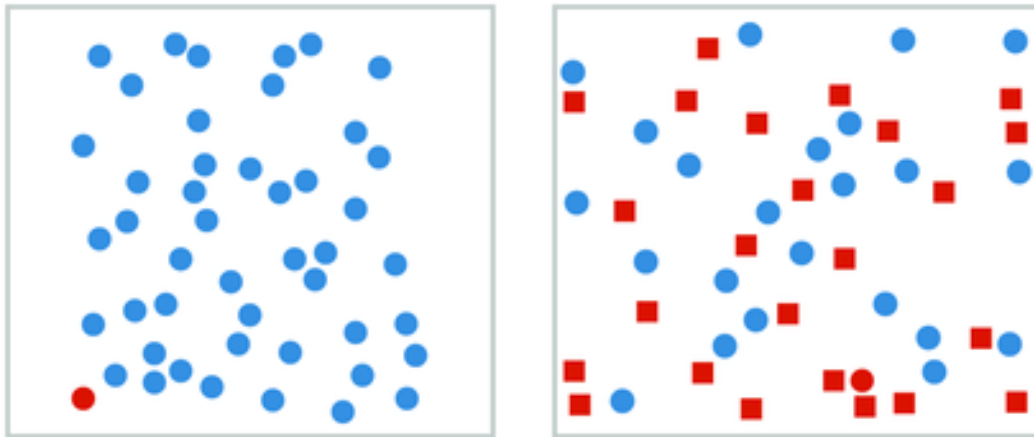
2.1.2 Menschliche Wahrnehmung

Bei dem Design und der Erstellung von guten Visualisierungen ist die Kenntnis der menschlichen Wahrnehmung essenziell, da die Fähigkeiten des Betrachters und die Einschränkungen des menschlichen visuellen Systems beachtet werden müssen. Missinterpretationen sollen vermieden, Daten präzise dargestellt und die Aufmerksamkeit auf bedeutende Bereiche gelenkt werden [WGK10, p. 30]. Diese Punkte sind im Zusammenhang mit dieser Arbeit besonders wichtig, da eine Visualisierung für ein kleines Display mit nicht allzu großer Auflösung entwickelt wird, dessen grundlegende Informationen nicht nur aus nächster Nähe erkannt werden sollen. Die Herausforderung ist es, eine Balance zwischen präziser Ablesbarkeit und dem schnellen Erfassen der gesamten Visualisierung zu finden. Hier ist das Lenken der Wahrnehmung und Aufmerksamkeit des Betrachters/der Betrachterin entscheidend, weswegen in diesem Kapitel tiefer auf den aktuellen wissenschaftlichen Stand zur Funktionsweise und des Ablaufs der menschlichen Wahrnehmung eingegangen wird.

Als Wahrnehmung wird der Prozess des Erkennens, des Organisierens und der Interpretation sensorischer Information bezeichnet. Menschen können sensorische Informationen über fünf Kanäle aufnehmen: Sehen, Hören, Fühlen, Schmecken und Riechen, wobei die ersten beiden bisher am meisten untersucht wurden [WGK10, p. 73]. Für die Visualisierung ist vor allem das visuelle System von Bedeutung. Unser visuelles System nimmt die meisten Informationen innerhalb der fünf Sinne auf, es hat, so gesehen, die größte Bandbreite. Während beispielsweise das Hören im Gehirn sequentiell verarbeitet wird, werden visuelle Reize parallel verarbeitet [Mun14, pp. 6–7]. Dabei werden zwei Stufen der visuellen Wahrnehmung unterschieden: die automatische, beziehungsweise präattentive, Wahrnehmung [CMS99, p. 25] und die kontrollierte, beziehungsweise attentive, Wahrnehmung [WGK10, p. 89].

Als präattentive oder automatische Wahrnehmung werden eine Menge an visuellen Eigenschaften zusammengefasst, die schnell und mit großer Genauigkeit vom menschlichen visuellen System erkannt werden können. Während das Initiieren einer Augenbewegung schon mindestens 200 Millisekunden benötigt, werden diese Eigenschaften in 200 bis 250 Millisekunden erkannt [WGK10, p. 89]. Zu den präattentiven Aufgaben gehören die Zielerkennung, die Umrisserkennung, die Flächenverfolgung sowie Zählen und Schätzen. Um diese präattentiven Aufgaben durchführen zu können, müssen die verwendeten Elemente bestimmte Eigenschaften aufweisen. Zu diesen visuellen Eigenschaften, bei denen die präattentive Wahrnehmung funktioniert, zählen unter anderem Länge, Breite, Größe, Krümmung, Anzahl, Umrisse, Überlappungen, Farbton, Intensität, Blinken, Bewegungsrichtung und räumliche Tiefe. Bei einer präattentiven Aufgabe ist es wichtig, dass sich das Zielelement oder die Zielelemente in einer einzigartigen visuellen Eigenschaft von den anderen Objekten unterscheiden. Ein Beispiel der Zielerkennung ist das Erkennen eines blauen Kreises unter roten Kreisen [WGK10, p. 92] (vgl. Abbildung 2.2 links). Schwieriger wird es, wenn sich das Zielelement nicht in einer einzigartigen visuellen Eigenschaft unterscheidet oder sich aus bereits vorhandenen Eigenschaften zusammensetzt, beispielsweise ein roter Kreis unter blauen Kreisen und roten Vierecken. Das Zielobjekt wird hier als Conjunction Target bezeichnet. Das Erkennen von Conjunction Targets ist in den meisten Fällen nicht präattentiv (vgl. Abbildung 2.2 rechts) [WGK10, p. 91].

Die attentive Wahrnehmung verarbeitet diese ersten Eindrücke der präattentiven Wahrnehmung und wandelt sie in strukturierte Objekte um. Dabei spielt die Aufmerksamkeit eine große Rolle. Die Aufmerksamkeit definiert sich dabei als ein aktiver Prozess, durch den in einer Umgebung unterschiedliche Dinge oder Teilaspekte wahrgenommen werden. Dabei wird zwischen der offenen



- (a) Eine Aufgabe, die mithilfe präattentiver Wahrnehmung zu lösen ist. Es gilt zu erkennen, ob zwischen blauen Kreisen ein roter Kreis vorhanden ist [Mun14, Figure 5.11b].
- (b) Ein Conjunction Target, das nicht mithilfe von präattentiver Wahrnehmung gefunden werden kann. Es gilt zu erkennen, ob sich unter blauen Kreisen und roten Vierecken ein roter Kreis befindet [Mun14, Figure 5.11f].

Abb. 2.2: Beispiele für präattentive und nicht-präattentive Aufgaben.

und verdeckten Aufmerksamkeit unterschieden. Die offene Aufmerksamkeit sorgt dafür, dass interessierende Details durch Augenbewegungen in den Punkt des schärfsten Sehens gerückt werden, während die verdeckte Aufmerksamkeit ohne Augenbewegungen funktioniert. Aufmerksamkeit kann dabei durch Reize erregt oder vom Betrachter auf etwas gelenkt werden und sich dabei auf bestimmte Bildregionen richten oder sich in einer anderen Wahrnehmungsdimension befinden, beispielsweise auf Objekten einer bestimmten Farbe. Im Gegensatz zur präattentiven Wahrnehmungen wird durch diese Aufmerksamkeit eine Verarbeitungssequenz erzeugt. Ein großer Verarbeitungsschritt in dieser Sequenz ist die Objekt- und Mustererkennung, wie sie unter anderem durch die Gestaltgesetze beschrieben werden [FF06, p. 133].

2.1.3 Der Visualisierungsprozess

Ausgehend von Daten, grafischen Elementen und der menschlichen Wahrnehmung kann der Visualisierungsprozess definiert werden. Dieser führt von den zugrundeliegenden Rohdaten über eine Abfolge von Transformationen bis hin zum Betrachter/der Betrachterin (vgl. Abbildung 2.3). Die Basis jeder Visualisierung bilden die Rohdaten, die in beliebiger Form vorliegen können. Bevor sie von einem Computer visualisiert werden können, müssen sie mithilfe von Datentransformationen in Datentabellen umgewandelt werden. Dabei kann es sowohl einen Datenverlust geben, beispielsweise durch die Eliminierung fehlerhafter Werte, als auch einen Datengewinn, unter anderem durch statistische Berechnungen oder Interpolation fehlender Daten. Das Ergebnis dieser Datentransformation sind spezifische Datenformate oder Relationen in Form von Tupeln.

Diese Datentabellen werden dann im nächsten Schritt auf visuelle Strukturen abgebildet. Hierzu werden Marken definiert. Marken sind grundlegende grafische Elemente eines Bildes, die nach ihrer Dimensionalität kategorisiert werden: Punkte (0-dimensional), Linien (1-dimensional), Flächen

Tabelle 2.1: Die Effektivität von visuellen Variablen bei unterschiedlichen Attributtypen, absteigend geordnet von oben nach unten. Basierend auf McKinlay [McK99]. Nicht vorhandene visuelle Variablen sind für den Attributtyp unerheblich. Bewegung als visuelle Variable wurde nicht berücksichtigt.

Nominal	Ordinal	Quantitativ
Position	Position	Position
Farbe	Helligkeit	Länge
Textur	Farbton	Orientierung
Helligkeit	Textur	Fläche
Form	Größe (Länge)	Helligkeit
Größe (Länge)	Orientierung	Farbton
Orientierung	Fläche	
Fläche		

(2-dimensional) und 3-dimensionale Objekte [Mun14, p. 95] [CMS99, p. 28]. Diesen Marken werden räumliche Positionen als auch weitere visuelle Eigenschaften zugewiesen, die auch visuelle Variablen genannt werden [Car03, pp. 4–5]. Zu den acht visuellen Variablen, die eng mit den präattentiven Eigenschaften verwandt sind, gehören Position, Form, Größe, Helligkeit, Farbe, Orientierung, Textur und Bewegung [WGK10, p. 133]. An diesem Punkt muss entschieden werden, welche Informationsaspekt mit welcher Marke dargestellt wird und welche visuelle Variable in diesem Zusammenhang am besten funktioniert. Das ist vor allem abhängig vom Datentyp. Es wird unterschieden zwischen nominalen, ordinalen und quantitativen Daten. Für nominale Daten gehören Position, Größe, Orientierung, Farbe, Textur und Form zu den effektivsten Enkodierungen. Für ordinale geordnete Daten gehören Position, Größe und Helligkeit zu den favorisierten Darstellungen, während für quantitative Daten vor allem Position und Größe ideal sind [CMS99, p. 30] (vgl. Tabelle 2.1).

Nach dieser Zuweisung werden Transformationen der Ansicht vorgenommen. Dazu zählen die Kommunikation mit dem Interface einer Computergrafik-Anwendung und das Setzen grafischer Parameter wie beispielsweise der Betrachtungspunkt und die Skalierung. Das daraus resultierende Bild ist das finale Ergebnis, das dem Betrachter/der Betrachterin präsentiert wird. Dieser wiederum kann mit jedem Schritt des Visualisierungsprozesses interagieren. Bei der Datentransformation kann der Betrachter/die Betrachterin unter anderem Datenbereiche auswählen, bei der Abbildung auf visuelle Strukturen steuern, welche Art von Diagramm er/sie angezeigt bekommen möchte oder Einfluss auf die Ansichtstransformation nehmen, indem er/sie an einen bestimmten Bereich der Visualisierung heranzoomt [CMS99, p. 17] [WGK10, pp. 130–132].

2.1.4 Zeit und zeitorientierte Daten

Da in dieser Arbeit zeitorientierte Daten verarbeitet werden, liegt der Fokus in diesem Abschnitt darauf, näher auf die Eigenschaften zeitorientierter Daten einzugehen. Um zeitorientierte Daten zu definieren, müssen zuerst der Zusammenhang von Visualisierung und Charakteristika der Zeitdomäne erläutert werden. Diese teilen sich in vier Punkte ein: Skala, Fokus, Anordnung und Betrachtungspunkt [AMST11, p. 70].

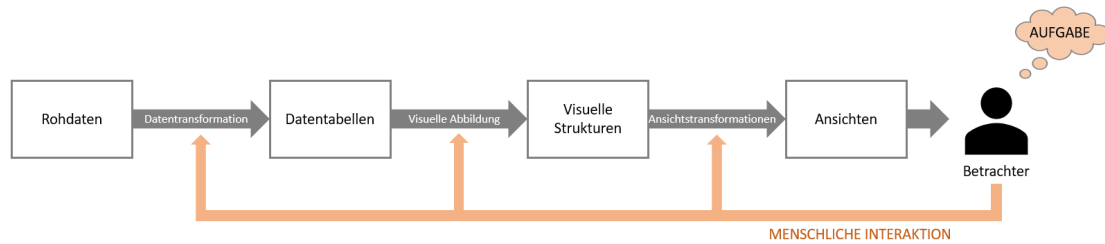
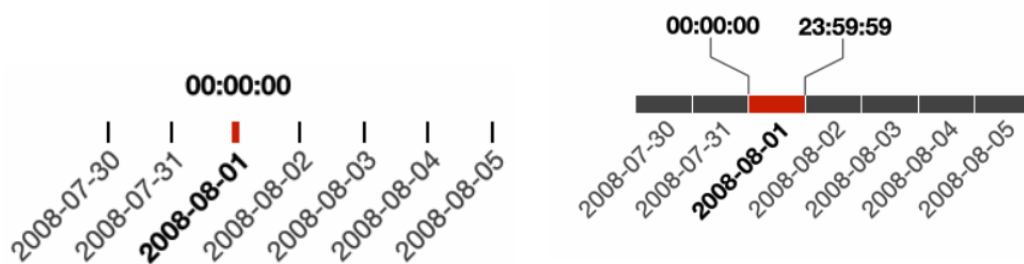


Abb. 2.3: Die grundlegende Struktur des Visualisierungsprozesses, von Rohdaten bis zum endgültigen Bild beim Betrachter. Basierend auf [CMS99, p. 17] und [CMS99, p. 25].



(a) Ist der Fokus punktbasiert, gibt es keinerlei Informationen über die Zeit, die zwischen zwei solcher Zeitpunkte liegt [AMST11, p. 50, Figure 3.7]. Abbildung lizenziert unter Nr. 4816611239379 durch Springer Nature.⁹

(b) Ist der Fokus intervallbasiert, enthält jedes Element Informationen über einen bestimmten Bereich der Zeit, der größer als Null ist [AMST11, p. 50, Figure 3.8]. Abbildung lizenziert unter Nr. 4816611239379 durch Springer Nature.

Abb. 2.4: Die Ausprägung des Fokus zeitbasierter Daten ist entweder punkt- oder intervallbasiert.

Die für eine Zeitdomäne verwendete Skala kann entweder ordinal, diskret oder kontinuierlich sein. Dabei ist die am häufigsten in der Informationsvisualisierung verwendete Skala die diskrete Zeitskala. Sie basiert auf einer Einteilung in Zeiteinheiten, ein Datenpunkt ist fest an einen Zeitpunkt gebunden. Dieser Datenpunkt hat eine Dimension von Null. Auf einer solchen diskreten Skala können zeitliche Distanzen abgelesen werden, zwischen den Datenpunkten existieren aber keine weiteren Werte.

Der Fokus der Zeit bestimmt, ob diese punktbasiert oder zeitbasiert ist. Punktbasiert gibt es keine Information zwischen zwei Zeitpunkten, für die eine Information vorhanden ist. Die vorhandene Information zu diesen Zeitpunkten hat die Dimension Null (vgl. Abbildung 2.4a). Ein intervallbasierter Fokus bezieht sich auf Unterteilungen der Zeit, deren Ausdehnung größer ist als Null [AMST11, pp. 47–48] (vgl. Abbildung 2.4b).

Die Anordnung der Zeitdomäne kann linear oder zyklisch erfolgen. Eine zyklische Organisation der Zeit liegt vor, wenn bestimmte Zeitwerte immer wieder erscheinen, beispielweise die Monate eines Jahres. Allerdings sind strikt zyklische Daten selten, meist liegt eine Mischung aus zyklischen und linearen Daten vor, zum Beispiel die Monate aufeinanderfolgender Jahre [AMST11, p. 50].

Der Betrachtungspunkt von Zeit und zeitlichen Ereignissen beschreibt, ob diese geordnet oder verzweigt sind, beziehungsweise aus mehreren Perspektiven betrachtet wird [AMST11, p. 51].

2.1.5 Visualisierung zeitorientierter Daten

Bei der Erstellung einer Visualisierung sind drei grundlegende Fragen zu beantworten: Was wird visualisiert? Welche Aufgaben soll der Betrachter/die Betrachterin damit erledigen können? Wie soll die visuelle Repräsentation aussehen?

Die erste Frage kann bei der Visualisierung zeitorientierter Daten mit den Eigenschaften der Daten beantwortet werden (vgl. Abschnitt 2.1.4). Bei der Bestimmung der Nutzeraufgaben gibt es mehrere Ansätze. Ward et al. [WGK10, p. 380] teilt diese basierend auf Keller et al. [KKM+94] in neun Aufgaben auf: Identifizieren, Lokalisieren, Unterscheiden, Kategorisieren, Clustern, Ordnen, Vergleichen, Assoziieren und Korrelieren. Unter Identifizieren versteht man das Erkennen eines Objekts mithilfe von Eigenschaften, durch die es repräsentiert wird. Das Lokalisieren beschreibt das Finden der Position eines gegebenen Objekts. Das Unterscheiden von Objekten bezieht sich auf das Feststellen abweichender Eigenschaften, während das Kategorisieren Objekte in Typgruppen unterteilt. Clustern bedeutet das Gruppieren ähnlicher Objekte aufgrund einer Beziehung untereinander, im Gegensatz dazu steht das Segmentieren, das Objekte voneinander trennt. Wenn es möglich ist, Objekte in eine chronologische oder numerische Reihenfolge zu bringen, werden diese geordnet. Ist dies nicht möglich, können Objekte auf Basis von Ähnlichkeiten und Unterschieden verglichen werden. Das Assoziieren erlaubt das Herstellen von Verbindungen zwischen zwei oder mehr Objekten. Zuletzt beschreibt das Korrelieren das Finden von kausalen oder wechselseitigen Beziehungen zwischen zwei oder mehr Objekten.

Zu den ersten beiden Aufgaben, dem Identifizieren und dem Lokalisieren, haben Aigner et al. [AMST11] eine weitere Aufteilung in Unteraufgaben, basierend auf McEachren [Mac95] vorgeschlagen, die sich auf zeitorientierte Daten bezieht (vgl. Abbildung 2.5). Die Identifizierung wird dabei als konkrete Suche eines Datenwerts zu einem bestimmten Zeitpunkt beschrieben, während die Lokalisierung analog dazu zur Bestimmung des Zeitpunkts eines bestimmten Datenwertes wird. Daneben werden zusätzlich die Unteraufgaben des Erkennens von Zeitintervallen, zeitlichen Mustern, der Änderungsrate, Sequenzen und Synchronisationen eingeführt. Die Erkennung eines Zeitintervalls beinhaltet das Bestimmen der Länge der Zeitspanne zwischen Beginn und Ende eines Datenelements. Unter dem Erkennen zeitlicher Muster versteht man die Häufigkeit, mit der sich ein bestimmtes Datenelement wiederholt, während die Änderungsrate die Geschwindigkeit oder Ausprägung beschreibt, mit der ein Datenelement sich verändert. Das Erkennen einer Sequenz spezifiziert, ob Datenelemente in einer bestimmten Reihenfolge auftreten. Zuletzt stellt die Synchronisation dar, ob bestimmte Datenelemente aufgrund einer Verbindung zusammen existieren. Mit diesen Unteraufgaben können die Aufgaben im Bereich der zeitorientierten Daten noch exakter definiert werden.

Die visuelle Repräsentation ist der erste Schritt in der Visualisierungspipeline (vgl. Abschnitt 2.1.3, beziehungsweise Abbildung 2.3): Das Abbilden der abstrakten Daten auf Geometrie mit dazugehörigen visuellen Attributen. Für das Abbilden der Zeit gibt es zwei Optionen: Die Abbildung von Zeit auf Raum oder die Abbildung von Zeit auf Zeit. Bei der Abbildung von Zeit auf Raum, befinden sich die Zeitdomäne und die dazugehörigen Daten in einer einzigen Darstellung, die sich über die Zeit nicht ändert, also statisch ist (vgl. Abbildung 2.6). Die Abbildung von Zeit auf Zeit erzeugt dagegen eine dynamische Darstellung, die sich automatisch über die Zeit hinweg ändert [AMST11, p. 76].

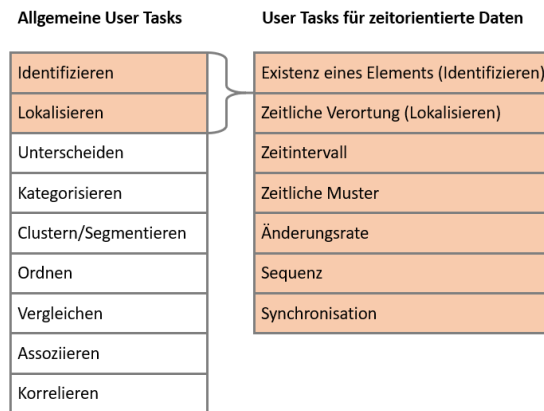


Abb. 2.5: Aufgaben nach Keller et al. [KKM+94] und die Aufteilung in Unteraufgaben für zeitorientierte Daten nach MacEachren [Mac95].

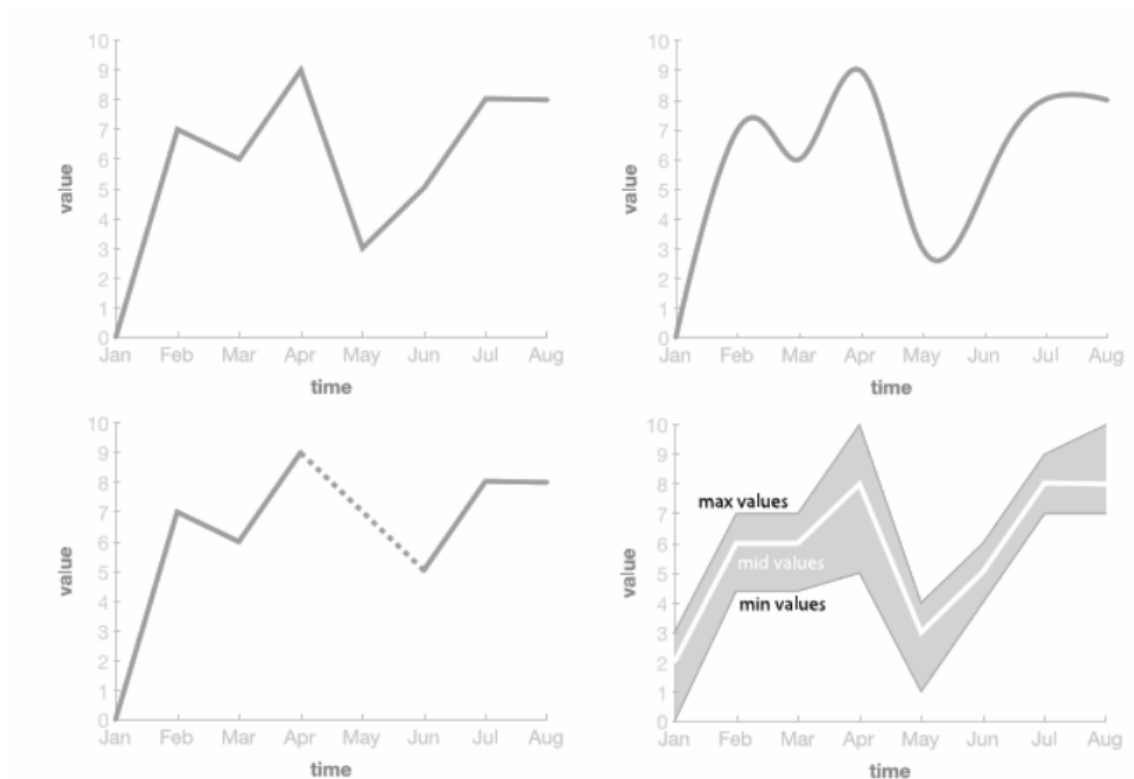


Abb. 2.6: Die beispielhafte, statische Abbildung von Zeit auf Raum mithilfe unterschiedlicher Linien-
diagramme [AMST11, p. 153, Figure 7.2]. Abbildung lizenziert unter Nr. 4816611239379
durch Springer Nature.

2.1.6 Visualisierung multivariater Daten

Da die später verwendeten Sensordaten nicht nur zeitorientiert, sondern auch multivariat sind, das heißt, mehr als zwei Dimensionen haben, wird im Folgenden näher auf die Visualisierungsmöglichkeiten solcher Datensätze eingegangen. Während univariate Daten auf einer zweidimensionalen Fläche abgebildet werden können, müssen bei multivariaten Daten mehr Zwischenschritte bedacht werden. Um diese zusätzlichen Dimensionen darzustellen, gibt es unterschiedliche Ansätze für verschiedene Diagrammtypen. In diesem Abschnitt wird in erster Linie auf statische Anzeigen eingegangen. Um den Faktor der Zeit bei diesen sichtbar zu machen, kann in diesem Fall immer Zeit auf Raum abgebildet werden [AMST11, p. 80]. Bei den Diagrammtypen wird auf punktbasierte, linienbasierte, flächenbasierte und kombinierte Techniken eingegangen.

Zu den punktbasierten Techniken gehören vor allem Scatterplots (vgl. Abbildung 2.7 mittig). Hier werden die Datenwerte als Punkte dargestellt, die je nach Umständen in Größe, Farbe und Position variieren. Die Darstellung von mehr als zwei Dimensionen kann dabei auf vier unterschiedliche Arten erfolgen: das Bilden von Dimensionsteilmengen, die Dimensionsreduktion, das Einbetten von Dimensionen oder die Verwendung mehrerer Ansichten. Bei der Bildung von Dimensionsteilmengen gibt es die Variante, dem Betrachter/der Betrachterin die Möglichkeit zu geben, selber die Dimensionen zu selektieren, die für ihn/sie von Interesse sind. Die zweite Variante ist die Verwendung eines Algorithmus, der die Dimensionen mit dem höchsten Informationsgehalt bestimmt und anzeigen lässt [WGK10, pp. 238–239]. Die Dimensionsreduktion erfolgt durch Techniken, die höherdimensionale Daten auf weniger Dimensionen abbilden. Dabei wird versucht, die Beziehungen zwischen Datenpunkten bestmöglich beizubehalten [WGK10, pp. 238–239]. Ein Beispiel für solche dimensionsreduzierenden Algorithmen sind kräftebasierte Algorithmen, die ein Ähnlichkeitsmaß zwischen Daten bestimmen und versuchen, dieses bei der iterativen Eliminierung von Dimensionen beizubehalten. Die Probleme dieser Algorithmen sind allerdings, dass bereits kleine Abweichungen in der Ausgangssituation große Effekte auf die Endresultate haben können, als auch die verlorene Aussagekraft von Achsen [WGK10, pp. 239–240]. Das Einbetten von Dimensionen erfolgt durch das Abbilden von Dimensionen auf weitere graphische Attribute als bloß die Position, wie zum Beispiel Farbe, Form und Größe. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass diese Methode bei einer bestimmten Anzahl an darzustellenden Dimensionen an ihre Grenzen stößt, da nur begrenzt grafische Attribute zur Verfügung stehen. Die einfachste Variante, um mehr als zwei Dimensionen im zweidimensionalen Raum darzustellen, ist das Überlagern oder nebeneinander Anordnen mehrerer Anzeigen, die jeweils eine Teilmenge der Dimensionen enthält [WGK10, pp. 238–239]. Ein Beispiel hierfür sind Scatterplot-Matrizen (vgl. Abbildung 2.7 rechts).

Zu den linienbasierten Techniken gehören Liniendiagramme, parallele Koordinaten und radiale Achsen. Als Liniendiagramme werden dabei linienbasierte Diagramme mit orthogonalen Achsen bezeichnet. Um mehr als zwei Dimensionen darzustellen gibt es primär die Möglichkeit, mehrere Ansichten zu generieren und über- beziehungsweise nebeneinander zu positionieren. Die Probleme der Überlagerung sind hierbei, dass bei vielen ähnlichen Linien die Unterscheidung schwierig werden kann. Zudem muss überlegt werden, wie die Achsen bei unterschiedlichen Metriken der zusammengefassten Dimensionen funktionieren [WGK10, pp. 244–246]. Das Problem der unterschiedlichen Skalen kann mithilfe von parallelen Koordinaten gelöst werden. Hier werden die Koordinaten nicht orthogonal, sondern die Achsen aller benötigten Dimensionen in gleichmäßigen Abständen parallel angeordnet. Ein Datenpunkt wird dann zu einer Polylinie, die alle Achsen

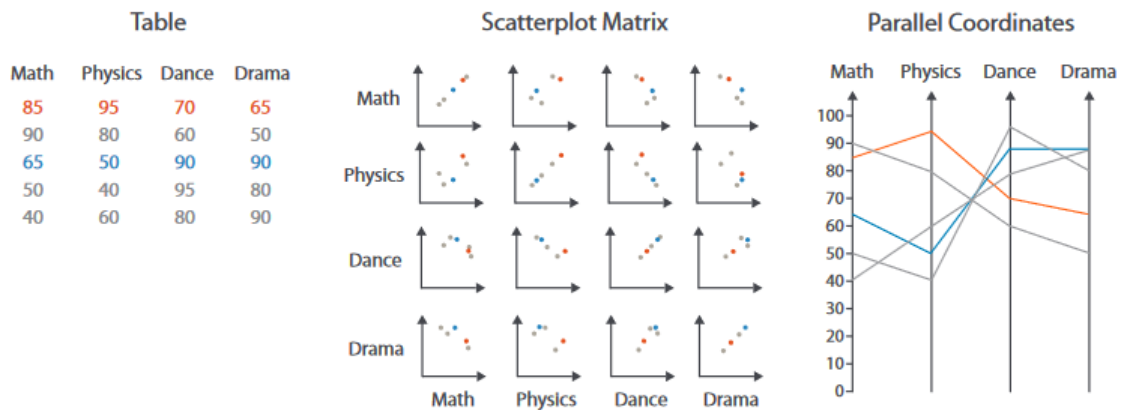


Abb. 2.7: Schematische Darstellung von einfachen Beispieldaten als Tabelle (links), Scatterplot-Matrix (mittig) und mit parallelen Koordinaten (rechts) [Mun14, p. 163, Figure 7.12].



Abb. 2.8: Um zyklische Abfolgen zu analysieren, kann es hilfreich sein, diese statt auf linearen auf radialen Achsen anzuordnen [Mun14, Figure 7.15c]

an seinen jeweiligen Werten schneidet. Auffälligkeiten können dann anhand ähnlicher Linien, ähnlicher Kreuzungspunkte oder isolierter Linien erkannt werden [WGK10, pp. 247–248] (vgl. Abbildung 2.7).

Um zyklische Abfolgen zu analysieren, kann es hilfreich sein, diese auf radialen Achsen anzuordnen. Diese funktionieren wie ein Liniendiagramm, das in gleichmäßige Abschnitte aufgeteilt und auf Kreissegmente abgebildet wird. Dabei kann auch von der strikten Liniendarstellung abgewichen und Säulen oder Flächen verwendet werden (vgl. Abbildung 2.8). Sollte mehr als ein Zyklus angezeigt werden, kann diese Diagrammform um konzentrische Ringe oder eine spiralförmige Anordnung erweitert werden [WGK10, pp. 249–251].

Bei den flächenbasierten Diagrammen gibt es unter anderem Säulen- beziehungsweise Balkendiagramme und tabellarische Ansichten. Bei einem Säulen- beziehungsweise Balkendiagramm werden quantitative Werte durch die Länge von Balken dargestellt. Um weitere Dimensionen zu enkodieren, können nebeneinander weitere Balken pro Dimension hinzugefügt werden oder diese übereinandergestapelt werden. Das Anordnen der Balken nebeneinander ist hierbei für einen

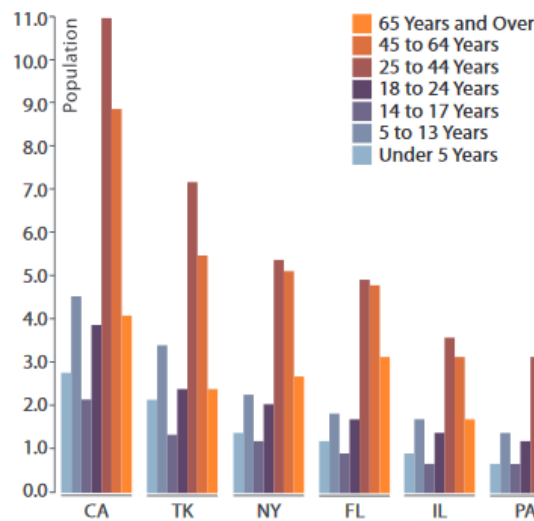


Abb. 2.9: multivariate Daten können auch in Balkendiagrammen dargestellt werden, wie hier durch nebeneinander angeordnete Balken pro Kategorie. [Mun14, Figure 12.8a]

genauen Vergleich der Werte vorzuziehen, da die Balken dann eine gemeinsame Referenzbasis haben. Es ist ebenso möglich, die Balken in einem Netz oder Gitter anzuordnen. Hierbei muss aber das gegenseitige Verdecken der Balken berücksichtigt werden [WGK10, pp. 251–253].

Ein bekanntes Beispiel für tabellarische Ansichten sind matrizenförmige Heatmaps. Die Dimensionen werden entlang der Zeilen und Spalten angeordnet und die Zellen entsprechend ihrem Wert eingefärbt. Andere Ansätze unterscheiden sich vor Allem durch die Interaktionsmöglichkeiten, wie das Zu- und Abwählen, sowie Umsortieren von Zeilen und Spalten, das Anpassen von Zellgrößen oder Zoomfunktionen [WGK10, pp. 253–256].

Häufig werden die genannten Techniken auch kombiniert, um alle Dimensionen aussagekräftig darstellen zu können. Beispiele hierfür sind die Verwendung von Glyphen und Icons, sowie pixelorientierter Techniken. Als Glyphe wird eine graphische Repräsentation eines Datenteils bezeichnet, deren visuelle Attribute durch ein oder mehrere Datenattribute gesteuert wird. Beispiele für Glyphen sind Balken, deren Höhe und Farbe variiert, in der Höhe, Breite und Farbe variierende Boxen oder Sterne, deren gleichmäßig um ein Zentrum verteilte Strahlen in der Länge variieren (vgl. Abbildung 2.10). Die Reihenfolge, in der Dimensionen auf die graphischen Attribute abgebildet werden, kann entweder uniform, daten- oder strukturorientiert erfolgen. Bei der uniformen Strategie sind die Glyphen skaliert und in gleichmäßigen Abständen angeordnet, um die gesamte Anzeige auszufüllen, was Überlappungen verhindert. Bei der datenorientierten Strategie dagegen bestimmen die Datenwerte die Position der Glyphen. Für den strukturorientierten Ansatz besitzen die Daten eine explizite oder implizite Struktur, beispielsweise zyklisch oder hierarchisch, welche dann die Position der Glyphe bestimmt [WGK10, pp. 258–263]. Zu den pixelorientierten Techniken zählen unter anderem die Dense Pixel Displays [WGK10, pp. 263–268]. Hier wird jeder Wert auf einen individuellen Pixel abgebildet, welche am Ende ein gefülltes Polygon bilden, das jede Dimension repräsentiert. Die Vorteile sind dabei vor allem die hohe Informationsdichte und die Möglichkeit, Millionen Datenwerte auf einen Blick zu zeigen [WGK10, pp. 263–264].

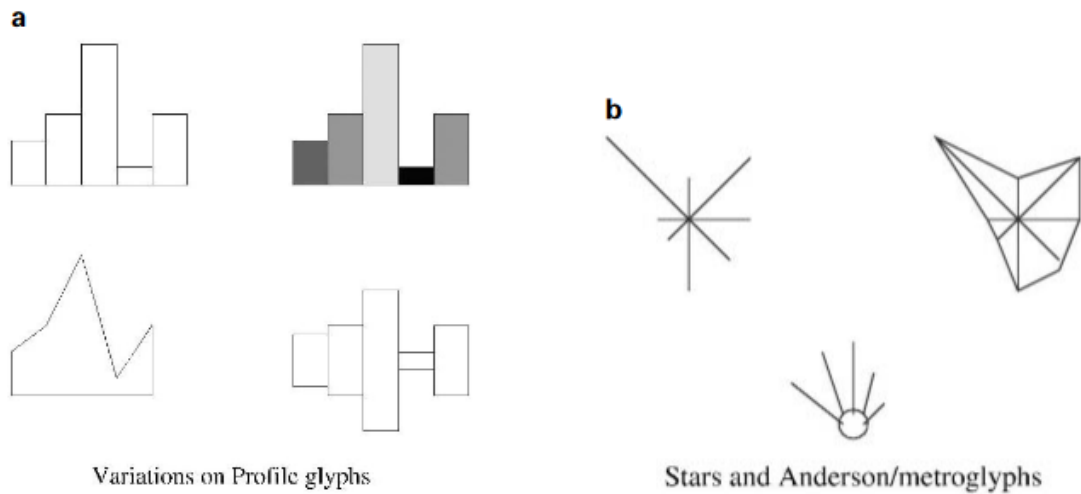


Abb. 2.10: Beispiele für Glyphen. Links (a) an Linie-, Flächen-, Balken- und Säulendiagramme angelehnte Glyphen. Rechts (b) Beispiele für sternförmige und netzförmige Glyphen [War02, p. 3, Figure 1].

2.1.7 Grundregeln der Visualisierung

Eine erfolgreiche Visualisierung stellt die vorhandene Information akkurat und für den Betrachter/die Betrachterin verständlich dar und berücksichtigt dabei ihren Zweck (vgl. Abschnitt 2.1.1). Gründe für eine nicht gelungene Visualisierung können unter anderem eine verwirrende Darstellung, eine zu hohe Komplexität für die Zielgruppe, verzerrte oder schlecht erkennbare Daten sein [WGK10, p. 355]. Die Feststellung, ob eine Visualisierung erfolgreich ist, kann dabei mithilfe einer Evaluation erfolgen.

Für das Design einer Visualisierung gibt es zwei übergeordnete Prinzipien: Die Aussagekraft und die Effektivität.

Das Prinzip der Aussagekraft beschreibt, dass eine visuelle Darstellung alle Attribute der Daten darstellt, aber eben auch nur diese. Die Informationsdichte sollte möglichst ausgewogen sein [WGK10, pp. 131–132]. Hier muss besonders bei ungleichmäßig verteilten Datensätzen ein Kompromiss gefunden werden. Dieser könnte beispielweise aus einer Vorfilterung der Daten und dem Entfernen unwichtiger Datenpunkte oder der Skalierung einer oder mehrerer Dimensionen bestehen [WGK10, pp. 359–360].

Das zweite Prinzip ist das Effektivitätsprinzip: Die wichtigsten Attribute sollten mit den effektivsten visuellen Kanälen enkodiert werden [Mun14, pp. 100–101]. Eine Visualisierung ist umso effektiver, je schneller eine Visualisierung verstanden wird, je mehr unterschiedliche Informationen sie übermittelt, je weniger Fehler bei der Interpretation passieren und je kostengünstiger sie erstellt werden kann. Dies wird meist in Relation zu anderen Visualisierungen gesehen [CMS99, p. 23] [WGK10, p. 132]. Die Effektivität einer Visualisierung ist stark abhängig von den verwendeten visuellen Variablen, wie in Abschnitt 2.1.3 erklärt. Je nach Datentyp sollten die passenden visuellen Variablen ausgewählt werden.

Es gibt noch weitere Punkte, die beim Design einer Visualisierung bedacht werden sollten und die ebenfalls eine Rolle bei der Aussagekraft und Effektivität spielen. Die Abbildung der Daten sollte möglichst intuitiv erfolgen, je besser deren Semantik und üblicher Kontext beim Betrachter/bei der Betrachterin bedacht werden, desto weniger anfällig für Missinterpretationen ist die Darstellung [WGK10, p. 356]. In dieser Intuitivität ist auch das sorgfältige Auswählen der Darstellungsdimensionen inbegriffen. Dreidimensionale Darstellungen sollten nur eingesetzt werden, wenn sie helfen, dreidimensionale Strukturen zu verstehen, da sonst meist die Nachteile von Verdeckung, perspektivischer Verzerrung oder Schatten überwiegen [Mun14, pp. 117–118]. Aber auch die zweidimensionale Darstellung ist nicht immer selbstverständlich. Je nach Aufgabe kann unter Umständen die tabellarische Darstellung von Daten deutlich effektiver sein als eine zweidimensionale Visualisierung. Ein Beispiel hierfür ist das Ablesen von Werten zu bestimmten Beschriftungen. Sind diese Beschriftungen alphabetisch in einer Tabelle geordnet, können diese üblicherweise schneller gefunden werden, als beim Absuchen einer Visualisierung [Mun14, p. 131]. Gerade bei zeitorientierten Daten ist es wichtig zu wissen, dass das Kurzzeitgedächtnis des Menschen begrenzt ist. Wird seine Kapazität überschritten, können keine weiteren Informationen aufgenommen werden. Dies kommt besonders bei Zeit-zu-Zeit-Abbildungen zum Tragen. Ergeben sich Änderungen in mehreren Bildbereichen, können diese nur schwer nachverfolgt werden. Hinzu kommt die Change Blindness, bei der der Mensch unter Umständen drastische Änderungen in der Visualisierung nicht erkennt, da die Aufmerksamkeit auf andere Bildbereiche gelenkt ist. Solche Zeit-zu-Zeit-Abbildungen sollten daher nur verwendet werden, wenn sich nur wenige Bildbereiche ändern [Mun14, pp. 131–134]. Bei der Verwendung von Farbe muss berücksichtigt werden, dass die Farbwahrnehmung von den umgebenden Farben abhängig ist, beispielsweise des Hintergrunds [WGK10, pp. 363–364] oder der Betrachter/die Betrachterin eine Farbfehlsichtigkeit besitzt. Als Hilfestellung kann die Aussage verwendet werden, dass bei einer Visualisierung auch nach einer Transformation in schwarz-weiß die wichtigsten Informationen erkennbar sein müssen. Um dies zu erreichen ist es empfehlenswert, das wichtigste Attribut primär mit der Helligkeit zu enkodieren und dann erst durch Farbton und Sättigung [Mun14, p. 140]. Alternativ hilft eine redundante Abbildung, zum Beispiel durch Farbton und Größe, um Missinterpretationen zu vermeiden [WGK10, pp. 363–364]. Besonders wichtig ist auch das Liefern von Zusatzinformationen wie Beschriftungen und Legenden und deren konsistente Verwendung in allen Anzeigen [WGK10, pp. 360–361]. Als letzter Punkt steht das Abwägen zwischen Ästhetik und Funktionalität. Die Ästhetik spielt durchaus eine Rolle in der Effektivität einer Visualisierung. Sie sorgt für eine ausgeglichene Nutzung des vorhandenen Platzes und der nötigen Einfachheit, um eine Informationsüberflutung zu vermeiden. Allerdings sollte die Funktionalität einer Visualisierung immer im Vordergrund stehen, da es einfacher ist, eine funktionale Visualisierung schrittweise ästhetischer zu gestalten als anders herum [WGK10, pp. 365–366] [Mun14, pp. 140–141].

Mit dieser Basis der Visualisierung wird nun genauer auf die wissenschaftlichen Grundlagen zu Feinstaub eingegangen.

2.2 Luftqualität und Feinstaub

In diesem Abschnitt wird auf den Einfluss der Luftqualität auf den Menschen eingegangen und vor Allem die Rolle von Feinstaub genauer erläutert. Nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation (WHO) ist Luftverschmutzung der zweithäufigste Grund für einen Tod an einer nicht-übertragbaren Krankheit und verursacht weltweit 7 Millionen vorzeitige Todesfälle jedes Jahr [Org19, p. 1].

Neben Feinstaub gibt es zahlreiche weitere Stoffe in der Luft, die negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben können. Sie kommen ebenso wie Feinstaub oft aufgrund natürlicher Ursachen vor, stammen aber genauso auch aus anthropogenen Quellen. Die Air Quality Guidelines der WHO von 2000 [Org00] teilen diese in organische, anorganische, klassische und häusliche Schadstoffe ein. Zu den organischen Schadstoffen zählen unter anderem polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs), die unter anderem beim Rauchen von Zigaretten entstehen und im Verdacht stehen, krebserregend zu sein. Zu den anorganischen Schadstoffen zählen Schwermetalle wie Cadmium und Blei, bei denen die Exposition in hohen Konzentrationen bei Cadmium ebenfalls Auslöser für Krebs sein kann und bei Blei zu Nervenschäden führt. Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃), Schwefeldioxid (SO₂) und Feinstaub (PM) gehören zu den klassischen Schadstoffen. Die Grenzwerte und Empfehlungen für diese klassischen Schadstoffe hat die WHO 2005 überarbeitet [Org06] und neu herausgegeben. Für die Bestimmung der Luftqualität werden häufig nur die klassischen Schadstoffe herangezogen. Als letztes gibt es Schadstoffe, die in erster Linie innerhalb von Gebäuden auftreten. Dazu gehört unter anderem Radon, das durch den Boden in Gebäude eindringt, sich dort ansammelt und in hohen Konzentrationen Lungenkrebs auslösen kann.

2.2.1 Feinstaub

Feinstaub gehört laut der WHO zu den primären Bedenken im Bereich der öffentlichen Gesundheit [Org19, p. 3]. Im Folgenden wird deshalb genauer auf Definition und Herkunft von Feinstaub eingegangen, als auch auf seine Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.

Definition und Herkunft

Als Feinstaub werden feste und flüssige Partikel bezeichnet, die Teil des gesamten Schwebstaubs (engl. total suspended particles, TSP) sind und einen maximalen Durchmesser von 10 Mikrometer aufweisen. Die Gesamtheit dieser Teilchen wird mit PM₁₀ bezeichnet, wobei PM als Abkürzung für das englische Particulate Matter steht. Als Teilmengen der PM₁₀ werden noch PM_{2.5}, also Partikel mit einem maximalen Durchmesser von 2,5 Mikrometer, und ultrafeine Partikel (UFP) mit bis zu 0,1 Mikrometer großem Durchmesser unterschieden. Der Anteil an PM₁₀ am TSP beträgt dabei ca. 60–90 Prozent, während PM_{2.5} einen Anteil von 30–75 Prozent hat. Die Konzentrationen von PM₁₀ und PM_{2.5} werden dabei in Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) angegeben. Da UFP kaum Masse besitzen, wird deren Konzentration in Teilchenanzahl pro Kubikzentimeter Luft gemessen. Als Referenz kann gesehen werden, dass die Belastung von UFP in deutschen Städten etwa um die 10.000 Partikel pro Kubikzentimeter Luft beträgt [LS05, p. 2]. Eine weitere Kategorisierung des Feinstaubes ist die Einteilung in primären und sekundären Feinstaub. Während primärer Feinstaub direkt während eines Prozesses freigesetzt wird, beispielsweise bei einem Verbrennungsprozess, bildet sich sekundärer Feinstaub aus gasförmigen Substanzen wie Schwefel und Stickoxide oder Ammoniak durch Reaktionen in der Luft [Umw09; Umw18].

Feinstaub entsteht durchaus auch in der Natur, beispielsweise durch Bodenerosion, vulkanische Aktivität oder Waldbrände und enthält unter anderem auch Pollen, Sporen und Bakterien. Ein Großteil geht aber auf menschengemachte Prozesse zurück. Zu den größten Produzenten von primärem Feinstaub gehören Straßenverkehr, Heizwerke und Wohnungsheizungen, bestimmte Industrieprozesse und das Umschlagen von Schüttgütern. Dabei ist in städtischen Ballungsgebieten vor allem der Straßenverkehr die Hauptquelle der Feinstaubentstehung. Feinstaub bildet sich nicht

bloß aus dem Prozess der Kraftstoffverbrennung, sondern auch aus Bremsen- und Reifenabrieb und Staubaufwirbelung von der Straße. Der größte Produzent von sekundärem Feinstaub ist die Landwirtschaft, vor allem durch deren Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung [Umw09; Umw18].

Die Konzentration von Feinstaub in der Luft ist zudem auch witterungsabhängig. Fehlt der Austausch mit der Umgebungsluft, können sich die Partikel in den unteren Luftschichten ansammeln, da sie nicht abtransportiert werden. Das ist vor allem in heißen Sommern und trockenen Wintern der Fall, da hier Hochdruckwetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten herrschen, man spricht von Inversionswetterlagen [Umw09; Umw18].

Gesundheitliche Risiken durch Feinstaub

Die schädlichen Auswirkungen von Feinstaub auf den menschlichen Organismus sind davon abhängig, wie hoch seine Konzentration in der Luft ist, wie seine chemische Zusammensetzung aussieht und wie groß die Partikel sind [LS05, p. 5]. Partikel der PM10 und PM2.5 gelangen nur zu einem geringen Bruchteil in die kleineren Bronchien und Lungenbläschen, während ultrafeine Partikel bis in den Blutkreislauf gelangen können. Abgelagerte Partikel können in der Folge Entzündungen des Lungengewebes hervorrufen, was aufgrund der engen Verbindung auch Auswirkungen auf Herz- und Blutkreislauf haben kann. Ein weiteres Problem stellt die Anlagerung von Schwermetallen und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), die als krebserregend gelten, an den Partikeln dar. Diese Stoffe gelangen dann ebenfalls in die Lunge [Umw09]. Sich daraus ergebende Effekte sind die allgemeine Schwächung der Atemwege und des Herzkreislaufes, was sich durch Asthma und Atemprobleme zeigt. Dies führt zu einer erhöhten Sterberate aufgrund Herzkreislauf- und Atemwegserkrankungen und Lungenkrebs [Org13]. Weltweit sind etwa 3% aller Tode aufgrund von Herz-Lungen-Krankheiten und 5% der Tode durch Lungenkrebs auf Feinstaub zurückzuführen. In Regionen, in denen die Bevölkerung einer erhöhten PM2.5-Konzentration ausgesetzt ist, ist die Lebenserwartung im Vergleich zu umliegenden Regionen um etwa 8,6 Monate geringer [Org13].

Grenzwerte für Feinstaub

Die ersten Air Quality Guidelines für Europa wurden 1987 von der WHO ausgegeben. Die empfohlenen jährlichen Mittelwerte wurden bei $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ angesetzt, die Tagesmittelwerte lagen bei $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ für thorakale Partikel, die in etwa den PM10 entsprachen [And09, p. 2]. Die Air Quality Guidelines der WHO von 2005 setzen getrennte empfohlene Grenzwerte für PM10 und PM2.5-Belastungen. Für PM2.5 werden ein Maximum von 10 Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Luft im jährlichen Mittel empfohlen, sowie $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ als 24-Stunden-Mittelwert. Dieser Tagesmittelwert sollte nicht öfter als drei mal im Jahr überschritten werden. Für PM10 betragen diese Empfehlungen $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ im jährlichen Mittel und $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ im jährlichen Mittel [Org13]. Diese strikteren Grenzen ergaben sich aus der Beobachtung, dass es bei der Feinstaubbelastung keine deutlich erkennbare Schwelle gibt, bei der sich die gesundheitlichen Folgen verringern [And09, p. 2]. Die Air Quality Guidelines der WHO sind dabei weder Standard noch rechtlich bindend, bilden aber die Grundlage für die nationale Gesundheitspolitik, ebenso wie die Air Quality Standards der Europäischen Kommission. Hier gelten $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ im jährlichen Mittel für PM2.5 und $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ für PM10. Das Tagesmittel von PM10 darf 35-mal im Jahr überschritten werden und beträgt $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Diese Vorgaben gelten als Zielwerte und die EU-Mitglieder sind dazu angehalten, alle

nötigen Maßnahmen zu ergreifen, um diese Werte einzuhalten [Kom19]. Es herrscht die Pflicht zur Aufstellung von Luftreinhalteplänen und Aktionsplänen, wenn die genannten Grenzwerte in Gefahr sind, überschritten zu werden oder bereits überschritten sind [LS05].

Deutschland hat diese Grenzwerte und die Pflicht zur Erstellung von Luftreinhalteplänen im Bundes-Immissionsschutzgesetz umgesetzt.

Feinstaubbelastung in Deutschland: Stuttgart

Deutschland misst seit 2000 flächendeckend die PM10-Konzentrationen und seit 2008 ebenfalls die PM2.5-Konzentrationen. Die Jahresmittelwerte von PM10 sind dabei fast stetig gesunken (vgl. Abb. 2.11). Dies ist zu großen Teilen auf die reduzierten SO₂-Emissionen zurückzuführen, durch welche es zu weniger Bildung von sekundärem Feinstaub kommt. Dagegen arbeitet das Klima, das für immer längere Trockenperioden sorgt, in denen sich Feinstaub ansammeln kann [Umw18].

Die Stadt Stuttgart ist aufgrund ihrer topografischen Lage in einem Talkessel und der damit einhergehenden Windarmut anfällig für hohe Feinstaubkonzentrationen [Stu18, p. 13]. Aufgrund dessen wird die Luftqualität seit 1980 vom Land Baden-Württemberg durch ein Messnetz überwacht. Die Feinstaubbelastung in Stuttgart wird aktuell durch acht Messtationen gemessen, die im gesamten Stadtbereich verteilt sind, unter anderem am Neckartor [Lan19]. Hier ist die Belastung durch verkehrsbedingten Feinstaub durch die Bundesstraße B14 besonders hoch (vgl. Abbildung 2.12).

Dabei hat die Belastung durch Schadstoffe, die nicht durch den Verkehr verursacht werden, in den letzten Jahren stark abgenommen [Lan19]. Im Jahr 2018 wurden erstmals an allen Messtationen im Stadtgebiet die gesetzlichen Feinstaubwerte eingehalten. Die zulässigen Grenzwerte im Jahresmittel wurden dabei bereits 2011 erreicht [Stu19a].

Dies ist auch auf die Maßnahmen des Luftreinhalteplans des Regierungspräsidiums Stuttgart zurückzuführen [Stu18]. Die Maßnahmen enthalten unter anderem den Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs, Ausbau des Radverkehrs, Reduzierung von Höchstgeschwindigkeiten auf Steigungsstrecken und das Ausrufen eines Feinstaubalarms. Dieser wird seit 2016 ausgerufen, wenn der Deutsche Wetterdienst an mindestens zwei aufeinanderfolgenden Tagen ein stark eingeschränktes Austauschvermögen der Atmosphäre vorhersagt. An Tagen mit Feinstaubalarm ist die Benutzung von Kleinf Feuerungsanlagen verboten und es gelten bestimmte Angebote des ÖPNV, um die Schadstoffbelastung durch Autos zu verringern [Stu18, p. 48].

Feinstaubmessung und Feinstaubsensoren

Da im Verlauf dieser Arbeit Daten von Feinstaub-Messstationen verwendet werden, als auch eine Heim-Messstation aufgebaut werden soll, wird hier auf die Wirkungsweise von Feinstaubsensoren eingegangen. Zur Messung von Partikelkonzentrationen gibt es drei hauptsächliche Messverfahren. Dazu gehören die gravimetrischen Verfahren, die Aerosolspektrometer und fotometrische Verfahren. Bei den gravimetrischen Verfahren wird ein Probenahmefilter für einen bestimmten Zeitraum durchströmt und danach gewogen. Dieses Verfahren liefert nur Mittelwerte und keine Zeitauflösung, weswegen es in der Feinstaubmessung zum großen Teil durch Aerosolspektrometer und fotometrische Verfahren abgelöst wurde. Ein Aerosolspektrometer misst die durch Einzelpartikel verursachte Streulichtintensität. Mithilfe dieser wird die Masseverteilung unterschiedlich

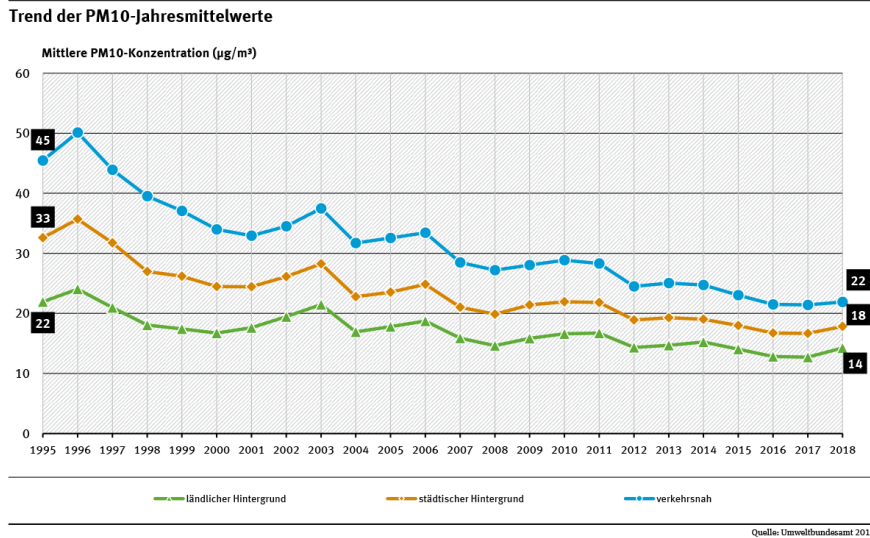


Abb. 2.11: Mittlere PM10-Konzentration in Deutschland seit 1995. Quelle: Umweltbundesamt 2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_trend-pm10-jmw/2019-11-01.pdf, Lizenz: CC BY-SA 4.0

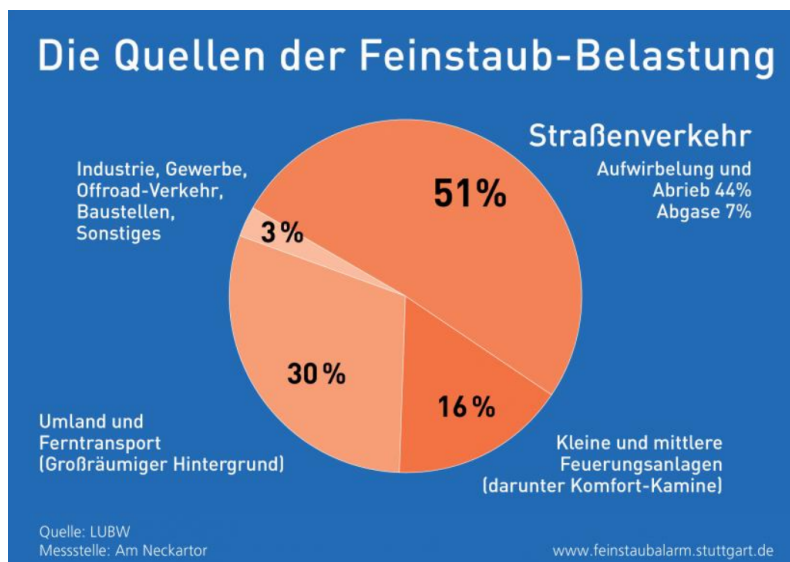


Abb. 2.12: Quellen der Feinstaubbelastung an der Messtelle “Am Neckartor” durch das Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg, Quelle: <https://www.stadtklima-stuttgart.de/Quellen-der-Feinstaubbelastung.htm> mit freundlicher Genehmigung der Stadt Stuttgart.

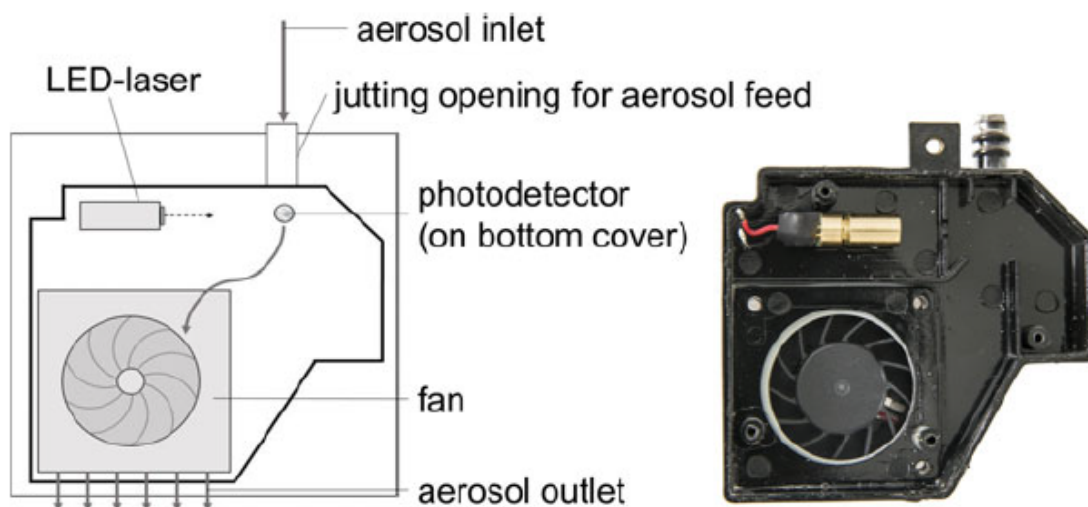


Abb. 2.13: Der Sensor SDS011 als schematische Zeichnung und Foto. Quelle: [SMD18, p. 3, Figure 1], Abbildung lizenziert unter Nr. 4811781481492 durch John Wiley and Sons.

großer Partikel abhängig von deren Durchmesser bestimmt. Aus diesen werden die angenommenen partikelgrößenabhängigen Brechungsindizes, Partikeldichten und Partikelformen berechnet und als Kalibriermatrix abgelegt. Im Gegensatz dazu ist in einem Fotometer ein Kalibrierfaktor fest hinterlegt und es werden eine Partikelgrößenverteilung, sowie mittlere Werte für Brechungsindex, Partikeldichte und -form angenommen. Es wird das gesamte an einer Partikelwolke gestreute Licht gemessen und als Maß für die Partikelkonzentration verwendet. Stimmen während der Messung die realen Partikeleigenschaften mit den angenommenen Werten überein, können diese Sensoren ebenfalls eine hohe Genauigkeit aufweisen. Weichen diese Werte jedoch ab, können genauso hohe Diskrepanzen zwischen den realen und den gemessenen Werten entstehen. Dementsprechend eignen sich fotometrische Sensoren nicht für die Grenzwertüberwachung, sondern nur für orientierende Messungen der atmosphärischen Feinstaubkonzentration [CHS+18, pp. 3–4].

In dieser Arbeit wurde der Sensor SDS011 der Firma Nova Fitness Co., Ltd. verwendet (vgl. Abbildung 2.13). Hier tritt das Gas über eine kreisförmige Öffnung in den Sensor ein und wird durch einen Laserstrahl gelenkt. Kreuzen nun Partikel diesen Laserstrahl, wird dessen Licht sowohl gestreut als auch absorbiert. Das gestreute Licht wird von einem Fotodetektor am Boden des Sensors erkannt und gemessen [SMD18, p. 2]. Die Messergebnisse dieses Sensors wurden von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg [Lan17] mit den Werten eines eignungsgeprüften Feinstaubanalysators verglichen. Demnach waren dessen Messwerte bei einer Luftfeuchte von 50–70 Prozent und einer Feinstaubkonzentration von weniger als 20 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft im zufriedenstellenden Bereich. Über diese Grenzen hinaus ist der Sensor sehr anfällig für Luftfeuchte, Lufttemperatur und Luftdruck. Besonders die Luftfeuchte stellt hier ein Problem dar, da sich bei erhöhter Luftfeuchtigkeit Partikel agglomerieren und somit an Durchmesser gewinnen, als auch der Laserstrahl durch Wassermoleküle gestreut wird. Zudem können der Messstandort und die Charge für große Unterschiede in den Messwerten im Vergleich zu dem eignungsgeprüften Analysator sorgen. Aufgrund der vielen Faktoren ist es schwer, eine einfache Korrekturformel für den Sensor zu finden [Lan17, p. 22].

Tabelle 2.2: Einteilung von Feinstaubkonzentrationen in Indexklassen gemäß dem Luftqualitätsindex für langfristige Auswirkungen der Landesanstalt für Umweltschutz des Landes Baden-Württemberg [Umw05, p. 10].

Indexklasse	1: sehr gut	2: gut	3: befriedigend	4: ausreichend	5: schlecht	6: sehr schlecht
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	≤ 7	>7-15	>15-30	>30-40	>40-50	>50

Tabelle 2.3: Einteilung von Feinstaubkonzentrationen in Indexklassen gemäß der Übersichtskarte für Luftqualität des Umweltbundesamts [Umw19b].

Indexklasse	sehr gut	gut	mäßig	schlecht	sehr schlecht
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0-20	21-35	36-50	51-100	>100
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0-60	61-120	121-180	181-240	>240

2.2.2 Luftqualitätsindizes

Um die Konzentrationen von Luftschadstoffen in einen Kontext zu und für Laien in eine Relation zur Gesundheitsschädlichkeit zu setzen, wurden Luftqualitätsindizes (engl. Air Quality Index, AQI) entwickelt. Hierbei wird die Luftqualität gemäß den Konzentrationen der meist klassischen Luftschadstoffe in eine Gefahrenklasse eingeteilt. Ein Beispiel hierfür ist der Luftqualitätsindex für langfristige Auswirkungen (LAQx) der Landesanstalt für Umweltschutz des Landes Baden-Württemberg [Umw05]. Dieser basiert auf den Konzentrationen von Stickstoffdioxid (NO_2), Benzol, PM10, Schwefeldioxid (SO_2) und Ozon [Umw05, p. 7–8] und soll die langfristige Schädlichkeit der Luftqualität beschreiben [Umw05, p. 4]. Dies geschieht durch die Einteilung in sechs Indexklassen mit den Noten 1 (“sehr gut”), hier sind keine nachteiligen Effekte auf die Gesundheit zu erwarten, bis 6 (“sehr schlecht”), wo auch nicht zu Risikogruppen gehörige Personen negative Effekte auf die Gesundheit zu erwarten haben [Umw05, p. 8–9]. Jeder Schadstoff bekommt aufgrund seiner Konzentration eine dieser Indexklassen zugewiesen [Umw05, p. 10], den Auszug der Feinstaubkonzentrationen ist in Abbildung 2.2 zu sehen. Aus der Verteilung der Schadstoffe auf die Indexklassen wird dann der schlussendliche Indexwert bestimmt [Umw05, p. 14].

Tabelle 2.4: Einteilung von Feinstaubkonzentrationen in Indexklassen gemäß des European Air Quality Index der Europäischen Umweltagentur [Umw19a].

Indexklasse	good	fair	moderate	poor	very poor	extremely poor
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0-10	10-20	20-25	25-50	50-75	75-800
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0-20	20-40	40-50	50-100	100-150	150-1200

Tabelle 2.5: Einteilung von Feinstaubkonzentrationen in Indexklassen gemäß des CAQI [CIT07], jeweils als (maximaler) stündlicher Wert oder gleitender Tagesmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Indexklasse		Very Low	Low	Medium	High	Very High
Roadside Index						
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1h	0-15	15-30	30-55	55-110	>110
	24h	0-10	10-20	20-30	30-60	>60
Background Index						
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1h	0-25	25-50	50-90	90-180	>180
	24h	0-15	15-30	30-50	50-100	>100

Das Umweltbundesamt verwendet für ihre Luftqualitäts-Übersichtskarte von Deutschland eine etwas einfachere Berechnung. Hier werden nur das Stundenmittel von NO_2 , das stündlich gleitende Tagesmittel vom PM_{10} und das Stundenmittel von O_3 zur Berechnung herangezogen. Zudem besteht das System aus nur fünf Indexklassen, von "sehr gut" zu "sehr schlecht", die durch unterschiedliche Farben enkodiert werden (vgl. Abbildung 2.3, Auszug der Einteilung von Feinstaubkonzentrationen). Der schlussendliche Indexwert entspricht der schlechtesten Indexklasse der bewerteten Schadstoffe.

Die Europäische Umweltagentur hat daneben den European Air Quality Index entwickelt [Umw19a]. Dieser berücksichtigt neben den stündlichen Konzentrationen von NO_2 , O_3 und SO_2 die gleitenden Tagesmittelwerte von PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$. Die Schadstoffe werden in sechs Indexklassen eingeteilt, die farbig enkodiert sind (vgl. Abbildung 2.4, Auszug der Einteilung von Feinstaubkonzentrationen). Die Berechnung der schlussendlichen Indexklasse einer Messstation ist neben den Indexklassen der einzelnen Stoffe auch von ihrem Standort abhängig, beispielsweise wird SO_2 für die Berechnung des Index verkehrsnaher Stationen nicht berücksichtigt.

Weitere Indizes, die häufig anzutreffen sind, sind der CAQI und der USAQI. Der CAQI ist das Ergebnis der Projekte CITEAIR und CITEAIR II, die unter anderem von der Europäischen Union initiiert wurden. Er besitzt dabei drei Ausprägungen, auf stündlicher, täglicher und jährlicher Basis. Dabei werden für den stündlichen und täglichen Index je nach Standort der Station NO_2 , PM_{10} , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$, CO und SO_2 in die Berechnung einbezogen und in fünf Indexklassen eingeteilt, die farbig enkodiert werden. Der jährliche Index berechnet sich dann aus den Überschreitungen von festgelegten Grenzwerten [CIT07] (vgl. Abbildung 2.5, Auszug der Einteilung von Feinstaubkonzentrationen).

Der US-amerikanische US AQI wurde von der Environmental Protection Agency (EPA) entwickelt und berechnet eine Gefahrenklasse aufgrund der Indexklasse von O_3 , PM , CO , SO_2 und NO_2 . Dabei gibt es sechs Gefahrenklassen, die wieder farbig enkodiert werden (vgl. Abbildung 2.6). Der Schadstoff mit der schlechtesten Indexklasse bestimmt den schlussendlichen Luftqualitätsindex [Air19].

Was alle Luftqualitätsindizes gemeinsam haben, ist die Ausgabe von Gesundheitshinweisen und Handlungsempfehlungen für die einzelnen Indexklassen.

Tabelle 2.6: Einteilung des AQI in Gefahrenklassen gemäß der Environmental Protection Agency (EPA) [CIT07].

Indexklasse	Good	Moderate	Unhealthy for Sensitive Groups	Unhealthy	Very Unhe- althy	Hazardous
Air Quality Index (AQI) Values	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300	301-500

3 Verwandte Arbeiten

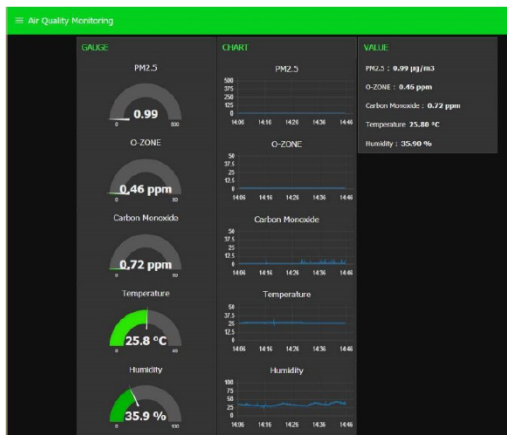
In diesem Kapitel wird auf schon bereits vorhandene Visualisierungen im Bereich Feinstaub und Luftqualität eingegangen, um zu sehen, wie diese die vorhandenen Daten in einen Kontext setzen. Begonnen mit wissenschaftlichen Arbeiten, die sich sowohl mit kompletten Lösungen aus dem Bereich Crowdsensing und Heimapplikationen beschäftigen als auch mit Visualisierungen auf kleinen Displays. Dann werden Visualisierungsbeispiele aus Webapplikationen, Smartphone-Apps und Smart-Home-Lösungen untersucht.

3.1 Wissenschaftliche Arbeiten zur Visualisierung von Feinstaubdaten und Visualisierung auf kleinen Displays

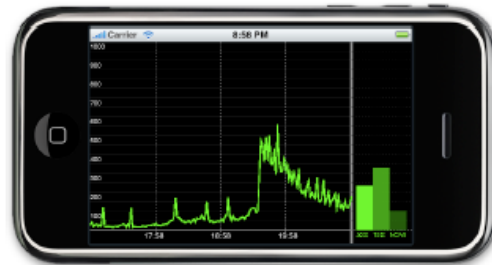
Da Umwelt- und Luftverschmutzung im Moment viel diskutierte Themen sind, gibt es viele wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit dem Aufbau von kostengünstigen Sensornetzen befassen, wie beispielsweise die Arbeit von Chanthakit et al. [CR18]. Hier wurde eine kostengünstige Messstation zur Erfassung der Konzentration unterschiedlicher Luftschadstoffe gebaut und mithilfe eines MQTT-basierten Systems zur Visualisierung auf dem Smartphone und im Webbrowser abgerufen (vgl. Abbildung 3.1a), sowie ein Alarm bei der Überschreitung bestimmter Konzentrationen eingerichtet. Kim und Paulos [KP09] haben dagegen die häusliche Luftqualität gemessen und auf einem iPod-Touch durch eine Kombination aus Linien- und Balkendiagramm dargestellt.

Neben den Arbeiten zu den technischen Grundsätzen gibt es auch Arbeiten zu Informationsvisualisierung im Alltag, wie durch Pousman et al. [PSM07]. Hier wird auf die Unterscheidung zwischen Informationsvisualisierung im Arbeitskontext und Informationsvisualisierung im Alltag eingegangen. Unter Informationsvisualisierung im Alltag wird dabei die Verwendung computergestützter Werkzeuge, die interessante Informationen des täglichen Gebrauchs visuell unterstützend vermitteln, definiert. Die Unterscheidungspunkte zur wissenschaftlichen Visualisierung sind die Arbeitsumgebung, heterogenere Nutzergruppen, andere Verwendungsmuster und Datentypen, sowie die zu erwartenden Erkenntnisse.

Daneben sind auch Forschungen aus dem Bereich der Smartwatch-Visualisierungen von Belang, da diese sich mit der Effektivität von Visualisierungen auf kleinen Displays beschäftigen. Darunter sind Blascheck et al. [BBB+18] zu erwähnen, die untersucht haben, welche Diagrammform auf Smartwatches die größte Effektivität aufweist. Untersucht wurden dabei Donut-, Radial- und Balkendiagrammen mit unterschiedlich großen Datensätzen. Dabei haben Donut- und Balkendiagramme am besten abgeschnitten und das auch bei der maximal getesteten Anzahl von 24 Datensegmenten. Neshati et al. [NSL+19] haben Sparklines und die Kompression von Liniendiagrammen auf Smartwatches untersucht. Dabei kamen sie zu dem Ergebnis, dass eine Kompression der x-Achse eines Liniendiagramms die Wahrnehmung kaum beeinträchtigt und die Verwendung einer Pixelbreite zur Darstellung von Datenpunkten auf Smartwatches zu zufriedenstellenden Ergebnissen führt.



(a) Die Visualisierung der gesammelten Feinstaubdaten in der Browserversion von Chanthakit et al. [CR18, p. 5, Figure 8]. Neben der Anzeige der aktuellen Werte in tacho-ähnlichen Darstellungen gibt es einen Verlauf der Daten als Liniendiagramme erweitert.



(b) Die Visualisierung der häuslichen Feinstaubbelastung durch Kim und Paulos [KP09, p. 2, Figure 2]. Links ein Liniendiagramm, rechts die letzten drei Werte als Balkendiagramm.

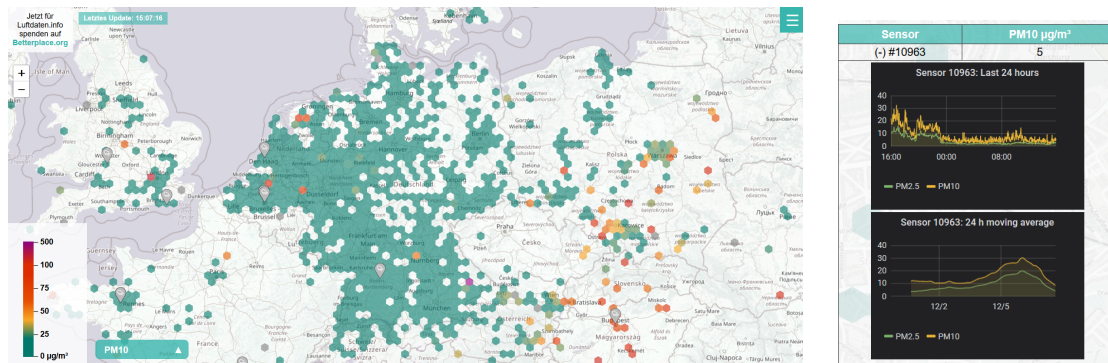
Abb. 3.1: Die Browservisualisierung der Daten bei Chanthakit et al. [CR18] (links und mittig), sowie die Visualisierung von häuslichen Feinstaubdaten durch Kim und Paulos [KP09].

Weiterführend zum Thema Visualisierungen im Alltag haben Rodgers und Bartram [RB11] die künstlerische Visualisierung des häuslichen Energieverbrauchs untersucht. Dabei wurde eine Studie mit Designs durchgeführt, die über die klassischen Diagrammvisualisierungen hinausgehen, aber trotzdem die nötigen Informationen vermitteln.

3.2 Feinstaub-Karten

Visualisierungen von Luftqualität sind oft kartengebunden, um Übersichten über bestimmte Regionen zu erhalten. Angeboten werden sie unter anderem von Open-Science-Projekten, Ämtern, aber auch privaten Firmen.

Die Webseite von luftdaten.info [Stu19b] gehört zu den Open-Science-Anbietern. Luftdaten.info wurde vom OK Lab Stuttgart initiiert und ist Teil der Programms Open Code for Germany und der Open Knowledge Foundation Germany. Die Ziele dieses Projektes sind nach eigenen Angaben, Apps zu entwickeln, über das Thema Feinstaub zu informieren, die Gesellschaft positiv zu gestalten und zu unterstützen, als auch die Arbeit von Verwaltungen und Behörden transparenter zu machen [Stu19b]. Die Karte von luftdaten.info zieht ihre Daten aus einem Netz an selbstgebaute Feinstaub-Messgeräten, deren Bauanleitung das Projekt kostenlos zur Verfügung stellt. Die Sensoren messen dabei die PM2.5- und die PM10-Konzentration, sowie teilweise auch Temperatur und Luftdruck. Daneben kann auch der berechnete AQI der Feinstaubkonzentrationen angezeigt werden. Die Daten werden dabei in etwa alle fünf Minuten aktualisiert. Auf der Karte werden die Sensorwerte als farbige Sechsecke dargestellt, die ein Feld bestimmter Größe abdecken. In der höchsten Zoomstufe stellt ein Sechseck oft nur die Werte eines Sensors dar, bei Herauszoomen fassen sie dann mehrere Werte zusammen. Eingefärbt wird nach einer kontinuierlichen Farbskala, die unten links zu



(a) Übersicht über die verfügbaren Sensoren in Deutschland. Quelle: Screenshot

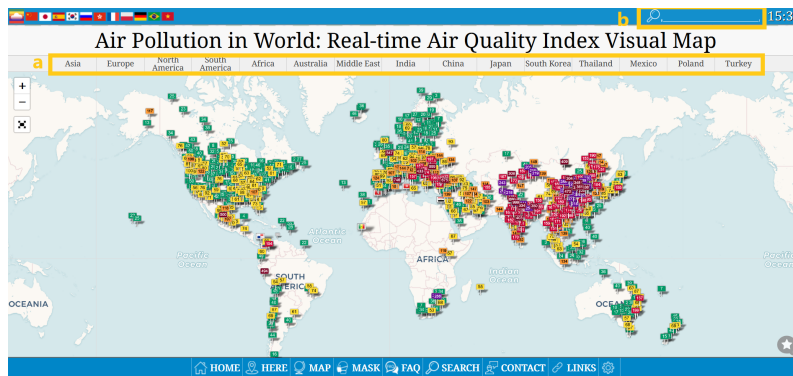
(b) Detailansicht mit Verläufen als Liniendiagrammen bei einem ausgewählten Sensor. Quelle: Screenshot

Abb. 3.2: Übersicht und Detailansicht der Feinstaubkarte von luftdaten.info des Stuttgarter OK Labs [Stu19b]. Quelle: Screenshot.

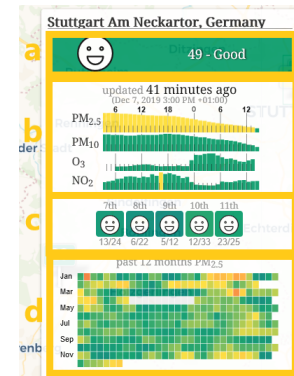
sehen ist (vgl. Abbildung 3.2a). Mit dem Klick auf ein Sechseck werden die für die Einfärbung herangezogenen Sensoren mit ihrer ID angezeigt. Zudem kann für jeden einzelnen Sensor der gleitende Mittelwert als auch der Verlauf der Rohwerte der letzten 24 Stunden angezeigt werden (vgl. Abbildung 3.2b) [Stu19b].

Ein weiteres Beispiel für eine Feinstaub-Übersichtskarte einer Open-Science-Organisation sind die Webseiten aqicn.org und waqi.info [Pro20]. Sie werden vom World Air Quality Project betrieben, das 2007 in Beijing initiiert wurde mit dem Ziel, das Bewusstsein für Luftverschmutzung zu stärken und vorhandene Informationen zu bündeln. Die verwendeten Werte sind dabei die öffentlich zugänglichen Werte der nationalen Umweltbehörden. Die Übersichtskarte zeigt dabei den AQI an, als kleines eingefärbtes Schild mit dem entsprechenden Wert (vgl. Abbildung 3.3a). Um an Detailinformationen zu gelangen, gibt es vorgefertigte Zoomeinstellungen für verschiedene Regionen, zudem kann auch direkt nach einer Stadt gesucht werden. Wird ein Ort in der Übersicht ausgewählt, werden die PM_{2.5}, PM₁₀, O₃ und NO₂-Werte angezeigt, als auch eine Vorhersage der nächsten vier Tage und eine Heatmap der letzten 12 Monate (vgl. Abbildung 3.3b).

Neben luftdaten.info und dem World Air Quality Project bietet auch das [openaq](http://openaq.org)-Projekt eine Übersichtskarte für Luftqualität an. Das Open-Source-Projekt sammelt Daten nationaler Messnetze und stellt diese ebenfalls kostenfrei als Schnittstelle zur Verfügung. Das Projekt hat es sich zum Ziel gesetzt, als Verbindung zwischen lokalen Organisationen und Bürgern im Kampf gegen Luftverschmutzung und den ungleichen Zugang zu unverschmutzter Luft zu fungieren [Ope20]. Auf der Weltkarte können die Werte von BC, CO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} und SO₂ eingesehen werden. In der Übersicht werden diese als eingefärbte Punkte dargestellt, wobei jede dieser Punkte eine Messstation repräsentiert (vgl. Abbildung 3.4). Leider sind im Bereich von Baden-Württemberg kaum Messstationen verzeichnet. In der Detailansicht können die jeweiligen Werte der Station über die letzten sieben Tage als Scatterplot eingesehen werden (vgl. Abbildung 3.5). Eine Prognose gibt es nicht.



(a) Übersichtskarte des World Air Quality Project. Mit den Schaltflächen oben (Markierung a) kann auf einen Kontinent herangezoomt werden oder im Suchfeld (Markierung b) direkt nach einer Stadt gefiltert werden [Pro20]. Eingefärbte, beschriftete Schilder zeigen den AQI am jeweiligen Ort an. Quelle: Screenshot



(b) Detailansicht bei ausgewählter Messstation. Quelle: Screenshot

Abb. 3.3: Übersicht und Detailansicht des World Air Quality Index [Pro20]. Die Detailsicht zeigt den aktuellen AQI (Markierung a), Balkendiagramme der Verläufe vom PM_{2.5}, PM₁₀, O₃ und NO₂ der letzten 24 Stunden (Markierung b), eine Vorhersage der nächsten fünf Tage (Markierung c) und eine Heatmap der letzten zwölf Monate (Markierung d). Quelle: Screenshot.

Ein Vergleich der Eckdaten von luftdaten.info, waqi.org und openaq.org ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Eine Übersicht über die Luftqualität in Europa bietet die Europäische Umweltagentur. Hier werden die Werte der Messstationen als gemäß dem Luftqualitätsindex eingefärbte Kreise angezeigt (vgl. Abbildung 3.6). Es können Land und Station als auch vergangene Werte oder prognostizierte Werte ausgewählt werden. In der Detailansicht einer einzelnen Station werden einzeilige Heatmaps für die einzelnen Werte der letzten sieben Tage angezeigt als auch Detailinformationen zur jeweiligen Station und ein Kreisdiagramm der Luftqualität des letzten Jahres (vgl. Abbildung 3.7) [Umw19a].

Für einzelne Länder bieten auch die nationalen Umweltbehörden Übersichtskarten der Luftbelastung an, so auch das Umweltbundesamt. Hier werden die gleitenden PM₁₀-Tagesmittelwerte und die stündlichen Mittelwerte von O₃ und NO₂ herangezogen und der daraus resultierende Luftqualitätsindex als Kreisdiagramm angezeigt. Dieses Kreisdiagramm dient als Glyphe, um anzuzeigen, welche Messwerte die jeweilige Station liefert. Ist eine Station ausgewählt, wird deren Standortkategorie als auch die Messwerte aufgeschlüsselt angezeigt. Zudem werden die zugehörigen Gesundheitshinweise und Handlungsempfehlungen für die jeweilige Luftqualität eingeblendet (vgl. Abbildung 3.8) [Umw19b].

Ein Vergleich der Eckdaten der Feinstaubvisualisierungen der EEA und des Umweltbundesamts findet sich in Tabelle 3.2.

Weitere Anbieter von Luftqualität-Übersichtskarten sind private Firmen. Ein Beispiel hierfür ist die Karte von Breezometer. Breezometer ist eine in Israel ansässige Firma, die nach eigenen Angaben ihre Daten aus verschiedensten Quellen beziehen, diese zusätzlich mehreren Algorithmen wie beispielweise Machine Learning unterziehen, um damit eine möglichst hohe Akkuratess ihrer Werte

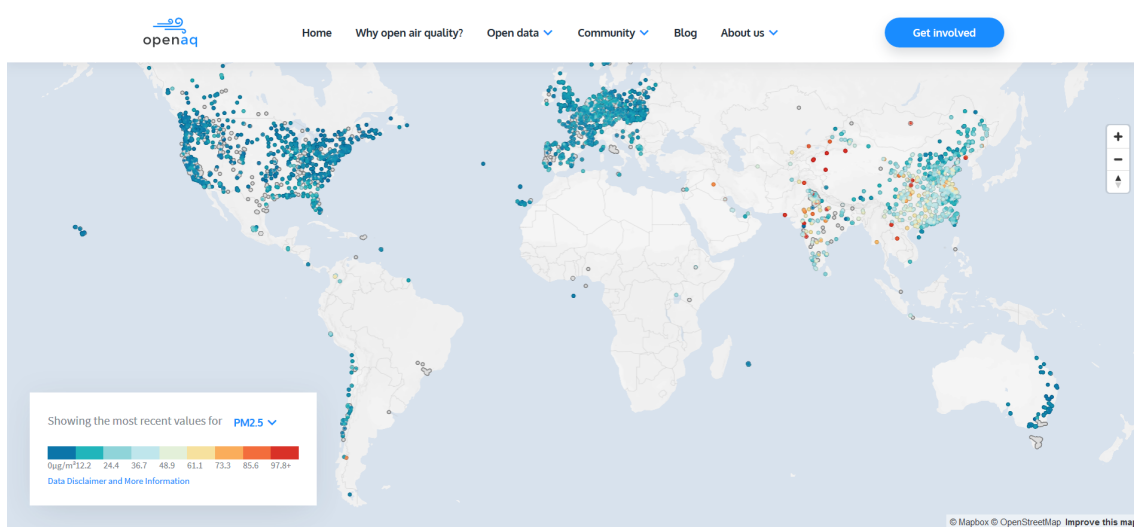


Abb. 3.4: Übersichtskarte von openaq.org [Ope20]. Die Messstationen werden durch entsprechend der momentanen Feinstaubkonzentration eingefärbte Punkte repräsentiert. Quelle: Screenshot

Values breakdown

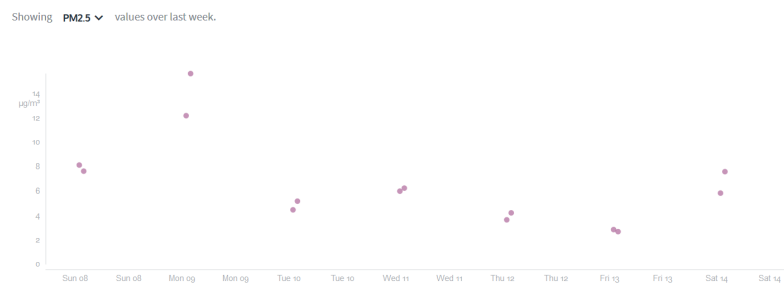


Abb. 3.5: Detailwerte einer Messstation bei OpenAQ: Der Verlauf aller Werte über die letzten sieben Tage kann eingesehen werden. Da für Baden-Württemberg keine Messstationen verzeichnet sind, hier der Verlauf der Messstation in Ulm [Ope20]. Quelle: Screenshot

zu erzielen. Diese API kann kostenpflichtig genutzt werden. Auf der Webseite von Breezometer kann eine weltweite Karte eingesehen werden, die die bereitgestellte API verwendet und aufbereitet. Auf der Karte kann nach einem Ort gesucht werden, dessen Luftqualitätsindex wird in einem Kreisdiagramm angezeigt (vgl. Abbildung 3.9). Zusätzlich wird der übliche Wert um diese Uhrzeit angezeigt, als auch eine 2-Stunden-Vorhersage und gesundheitliche Empfehlungen sowie Informationen zu den einzelnen Schadstoffen. Als letztes bietet Breezometer eine 12-Stunden-Vorhersage als Liniendiagramm an.

Der Sensorhersteller PurpleAir bietet ebenfalls eine Übersichtskarte an, deren Daten aus der Einspeisung ihrer Kunden erfolgt. In der Übersicht werden die einzelnen Messstationen als gemäß dem Luftqualitätsindex eingefärbten Kreis angezeigt. Es können sowohl diverse Werte

Tabelle 3.1: Vergleich der Luftqualitätskarten der vorgestellten Open-Science-Projekte.

Anbieter	OK Lab Stuttgart	World Air Quality Project	openaq
Abdeckung	weltweit	weltweit	weltweit
Datenquelle	nach Anleitung selbstgebaute Sensoren, deren Werte dnn zur Verfügung gestellt werden	Messnetze nationaler Umweltbehörden	Messnetze nationaler Umweltbehörden
Wertebereich	- PM10 (Rohwert) - PM2.5 (Rohwert) - AQI US - Temperatur - relative Luftfeuchte - Luftdruck	AQI basierend auf PM10 (gewichteter, gleitender 12h-Mittelwert) PM2.5 (gewichteter, gleitender 12h-Mittelwert) NO2 (gewichteter, gleitender 12h-Mittelwert) Temperatur Luftdruck Luftfeuchte Wind	BC (Rohwert) CO (Rohwert) NO2 (Rohwert) O3 (Rohwert) PM10 (Rohwert) PM2.5 (Rohwert) SO2 (Rohwert)
Visualisierung	- eingefärbte Sechsecke auf der Weltkarte - Liniendiagramme	- eingefärbte, beschriftete Schilder auf der Weltkarte - Balkendiagramme - Icons - Heatmaps	- eingefärbte Punkte auf der Weltkarte - Scatterplots
URL	luftdaten.info	waqi.info aqicn.org	openaq.org
Prognose	keine	AQI von PM2.5 der nächsten drei Tage	keine
Vergangenheit	Rohwerte und gleitende Mittelwerte der letzten 24 Stunden für PM2.5 und PM10	alle Werte der letzten 24 Stunden	Werte der letzten 7 Tage

angezeigt werden, als auch nach Sensortyp und unterschiedlichen Zeitwerten gefiltert werden (vgl. Abbildung 3.10). Es ist möglich, eine einzelne Messtation anzuwählen, deren Werte der letzten sieben Tage als Liniendiagramm zu betrachten (vgl. Abbildung 3.11) [Pur19].

Einen Überblick über die Eckdaten von Breezometer und PurpleAir findet sich in Tabelle 3.3.

3.3 Feinstaub-Apps

Neben Übersichtskarten als Webanwendung gibt es ähnliche Konzepte als Applikation für das Smartphone. Dabei ähneln sich viele Apps und im Folgenden werden einige Visualisierungsmöglichkeiten, die in Apps vorkommen, beschrieben.

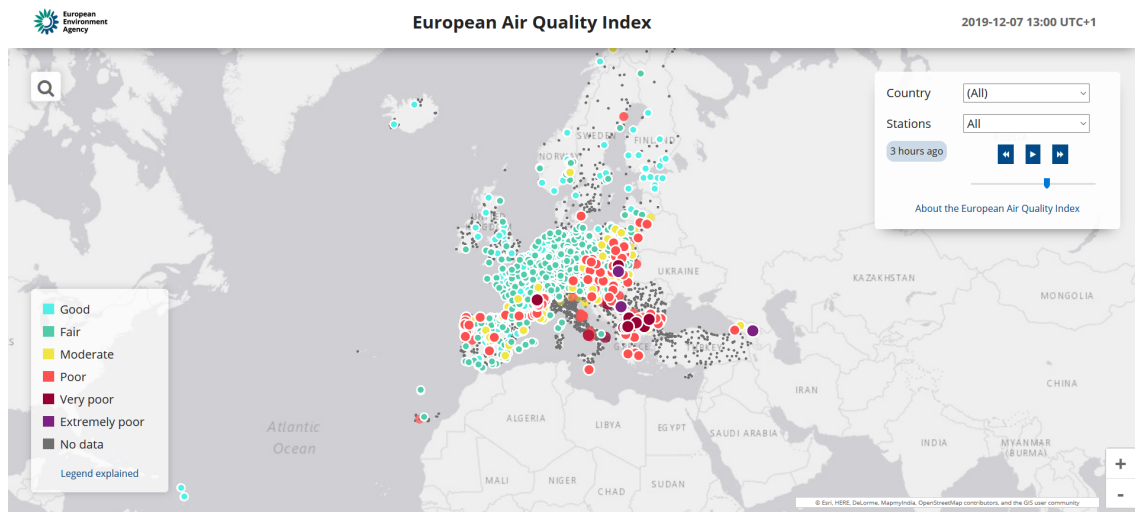


Abb. 3.6: Übersichtskarte der Luftqualität in Europa der Europäischen Umweltagentur [Umw19a]. Messstationen werden durch entsprechend dem Messwert eingefärbte und größenskalierte Kreise dargestellt. Quelle: Screenshot

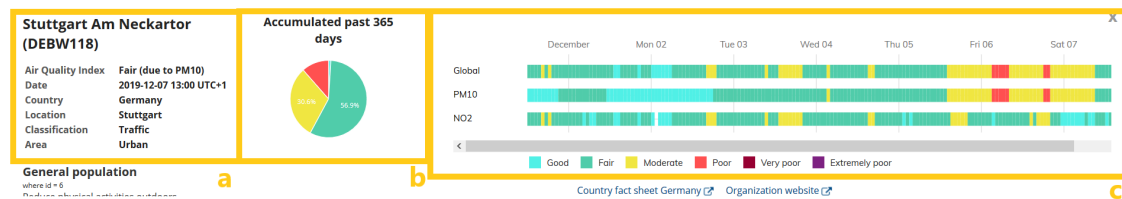


Abb. 3.7: Auswahl der Messstation Stuttgart am Neckartor auf der Seite der Europäischen Umweltagentur [Umw19a]. Ein kurzer Steckbrief (Markierung a) bietet Detailinformationen zur Messstation, beispielsweise ihrer Lage. Ein Kreisdiagramm zeigt die Anteile verschiedener AQI-Einstufungen im Verlauf der letzten 365 Tage (Markierung b). Einzeilige Heatmaps bieten den PM2.5-, den PM10- und den daraus resultierenden Gesamt-AQI Verlauf der letzten sieben Tage (Markierung c). Quelle: Screenshot

Viele Apps verwenden dabei eine Art Dashboard, auf dem unterschiedliche Informationen zu Luftqualität und Wetter in Karten zusammengefasst sind. Von hier aus kann man zu detaillierten Diagrammen gelangen. Die Luftqualität wird dabei so gut wie immer mit einem Luftqualitätsindex dargestellt und dabei eine entsprechende Farbkodierung verwendet. Manche Apps verwenden zusätzlich unterschiedliche Versionen von Smileys als Glyphen, wie beispielweise die Apps Airlief (vgl. Abbildung 3.12a), AirVisual von IQAir AG (vgl. Abbildung 3.12b) oder der App Air Quality Checker von Labmatic co. (vgl. Abbildung 3.12c).

Zur Darstellung des Verlaufs von Feinstaubkonzentrationen werden meist Balkendiagramme verwendet, die teilweise gemäß dem AQI eingefärbt werden. Man findet sie unter anderem in der App Weltluftqualität von insdio (vgl. Abbildung 3.13c), der App Luftqualität des Umweltbundesamts (vgl. Abbildung 3.13a) und der App Airlify (vgl. Abbildung 3.13b). Für andere Luftschadstoffe werden dagegen häufig Liniendiagramme verwendet, wie in der App Airlify (vgl. Abbildung 3.14a) und der App Air Quality Checker (vgl. Abbildung 3.14b).

3 Verwandte Arbeiten

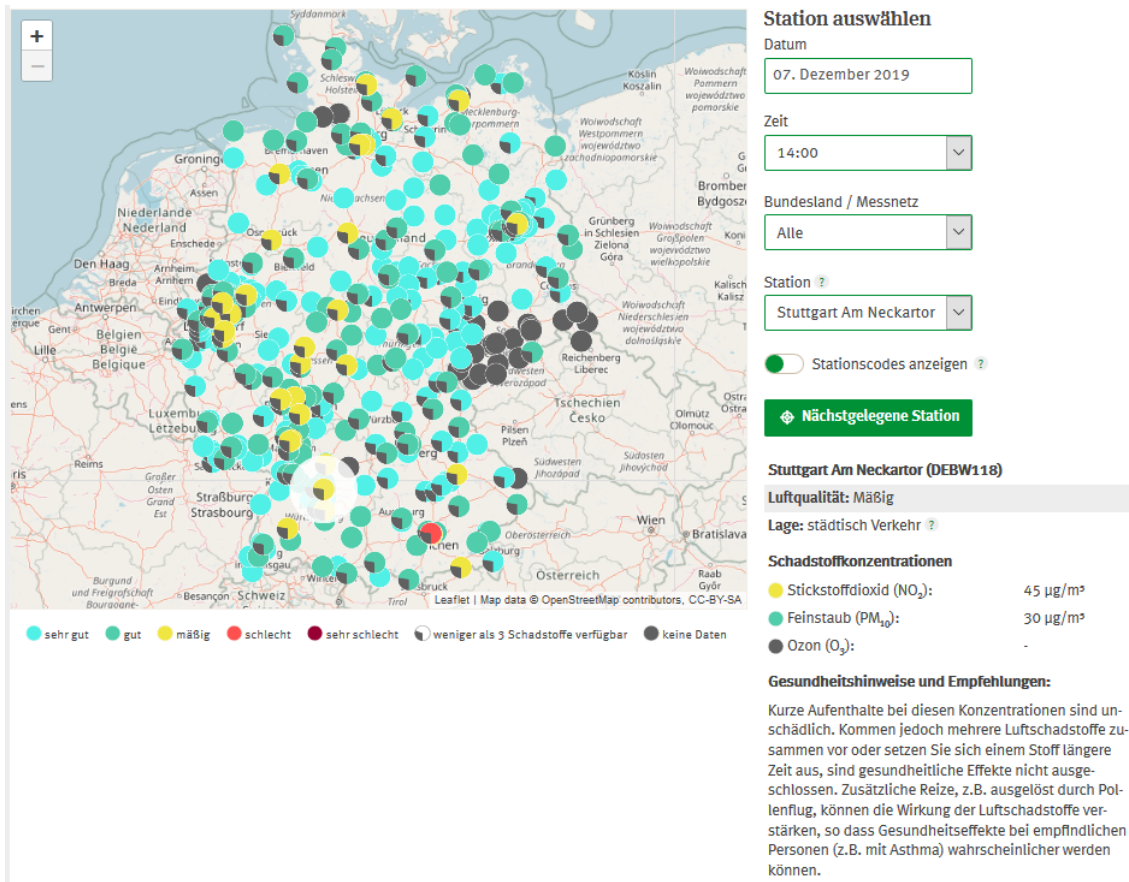


Abb. 3.8: Übersichtskarte des Umweltbundesamt mit ausgewählter Station Stuttgart am Neckartor [Umw19b]. Quelle: Screenshot

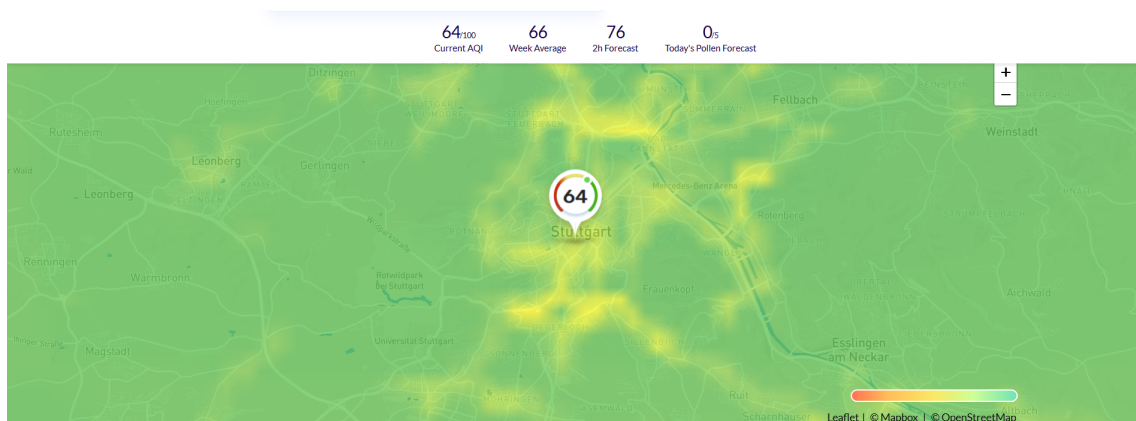


Abb. 3.9: Übersichtskarte der Region Stuttgart auf der Karte der Firma Breezometer [Bre19]. Die Messtation wird durch ein kreisförmiges Popup angezeigt, mit einer Markierung des momentanen Wertes auf einer kreisförmigen Skala. Der Wert wird zudem mittig angezeigt. Die Karte ist kontinuierlich eingefärbt gemäß der berechneten Konzentration am jeweiligen Ort. Quelle: Screenshot

Tabelle 3.2: Vergleich der Luftqualitätskarten der Europäischen Umweltagentur und dem Umweltbundesamt.

Anbieter	European Environment Agency	Umweltbundesamt
Abdeckung	Europa	Deutschland
Datenquelle	Messnetze nationaler Umweltbehörden	Werte des eigenen nationalen Messnetzes
Wertebereich	AQI basierend auf - PM10 (gleitender 24h-Mittelwert) - PM2.5 (gleitender 24h-Mittelwert) - O3 (Rohwert) - NO2 (Rohwert) - SO2 (Rohwert) Die einzelnen Werte können dabei nicht eingesehen werden.	AQI basierend auf - NO2 (Stundenmittelwert) - PM10 (Gleitender 24h-Mittelwert) - O3 (Stundenmittelwert) Die einzelnen Werte können eingesehen werden.
Visualisierung	- eingefärbte, größenskalierte Kreise auf der Weltkarte - Kreisdiagramme - Heatmaps	- an Kreisdiagramme angelehnte, eingefärbte Glyphen auf der Übersichtskarte
URL	airindex.eea.europa.eu	umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten/luftqualitaet
Prognose	alle Werte für die nächsten 24 Stunden	keine
Vergangenheit	alle Werte der letzten 48 Stunden	alle Werte der letzten Jahre

**Abb. 3.10:** Weltübersicht mit den Messstationen von PurpleAir [Pur19]. Die Messstationen werden durch Kreise repräsentiert, die gemäß ihrem Wert beschriftet und eingefärbt sind. Quelle: Screenshot

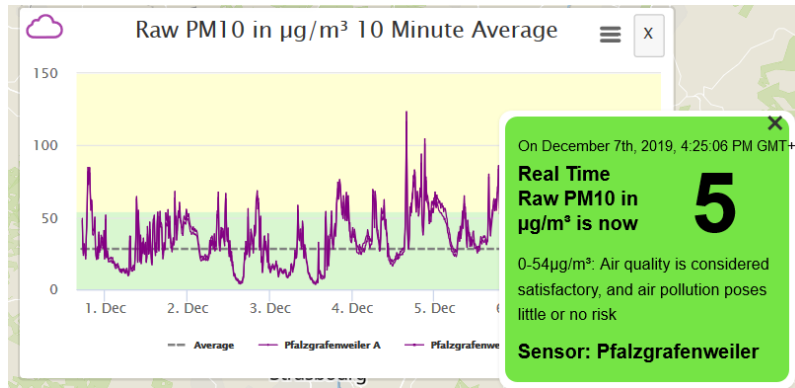


Abb. 3.11: Liniendiagramm einer einzelnen Messstation von PurpleAir [Pur19] über die letzten sieben Tage der ausgewählten Konzentration. Daneben der aktuelle Werte der Station. Quelle: Screenshot

Tabelle 3.3: Vergleich der Luftqualitätskarten der Firmen Breezometer und PurpleAir.

Anbieter	Breezometer	PurpleAir
Abdeckung	weltweit	weltweit
Datenquelle	unterschiedlich	Werte aus den eigenen Sensoren, die Kunden einspeisen.
Wertebereich	AQI basierend auf - NO2 - PM2.5) - PM10 - CO - NO - NOX - O3 - SO2 Es ist nicht klar, wie diese Werte zustande kommen.	- PM10 - PM2.5 - PM1.0 - Temperatur - Luftfeuchte Diese Werte können als Rohwerte oder als unterschiedliche AQIs angezeigt werden. Daneben können auch 10-minütige bis wöchentliche Mittelwerte eingestellt werden.
Visualisierung	- Kontinuierliche eingefärbte Karte mit Markierung auf runder Skala für einzelne Messstationen - Liniendiagramme	- eingefärbte Kreise mit Beschriftung auf der Weltkarte - Liniendiagramme
URL	breezometer.com	purpleair.com
Prognose	AQI für die nächsten 12 Stunden	Werte der letzten drei Tage
Vergangenheit	keine	Mittelwerte für die nächsten zehn Minuten bis zu einer Woche



(a) Glyphe aus der App Airlief.
Quelle: Screenshot

(b) Glyphe aus der App AirVisual.
Quelle: Screenshot

(c) Glyphe aus der App Air Quality Checker von Labmatic co.
Quelle: Screenshot

Abb. 3.12: Verwendete Glyphen zur Enkodierung des aktuellen AQI in verschiedenen Apps.

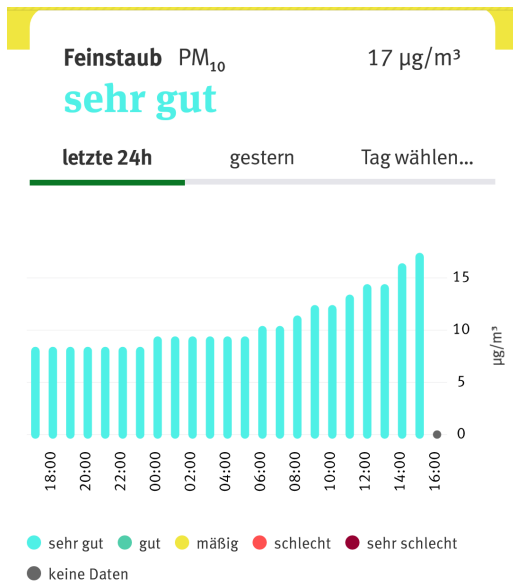
Eine weitere Visualisierungsmöglichkeit von Luftschadstoffkonzentrationen zeigt die App Air Quality Checker, bei welcher aktuellen Werte als Kreisdiagramme angezeigt werden (vgl. Abbildung 3.15). Ein volles Kreisdiagramm, also 100 Prozent, stellt in diesem Fall die Grenze zur dritten verwendeten Indexklasse dar, ab welche der Luftqualitätsindex nur noch als “mäßig” eingestuft wird.

3.4 Feinstaub-Heimmonitore

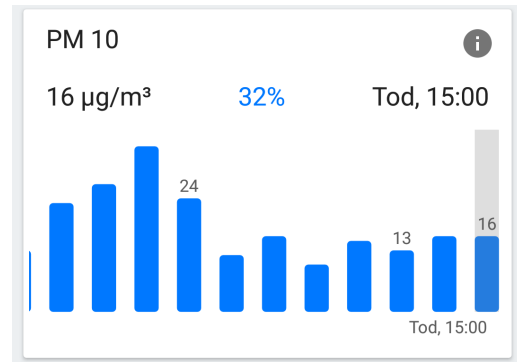
Neben Applikationen für das Smartphone werden mittlerweile auch smarte Heimmonitore angeboten, die bestimmte Werte stationär anzeigen. Diese kommen meist mit Sensoren, die Zuhause installiert werden können und die Feinstaubwerte des Innenraums messen. Viele Visualisierungsvarianten sind aber weitgehend dieselben, wie sie auch in Web- und Smartphone-Applikationen verwendet werden, daher wird auf diese nicht weiter eingegangen. Vorteile von diesen Monitoren ist, dass man die aktuellen Werte immer im Blick hat, ohne dafür erst das Smartphone in die Hand nehmen zu müssen und eine App zu öffnen. Ein permanent sichtbarer Monitor wird, womöglich unbewusst, viel öfter geprüft, weil er sich immer wieder im Blickfeld befindet. Dies hilft, hohe Werte rechtzeitig zu erkennen, die einen Grund zur Sorge bieten könnte und Gegenmaßnahmen erfordern.

3.5 Zusammenfassung der existierenden Visualisierungen

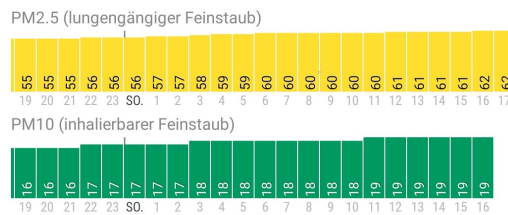
Nach der Analyse der bereits verfügbaren Anwendungen kann festgestellt werden, dass die vorherrschenden Visualisierungsformen von Feinstaubkonzentrationsverläufen Liniendiagramme und Balkendiagramme sind. Bei Balkendiagrammen wird eine Einfärbung der Balken nach AQI dazu genutzt, die Werte besser auf einen Blick einordnen zu können. Aufgrund dessen werden vertikale Achsenbeschriftungen häufig weggelassen. Ebenfalls einige Male tauchen Heatmaps auf, oft um gröbere Granularitäten wie Tage über einen längeren Zeitraum zu enkodieren. Für die Darstellung eines aktuellen Werts werden oft nach dem AQI eingefärbte Flächen verwendet und



(a) Balkendiagramm aus der App Luftqualität des Umweltbundesamts. Quelle: Screenshot

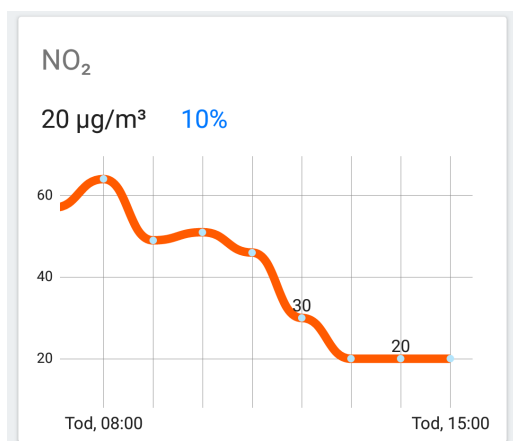


(b) Balkendiagramm aus der App Airly. Quelle: Screenshot

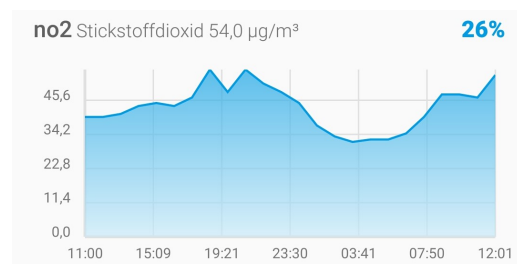


(c) Balkendiagramme aus der App Weltluftqualität von insdio. Quelle: Screenshot

Abb. 3.13: Verwendete Balkendiagramme für Konzentrationsverläufe von Feinstaub in verschiedenen Apps.



(a) Konzentrationsverlauf von NO₂ in der App Airly. Quelle: Screenshot



(b) Konzentrationsverlauf von NO₂ in der App Air Quality Checker. Quelle: Screenshot

Abb. 3.14: Verwendete Liniendiagramme für NO₂ in verschiedenen Apps.

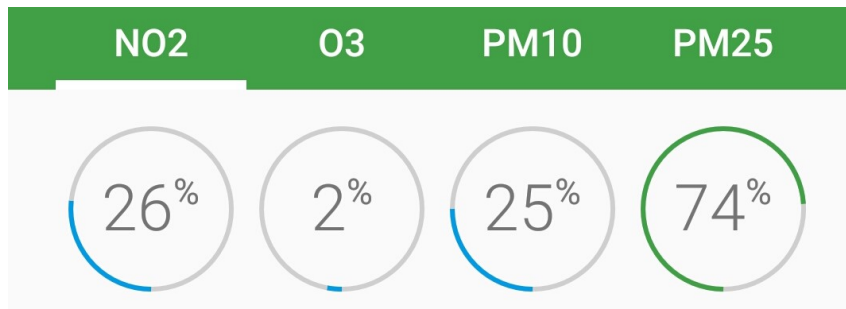


Abb. 3.15: Anzeige der aktuellen Luftschadstoffkonzentrationen als Kreisdiagramme in der App Air Quality Checker. Quelle: Screenshot

durch eine Smiley-Glyphe ergänzt. Kreisdiagramme finden sich ebenfalls wieder, sind allerdings nicht unbedingt intuitiv verständlich. Abschließend kann zu Farbgestaltung gesagt werden, dass sich die meisten Visualisierungen an einer von grün über gelb nach rot verlaufenden “Ampel”-Farbskala orientieren, um Werte farblich zu enkodieren.

Was den meisten Visualisierungen fehlt, ist ein direkter Vergleich mehrere Granularitäten oder eines lokalen Werts zu seiner Umgebung. Die meisten Visualisierungen bieten den aktuellen Wert und den letzten Verlauf, ohne Vergleichsmöglichkeiten. Die zu entwickelnde Visualisierung soll genau das beinhalten, um Konzentrationen besser verfolgen und lokale Werte in einen besseren Kontext setzen zu können.

4 Visualisierungskonzept

Das Gesamtkonzept basiert auf den Schnittstellen von luftdaten.info, da dieses ein engmaschigeres Messnetz aufweist als die von nationalen Behörden zugänglichen Daten. Dies ermöglicht festzustellen, ob erhöhte Werte womöglich von lokalen Quellen kommen oder eine allgemein hohe Feinstaubbelastung vorliegt, indem Werte eines Sensors mit den Werten der unmittelbaren Umgebung verglichen werden können. Dies führt zu einem genaueren Bild der vorliegenden persönlichen Feinstaubbelastung und konkretisiert damit die abstrakte Übersicht, die beispielsweise eine Karte mit wenigen oder keinen Messtationen im Umkreis des Wohnorts bietet.

Die bisher betrachteten Visualisierungsbeispiele hatten gemeinsam, dass sie jeweils nur isolierte Werte und Verläufe darstellen. Diese Visualisierungen müssen daher erweitert werden, um auch auf einem kleinen Display zu funktionieren. Die zu entwickelnde Visualisierung sollte möglichst keine Interaktion erfordern und alle wichtigen Werte und Verläufe in verschiedenen Granularitäten auf einen Blick bieten. Dazu gehört ebenfalls die zuvor angesprochene Vergleichsmöglichkeit mit umgebenden Sensoren.

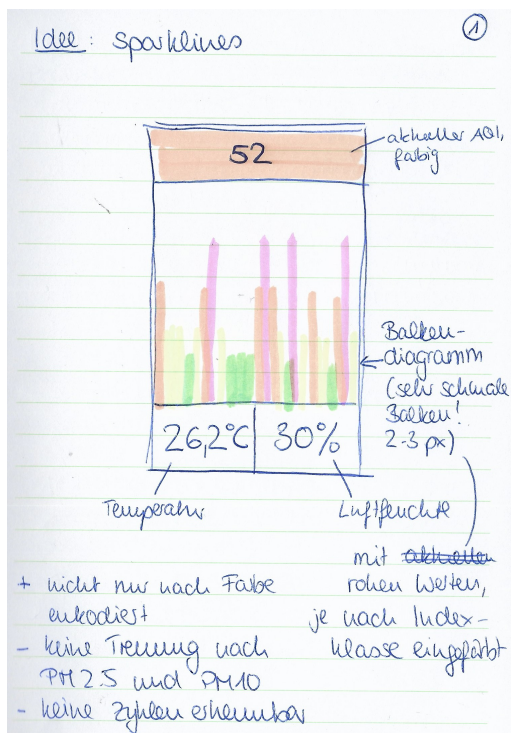
In diesem Kapitel werden zunächst die Prämissen beschrieben, auf denen das Visualisierungskonzept aufgebaut werden soll. Dann werden die iterativen Entwürfe vorgestellt und der Entscheidungsprozess beschrieben, mit welchem das finale Konzept ausgewählt wurde.

4.1 Prämissen

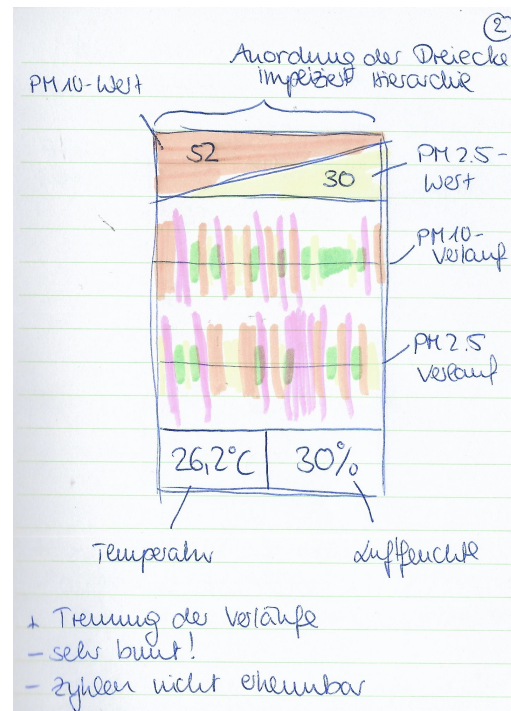
Die Prämissen für die entstehenden Visualisierungen ergeben sich aus den zur Verfügung stehenden Daten und dem verfügbaren Platz auf einem Display. Da angedacht ist, eine eigene Messstation lokal aufzubauen, soll auf jeden Fall der aktuelle Feinstaubwert, die aktuelle Temperatur und die aktuelle Luftfeuchte des eigenen Sensors zu abzulesen sein. Bei den Feinstaubwerten kann sowohl der PM2.5-Wert als auch der PM10-Wert herangezogen werden, wobei der PM2.5-Wert aufgrund der höheren gesundheitlichen Relevanz und Präzision des Sensors Vorrang hat. Daher ist die Minimalanforderung, den PM2.5-Wert darzustellen. Hier soll ein zeitlicher Verlauf abgebildet werden, um gegebenenfalls Minima, Maxima und zeitliche Muster erkennen zu können. Zudem sollen auch Daten von umgebenden Sensoren dargestellt werden, um die Werte der eigenen Station vergleichen zu können.

4.2 Erste Entwürfe

Im ersten Durchlauf des Designprozesses wurden zunächst zehn Skizzen erstellt [BCGM12]. Dabei wurde für jede Idee jeweils ein Entwurf entweder im Hoch- oder Querformat erstellt, ohne Rücksicht auf eine mögliche Drehung des Designs.



(a) Der erste Entwurf der Designphase: Oben wird der aktuelle PM2.5-Wert angezeigt, ganz unten die aktuelle Temperatur und die aktuelle Luftfeuchte. Der Verlauf der Feinstaubkonzentration wird mithilfe eines Balkendiagramms dargestellt, das grob an Sparklines angelehnt ist.

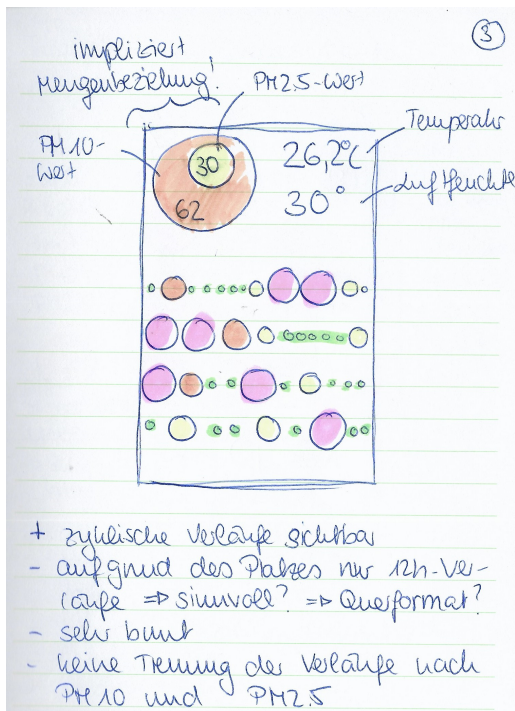


(b) Der zweite Entwurf der Designphase: Der aktuelle PM2.5 und der aktuelle PM10-Wert werden oben in ineinandergreifenden Dreiecken. Unten befinden sich zwei Textboxen mit der aktuellen Temperatur und der aktuellen Luftfeuchte. Die Konzentrationsverläufe von PM2.5 und PM10 werden in zwei übereinander angeordneten, vertikal zentrierten Balkendiagrammen dargestellt.

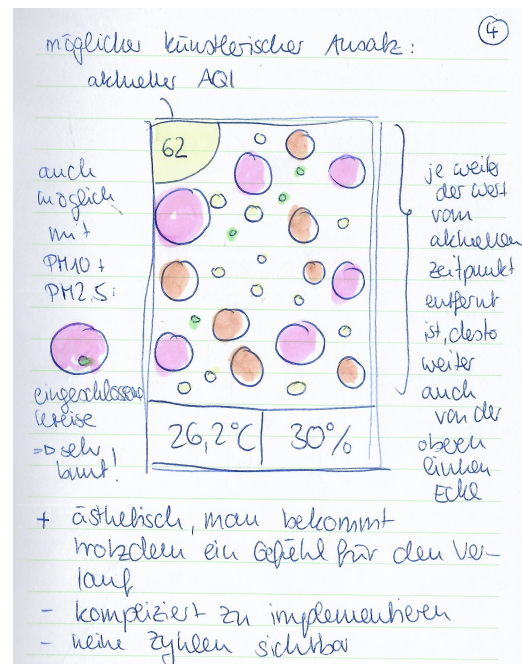
Abb. 4.1: Entwürfe der Designphase.

Der erste Entwurf (vgl. Abbildung 4.1a) verwendet ein Balkendiagramm mit dünnen, dem AQI entsprechend eingefärbten, Balken. Der aktuelle PM2.5-Wert wird in einer displaybreiten Box ganz oben angezeigt und farblich ebenfalls entsprechend dem AQI hinterlegt. Die Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden in zwei Boxen am unteren Rand angezeigt. Durch Hinzufügen einer Achsenbeschriftung können Werte hier präzise abgelesen werden, der Verlauf verfolgt werden.

Im zweiten Entwurf (vgl. Abbildung 4.1b) werden sowohl der aktuelle PM2.5- und der aktuelle PM10-Wert in ineinandergreifenden, dreieckigen Boxen am oberen Rand angezeigt und farblich entsprechend dem AQI hinterlegt. Temperatur und Luftfeuchte finden erneut am unteren Rand Platz. Zentral werden zwei vertikal-zentrierte Balkendiagramme für den Verlauf der beiden Feinstaubwerte verwendet. Aufgrund der vorgeschlagenen Zentrierung der Balkendiagramme ohne gemeinsame Nulllinie, ist das präzise Ablesen von Werten erschwert. Der Verlauf der Feinstaubkonzentrationen ist jedoch ersichtlich und der verfügbare Platz wird gut genutzt.



(a) Der dritte Entwurf der Designphase: Oben links werden der aktuelle PM2.5 und der aktuelle PM10-Wert in ineinander liegenden Kreisen angezeigt, rechts daneben befinden sich die aktuelle Temperatur und die aktuelle Luftfeuchte. Der Verlauf der Feinstaubkonzentration wird in linear angeordneten Kreisen dargestellt.

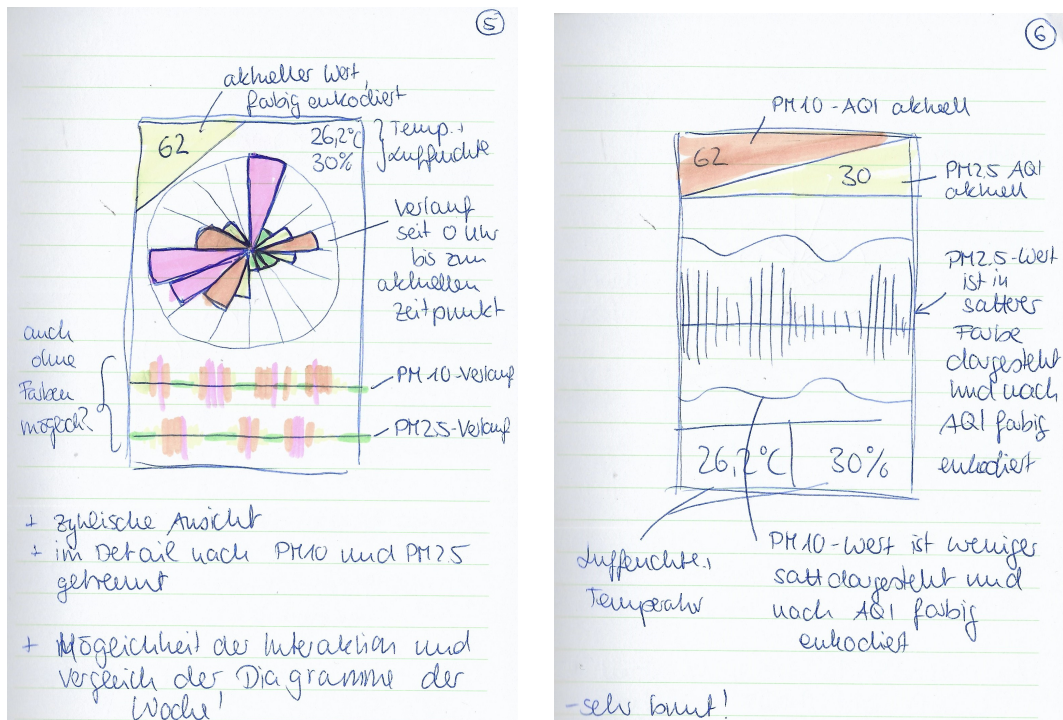


(b) Der vierte Entwurf der Designphase: Der aktuelle PM2.5 wird in einem Viertelkreis in der linken oberen Ecke angezeigt. Die aktuelle Temperatur und die aktuelle Luftfeuchte befinden sich in Textboxen am unteren Rand des Displays. Der Verlauf der Feinstaubkonzentration wird nicht explizit dargestellt, sondern durch frei angeordnete, entsprechend skalierte und eingefärbte Kreise, die sich näher an der linken oberen Ecke befinden, je aktueller sie sind.

Abb. 4.2: Entwürfe der Designphase.

Der dritte Entwurf (vgl. Abbildung 4.2a) verwendet unterschiedlich große, nach AQI eingefärbte Kreise, um die Feinstaubkonzentration anzuzeigen. Der aktuelle PM2.5- und PM10-Wert wird als Mengenbeziehung von zwei Kreisen angezeigt, was das Verhältnis der beiden Werte zueinander deutlich macht. Temperatur und Luftfeuchte werden in der oberen rechten Ecke angezeigt. Der zeitliche Verlauf der PM2.5-Konzentration wird dabei durch die linear in mehreren Zeilen angeordneten Kreise dargestellt. Ein präzises Ablesen der Werte ist hier nicht möglich, der Verlauf wird durch die Darstellung über mehrere Zeilen unterbrochen und ist dadurch schwerer zu erfassen. Durch die Ausdehnung der Kreise sowohl in vertikaler und horizontaler Richtung ist die Nutzung des vorhandenen Platzes nicht optimal.

Der vierte Entwurf (vgl. Abbildung 4.2b) orientiert sich stärker an einer künstlerischen Form der Visualisierung. Der aktuelle Feinstaubwert, farblich nach AQI enkodiert, wird in einem Viertelkreis in der oberen linken Ecke angezeigt. Die vergangenen Werte werden als gemäß dem darzustellenden Wert als größenskalierte, ebenfalls eingefärbte, Kreise dargestellt, die sich näher an der oberen



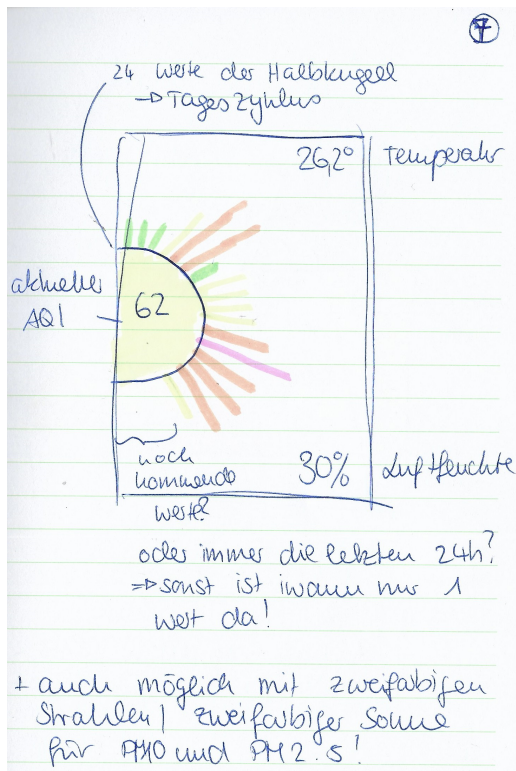
(a) Der fünfte Entwurf der Designphase: In der linken oberen Ecke wird der aktuelle PM2.5-Wert angezeigt, in der rechten oberen Ecke die aktuelle Temperatur und die aktuelle Luftfeuchte. Die Werte der letzten 24 Stunden werden in einem radialen Balkendiagramm angezeigt. Darunter befinden sich die Verläufe von PM2.5 und PM10 in zwei übereinander angeordneten vertikal-zentrierten Balkendiagrammen.

(b) Der sechste Entwurf der Designphase: Der aktuelle PM2.5- und der aktuelle PM10-Wert werden oben in zwei ineinandergreifenden Dreiecken angezeigt, die aktuelle Temperatur und die aktuelle Luftfeuchte befinden sich in Textboxen am unteren Displayrand. Der PM2.5- und der PM10-Verlauf werden in einem kombinierten Linien- und Balkendiagramm dargestellt.

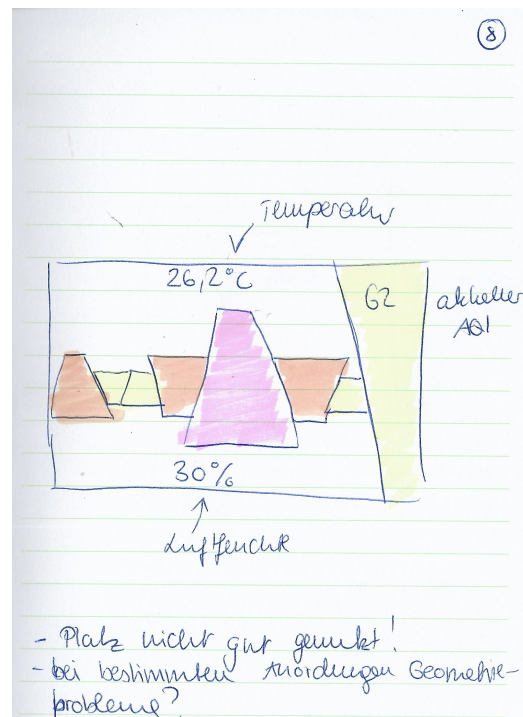
Abb. 4.3: Entwürfe der Designphase.

linken Ecke befinden, je aktueller sie sind. So bekommt man auch ohne eine lineare Anordnung ein Gefühl für den vergangenen Werteverlauf, allerdings kann er nicht genau abgelesen werden. Ein präzises Ablesen von Werten und ihrer zeitlichen Einordnung ist allerdings nicht möglich. Dafür kann der verfügbare Platz durch die freie Anordnung der Kreise optimal genutzt werden.

Der fünfte Entwurf (vgl. Abbildung 4.3a) kombiniert ein radiales Balkendiagramm mit zentrierten Balkendiagrammen. Der aktuelle PM2.5-Wert wird in einer dreieckigen Box in der linken oberen Ecke angezeigt, Temperatur und Luftfeuchte in der rechten oberen Ecke. Das radiale Diagramm zeigt die Werte der letzten Stunden, jeweils nach Farbe und Größe der Kreissegmente encodiert. Zwei zentrierte, übereinander angeordnete Balkendiagramme zeigen jeweils den PM2.5- und den PM10-Verlauf. Das radiale Diagramm hat dabei den großen Nachteil, dass niedrige "Balken" im Vergleich mit höheren überproportional in ihrer Fläche schrumpfen und die Verhältnisse zwischen den Werten so verzerrt werden. Ein präzises Ablesen der Werte ist in beiden Darstellungen erschwert.



(a) Der siebte Entwurf der Designphase: Ein halb-kreisförmiges Balkendiagramm.

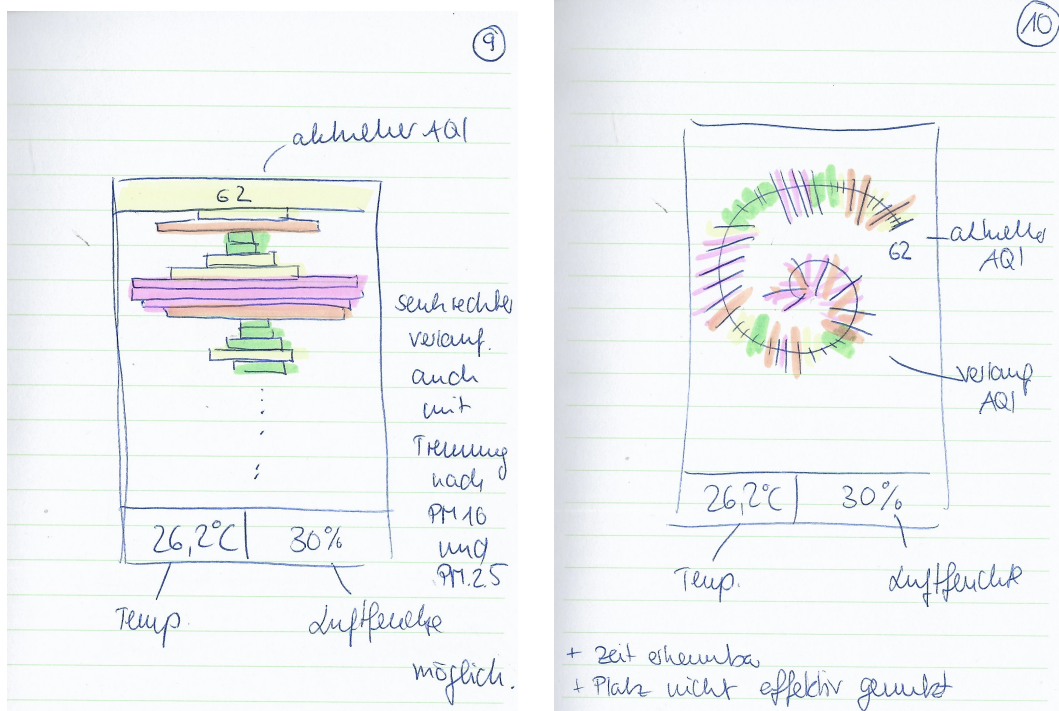


(b) Der achte Entwurf der Designphase: unterschiedlich große Trapeze.

Abb. 4.4: Entwürfe der Designphase.

Der sechste Entwurf (vgl. Abbildung 4.3b) verbindet ein Balken- und Liniendiagramm, die vertikal zentriert werden. Die Linie markiert hierbei den PM10-Wert, während die farblich nach AQI enkodierten Balken den PM2.5-Wert darstellen. Die aktuellen PM2.5- und PM10-Werte werden erneut in ineinandergreifenden, dreieckigen Boxen am oberen Rand angezeigt, die Temperatur und Luftfeuchte in zwei Boxen am unteren Rand. Durch die vertikale Zentrierung der Diagramme, ist das präzise Ablesen der Werte erschwert, der Verlauf lässt sich jedoch gut verfolgen. Durch das Verbinden der zwei Diagramme müssen diese aber nicht mehr übereinander angeordnet werden, was der Höhe der Balken mehr Platz lässt, und diese somit leichter ablesbar macht. Der verfügbare Platz wird dadurch vor allem in der Höhe gut genutzt.

Der siebte Entwurf (vgl. Abbildung 4.4a) verwendet am linken Rand ein halbkreisförmig angeordnetes Balkendiagramm, in dessen Zentrum der aktuelle PM2.5-Wert mit AQI-Farbkodierung steht. Die Balken sind ebenfalls farblich kodiert und bilden eine Art Sonne. Die Temperatur wird in der linken oberen, die Luftfeuchte in der rechten unteren Ecke angezeigt. Ein präzises Ablesen der Werte ist durch die halbkreisförmige Anordnung erschwert, zudem entsteht durch diese Darstellung viel leerer, ungenutzter Raum auf dem Display.



- (a) Der neunte Entwurf der Designphase: Der aktuelle PM2.5-Wert wird oben in einer displaybreiten Box angezeigt, die aktuelle Temperatur und die aktuelle Luftfeuchte in Boxen am unteren Rand des Displays. Der PM2.5-Verlauf wird in einem vertikal angeordneten, horizontal-zentriertem Balkendiagramm dargestellt.
- (b) Der zehnte Entwurf der Designphase: Der PM2.5-Verlauf wird in einem spiralförmig angeordneten Balkendiagramm dargestellt, an dessen äußeren Ende der aktuelle PM2.5-Wert angezeigt wird. Die aktuelle Temperatur und die aktuelle Luftfeuchte befinden sich in Boxen am unteren Rand des Displays.

Abb. 4.5: Entwürfe der Designphase.

Der achte Entwurf (vgl. Abbildung 4.4b) sieht eine lineare Anordnung von unterschiedlich großen Trapezen vor. Am rechten Rand befindet sich das aktuelle Trapez mit Wertebeschriftung, Temperatur und Luftfeuchte werden jeweils am oberen und am unteren Rand angezeigt. Die Größe und Farbe der Trapeze ist dabei wertabhängig. Ein präzises Ablesen der Werte ist nicht möglich, zudem wird der zur Verfügung stehende Platz nicht optimal genutzt.

Der neunte Entwurf (vgl. Abbildung 4.5a) verwendet ein vertikal angeordnetes, zentriertes Balkendiagramm mit entsprechend dem AQI eingefärbten Balken. Der aktuelle PM2.5-Wert wird ganz oben in einem displaybreiten Balken angezeigt und farblich nach AQI hinterlegt. Temperatur und Luftfeuchte werden in Boxen am unteren Rand angezeigt. Durch die Zentrierung ist das Ablesen der Werte erschwert, der Platz durch die Verwendung eines einzigen Diagramms gut genutzt.

Der zehnte Entwurf (vgl. Abbildung 4.5b) ordnet ein zentriertes Balkendiagramm spiralförmig an. Der aktuelle PM2.5-Wert wird am Ende der Spirale angezeigt, Temperatur und Luftfeuchte in Boxen am unteren Rand. Ein präzises Ablesen der Werte ist nicht möglich, da durch die Verjüngung

der Spirale keine Achsenbeschriftung möglich ist. Ein weiterer Nachteil ist die dadurch entstehende Verzerrung der Balken zueinander. Zudem ist eine optimale Nutzung des verfügbaren Platzes nicht möglich.

Eine Übersicht über die Entwürfe und deren Vor- und Nachteile ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Übersicht über die ersten zehn Entwürfe.

Nummer	Abbildung	Verwendete Visualisierung	Werte präzise ablesbar?	Optimale Nutzung des vorhandenen Platzes?	Verläufe ablesbar?
1	4.1a	Balkendiagramm mit einheitlicher Nulllinie	Ja	Ja	Ja
2	4.1b	Vertikal-zentriertes Balkendiagramm	Nein	Ja	Ja
3	4.2a	Größenskalierte Kreise in linearer Anordnung	Nein	Nein	Ja
4	4.2b	Größenskalierte Kreise in freier Anordnung	Nein	Ja	Nein
5	4.3a	Radiales Balkendiagramm und vertikal zentriertes Balkendiagramm	Nein	Ja	Ja
6	4.3b	Balkendiagramm und Liniendiagramm	Ja	Ja	Ja
7	4.4a	Halbkreisförmiges Balkendiagramm	Nein	Nein	Ja
8	4.4b	Größenskalierte Trapeze in linearer Anordnung	Nein	Nein	Ja
9	4.5a	Vertikales Balkendiagramm mit zentrierten Balken	Nein	Ja	Ja
10	4.5b	Spiralförmig angeordnetes Balkendiagramm mit zentrierten Balken	Nein	Nein	Ja

4.3 Verfeinerung

Für den angedachten Verwendungszweck wurden für die Auswahl aus den ersten Entwürfen die Prämissen erweitert: in der Visualisierung sollten die Werte präzise ablesbar sein, der zeitliche Verlauf der Werte erkennbar und im Idealfall sowohl der PM2.5- und der PM10-Verlauf verfolgbar sein. Daher schien besonders die Verbindung von Linien- und Balkendiagramm sinnvoll. Wichtig

dabei war eine gemeinsame Nulllinie. Die Verfeinerung der Entwürfe sollte sich darauf fokussieren, dass der Verlauf beider Konzentrationen ablesbar ist, dabei aber auch verschiedene zeitliche Granularitäten berücksichtigt werden.

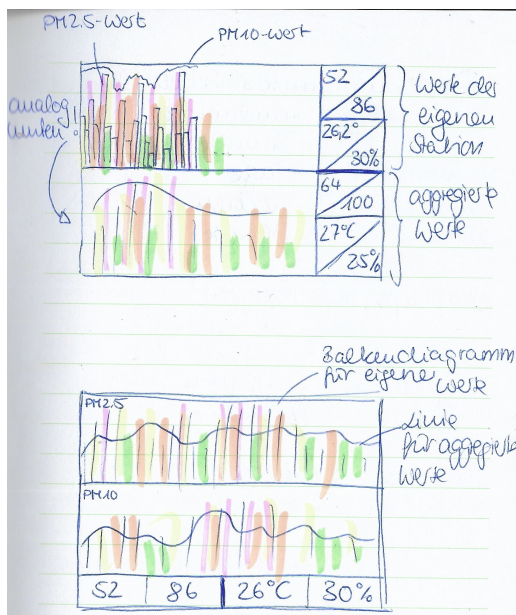
In der ersten Verfeinerung der Entwürfe (vgl. Abbildung 4.6a) liegt der Fokus auf der parallelen Darstellung der Konzentrationsverläufe in zwei übereinander angeordneten Diagrammen. Die Werte der eigenen Messstation wird dabei als farbig enkodiertes Balkendiagramm visualisiert und die aggregierten Werte umgebender Stationen zum Vergleich als Linie darübergelegt. Boxen mit der Anzeige von Temperatur, Luftfeuchte und aktuellem AQI können dabei entweder am rechten oder unteren Rand angeordnet werden.

Die zweite Verfeinerung (vgl. Abbildung 4.6b) nutzt ein ähnliches Layout, verwendet aber drei übereinander angeordnete Balkendiagramme, um unterschiedliche Granularitäten der Werte anzuzeigen (halbstündliche/stündliche Werte, Tageswert und Wochenwerte). Die aktuellen Werte, sowie Temperatur und Luftfeuchte werden in Boxen am linken Rand dargestellt. Eine hochformatige Variante ordnet diese Werte am oberen Rand an. Die kleinste Granularität an Feinstaubwerten wird in einem kombinierten Balken- und Liniendiagramm dargestellt, darunter ein Balkendiagramm für die Tageswerte der letzten Woche. Neu hinzu kommt eine Gridded Heatmap für die Tageswerte des letzten Monats.

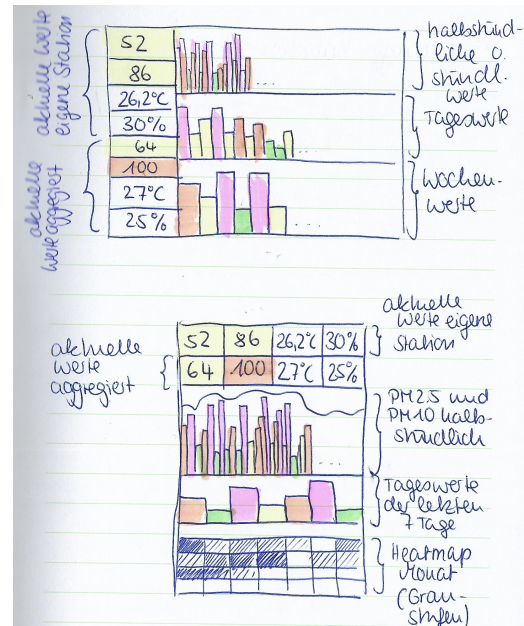
Die letzte Verfeinerung (vgl. Abbildung 4.7) konzentriert sich weniger auf die Prämissen, als auf die experimentell, freie Darstellung der Feinstaubwerte. Die erste Variante bildet die Feinstaubwerte auf entsprechend dem AQI größenskalierte und eingefärbte Quadrate ab. Je aktueller ein Werte ist, desto näher befindet sich das entsprechende Quadrat an der linken oberen Ecke, in der der momentane PM2.5-Wert angezeigt wird. Temperatur, Luftfeuchte und aggregierte Werte befinden sich in Boxen am rechten Rand. Die zweite Variante orientiert sich am Prinzip der Wordcloud. Einem Feinstaubwert wird dem Wert entsprechend eine Größe und Farbe zugeordnet. Der aktuell Wert befindet sich im Zentrum, die anderen Werte werden entsprechend dem Wordcloud-Prinzip ringsum angeordnet. Die Temperatur befindet sich in der linken unteren Ecke, die Luftfeuchte unten rechts.

4.4 Auswahl

Da die Darstellung unterschiedlicher Granularitäten und Konzentrationen im Fokus der Visualisierung stehen soll, wird eine Mischung der ersten Entwürfe für die Implementierung herangezogen. Hierbei sollen drei verschiedene Granularitäten Platz finden: halbstündliche Werte zur Abdeckung der letzten 24 Stunden, halbtägliche Werte zur Darstellung der vergangenen Woche und der PM2.5-Verlauf des letzten Monats. Um den Platz am besten zu nutzen, soll ein Querformat verwendet werden und alle Einzelwerte wie Temperatur und Luftfeuchte in Boxen am rechten Rand angezeigt werden. Um die Werte des eigenen Sensors vergleichbar zu machen, soll in den Diagrammen der PM2.5- und PM10-Werteverlauf sowohl vom eigenen Sensor als auch ein aggregierter Verlauf umgebender Sensoren zusammengeführt werden. Hierzu sollen gestapelte Balkendiagramme mit einem verbundenen Liniendiagramm verwendet werden.



(a) Die erste Verfeinerung fokussiert sich darauf, die Verläufe sowohl von PM2.5- als auch von PM10-Werten zusammenzufassen. Die aktuellen PM2.5- und PM10-Werte sowie Temperatur und Luftfeuchte sowohl der eigenen Messstation als auch der umgebenden Sensoren werden in ineinandergreifenden Dreiecken am rechten Rand angezeigt (oben), beziehungsweise die aktuellen Werte der eigenen Messstation am unteren Rand (unten). Die PM2.5- und PM10-Verläufe werden in zwei übereinander angeordneten, kombinierten Balken- und Liniendiagrammen dargestellt. Die Balken repräsentieren dabei die Werte der eigenen Messstation, die Linie die Werte der umgebenden Sensoren.



(b) Die zweite verfeinerte Variante fokussiert sich auf die Darstellung mehrerer zeitlicher Granularitäten. Die aktuellen Werte werden in Boxen am linken Rand (oben), beziehungsweise am oberen Rand (unten) angezeigt. Daneben befinden sich Balken- (oben), beziehungsweise kombinierte Linien- und Balkendiagramme unterschiedlicher Granularitäten. Am unteren Displayrand befindet sich im unteren Entwurf eine Grided Heatmap der gemittelten PM2.5-Werte der letzten Monate.

Abb. 4.6: Verfeinerungen der ersten Entwürfe.

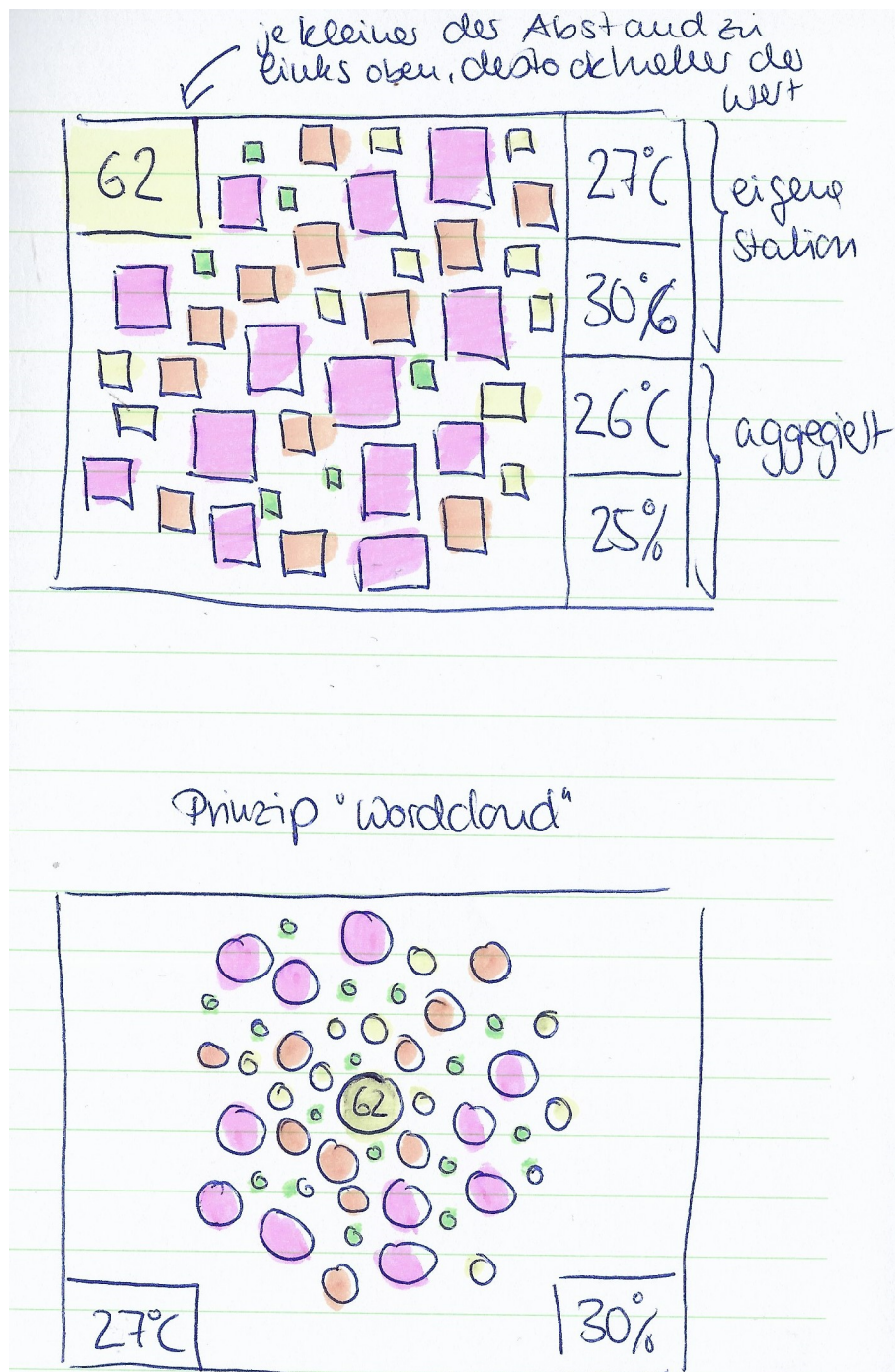


Abb. 4.7: Die dritte Verfeinerung orientiert sich an nichtlinearen Darstellungen der Verläufe. In der oberen Darstellung befindet sich der aktuelle PM2.5-Wert in einer Box in der linken oberen Ecke, weitere aktuelle Werte werden in Textboxen am rechten Rand angezeigt. Der Verlauf der PM2.5-Konzentration wird durch gemäß dem Wert skalierte und eingefärbte Quadrate repräsentiert, die sich je näher an der linken oberen Ecke befinden, desto aktueller der repräsentierte Wert ist. In der unteren Variante befindet sich der aktuelle PM2.5-Wert mittig, während der Verlauf der PM2.5-Konzentration als skalierte und eingefärbte Kreise nach dem Prinzip einer Wordcloud um das Zentrum eingeordnet werden. Weitere aktuelle Werte befinden sich in Textboxen am unteren Displayrand.

5 Implementierung

Die Implementierung der Visualisierung besteht aus drei Teilen: Dem Bau einer eigenen Messstation, dem Aufsetzen einer lokalen Datenbank zum Abfragen der Feinstaubwerte über eine Web-API und aus der tatsächlichen Umsetzung der entwickelten Visualisierung auf einem Display. Diese Elemente basieren auf dem Messnetz von luftdaten.info. Die eigene Messstation ist im Messnetz von luftdaten.info registriert, das deren Daten abfragt und über eine API zur Verfügung stellt. Über diese API werden die Daten des eigenen Sensors und die umgebender Sensoren ausgelesen und in die lokale Datenbank gespeichert. Innerhalb des lokalen Netzwerks greift dann die Implementierung der Visualisierung auf die Datenbank zu und verarbeitet die Daten. Die Zusammenhänge der Komponenten werden in Abbildung 5.1 noch einmal verdeutlicht.

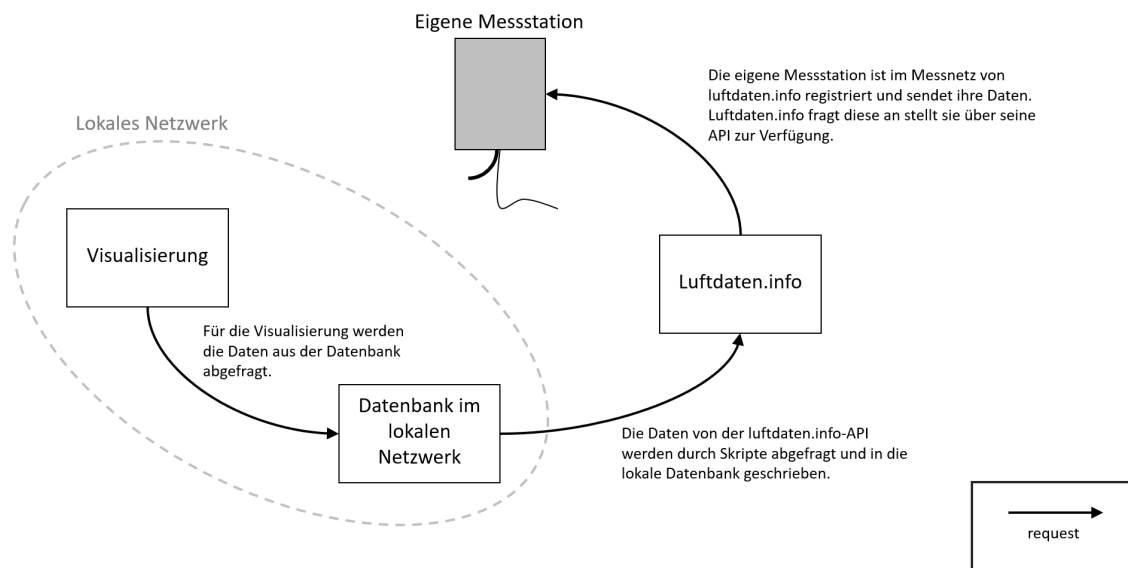


Abb. 5.1: Die eigene Messstation ist im Messnetz von luftdaten.info registriert. Luftdaten.info fragt deren Daten ab und stellt sie über eine API zur Verfügung. Über diese API fragen Skripte die Daten des eigenen und der umgebenden Sensoren ab und schreiben sie in die lokale Datenbank. Innerhalb des lokalen Netzwerks fragt die Implementierung der Visualisierung die Daten aus der Datenbank ab und stellt sie dar.

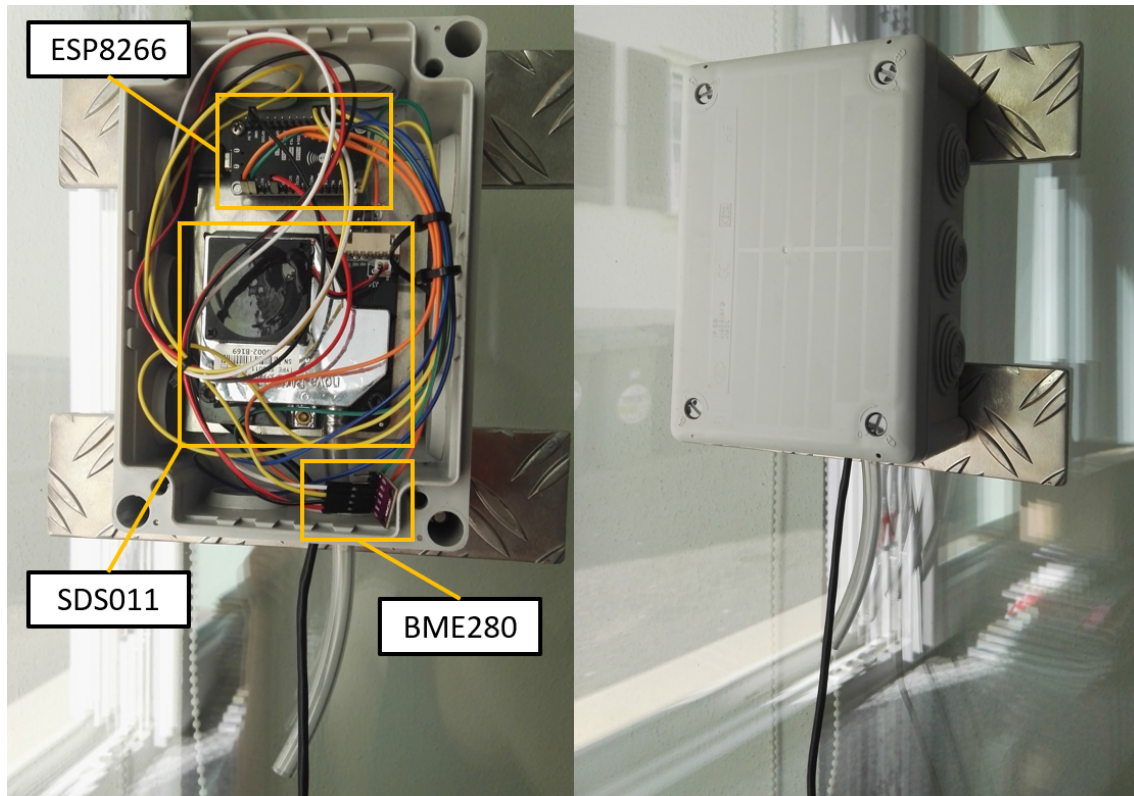


Abb. 5.2: Die Messstation: links mit geöffnetem Deckel und beschrifteten Hauptkomponenten (Entwicklerboard (ESP8266), Feinstaubsensor (SDS011) und Temperatur-/Luftfeuchtesensor (BME280)), rechts mit geschlossenem Deckel. Die Verteilerdose ist auf zwei Metallschienen geschraubt, die mit doppelseitigem Klebeband an der Fensterscheibe befestigt sind. Die Stromversorgung wird unten aus der Dose heraus und durch die Fensterdichtung in den Innenraum geführt.

5.1 Messstation

Die Feinstaub-Messstation wurde gemäß der Anleitung des Stuttgarter OK Labs gebaut, die unter <https://luftdaten.info/feinstaubsensor-bauen/> zu finden ist. Die Hauptkomponenten sind dabei ein NodeMCU-Entwicklungsboard mit ESP8266-Chip [Sys19b], der SDS011-Feinstaubsensor [Nov15] und ein BME280-Temperatur- und Luftfeuchtesensor [Sen18]. Die Software ist bereits komplett fertig und kann mit wenigen Klicks aufgespielt werden. Die Komponenten werden entsprechend der Anleitung verkabelt und in einem wetterfesten Gehäuse verpackt. Statt für die auf der Webseite vorgestellte Variante aus Kunststoffröhren habe ich mich für ein Gehäuse aus einer Verteilerdose entschieden, wie in Abbildung 5.2 zu sehen. Diese lässt sich durch den Deckel leicht öffnen, um an die einzelnen Komponenten zu gelangen und bietet auch bessere Möglichkeiten zur Befestigung. Ich habe die Verteilerdose dann mithilfe von Metallschienen und doppelseitigem Klebeband an meiner Fensterscheibe befestigt. Das Stromkabel wird dabei durch die Fensterdichtung in die Wohnung geführt.



Abb. 5.3: Der Standort der Messstation ist an einer asphaltierten Einfahrt zur Kirche, die zu Stoßzeiten häufig frequentierte Straße ist wenige Meter entfernt.

Die Dose befindet sich etwa einen Meter über dem Boden an einer selten befahrenen, asphaltierten Auffahrt zur Kirche. Die Entfernung zur Straße, die zu Stoßzeiten durchaus stark frequentiert ist, beträgt etwa vier bis fünf Meter, wie man in Abbildung 5.3 sehen kann.

Nach der Installation der Messstation wird diese im Messnetz von luftdaten.info angemeldet. Kurz darauf können die Daten der Messstation auf der Übersichtskarte eingesehen werden, wie in Abbildung 5.4 zu sehen.

5.2 Datenbank

Um die Daten für die Visualisierung an einer Stelle abfragen zu können, wird eine lokale Datenbank aufgesetzt. Diese sammelt die Daten verschiedener Sensoren aus der API von luftdaten.info in regelmäßigen Abständen und stellt sie im lokalen Netzwerk zur Verfügung.

Die Datenbank läuft auf einem alten Raspberry Pi der ersten Generation. Dieser wurde per SD-Karte mit dem aktuellsten OS (Raspian Buster), sowie einem 32-GB USB-Stick bestückt, auf dem die Datenbank gespeichert wird (vgl. Abbildung 5.5). Als Datenbank-Software wird influxdb [Inc20] verwendet.

InfluxDB ist eine Open-Source-Datenbank der Firma InfluxData, die für das schnelle Schreiben und Lesen großer Mengen zeitbasierter Daten entwickelt wurde. InfluxDB verwendet dabei zwei TCP-Ports: Zum einen den Port 8086, über den eine Client-Server-Kommunikation über die Influx-API möglich ist, zum anderen den Port 8088 für den RPC-Service, unter anderem für Backup-Operationen. Über den Port 8086 kann somit jedes Gerät aus dem lokalen Netzwerk auf die Datenbank zugreifen.

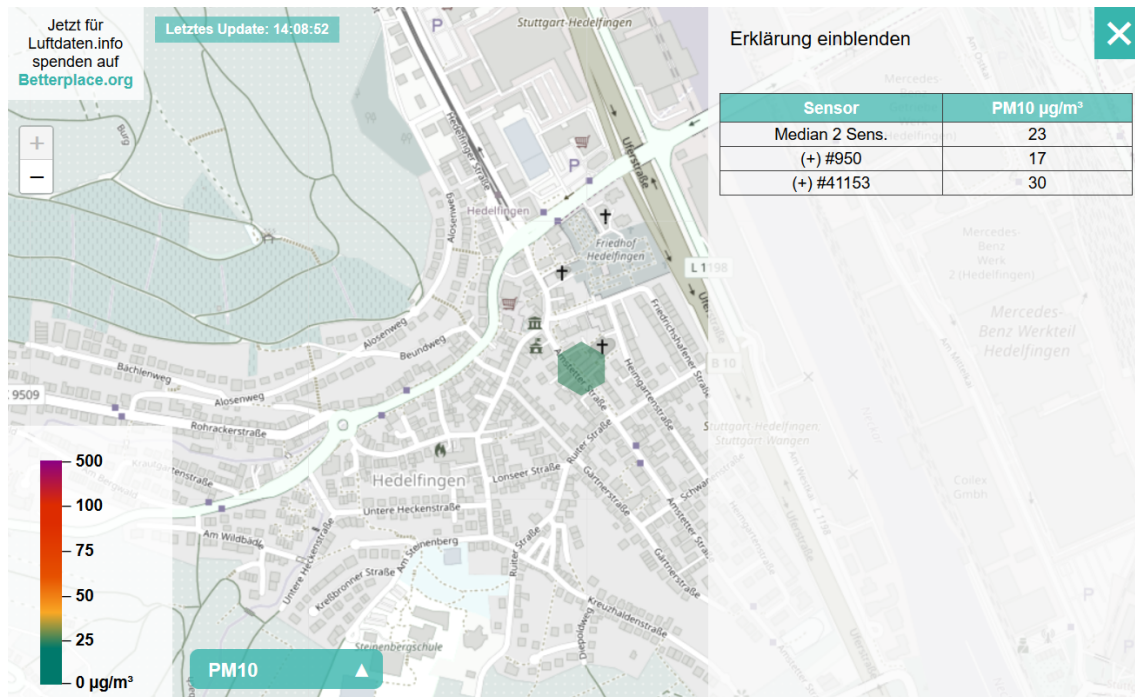


Abb. 5.4: Standort des angemeldeten Sensors auf der Übersichtskarte von luftdaten.info.

Nach der Installation werden zuerst in der Konfigurations-Datei die Speicherpfade für alle Daten auf den USB-Stick verlegt (vgl. Abbildung 5.6) und dann das Programm gestartet. Danach wird die Authentifizierung eingerichtet. Zuerst wird ein “admin”-User angelegt, der volle Lese- und Schreibrechte in der gesamten Datenbank besitzt. Für die Abfrage der späteren Werte wird ein Benutzer mit dem Namen “vis” angelegt, der später Leserechte für die betreffende Tabelle erhält. In der Konfigurationsdatei müssen die entsprechenden Zeilen entkommentiert (vgl. Abbildung 5.7) und das Programm neu gestartet werden.

Als nächstes wird die Tabelle “pmdata” angelegt, die später mit Werten befüllt wird. Für den späteren Zweck reicht eine einzige Tabelle. Die einzelnen Spalten müssen bei der Erstellung dabei nicht berücksichtigt werden, diese werden beim späteren Befüllen mit Datenpunkten automatisch angelegt. Für diese Tabelle werden dem Nutzer “vis” die Leserechte eingerichtet. Um einen vollen Speicher zu vermeiden, wird zudem eine Retention Policy mit einem Zeithorizont von 4 Wochen angelegt. Alle Datenpunkte, die hinter diesem Zeithorizont liegen, werden in regelmäßigen Abständen vom System gelöscht.

Damit ist die Einrichtung der Datenbank bereits abgeschlossen.

Um die Datenbank zu befüllen, werden zwei Skripte geschrieben. Da die Vollversion von Raspian Buster bereits Python-Entwicklungsumgebungen anbietet und Python-Libraries für InfluxDB existieren, werden diese in Python geschrieben. Dafür wird erst manuell eine Liste von Sensoren erstellt, deren Daten verwendet werden sollen. Die IDs und Standorte der von mir verwendeten Sensoren für den Standort meiner Wohnung sieht man in Abbildung 5.8. Die Sensoren wurden manuell ausgewählt, Sensoren, die konstant höhere Werte als umliegende Sensoren anzeigen, wurden dabei nicht berücksichtigt. Diese liegen vermutlich an einer lokalen Feinstaubquelle, welche für den Umgebungsvergleich nicht herangezogen werden soll.



Abb. 5.5: Der verwendete Raspberry Pi. Links der Stromanschluss und die SD-Karte mit dem Betriebssystem, unten der HDMI-Anschluss zum Bildschirm. Rechts der USB-Stick, der die Datenbank speichert und die Verbindung zu einem USB-Hub, um Maus und Tastatur anschließen zu können.

Das erste Skript ist ein Initialisierungsskript, das alle bereits verfügbaren Daten von luftdaten.info abfragt. Luftdaten.info archiviert einmal pro Tag die Daten aller registrierten Sensoren der letzten 24 Stunden als CSV-Dateien, je eine pro Sensor. Mithilfe der Liste an Sensor-IDs und der pandas-Bibliothek für Python können diese eingelesen und Zeile für Zeile in die Datenbanktabelle "pmdata" geschrieben werden. Dazu wird ein JSON-Gerüst vorgegeben, das mithilfe der CSVs befüllt wird und anhand dessen die Datenpunkte dann in die Datenbank geschrieben werden (vgl. Abbildung 5.9).

InfluxDB hat dabei zwei verschiedene Konzepte, um Elemente eines Datensatzes zu speichern: Tags und Felder. Der Unterschied zwischen ist hier, dass Tags indexiert werden und Felder nicht. Das sorgt dafür, dass Abfragen auf Tags schneller sind, als Abfragen auf Feldern. Für die verwendete Datenbank wird die ID des Sensors als Tag gespeichert. Der Wertetyp und Wert an sich werden als Feld gesetzt. Der Zeitstempel ("time") und der Wertetyp ("measurement") werden beide in eigenen Spalten gespeichert, da sie für InfluxDB Pflichtfelder sind.

Ein Datensatz in der Datenbank hat dementsprechend vier Spalten. Typen an verwendeten Daten sind "P1" für die PM10-Konzentration, "P2" für die PM2.5-Konzentration, "Temperature" für die Temperaturwerte und "Humidity" für die Luftfeuchte.

Die zuvor erwähnten CSV-Daten werde für die letzten 28 Tage abgefragt, um die 28-Tage-Übersicht der Visualisierung und einen Großteil der 7-Tage-Übersicht befüllen zu können. Ist das Skript durchgelaufen, ruft es ein zweites Skript auf, den eigentlichen Logger. Dieser Logger verwendet


```
[meta]
# Where the metadata/raft database is stored
dir = "/media/pi/INTENSO/influxdb/meta"

# Automatically create a default retention policy when creating a database.
# retention-autocreate = true

# If log messages are printed for the meta service
# logging-enabled = true

###
### [data]
###
### Controls where the actual shard data for InfluxDB lives and how it is
### flushed from the WAL. "dir" may need to be changed to a suitable place
### for your system, but the WAL settings are an advanced configuration. The
### defaults should work for most systems.
###

[data]
# The directory where the TSM storage engine stores TSM files.
dir = "/media/pi/INTENSO/influxdb/data"

# The directory where the TSM storage engine stores WAL files.
wal-dir = "/media/pi/INTENSO/influxdb/wal"
```

Abb. 5.6: Ausschnitt aus der influxdb.conf-Datei mit den abgeänderten Speicherpfaden. Alle von InfluxDB produzierten Daten werden jetzt auf dem USB-Stick gespeichert.

dasselbe JSON-Gerüst und fragt nacheinander die APIs der Sensoren aus der Liste ab und schreibt sie nach demselben Prinzip in die Datenbank. Dies passiert alle drei Minuten. Dieses Skript läuft dann in einer Endlosschleife und sorgt dafür, dass die Datenbank alle aktuellen Werte enthält.

5.3 Visualisierung

Die Visualisierung besteht aus der verwendeten Hardware, einem Entwicklerboard und einem Display, und der Software, die die Werte aus der lokalen Datenbank über WLAN abfragt und darstellt.

5.3.1 Hardware

Als Grundlage der Visualisierung dienen NodeMCU-Entwicklerboards mit einem ESP32-Chip [Sys19a], der unter anderem durch einen zweiten Kern leistungsfähiger sind als die ESP8266-Chips. In Tabelle 3.2 sind die Basisspezifikationen des Boards dargestellt.

```
[http]
# Determines whether HTTP endpoint is enabled.
# enabled = true

# Determines whether the Flux query endpoint is enabled.
# flux-enabled = false

# Determines whether the Flux query logging is enabled.
# flux-log-enabled = false

# The bind address used by the HTTP service.
# bind-address = ":8086"

# Determines whether user authentication is enabled over HTTP/HTTPS.
auth-enabled = true

# Determines whether the pprof endpoint is enabled. This endpoint is used for
# troubleshooting and monitoring.
pprof-enabled = true

# Enables authentication on pprof endpoints. Users will need admin permissions
# to access the pprof endpoints when this setting is enabled. This setting has
# no effect if either auth-enabled or pprof-enabled are set to false.
pprof-auth-enabled = true

# Enables a pprof endpoint that binds to localhost:6060 immediately on startup.
# This is only needed to debug startup issues.
# debug-pprof-enabled = false

# Enables authentication on the /ping, /metrics, and deprecated /status
# endpoints. This setting has no effect if auth-enabled is set to false.
ping-auth-enabled = true
```

Abb. 5.7: Ausschnitt aus der influxdb.conf-Datei mit den entkommentierten Zeilen, die die Authentifizierung aktivieren. Ein Abrufen der InfluxDB-Daten ist danach nur mit der Eingabe von Username und Passwort möglich.

Um verschiedene Varianten der Visualisierung zu testen, sollen mindestens zwei unterschiedliche Displaygrößen verwendet werden. Zunächst muss allerdings entschieden werden, welche Art von Display verwendet werden soll. Hierzu wurden LCD-TFT-, OLED- und eInk-Displays in Betracht gezogen. TFT-LCD-Displays haben den Vorteil, dass sie in diversen Größen relativ kostengünstig erwerbbar sind. Zudem gibt es sie mit Touchscreen und großer Farbtiefe. OLED-Displays dagegen sind verhältnismäßig teuer und für unsere benötigten Größen meist nur als alphanumerische Displays verfügbar. EInk-Displays haben zwar den geringsten Energieverbrauch, haben aber meist nur eine geringe Farbtiefe und keine Möglichkeit, als Touchscreen verwendet zu werden. Alle Kriterien wurden in eine Entscheidungsmatrix eingetragen und mit für jeden Displaytyp den Werten 1-3 versehen. Aus dieser Matrix heraus habe ich mich für LCD-TFT-Displays entschieden. Hier habe ich mir zwei Größen mit jeweils auch unterschiedlichen Auflösungen herausgesucht, auch auf Basis dessen, welche Displays in Kombination mit dem ESP32-NodeMCU-Board im Web bei Beispielprojekten verwendet wurden.

5 Implementierung

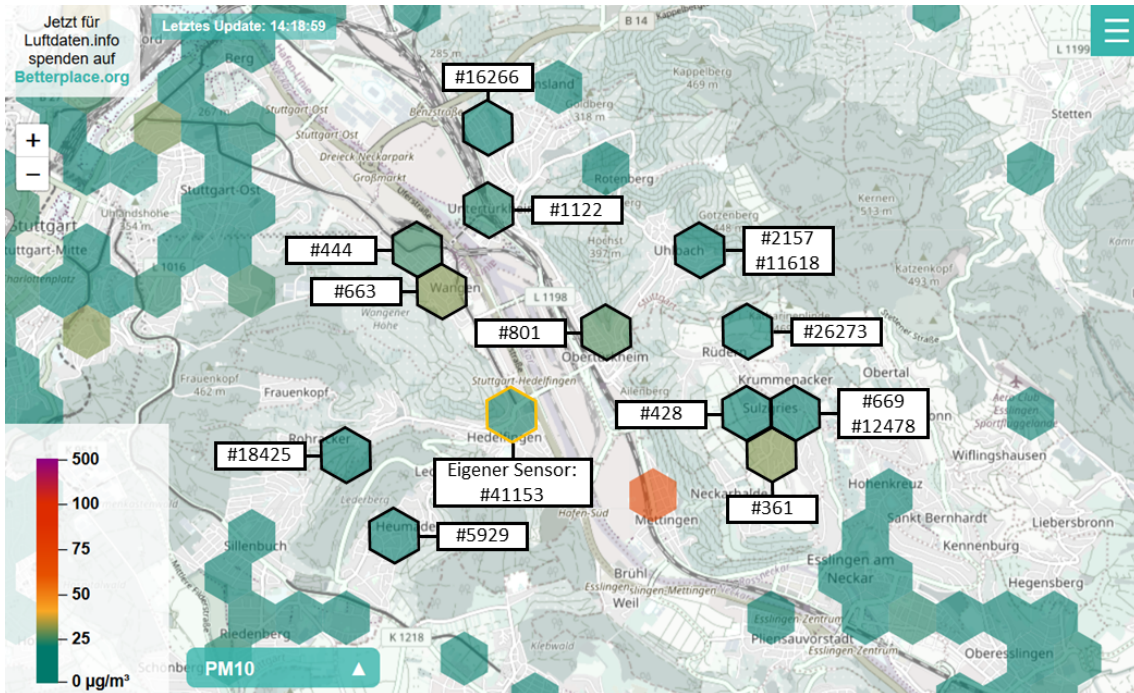


Abb. 5.8: Übersicht über die Standorte und IDs von Sensoren, die für die Visualisierung herangezogen wurden (Screenshot der Karte von luftdaten.info).

```

json_frame = [
  {
    "measurement": "pm",
    "tags": {
      "id": 0
    },
    "time": "2020-03-01T0:00:00Z",
    "fields": {
      "type": "pm",
      "value": 0
    }
  },
  {
    "measurement": "pm",
    "tags": {
      "id": 0
    },
    "time": "2020-03-01T0:00:00Z",
    "fields": {
      "type": "pm",
      "value": 0
    }
  }
]

```

```

pi@raspberrypi:~$ influx -username admin -password pmdadmin
Connected to http://localhost:8086 version 1.7.10
InfluxDB shell version: 1.7.10
> use pmdata
Using database pmdata
> select * from "P2" limit 5
name: P2
time                id      type value
----                -
158291264000000000  1122   P2    11.73
158293424400000000  361    P2     4.23
158293425200000000  663    P2     3.33
158293425500000000  16266  P2     0.4
158293425600000000  801    P2     3.03
>

```

Abb. 5.9: Links das JSON-Gerüst für zwei Datenpunkte (PM2.5 und PM10) und rechts ein Auszug aus der Datenbank. Es wurde nach dem “measurement” gefiltert, die Spalten der Tabelle sind dann der Zeitstempel, die Sensor-ID, der Wertetyp (dementsprechend “P2”) und der entsprechende Wert.

Tabelle 5.1: Spezifikationen des ESP32-NodeMCU-Entwicklerboards [Joy].

Modell	ESP32
Prozessor	Tensilica LX6 Dual-Core
Taktfrequenz	240 MHz
SRAM	512 kB
Datenspeicher	4 MB
Wireless Standard	802.11 b/g/n
Frequenz	2,4 GHz
Datenschnittstellen	UART / I2C / SPI / DAC / ADC
Betriebsspannung	3,3V (betreibbar über 5V-microUSB)
Arbeitsstrom	80 mA
Betriebstemperatur	-40°C - 125°C
Abmessungen	48 x 26 x 11,5 mm
Gewicht	10 g

Das kleinere Display hat eine Bildschirmdiagonale von 2,4 Inch mit einer Auflösung von 320x240 Pixeln [QIT]. Das größere Displays besitzt eine Diagonale von 4,0 Inch und eine Auflösung von 480x320 Pixeln [Wav20]. Beide Displays haben eine SPI-Schnittstelle, die in diesem Fall verwendet werden soll. Das Wiring für das kleinere Display ist in Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 dargestellt. Die Pinbeschriftungen für das größere Display sind in Abbildung 5.10 gezeigt und das darauf basierende Wiring in Tabelle 5.6 aufgelistet.

Tabelle 5.2: Entscheidungsmatrix zur Auswahl des Displaytyps.

Kriterium	LCD-TFT	OLED	eInk
Energieverbrauch	1	2	3
Touchscreen	3	2	2
Farbtiefe	3	2	1
Preis	3	2	2
Verfügbarkeit	3	2	3
Gesamt	13	10	11

Tabelle 5.3: Spezifikationen der ausgewählten Displays [QIT; Wav20].

Modell	TFT LCD mit Touchscreen	TFT LCD mit Touchscreen
Diagonale	2.4"	4.0"
Auflösung	240x320	480x320
Schnittstelle	SPI	SPI
Farbtiefe	262k/65k	65536
Treiber-IC	ILI9341	ILI9486

Tabelle 5.4: Wiring für das 2.4-Inch-Display und die NodeMCU.

TFT	VCC	GND	CS	RESET	D/C	SDI (MOSI)	SCK	LED	SDCK (MISO)
NodeMCU	3V3	GND	D15	EN	D2	D23	D18	3V3	D19

Tabelle 5.5: Wiring für den Touchscreen des 2.4-Inch-Display und die NodeMCU.

TFT	T_CLK	T_CS	T_DIN	T_DO	T_IRQ
NodeMCU	D5	D2	D7	D6	D1

5.3.2 Software

Die Elemente der späteren Visualisierung sollen in einer Arduino-Bibliothek mit dem Name PM_vis verpackt werden. Die Visualisierung inklusive der Datenabfrage wird dann als Arduino-Sketch geschrieben und verwendet diese Bibliothek. Die Visualisierungselemente sind von der TFT_eSP-Bibliothek abhängig, welche benötigt wird, um Elemente auf den Displays anzuzeigen. Daher wird diese Bibliothek in die Dateien PM_vis.h und PM_vis.cpp eingebunden und muss installiert werden, bevor die PM_vis-Bibliothek verwendet werden kann. Die TFT_eSPI-Bibliothek ist eine Arduino-kompatible TFT-Bibliothek, die unter anderem für die ESP32-Chips optimiert wurde und unterschiedlichen Display-Treiberchips unterstützt: https://github.com/Bodmer/TFT_eSPI. Um das 2,4-Inch-Display mit dem ESP32-Board zu verwenden, darf in der Datei User_Setup_Select.h kein Setup ausgewählt sein, sondern nur die Datei User_Setup.h eingebunden sein. In dieser Datei User_Setup.h muss der entsprechende Absatz entkommentiert werden (vgl. Abbildung 5.12), da das Display einen ILI9341-Treiberchip besitzt. Für die Verwendung des 4-Inch-Displays muss das entsprechende Setup in der Datei User_Setup_Select.h ausgewählt werden (vgl. Abbildung 5.11), das für den Treiberchip ILI9486 passt. Das Einbinden der Datei User_Setup.h muss dagegen auskommentiert sein. Sind diese Setups eingestellt, können die Programme auf die ESP32-Boards aufgespielt und korrekt auf den Displays angezeigt werden.

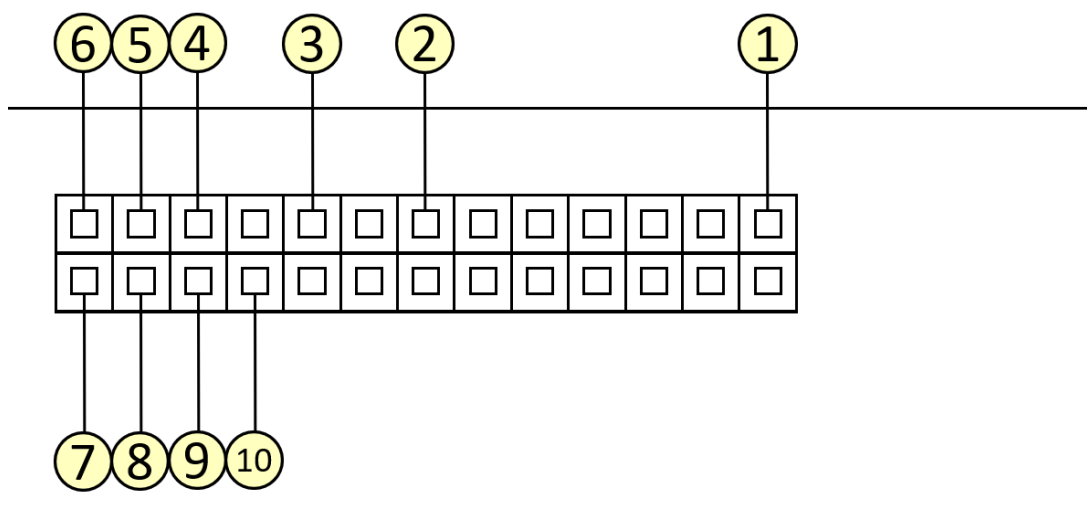


Abb. 5.10: Schematische Beschriftung für die Pins auf der Rückseite des 4-Inch-Displays.

Tabelle 5.6: Wiring für das 4-Inch-Display und die NodeMCU.

TFT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ESP32	Vin	GND	D22 (DC)	RST	D2 (CS)	D15 (T_CS)	GND	D18 (SCK)	D19 (MI- SO)	D23 (MO- SI)

```
#include <User_Setup.h> // Default setup is root library folder

// #include <User_Setups/Setup1_ILI9341.h> // Setup file configured for my ILI9341
// #include <User_Setups/Setup2_ST7735.h> // Setup file configured for my ST7735
// #include <User_Setups/Setup3_ILI9163.h> // Setup file configured for my ILI9163
// #include <User_Setups/Setup4_S6D02A1.h> // Setup file configured for my S6D02A1
// #include <User_Setups/Setup5_RPi_ILI9486.h> // Setup file configured for my stock RPi TFT
// #include <User_Setups/Setup6_RPi_Wr_ILI9486.h> // Setup file configured for my modified RPi TFT
// #include <User_Setups/Setup7_ST7735_128x128.h> // Setup file configured for my ST7735 128x128 display
// #include <User_Setups/Setup8_ILI9163_128x128.h> // Setup file configured for my ILI9163 128x128 display
// #include <User_Setups/Setup9_ST7735_Overlap.h> // Setup file configured for my ST7735
// #include <User_Setups/Setup10_RPi_touch_ILI9486.h> // Setup file configured for ESP8266 and RPi TFT with touch

#include <User_Setups/Setup11_RPi_touch_ILI9486.h> // Setup file configured for ESP32 and RPi TFT with touch
// #include <User_Setups/Setup12_M5Stack.h> // Setup file for the ESP32 based M5Stack
// #include <User_Setups/Setup13_ILI9481_Parallel.h> // Setup file for the ESP32 with parallel bus TFT
// #include <User_Setups/Setup14_ILI9341_Parallel.h> // Setup file for the ESP32 with parallel bus TFT
// #include <User_Setups/Setup15_HX8357D.h> // Setup file configured for HX8357D (untested)
// #include <User_Setups/Setup16_ILI9488_Parallel.h> // Setup file for the ESP32 with parallel bus TFT
// #include <User_Setups/Setup17_ePaper.h> // Setup file for any Waveshare ePaper display
// #include <User_Setups/Setup18_ST7789.h> // Setup file configured for ST7789
```

Abb. 5.11: Ausschnitt aus der Datei `User_Setup_Select.h` der `TFT_eSPI`-Bibliothek zur Verwendung des 4-Inch-Displays mit dem ILI9486-Treiberchip. Die markierte Zeile muss entkommentiert sein. Die Datei `User_Setup.h` darf dabei kein Setup aktiviert haben.

```
// ##### EDIT THE PIN NUMBERS IN THE LINES FOLLOWING TO SUIT YOUR ESP32 SETUP #####

// For ESP32 Dev board (only tested with ILI9341 display)
// The hardware SPI can be mapped to any pins

#define TFT_MISO 19
#define TFT_MOSI 23
#define TFT_SCLK 18
#define TFT_CS 15 // Chip select control pin
#define TFT_DC 2 // Data Command control pin
#define TFT_RST -1 // Set TFT_RST to -1 if display RESET is connected to ESP32 board RST
#define TOUCH_CS 4 // Chip select pin (T_CS) of touch screen

#define TFT_BL 4 // LED back-light (only for ST7789 with backlight control pin)

#define TOUCH_CS 21 // Chip select pin (T_CS) of touch screen
```

Abb. 5.12: Ausschnitt aus der Datei `User_Setup.h` der `TFT_eSPI`-Bibliothek zur Verwendung des 2,4-Inch-Displays mit dem ILI9341-Treiberchip. Die markierten Zeilen müssen entkommentiert sein. Die Datei `User_Setup_Select.h` darf dabei kein Setup aktiviert haben.

Tabelle 5.7: Verwendete Einteilung in Indexklassen, angelehnt an die Indexklassen der European Environment Agency.

Indexklasse	PM2.5	PM10
Sehr gut	0-10	0-20
Gut	10-20	20-40
Mäßig	20-25	40-50
Schlecht	25-50	50-100
Sehr Schlecht	>50	>100

5.3.3 Entwicklung der Visualisierungsbibliothek

Als erste Überlegung wird der AQI mit entsprechenden Farbverteilungen festgelegt, der für die Visualisierung verwendet werden soll und in Tabelle 5.7 zu sehen ist. Dieser leitet sich ab aus der Einteilung der European Environment Agency (vgl. Abbildung ??), lässt aber die letzte Indexklasse weg, da eine Belastung dieser Höhe nur sehr selten zu erwarten ist. In den anfänglichen Skizzen wurde noch eine Einfärbung nach dem Ampelsystem von grün über gelb nach rot gewählt. Da diese aber für Rot-Grün-Blindheit ungeeignet ist, wurde ein Farbverlauf gewählt, die sich ebenfalls an dem der EEA orientiert und statt grün für die unterste Indexklasse eine türkisblaue Farbe verwendet.

Das erste Element der Visualisierung sind die Textboxen für den aktuellen PM2.5-Wert des eigenen Sensors, des 24h-Mittelwerts der PM2.5-Konzentration des eigenen Sensors, sowie Luftfeuchte und Temperatur. Sie erhalten jeweils eine eigene Funktion, der x-Position, y-Position, Breite und Höhe, als auch der anzuzeigende Wert übergeben werden. Die Boxen der Feinstaubwerte werden zudem gemäß dem AQI eingefärbt.

Das nächste Element der Visualisierung ist das Balkendiagramm. Einen allerersten Entwurf der Textboxen und eine grobe Skizze eines Balkendiagramms mit zufälligen Höhen und Farben ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

Das Balkendiagramm soll ebenfalls als eigenständiges Element mit fest definierten Umrissen funktionieren, um es frei platzieren zu können. Ein erster Entwurf mit Rahmen und der Darstellung einer Konzentration als Balkendiagramm und einer als Liniendiagramm darüber sieht man in Abbildung 5.14. In diesem Entwurf wurden der niedrigste und der höchste Balkenwert an der y-Achse beschriftet, als auch die betreffenden Balken dunkel umrandet.

Hierbei wurde die Maximalhöhe der Balken auf 100 Pixel festgelegt. Alle Konzentrationen, die über 100 Mikrogramm pro Kubikmeter liegen, werden demnach oben abgeschnitten. Mit diesen hundert Pixeln entspricht jeweils ein Pixel einem Mikrogramm pro Kubikmeter des Maximums an PM10, das dargestellt werden soll. Um die Konzentrationen von PM2.5 und PM10 des eigenen Sensors als auch die PM2.5- und PM10-Konzentrationen der umgebenden Sensoren darstellen zu könne, wird das Balkendiagramm gestapelt (vgl. Abbildung 5.15). Dafür wird der PM2.5-Anteil an der PM10-Konzentration am unteren Ende des jeweiligen Balkens schattiert eingefärbt.

Das Balkendiagramm erhält zur besseren Lesbarkeit noch y-Achsenmarkierungen in Zehnerabständen und eine x-Achsenbeschriftung. Balken, die über die verfügbare Höhe hinausreichen, erhalten ein kleines weißes Dreieck am oberen Rand, um die Überschreitung des Maximalwerts deutlich zu machen. Daneben wird die Funktion des Balkendiagramms so angepasst, dass unterschiedliche

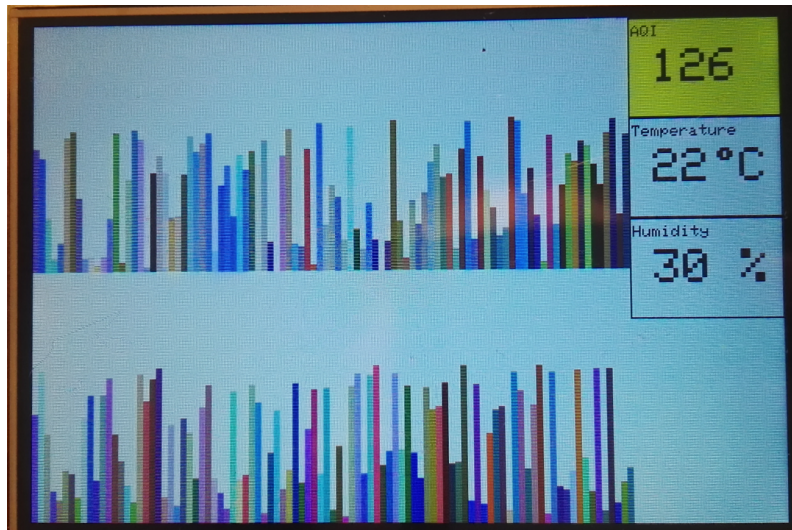


Abb. 5.13: Ein erster Entwurf für die Textboxen und eine schematische Darstellung des Balkendiagramms mit zufälligen Balkenhöhen und Farben.



Abb. 5.14: Eine erste Verbindung von Linien- und Balkendiagramm. Darunter sieht man die ersten Züge der Heatmap.

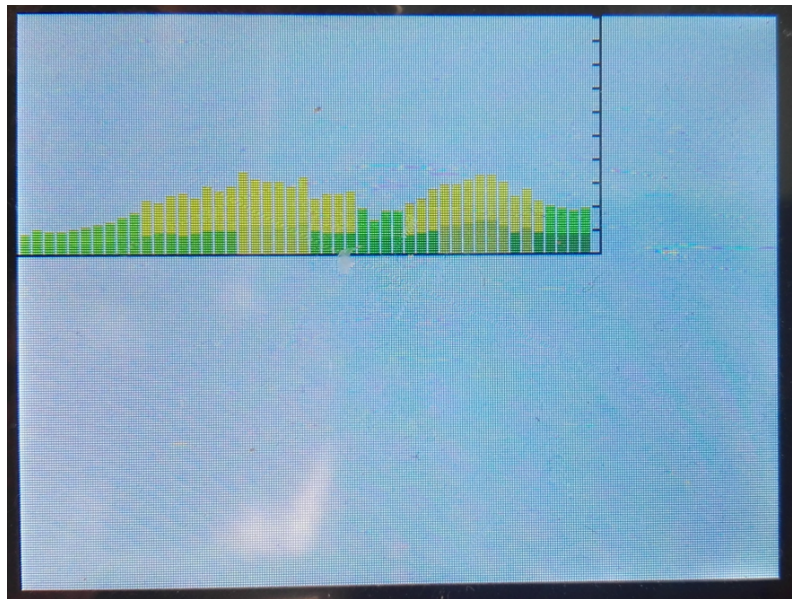


Abb. 5.15: Die Balkendiagramme werden gestapelt, um sowohl die PM2.5- als auch die PM10-Konzentration darzustellen. Der Anteil an PM2.5 in der Menge an PM10 wird dabei am unteren Ende des Balkens dunkler schattiert.

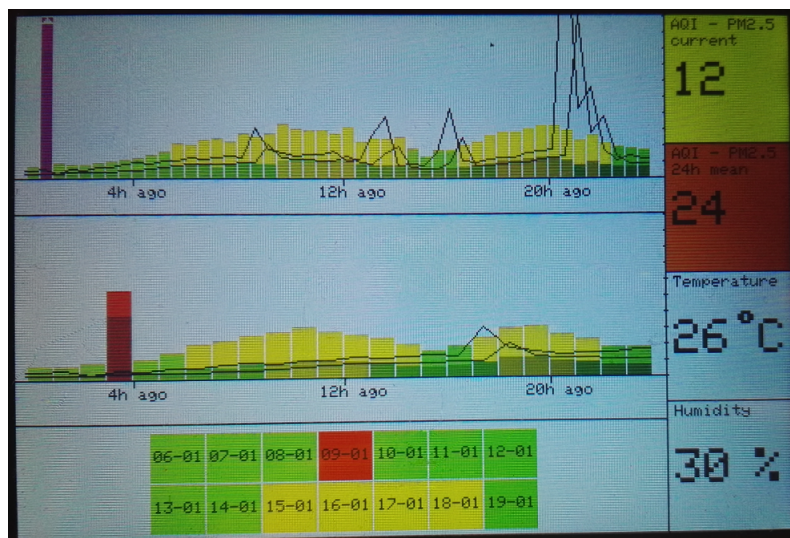


Abb. 5.16: Oben das Balkendiagramm der letzten 24 Stunden in halbstündigen Intervallen, darunter das Balkendiagramm der letzten sieben Tage in 12-Stunden-Intervallen. Ganz unten die Heatmap des PM2.5-Mittelwerts aller Sensoren der letzten 14 Tage.

Granularitäten darstellbar sind, in Abbildung 5.16 sieht man bereits einmal die letzten 24 Stunden in halbstündigen Intervallen und die letzten 7 Tage in 12-Stunden-Intervallen. Hinzu kommt die Heatmap, die zunächst die letzten 14 Tage mit Datumsbeschriftung darstellt.

Die finale Visualisierung enthält sechs Elemente, deren Position und Größe frei festgelegt werden kann (vgl. Abbildung 5.18):

- Ein gemäß der Tabelle 5.7 farbig hinterlegtes Textfeld für den aktuellen PM2.5-Wert des nächsten Feinstaubensors.
- Ein gemäß der Tabelle 5.7 farbig hinterlegtes Textfeld für dem Mittelwert der PM2.5-Konzentration des nächsten Sensors.
- Ein Textfeld für die aktuell gemessene Temperatur des nächsten Sensors.
- Ein Textfeld für die aktuell gemessene Temperatur des nächsten Sensors.
- Ein Balkendiagramm, dessen Granularität frei festgelegt werden kann. Es werden vier Datenarrays übergeben. Das Array mit den PM2.5-Werten des nächsten Sensors bestimmt die Höhe der dunkel schattierten Abschnitte der Balken. Das Array mit den PM10-Werten des nächsten Sensors bestimmt die Höhe der Balken insgesamt. Die Balken sind dabei gemäß der Tabelle 5.7 eingefärbt. Das Array mit den gemittelten PM2.5-Werten der umgebenden Sensoren bildet die schwarze Linie, das Array mit den gemittelten PM10-Werten die graue Linie. Dabei kann zwischen der 24-Stunden-Beschriftung der x-Achse und der 7-Tage-Beschriftung der x-Achse gewählt werden.
- Eine Heatmap der letzten 28 Tage, die jeweils farblich gemäß der Indexklasse (vgl. Tabelle 5.7) des gemittelte PM2.5-Tageswert aller Sensoren eingefärbt ist und als Beschriftung jeweils Tag und Monat enthält. Es wird einmal das Wertearray und einmal das Beschriftungsarray übergeben.

Dem Konstruktor des Visualisierungselements werden dabei die drei Namen der Schriftarten übergeben, die für die Anzeige verwendet sollen. Diese Schriften müssen zuvor im Sketch definiert und in den Flash-Speicher des Boards geladen werden.

Die verwendeten Abhängigkeiten der Bibliothek sind:

- TFT_eSPI.h
- FS.h

Die FS.h-Bibliothek wird benötigt, um die verwendeten Schriftarten in den Flashspeicher des Boards laden zu können.

5.3.4 Entwicklung des Sketches

Als Letztes wurde der finale Sketch geschrieben, der die Bibliothek verwendet. Das Board verbindet sich mit dem WLAN, um alle drei Minuten die Werte für die Datenarrays aus der Datenbank im lokalen Netzwerk abzufragen. Die dafür zu konfigurierenden Werte sind die SSID und Passwort des WLANs, die IP des Raspberry Pis im Netzwerk, sowie die ID des nächsten Sensors und die ID des

```

const char* ssid = "WLAN name";
const char* password = "xpasswordxx";
const String dbip = "192.168.178.39:8086";
const String own_sensor = "43224";
const String temp_sensor = "43225";
    
```

Abb. 5.17: Die zu konfigurierenden Variablen im Arduino-Programm. Zum einen die SSID und Passwort des WLANs, als auch die IP des Raspberry Pis im Netzwerk. Dazu noch die ID des nächsten Sensors und die ID des Temperatur- und Luftfeuchtesensors.

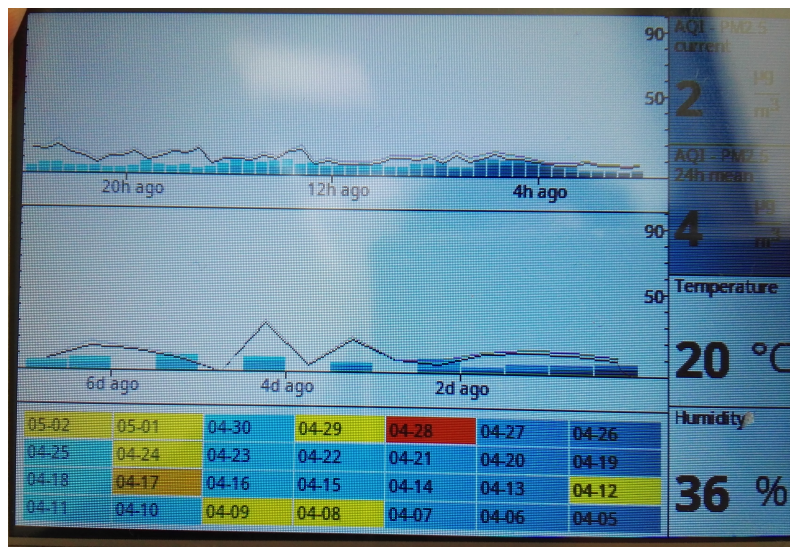


Abb. 5.18: Die finale Visualisierung auf dem 4-Inch-Display. Rechts die vier Textfelder. Oben das Balken-/Liniendiagramm für die letzten 24 Stunden, darunter das Balken-/Liniendiagramm für die letzten sieben Tage. Ganz unten die Heatmap für die letzten 28 Tage.

Sensors, von dem Temperatur und Luftfeuchte abgegriffen werden sollen (vgl. Abbildung 5.17). Nach dem Aufspielen auf das ESP32-Board und dem Verbinden mit dem Strom, verbindet sich das Board mit dem WLAN, fragt die vorhandenen Daten ab und stellt sie dar.

Auf dem großen Display werden alle Elemente der Visualisierung gleichzeitig angezeigt. Die Textboxen befinden sich am rechten Bildschirmrand. Daneben befinden sich von oben nach unten zuerst die letzten 24 Stunden in 30-Minuten-Intervallen, darunter die letzten sieben Tage in 12-Stunden-Intervallen und ganz unten eine Heatmap der letzten 28 Tage.

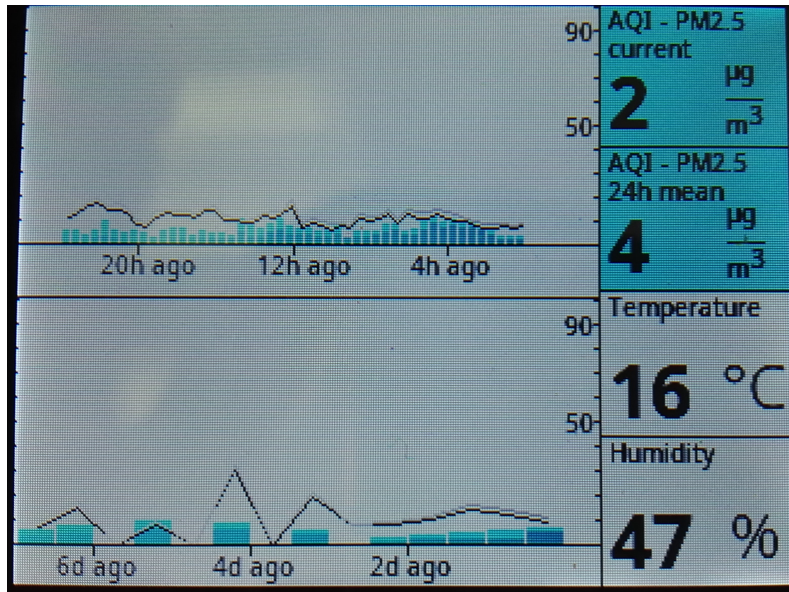
Auf dem kleinen Display kann zwischen zwei Ansichten umgeschaltet werden. In beiden Ansichten befinden sich die vier Textboxen am rechten Rand. In der initialen Ansicht befinden sich daneben das Diagramm für die letzten 24 Stunden in 30-Minuten-Intervallen und darunter das Diagramm für die letzten sieben Tage in 12-Stunden-Intervallen. Durch berühren des Touchscreens kann zu der Heatmap der letzten 28 Tage gewechselt werden. Dafür wird die Dual-Core-Architektur

des ESP-Chips ausgenutzt. Auf einem Kern läuft das Programm zur Abfrage der Daten von der Datenbank, der zweite Kern verarbeitet die Daten des Touchscreens und wechselt die Ansicht, wenn er berührt wurde.

Die verwendeten Bibliotheken sind:

- PM_vis.h
- TFT_eSPI.h
- FS.h
- ArduinoJson.h
- WiFi.h
- HTTPClient.h
- TimeLib.h

Die FS.h-Bibliothek wird erneut eingebunden, um die Systemhinweise beim Hochfahren in derselben Schriftart anzeigen zu können wie die spätere Visualisierung. Auch um die Schriftarten in der Visualisierung verwenden zu können, müssen die VLW-Dateien der Schriften im Ordner "data" des Sketches abgelegt und in den Flashspeicher des Boards geladen werden. Im Konstruktor des Visualisierungs-Objektes werden sie dann übergeben. Die WiFi.h- und HTTPClient-Bibliothek werden für die Abfrage der Werte über WLAN aus der Datenbank verwendet und müssen nicht mehr installiert, sondern nur eingebunden werden. Die TimeLib.h-Bibliothek wird verwendet, um das aktuelle Datum bestimmen zu können und damit die Daten der letzten 28 Tage tageweise abfragen zu können. Sie muss ebenfalls nur eingebunden werden. Die ArduinoJSON-Bibliothek wird gebraucht, um die HTTP-Response als JSON interpretieren zu können. Sie kann über die Bibliotheksverwaltung der Arduino IDE hinzugefügt werden.



(a) Die erste Ansicht des kleinen Displays zeigt rechts die unterschiedlichen Textboxen, links daneben die Übersicht über die letzten 24 Stunden und die Übersicht über die letzten sieben Tage.



(b) Die zweite Ansicht zeigt die vier Textboxen unverändert auf der rechten Seite. Der Rest des Displays zeigt die Heatmap der letzten 28 Tage.

Abb. 5.19: Die zwei finalen Ansichten auf dem 2,4-Inch-Display.

6 Evaluierung

Das ursprüngliche Vorhaben war, die entstandene Visualisierung in einer kleinen Pilotstudie zu testen, an der vier Haushalte teilnehmen sollten. Die Programme sollten auf den Wohnort der Teilnehmer angepasst und bei ihnen gut sichtbar in der Wohnung aufgestellt werden. Nach einem vorbereitenden Interview sollten die Teilnehmer einer Woche lang vor dem Verlassen der Wohnung kurz den aktuellen Feinstaubwert ablesen und zudem zweimal täglich, morgens und abends, den Verlauf beschreiben. Basierend auf den Informationen aus dem Vorinterview und dem bereitgestellten Infomaterial sollten sie festhalten, ob und inwiefern der Feinstaubwert sich auf ihr Handeln ausgewirkt hat. Abschließend sollte in einem zweiten Interview nach Beenden der Woche abgefragt werden, wie der Monitor ihren Alltag beeinflusst hat und Verbesserungsvorschläge, sowie Kritik an der Visualisierung aufgenommen werden. Aufgrund der Covid-19-Pandemie und den damit zusammenhängenden Ausgangsbegrenzungen und Kontaktsperrern, konnte die Evaluation allerdings nicht wie geplant durchgeführt werden.

Letztendlich fand sich ein Haushalt, der sich bereiterklärt hat, trotz allem die Studie durchzuführen. Dafür wurde auf einem Raspberry Pi 3 (Model B) die Datenbank aufgesetzt und im WLAN des Haushalts gestartet. Das Programm mit der modifizierten Liste an IDs und WLAN-Daten wurde auf die Entwicklungsplatine gespielt. Für das Display und die Platine wurde ein improvisiertes Gehäuse aus Pappe gebaut, wie in Abbildung 6.1 zu sehen.

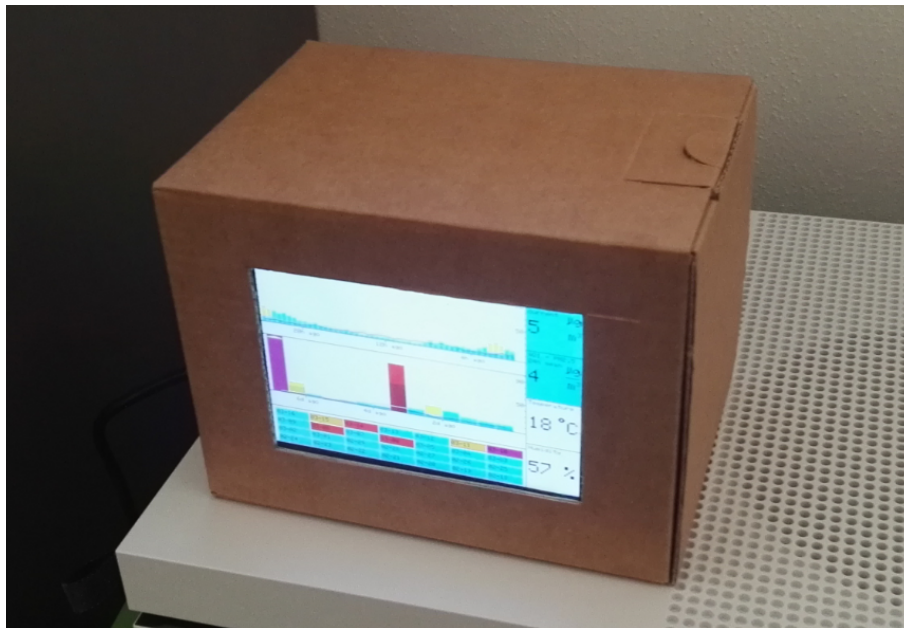


Abb. 6.1: Für die Evaluierung wurde für das 4-Inch-Display und das angeschlossene Entwicklungsboard ein Pappgehäuse gebaut.

Die Dauer der Studie wurde auf zwei Wochen begrenzt. Da aufgrund der aktuellen Situation kein Alltag stattfand, wurden Aktivitäten, die im Vorinterview beschrieben wurden, hypothetisch abgefragt und der Fokus der Studie auf eine Verbesserung der Visualisierung gelegt.

6.1 Vorinterview und Durchführung

Das Vorgespräch wurde als semi-strukturiertes Interview geführt. Es diente dazu, allgemeine Informationen zu den Teilnehmern abzufragen und ihren aktuellen Stand zu Feinstaub zu definieren. Der Haushalt besteht aus zwei Personen, eine weiblich und 26 Jahre alt, eine männlich und 32 Jahre alt und befindet sich in einem der äußeren Stadtteile von Stuttgart. Sie ist Studentin und er Arbeitnehmer. Im Alltag verlassen beide morgens das Haus, er um mit dem Auto zur Arbeit zu fahren, sie um mit dem ÖPNV zur Universität in der Stuttgarter Stadtmitte zu pendeln. Sie kehrt gegen Nachmittag zurück, um dann mit dem Auto zu Nachhilfeschülern außerhalb von Stuttgart zu fahren. Ihre Aktivitäten draußen bestehen vor allem aus gelegentlichen Spaziergängen abends unter der Woche und öfteren Spaziergängen am Wochenende, als auch Besuchen in der Stuttgarter Innenstadt oder Wochenendausflügen an den Bodensee. Während der Ausgangsbegrenzung aufgrund der Covid-19-Pandemie arbeiten beide von Zuhause. Fahrten unternehmen sie kaum und gehen stattdessen regelmäßiger draußen spazieren. Dass Feinstaub in Stuttgart ein häufig diskutiertes Thema ist, sind sich beide bewusst, ihre bisherigen Informationen haben sie aber größtenteils aus Fernsehbeiträgen oder Artikeln, haben sich aber nicht vorsätzlich oder zusätzlich informiert. Sie ist Asthmatikerin, und gehört somit zu einer Risikogruppe für die gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstaub (vgl. Kapitel 2.2.1). Aufgrund dessen, dass ihr Wohnort in den Randbereichen von Stuttgart und nicht im Kessel liegt, hat sie bisher aber keinen Grund gesehen, sich besonders mit dem Thema Feinstaub zu beschäftigen. Das Ausrufen des Stuttgarter Feinstaubalarms hat sie zwar dazu gebracht, ihre Autofahrten zusammenzulegen und zu minimieren, hat sie aber nicht zu Handlungen aufgrund der Sorge um ihre persönliche Gesundheit geführt. Beide meinen, dass ein Feinstaubmonitor im Haus sie durchaus für das Thema sensibilisieren kann. Besonders, wenn Parallelen zwischen gesundheitlichen Problemen und dem aktuellen Feinstaubwert gezogen werden können, können sie sich vorstellen, zukünftige Handlungen auch von dem Monitor abhängig zu machen.

Die Teilnehmer bekamen die Aufgabe, jeweils morgens und abends den aktuellen Feinstaubwert und den Verlauf der Konzentrationen über die Nacht, beziehungsweise den Tag zu notieren oder per Foto festzuhalten. Morgens sollten sie die Frage beantworten, ob der aktuelle Wert das Lüften der Wohnung beeinflusst, abends sollten sie notieren, ob sie der Wert in ihrem täglichen Spaziergang beeinflusst. Zudem sollten sie notieren, wenn sie bemerkten, dass sie etwas an der Visualisierung stört, sie etwas als unpraktisch empfanden, oder nicht die Informationen aus der Visualisierung bekamen, die sie in diesem Moment gebrauchen konnten.

6.2 Nachinterview und Ergebnisse

Während des zweiwöchigen Verlaufs der Studie vom 26.03.2020 bis zum 08.04.2020 waren nur selten erhöhte Werte zu erkennen. Die Konzentrationen bewegten sich beinahe durchgängig im "sehr guten" Bereich und nur ab und zu im niedrigen "guten" Bereich, daher hatten die Teilnehmer keine

Bedenken, morgens zu lüften und tagsüber spazieren zu gehen. Allerdings gab es einen Tag, an dem die Teilnehmerin von Atembeschwerden und tränenden Augen während des Spaziergangs berichtete. Über Nacht waren die Feinstaubkonzentrationen leicht angestiegen und die PM2.5-Konzentration befand sich im “guten” Bereich. Da die Teilnehmerin gegen diverse Pollen allergisch ist vermutete sie, dass ihre Beschwerden vermutlich auf den beginnenden Pollenflug zurückzuführen waren und dieser auch der Grund für Anstieg der Feinstaubkonzentration war.

Das Nachinterview wurde ebenfalls als semi-strukturiertes Interview geführt. Als positiv an der Visualisierung wurde bewertet, dass die Farbgebung in den niedrigen Bereichen von “sehr gut” und “gut” optisch gut unterscheidbar waren. Das war vor allem bei konstant niedrigen Verläufen praktisch. Zudem wurde es als angenehm empfunden, dass alle Visualisierungen auf einem Display sichtbar waren und es kein kompliziertes Menü oder Icons gab.

Dieser Punkt wurde aber auch in der Kritik angeführt. Dadurch, dass alle Granularitäten auf einmal sichtbar sind, sind diese entsprechend klein und nur von Nahem zu erkennen. Zudem wurde die Visualisierung als unübersichtlich empfunden, da die Teilnehmer vor allem der aktuelle Werte interessierte. Sie gaben an, diesen lieber prägnanter sehen zu wollen und die anderen Granularitäten bei Bedarf aufrufen zu können. Da das Internet aufgrund der Covid-19-Pandemie zusätzlich belastet war, gab es auf der Seite von luftdaten.info einige Male Verbindungsprobleme zu den Schnittstellen. Da der als aktuell präsentierte Wert immer der Wert mit dem letzten möglichen Zeitpunkt aus der Datenbank ist, war dieser dann unter Umständen schon einige Stunden alt. Hier wurde angemerkt, dass es praktisch wäre zu sehen, von welchem Datum und welcher Uhrzeit der als aktuell präsentierte Wert stammt, um nicht verwirrt zu werden. Des Weiteren wurde zurückgemeldet, dass es praktisch wäre, nicht nur mit Werten aus der Umgebung vergleichen zu können, sondern auch mit Werten eines Ortes, an den man beispielsweise fahren möchte. Als letztes wurde die Möglichkeit einer App vorgeschlagen, das der Monitor als altmodisch empfunden wurde und unterwegs nicht abgerufen werden kann.

Als letztes wurde die Frage aus dem Vorinterview aufgegriffen, ob und inwiefern der Feinstaubmonitor die Teilnehmer für das Thema Feinstaub sensibilisiert hat. Hier gaben die Teilnehmer an, dass sie es durchaus interessant gefunden hätten, die Feinstaubwerte verfolgen zu können. Da die Werte sich allerdings konstant im niedrigen bis sehr niedrigen Bereich gefunden hatten gaben sie an, den Monitor während der Studie zwar regelmäßig abgelesen zu haben, sich dies aber im normalen Alltag vermutlich nicht fortsetzen würde. Im Gegensatz zu beispielsweise der Temperatur hätte der aktuelle Feinstaubwert keine direkt spürbaren Auswirkungen und würde deswegen keinen wichtigen Stellenwert einnehmen.

6.3 Fazit

Das Fazit der Studie ist, dass ein Monitor zwar praktisch sein kann, aber zumindest im Alltag der Testpersonen keinen großen Stellenwert einnehmen würde, wenn die Belastungen sich konstant im niedrigen Bereich bewegen. Direkt spürbare Effekte auf die Gesundheit sind dann nicht wahrnehmbar und die Langzeitfolgen auch als gering einzuschätzen. Aufgrund der Abfrage von nur einem Haushalt und zudem den Umständen, die nicht dem Normalzustand entsprechen, ist die Pilotstudie auf keinen Fall repräsentativ, sondern bildet nur einen Einzelfall ab. Dieser Einzelfall kann aber womöglich auf

Haushalte in ähnlich niedrig belasteten Gebieten übertragen werden. Um ein umfassenderes Bild auf das Bewusstsein der Bevölkerung zum Thema Feinstaub und die Verwendung die Visualisierung zu erhalten, müsste ein deutlich weiter gefasste Studie durchgeführt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war, eine Visualisierung für Feinstaubdaten auf kleinen Displays zu entwickeln und zu einer ersten Einschätzung zu gelangen, ob diese einen Mehrwert im Alltag bringen und für das Thema Feinstaub sensibilisieren. Dafür wurden Schnittstellen des luftdaten.info-Projekts des Stuttgarter OK Labs verwendet und mithilfe der Arduino IDE auf Entwicklerboards und preisgünstig verfügbaren Displays visualisiert. Da die Schnittstellen zur Datenbank von luftdaten.info jedoch nicht genügend Funktionalitäten für den Verwendungszweck aufwiesen, wurde zusätzlich mit einem Raspberry Pi und der influxDB-Software eine Datenbank im lokalen Netzwerk eingerichtet. Ein Display wurde für eine kleine Pilotstudie für zwei Wochen in einem Haushalt aufgestellt, um Schwächen der Visualisierung zu identifizieren und den Effekt eines solchen Displays auf den Alltag zu untersuchen.

Diese Studie ergab, dass die Überwachung der Feinstaubwerte für die Testpersonen keinen großen praktischen Nutzen hatte. Das lag vor allem daran, dass sich die Feinstaubkonzentrationen konstant im niedrigen bis sehr niedrigen Bereich befanden und somit keinen direkt spürbaren Einfluss auf Verhalten und Gesundheit hatten.

Allerdings kann dieses Ergebnis nicht als repräsentativ angesehen werden, da der Wohnort der Testpersonen sich zwar im Stuttgarter Umland befand, allerdings nicht in Kessellage oder in durch andere Faktoren stärker belastetem Gebiet, wie beispielsweise sehr nah zu stark befahrenen Straßen. Zudem bildeten die Feinstaubwerte aufgrund der Covid-19-Pandemie und den damit einhergehenden Veränderungen bezüglich beispielsweise Industrie und Verkehrslage unter Umständen nicht den Normalzustand ab.

Das Aufstellen eines eigenen Sensors und das Verfolgen von Werten in der eigenen Umgebung hat zumindest mich selbst spürbar für das Thema Feinstaub sensibilisiert. Bei der Recherche zu gesundheitlichen Auswirkungen von hohen Feinstaubbelastungen habe ich gemerkt, wie wenig ich über das Thema Feinstaub gewusst habe, obwohl ich in Stuttgart wohne, wo das Thema Feinstaub im deutschlandweiten Vergleich sehr präsent ist. Der Sensor vor meinem Fenster und die Visualisierung der Werte haben dafür gesorgt, mich stärker mit den Quellen von Feinstaub auseinanderzusetzen und bei jedem Anstieg der Werte die Ursachen zu hinterfragen. Zudem ist mir bewusst geworden, welches Privileg es ist, dennoch im weltweiten Vergleich in einer Region mit einer geringen Luftverschmutzung zu wohnen und gesundheitlich wenig anfällig für Feinstaub zu sein.

Da es aber auch in Deutschland durchaus Gebiete mit erhöhten Feinstaubbelastungen gibt, wie beispielsweise Wohngebiete an stark befahrenen Straßen oder Verkehrsknotenpunkten oder aber auch in der Nähe zu Industrieanlagen, wäre es aufgrund der nicht gegebenen Repräsentativität der Studie interessant, eine ähnliche Studie mit Anwohnern solcher Räume durchzuführen. Außerdem sollten deutlich mehr Testpersonen auch aus unterschiedlichen Altersgruppen, Lebenslagen und Gesundheitszuständen ausgewählt werden. Hier könnte dann auch festgestellt werden, ob eine Sensibilisierung gegenüber Feinstaub auch zu veränderten Verhaltensweisen führt. Auch eine

weltweite Betrachtung wäre hier interessant. In Ländern mit weniger Überwachung der Grenzwerte und Maßnahmen gegen Luftverschmutzung kann eine selbstständige Messung und Beobachtung der Feinstaublage womöglich einen höheren Stellenwert im Schutz der eigenen Gesundheit einnehmen.

Für die Visualisierung gibt es ebenfalls einige mögliche Erweiterungen. Statt eines externen Displays könnte eine App mit den entstandenen Visualisierungen implementiert werden, was auch ein Vorschlag der Testpersonen der Pilotstudie war. Feinstaub-Apps sind allerdings schon viele erhältlich. Eine Optimierung gegenüber der vorhandenen Apps wäre hier die Verwendung der Daten des eigenen Sensors und die zusätzlichen Granularitäten, welche die meisten Apps noch nicht bieten. Viele Apps verwenden zudem nur die Werte des offiziellen nationalen Messnetzes und besitzen so nur eine punktuelle Abdeckung. Das Einspeisen von Werten von luftdaten.info würde ein deutlich differenzierteres und genaueres Bild der Feinstaublage liefern. Die ständige Sichtbarkeit der Daten entfällt jedoch und ein aktives Informationsbedürfnis der Nutzer wird vorausgesetzt.

Eine neue Konzeption der Hardware unter dem Gesichtspunkt der Zusammenführung des visualisierenden Teils und der Datenbank wäre außerdem denkbar, um die Einrichtung und Verwendung des Monitors zu vereinfachen.

Zusammenfassend bietet diese Arbeit einen ersten Ansatz der Möglichkeiten von Erfassung, Verarbeitung und Visualisierung von Feinstaubdaten im privaten Bereich mithilfe von Open-Science-Daten. Im Bereich der Visualisierung und vor allem dem Medium der Visualisierung von Feinstaubdaten gibt es noch viel Potenzial zur Optimierung. Da Luftverschmutzung und Luftqualität weltweit sehr akute Themen sind, ist die Weiter- und Neuentwicklung von Visualisierungen, besonders im Hinblick auf immer flächendeckendere Daten, ein Bereich der einen wichtigen Beitrag zur Aufklärung und Information von Bürgern liefern kann.

Literaturverzeichnis

- [Air19] AirNow. *Air Quality Index (AQI) Basics*. Webseite. Besucht Dez. 2019. 2019. URL: <https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi> (zitiert auf S. 38).
- [AMST11] W. Aigner, S. Miksch, H. Schumann, C. Tominski. *Visualization of Time-Oriented Data*. Springer, 2011. ISBN: 978-1-48225-737-3. DOI: [10.1007/978-0-85729-079-3_1](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-079-3_1) (zitiert auf S. 23–27).
- [And09] H. R. Anderson. „Air Pollution and mortality: A history“. In: *Athmospheric Environment* 43.1 (2009), S. 142–152 (zitiert auf S. 33).
- [BBB+18] T. Blascheck, L. Besançon, A. Bezerianos, B. Lee, P. Isenberg. „Glanceable Visualization: Studies of Data Comparison Performance on Smartwatches“. In: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 25.1 (2018), S. 630–640 (zitiert auf S. 41).
- [BCGM12] B. Buxton, S. Carpendale, S. Greenberg, N. Marquardt. *Sketching User Experiences - The Workbook*. Morgan Kaufmann, 2012. ISBN: 978-0-12381-959-8 (zitiert auf S. 55).
- [Bre19] BreezoMeter. *Air Quality Map*. Webseite. Besucht Dez. 2019. 2019. URL: <https://breezometer.com/air-quality-map/> (zitiert auf S. 48).
- [Car03] M. S. T. Carpendale. „Considering visual variables as a basis for information visualization“. In: (2003) (zitiert auf S. 23).
- [CHS+18] C. Asbach, B. Hellack, S. Schumacher, M. Bässler, M. Spreitzer, T. Pohl, K. Weber, C. Monz, S. Bieder, T. Schultze, A. M. Todea. „Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen kostengünstiger Feinstaubsensoren“. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 78.6 (2018), S. 242–250 (zitiert auf S. 36).
- [CIT07] CITEAIR. *Air Quality in Europe - Indices definition*. Webseite. Besucht Dez. 2019. 2007. URL: https://www.airqualitynow.eu/about_indices_definition.php (zitiert auf S. 38, 39).
- [CMS99] S. K. Card, J. D. Mackinlay, B. Shneiderman. *Readings In Information Visualization: Using Vision To Think*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1999. ISBN: 1-55860-533-9 (zitiert auf S. 19–21, 23, 24, 30).
- [CR18] S. Chanthakit, C. Rattanapoka. „MQTT Based Air Quality Monitoring System using Node MCU and Node-RED“. In: *2018 Seventh ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC)*. IEEE. 2018, S. 1–5 (zitiert auf S. 41, 42).
- [FF06] P. Funke, P. A. Frensch. *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition*. Hogrefe Verlag, 2006. ISBN: 978-3-84091-846-9 (zitiert auf S. 22).
- [Inc20] I. Inc. *InfluxDB: Purpose-Built Open Source Time Series Database*. Webseite. Besucht Mär. 2020. 2020. URL: <https://www.influxdata.com/> (zitiert auf S. 67).

- [Joy] Joy-IT. *NodeMCU ESP32 Microcontroller Entwicklungsplatine*. Datenblatt (zitiert auf S. 73).
- [KKM+94] P. R. Keller, M. M. Keller, S. Markel, A. J. Mallinckrodt, S. McKay. „Visual cues: practical data visualization“. In: *Computers in Physics* 8.3 (1994), S. 297–298 (zitiert auf S. 25, 26).
- [Kom19] E. Kommission. *Air Quality Standards der Europäischen Kommission*. Webseite. Besucht Nov. 2019. 2019. URL: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (zitiert auf S. 34).
- [KP09] S. Kim, E. Paulos. „inAir: measuring and visualizing indoor air quality“. In: *Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing*. ACM. 2009, S. 81–84 (zitiert auf S. 41, 42).
- [Lan17] M. u. N. B.-W. Landesanstalt für Umwelt. *Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011*. Paper. 2017 (zitiert auf S. 36).
- [Lan19] A. f. U. -. A. S. Landeshauptstadt Stuttgart. *Die Luft in Stuttgart*. Webseite. Besucht Dez. 2019. 2019. URL: https://www.stadtlima-stuttgart.de/index.php?luft_luftinstuttgart (zitiert auf S. 34).
- [LS05] U. Lahl, W. Steven. „Feinstaub - eine gesundheitspolitische Herausforderung“. In: *Auditorium Maximum - Pneumologie* 59.10 (2005), S. 704–714. DOI: [10.1055/s-2005-915558](https://doi.org/10.1055/s-2005-915558) (zitiert auf S. 32–34).
- [Mac95] A. MacEachren. *How maps work: Representation, Visualization & Design*. Guilford Press, 1995. ISBN: 0-89862-589-0 (zitiert auf S. 25, 26).
- [McK99] J. D. McKinlay. „Automating the Design of Graphical Presentations of Relational Information“. In: *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1999. Kap. 2.2, S. 66–81. ISBN: 1-55860-533-9 (zitiert auf S. 23).
- [Mun14] T. Munzner. *Visualization Analysis and Design, with illustrations by Eamonn Maguire*. Grafiken lizenziert unter CC BY 4.0. A K Peters Visualization Series, CRC Press, 2014. ISBN: 978-1-46650-891-0 (zitiert auf S. 20–23, 28–31).
- [Nov15] L. Nova Fitness Co. *Laser PM2.5 Sensor Specification, Product Model: SDS011*. Datenblatt. Version 1.3. 2015 (zitiert auf S. 66).
- [NSL+19] A. Neshati, Y. Sakamoto, L. C. Leboe-McGowan, J. Leboe-McGowan, M. Serrano, P. Irani. „G-Sparks: Glanceable Sparklines on Smartwatches“. In: *Proceedings of the 45th Graphics Interface Conference on Proceedings of Graphics Interface 2019*. Canadian Human-Computer Communications Society. 2019, S. 23 (zitiert auf S. 41).
- [Ope20] OpenAQ. *OpenAQ - Fighting air inequality through open data and community*. Webseite. Besucht März 2020. 2020. URL: <https://openaq.org/> (zitiert auf S. 43, 45).
- [Org00] W. H. Organisation. *Air Quality Guidelines for Europe - Second Edition*. Paper. 2000 (zitiert auf S. 32).
- [Org06] W. H. Organisation. *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide - Global update 2005*. Paper. 2006 (zitiert auf S. 32).

- [Org13] W. H. Organisation. *Health Effects of Particulate Matter*. Paper. 2013 (zitiert auf S. 33).
- [Org19] W. H. Organisation. *Noncommunicable Diseases and Air Pollution - WHO European High-Level Conference on Noncommunicable Diseases*. Paper. 2019 (zitiert auf S. 31, 32).
- [Pro20] W. A. Q. Project. *World's Air Pollution: Real-Time Air Quality Index*. Webseite. Besucht Mai 2020. 2020. URL: <https://waqi.info/> (zitiert auf S. 43, 44).
- [PSM07] Z. Pousman, J. Stasko, M. Mateas. „Casual information visualization: Depictions of data in everyday life“. In: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 13.6 (2007), S. 1145–1152 (zitiert auf S. 41).
- [Pur19] PurpleAir. *PurpleAir: Real Time Air Quality Monitoring*. Webseite. Besucht Dez. 2019. 2019. URL: <https://www.purpleair.com/map/> (zitiert auf S. 46, 49, 50).
- [QIT] QITA. *SPECIFICATION FOR TFT LCD MODULE*. Datenblatt. Version A (zitiert auf S. 73).
- [RB11] J. Rodgers, L. Bartram. „Exploring ambient and artistic visualization for residential energy use feedback“. In: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 17.12 (2011), S. 2489–2497 (zitiert auf S. 42).
- [Sen18] B. Sensortec. *BME280 - Combined Humidity and Pressure Sensor*. Datenblatt. Version 1.6. 2018 (zitiert auf S. 66).
- [SMD18] A. D. Schwarz, J. Meyer, A. Dittler. „Opportunities for Low-Cost Particulate Matter Sensors in Filter Emission Measurements“. In: *Chemical Engineering Technologies* 41.9 (2018), S. 1826–1832 (zitiert auf S. 36).
- [Stu18] R. Stuttgart, Hrsg. *Luftreinhalteplan für den Regierungsbezirk Stuttgart - Teilplan Landeshauptstadt Stuttgart*. Luftreinhalteplan. 2018 (zitiert auf S. 34).
- [Stu19a] L. Stuttgart. *Feinstaubalarm in Stuttgart*. Webseite. Besucht Dez. 2019. 2019. URL: <https://www.stuttgart.de/feinstaubalarm/> (zitiert auf S. 34).
- [Stu19b] O. L. Stuttgart. *luftdaten.info – Feinstaub selber messen*. Webseite. Besucht Nov. 2019. 2019. URL: <https://luftdaten.info/> (zitiert auf S. 42, 43).
- [Sys19a] E. Systems. *ESP32-WROOM-32 Data Sheet*. Datenblatt. Version 2.9. 2019 (zitiert auf S. 70).
- [Sys19b] E. Systems. *ESP8266EX Data Sheet*. Datenblatt. Version 6.3. 2019 (zitiert auf S. 66).
- [Umw05] L. für Umweltschutz Baden-Württemberg. *Luftqualitätsindex für langfristige Wirkungen*. Paper. 2005 (zitiert auf S. 37).
- [Umw09] Umweltbundesamt, Hrsg. *Presse-Hintergrundpapier des Umweltbundesamts: Feinstaubbelastung in Deutschland*. Paper. 2009 (zitiert auf S. 32, 33).
- [Umw18] Umweltbundesamt. *Informationsseite des Umweltbundesamts zum Thema Feinstaub*. Webseite. Besucht Nov. 2019. 2018. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe/feinstaub> (zitiert auf S. 32–34).
- [Umw19a] E. Umweltagentur. *European Air Quality Index*. Webseite. Besucht Dez. 2019. 2019. URL: <http://airindex.eea.europa.eu/> (zitiert auf S. 37, 38, 44, 47).

- [Umw19b] Umweltbundesamt. *Aktuelle Luftdaten - Luftqualitätsindex*. Webseite. Besucht Dez. 2019. 2019. URL: <https://umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten/luftqualitaet/> (zitiert auf S. 37, 44, 48).
- [Val19] C. Valette. *Höhlenmalereien aus der Höhle Pont d'Arc in Frankreich*. Webseite. Besucht Nov. 2019, Lizenz: CC BY-SA 4.0. 2019. URL: https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:12_PanneauDesChevaux%28PartieDroite%29Cervid%C3%A9LionChevauxEtCoupleDeLions.jpg (zitiert auf S. 19).
- [War02] M. O. Ward. „A Taxonomy of Glyph Placement Strategies for Multidimensional Data Visualization“. In: *Information Visualization* 1.3-4 (2002), S. 194–210. DOI: [10.1057/PALGRAVE.IVS.9500025](https://doi.org/10.1057/PALGRAVE.IVS.9500025) (zitiert auf S. 30).
- [Wav20] Waveshare. *Waveshare 4inch RPi LCD (A)*. Webseite. Besucht Mär. 2020. 2020. URL: <https://www.waveshare.com/4inch-RPi-LCD-A.htm> (zitiert auf S. 73).
- [WGK10] M. Ward, G. Grinstein, D. Keim. *Interactive Data Visualization: Foundations, Techniques, And Applications*. A K Peters, 2010. ISBN: 978-1-56881-473-5 (zitiert auf S. 20, 21, 23, 25, 27–31).

Alle URLs wurden zuletzt am 21. 06. 2020 geprüft.

Erklärung

Ich versichere, diese Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Aussagen als solche gekennzeichnet. Weder diese Arbeit noch wesentliche Teile daraus waren bisher Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens. Ich habe diese Arbeit bisher weder teilweise noch vollständig veröffentlicht. Das elektronische Exemplar stimmt mit allen eingereichten Exemplaren überein.

Ort, Datum, Unterschrift