

Masterarbeit

Datenstrukturen und digitaler Zwilling – Konzeption einer Mikroklima-Analyse und Steuerung für die Stadt Gelsenkirchen

Titel der Arbeit

Yasin Zerria, Gelsenkirchen

Name, Geburtsort

Management

Studiengang

Wirtschaft

Fachbereich

Westfälische Hochschule Gelsenkirchen, Bocholt, Recklinghausen

Hochschule

Prof. Dr. Karin Küffmann

Erstprüferin/Erstprüfer

Manfred vom Sondern

Zweitprüferin/Zweitprüfer

11. November 2022

Abgabedatum

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Smart City	3
2.1 Definition von Smart City	3
2.2 Smart Environment im Fokus	7
2.2.1 Beispielhafte Projekte	10
2.2.2 Definition Mikroklima	13
3 IoT, Big Data, Datenerhebung und Auswertung	16
3.1 Definition von Daten	16
3.2 Funktionsweise von Low Power Wide Area Network	19
3.3 Typische Netzarchitekturen	23
3.4 LoRaWAN, ZigBee und Co.	27
3.5 Datenbanksystem	33
3.5.1 Relationale Datenbanken	34
3.5.2 NoSQL Datenbanken	36
3.5.3 Datenbankentwurf	38
3.6 Big Data	39
3.6.1 Data Warehouses	40
3.6.2 Business Intelligence	44
3.7 FIWARE und JSON	46
3.8 Digitaler Zwilling	50
4 Problemstellung in Gelsenkirchen	54
4.1 Ist-Aufnahme	54
4.1.1 Datenlage	55
4.1.2 Datenspeicherung	61
4.2 Ausschnitt einzelner Probleme	63
5 Gesamtkonzeption für Gelsenkirchen	66
6 Ablaufplan Gelsenkirchen	74
6.1 Offene Probleme und Fragen	76
6.2 Maßnahmen im Bereich Smart Environment	77
7 Fazit und Ausblick	79

8	Literaturverzeichnis	81
9	Anhang	98
10	Eidesstattliche Versicherung	105

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

3D	Dreidimensional
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BTEX	Benzol
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DBMS	Datenbank-Managementsysteme
EGLV	Emschergenossenschaft Lippeverband
ERM	Entity-Relationship-Modell
ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
GHz	Gigahertz
gkd-el	Gelsenkirchener Kommunale Datenzentrale Emscher-Lippe
IoT	Internet of Things
ISO	International Standard Organization
IT	Informationstechnik
JSON	JavaScript Object Notation
KSG	Klimaschutzgesetz
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
MHz	Megahertz
NB-IoT	Narrowband IoT
NGSI-LD	Next Generation Service Interface-Linked Data
NRW	Nordrhein-Westfalen

NO ₂	Stickstoffdioxid
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Stickstoffoxide
NoSQL	Not only Structured Query Language
OLAP	Online Analytical Processing
OSI	Open Systems Interconnection
PM	Partikelgröße
SQL	Structured Query Language
WLAN	Wireless Local Area Network
WNAN	Wireless Neighborhood Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
WWAN	Wireless Wide Area Network

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: OSI-Schichtenmodell	19
Abbildung 2: Aufbau eines Endgeräts	21
Abbildung 3: IoT Vier-Layer-Modell	23
Abbildung 4: IoT Fünf-Layer-Modell	24
Abbildung 5: Grobe Data Warehouse Architektur	41
Abbildung 6: Beispiel JSON	47
Abbildung 7: NGSI-LD Architektur	48
Abbildung 8: Grobe Architektur eines digitalen Zwilling	51
Abbildung 9: JSON-Schema WeatherObserved	102
Abbildung 10: JSON-Beispiel WeatherObserved	103

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Faktoren der Leistungsfähigkeit von ausgewählten Dimensionen . . .	7
Tabelle 2: Darstellung von strukturierten Daten	17
Tabelle 3: Darstellung von semistrukturierten Daten	18
Tabelle 4: Reichweite verschiedener Netzwerkartentypen	28
Tabelle 5: Beispieldarstellung einer relationalen Datenbank	35
Tabelle 6: Beispieldarstellung einer spaltenorientierten Datenbank	37
Tabelle 7: Darstellung der allgemeinen Pegelstände	56
Tabelle 8: Darstellung der Messwerte	57
Tabelle 9: Darstellung der Luftüberwachung-Stammdaten	59
Tabelle 10: Darstellung der Luftüberwachung-Messdaten	60
Tabelle 11: Übersicht von Dezimal-, Binär- und Hexadezimalzahlen	98
Tabelle 12: Grober Projektstrukturplan Mikroklima-Analyse	104

1 Einleitung

Der digitale Wandel bietet Kommunen neue vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten. Damit stehen diese jedoch auch vor immer neuen Herausforderungen. Zum einen handelt es sich um ein Querschnittsthema, wodurch unterschiedliche Bereiche angesprochen werden, zum anderen fehlt die notwendige Expertise. Der Bund fördert daher seit dem Jahr 2019 Kommunen bei der Umsetzung ihrer Smart City Strategien.¹ Durch erfolgreiche Umsetzungen soll eine nachhaltige Stadtentwicklung ermöglicht werden. Das können u. a. digitale Dienstleistungen der öffentlichen Verwaltung oder innovative Mobilitätsangebote sein.² Ein weiteres Thema, das Kommunen und die daran liegenden Stadtgebiete betrifft, ist das städtische Mikroklima.

In dieser Arbeit wird vorgestellt, wie das Mikroklima einer Stadt analysiert und gesteuert werden kann. Zunächst wird daher näher auf die Problemstellung eingegangen, um dann darauf folgend eine Zielsetzung zu formulieren.

1.1 Problemstellung

Für jegliche Form der Analyse muss eine Datengrundlage vorliegen. Auf dieser Basis können statistische Verfahren angewendet werden. Das Ergebnis bildet eine Form von Wissen.³ Ein Problem besteht jedoch, wenn jegliche Datengrundlage fehlt. In diesem Fall müssen die benötigten Daten definiert, Erhebungsmethoden identifiziert und durchgeführt werden. Für Erhebungen wird jedoch eine entsprechende Infrastruktur benötigt. Falls diese nicht vorhanden, ist muss sie aufgebaut werden. Im Bezug auf eine Mikroklima-Analyse bilden Klimadaten die Basis. Da Städte vom Klimawandel betroffen sind, ist es wichtig die Folgen zu erkennen.⁴ Dies können steigende Temperaturen, fehlende Niederschläge oder steigende Wasserpegel sein.⁵ Mithilfe von Echtzeitmessungen kann das aktuelle Klima überwacht werden. Damit können bereits Gebiete erkannt werden, welche im allgemeinen Vergleich auffällig sind. Im Falle einer Langzeitspeicherung entsteht eine immer größer werdende Datengrundlage. Diese kann dazu dienen Vorjahresvergleiche zu ziehen, um dann eventuelle Folgen des Klimawandels zu identifizieren. Dies fungiert als Grundlage für die Formulierung von Maßnahmen und deren Umsetzung. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Stadtgebiet Gelsenkirchens als Messraum näher betrachtet. Dieses muss mit entsprechender Sensorik und weiterführender Technologie ausgestattet werden. Hierbei entsteht jedoch das Problem, dass eine digitale Infrastruktur vorliegen muss. Dazu stehen diverse Anbieter zur Auswahl. Da die genutzten Technologien ineinander übergreifen müssen die einzelnen technischen Grundlagen näher betrachtet werden.

¹Vgl. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.) (2022).

²Vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.) (2021), S. 19.

³Vgl. Ester, M./ Sander, J. (2000), S. 2.

⁴Vgl. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.) (2022c).

⁵Vgl. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.) (2022b).

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept erarbeitet, um Analysen und Steuerungen im Bereich des Mikroklimas für die Stadt Gelsenkirchen zu ermöglichen. Dabei handelt es sich eher um ein technisches Konzept, als um eine praktische Anwendungen. Die gesellschaftliche Motivation begründet sich auf der Identifikation von klimatischen Problemgebieten. Durch das Erkennen können in diesen Gebieten Maßnahmen, die das Klima verbessern, durchgeführt werden. Um das zu ermöglichen muss ein Netzwerk von Sensoren aufgebaut werden. Mithilfe von Literaturrecherche wird das Konstrukt Smart City in Kapitel 2 definiert und näher betrachtet. Für eine konkrete Themeneinordnung wird das entsprechende Handlungsfeld identifiziert und beispielhafte Projekte anderer Städte in diesem Bereich vorgestellt. Darauf folgt eine nähere Betrachtung des Klimas im Allgemeinen und des Mikroklimas. Dabei werden Gründe vorgestellt, weswegen die Thematik Relevanz aufweist. Die Konzeption wird auf verschiedene Technologien, welche in einer Smart City Architektur verortet werden, aufbauen. Daher wird in Kapitel 3 eine Übersicht und deren Funktionsweisen der benötigten Technologien vorgenommen. Der Verlauf orientiert sich dabei an der Reihenfolge:

- Erhebung,
- Übertragung,
- Speicherung und
- Verarbeitung.

Dabei werden u. a. einzelne Netzwerktypen und -topologien näher betrachtet, Anbieter im Bereich der Funkkommunikation miteinander verglichen, einzelne Datenbankkonzepte gegenübergestellt und große Datenbestände weiter erörtert. Eine Besonderheit nehmen dabei Plattformen ein, die einzelne Datenbestände miteinander verknüpfen. Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit bildet die Definition eines digitalen Zwillings.

In Kapitel 4 werden die Rahmenbedingungen sowie bereits bestehende digitale Infrastruktur der Stadt Gelsenkirchen betrachtet. Mithilfe von Recherchen wird die Frage beantwortet, welche Datenbestände allgemein über das Stadtgebiet vorhanden sind. Darauf folgt ein Ausschnitt von aktuellen identifizierten Problemen. Das Ziel der in Kapitel 5 vorgestellten Konzeption bildet die Grundlage für weitere Analysen. Dabei werden keine konkreten Analysen durchgeführt oder Techniken im Detail vorgestellt. Die erforderlichen Schritte zum Aufbau eines funktionierenden Messnetzes werden näher betrachtet, um dann in Kapitel 6 einen möglichen Ablaufplan darzustellen. An dieser Stelle werden exemplarisch Maßnahmen aufgezeigt, die Einfluss auf das Mikroklima nehmen können. Abschließend wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick formuliert. Die Sichtung von Literatur bildet die Ausgangslage für diese Arbeit. Aus Gründen der Lesbarkeit wird in dieser Arbeit die Sprachform des generischen Maskulinums verwendet. Die Verwendung der männlichen Form soll daher als geschlechtsunabhängig verstanden werden.

2 Smart City

Im folgenden Kapitel wird erörtert, worum es sich konkret um *Städte* und *Smart Cities* handelt. Darauf folgend wird das Handlungsfeld *Smart Environment* näher betrachtet und wie beispielhafte Projekte darin ausgestaltet sind. Da besonders Städte vom Klimawandel und dessen Folgen betroffen sind ist es wichtig zu erörtern, worum es sich zum einen um das *Klima* und zum anderen um den *Klimawandel* handelt. Dies bildet den thematischen Hintergrund der hier vorliegenden Arbeit.

2.1 Definition von Smart City

Um das Konstrukt *Smart City* näher betrachten zu können, muss vorab definiert werden, worum es sich bei einer Stadt genau handelt. Dazu gibt es verschiedene Sichtweisen, bzw. Forschungsrichtungen die das näher untersuchen. Vor allem die ökonomische, ökologische und statistische Sichtweise sollen herangezogen werden.

Bei der ökonomischen Definition rücken die positiven und negativen Effekte des Wirtschaftsgeschehens in den Fokus.⁶ Dies kann die Innenstadt sein, in der die Möglichkeit besteht einkaufen zu gehen, das Unternehmen, das Arbeitsplätze anbietet, aber auch der Lärm oder andere Störfaktoren, die durch die Bevölkerung entstehen. Für eine Ermöglichung von Interaktionen werden weitere Infrastrukturen benötigt, wie bspw. eine Verkehrsinfrastruktur oder eine sichere Energieversorgung.⁷ Diese Faktoren ermöglichen, bzw. stellen das Leben in einer Stadt dar. Generell wird hierbei die Funktion der Versorgung näher betrachtet. Bei der ökologischen Sicht tritt der Kreislauf von Mensch und Umwelt in den Vordergrund. Durch die Stadt werden Luft, Wasser und Boden manipuliert.⁸ Dies ist bei erhöhtem Emissionsausstoß von Fahrzeugen, Versiegelung von Böden oder die Versauerung von Wasser durch Industrieanlagen zu beobachten. Als letzte Definition soll die statistische Sichtweise herangezogen werden. Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung zieht dafür zum einen die Einwohnerzahl heran und zum anderen, ob eine grundlegende Versorgungsfunktion vorhanden ist. Ab 5.000 Einwohnern erhält eine Gemeinde den Status der Stadt, welche in Kleinstadt (5.000 bis 20.000 Einwohner), Mittelstadt (20.000 bis 100.000 Einwohner) und Großstadt (mindestens 100.000 Einwohner) kategorisiert werden können.⁹ Alle drei oben genannten Definitionen sollen in dieser Arbeit miteinbezogen werden, so dass schlussgefolgert werden kann, dass eine Stadt eine gewisse Bevölkerungsdichte vorweist, die Bevölkerung dort miteinander interagiert und dadurch in die Umwelt eingegriffen wird.

2018 lebten ca. 55 % der weltweiten Bevölkerung in Städten. Es wird prognostiziert,

⁶Vgl. Mieg, Harald A. (2013), S. 8.

⁷Vgl. Jaekel, M./ Bronnert, K. (2013), S. 1-2.

⁸Vgl. Mieg, Harald A. (2013), S. 8.

⁹Vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.) (2022).

dass es bis zum Jahr 2030 ca. 60 % sind.¹⁰ 2018 betrug die Quote der in Städten lebenden Personen in Deutschland 77 %.¹¹ Dies verdeutlicht, wie wichtig das Thema Smart City ist und noch werden wird.

Dabei ist in der Literatur nicht eindeutig, was *Smart City* konkret bedeutet. Um das Thema näher zu spezifizieren, ist es notwendig einige Sichtweisen zu benennen, um daraus eine allgemeine Erklärung zu erarbeiten, welche für diese Arbeit gewählt werden soll.

Im Kontext von Städten und Kommunen kann der Begriff *Smart* verschiedene Bedeutungen haben. Zum einen kann die Sicht aus dem Heimbereich (Smart Home) herangezogen werden. Darin wird der Nutzer in den Fokus gesetzt, um die Produkte in der Art und Weise zu designen, dass eine hohe Nutzerfreundlichkeit gegeben wird. Das kann durch Smartphone oder Sprachsteuerung der einzelnen Geräte stattfinden. Zum anderen kann die Industrie (Smart Industry) näher betrachtet werden. Die einzelnen technischen Arbeitsprozesse finden nicht mehr direkt vom Mensch überwacht statt, sondern funktionieren großteils automatisiert. Die Informationstechnik (IT) steuert sich selbstständig.¹² In beiden Bereichen wird dadurch eine Effizienzsteigerung erzielt. Im Smart Home muss der Anwender keine Strecken mehr zur Nutzung der Geräte zurücklegen, in der Smart Industry können Arbeitsprozesse mit geringerer Nutzung von menschlicher Arbeitskraft durchgeführt werden.

Da es sich bei einer Stadt eher um ein Konstrukt statt um ein reales Objekt handelt, müssen die übergeordneten zu erreichenden Ziele näher betrachtet werden. Dazu können folgende sechs Charakteristika zusammengetragen werden:¹³

- Aufbau und Nutzung einer Netzwerk-Infrastruktur, um die ökonomische und politische Leistungsfähigkeit zu sichern und soziale, kulturelle und urbane Entwicklung zu ermöglichen,
- Schwerpunktsetzung auf eine unternehmensfreundlichen Stadtentwicklung,
- eine Technologieintegration, von der alle Einwohner gleichermaßen profitieren,
- die Förderung moderner und kreativer Industrien,
- eine Chancengleichheit für Einwohner im Hinblick auf Nutzung der Technologie zu schaffen und
- eine soziale und ökologische Nachhaltigkeit.

„Aufbau und Nutzung einer Netzwerk-Infrastruktur“ und eine „Technologieintegration“ spiegeln den technischen Aspekt einer Smart City wider. Mit Technologie ist vor allem das Internet der Dinge (Internet of Things (IoT)) gemeint.¹⁴ Dadurch ist es möglich reale Sachverhalte mithilfe von Sensoren abzubilden. Dies stellt jedoch nur eine

¹⁰Vgl. Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2021).

¹¹Vgl. Zech, T. (2018).

¹²Vgl. Klein, C./ Kaefer, G. (2008), S. 260.

¹³Vgl. Caragliu, A. et al. (2011), S. 67-69.

¹⁴Siehe Kapitel 3.2

von drei Stufen dar. Bei der „Instrumentalisierung“ (Instrumented) werden Echtzeiten erhoben. Die nächste Stufe ist die „Verbindung“ (Interconnected). Die erhobenen Daten werden in einem Wertschöpfungsprozess weiterverarbeitet. Auf der letzten Stufe „Intelligenz“ (Intelligent) werden die Daten in Korrelation zu einander gesetzt, so dass Analysen, bzw. Prognosen, ermöglicht werden.¹⁵ Als Beispiel wird ein intelligenter Parkplatz betrachtet. Jeder einzelne Stellplatz verfügt über die Möglichkeit mitzuteilen, ob er belegt oder unbelegt ist (Stufe: Instrumentalisiert). Einzeln bietet das jedoch keinen Vorteil, da nur ein Ausschnitt betrachtet wird. Die gesamte Betrachtung aller Stellplätze (Stufe: Verbindung) ermöglicht es Aussagen darüber zu liefern, wie hoch die Belegung derzeit ist. Das Ergebnis der Wertschöpfung ist bspw. der Auslastungsgrad. Werden diese Daten genutzt, um Zeitreihen zu erstellen, ist es möglich Aussagen darüber zu treffen, um welche Uhrzeiten der Parkplatz tendenziell ausgelasteter ist (Stufe: Intelligent). Die Intelligenz kann mit jeder weiteren Vernetzung stetig gesteigert werden. So wäre es theoretisch möglich, nicht nur einen Parkplatz zu betrachten, sondern viele weitere im Stadtgebiet. Mit der Einspeisung weiterer Daten aus angrenzenden Bereichen, wie bspw. die Auslastung der einzelnen Verkehrsstraßen, entsteht ein immer größeres Gesamtbild. Es könnten Aussagen darüber getroffen werden, welche Parkplätze angefahren werden oder wie lange sich die Abreise von bestimmten Plätzen verlängert.

Durch die Vernetzung von mehr Sachverhalten erweitert sich die Möglichkeit bestimmte Situationen besser zu überwachen, Hypothesen aufzustellen oder Maßnahmen zu konzipieren. Die Technologie stellt dabei einen von drei Komponenten dar, auf die eine Smart City aufbaut. Zusätzlich bilden die dort tätigen und lebenden Menschen sowie Institutionen, wie kommunale Verwaltung, Unternehmen und Forschungseinrichtungen, das Fundament.¹⁶ Zusammenfassend handelt es sich bei einer Smart City um eine Erweiterung des Konstruktes Stadt. Hierbei werden mithilfe von Technologien die Erreichung verschiedener Ziele angestrebt. Auf diese Weise werden einzelne kommunale Bereiche verbessert. Das kann eine unternehmensfreundliche Stadtentwicklung oder die soziale Gleichberechtigung sein. Dabei spielen die Einwohner eine zentrale Rolle, weil sie es am Ende sind, die von den Entwicklungen profitieren sollen. Ermöglichen kann das die kommunale Verwaltung durch entsprechenden Maßnahmen oder Institutionen durch Forschung und Entwicklung. Damit diese nicht willkürlich, sondern zielgerichtet und messbar sind, ist es hilfreich Handlungsfelder hinzuzuziehen. Diese bilden spezifische Bereiche ab, die in einer Stadt vorhanden sind. In der Literatur wird für die Bestimmung von Zielerreichung zwischen fünf¹⁷ (Economy, Governance,

¹⁵Vgl. Harrison, C. et al. (2010), S. 2.

¹⁶Vgl. Nam, T./ Pardo, T. A. (2011), S. 286.

¹⁷Zur besseren Lesbarkeit wird auf das voranstehende „Smart“ verzichtet

Living, Environment und Human Capital)¹⁸ bis sieben Handlungsfelder (Economy, Governance, Living, Environment, Citizen, Education und Mobility)¹⁹ unterschieden. Giffinger et al. haben 2007 als Vorbereitung für eine Studie sechs Handlungsfelder herausgestellt, in denen eine Stadt „smart“ sein kann. Darin wird zum einen die Mobilität in Form von *Smart Mobility* hinzugezogen und zum anderen die Bildung (*Smart Education*) mit den Bewohnern (*Smart Citizen*) in Form von *Smart People* kombiniert. Diese Handlungsfelder lauten:²⁰

- Smart Economy,
- Smart People,
- Smart Governance,
- Smart Mobility,
- Smart Environment und
- Smart Living.

Maßnahmen müssen nicht zwingend exakt einem Handlungsfeld zugewiesen werden, sondern können Einfluss auf mehrere haben. Die Stadt Gelsenkirchen z. B. betreibt zusammen mit GELSENDIENSTE die sogenannte *Baum-App*. Darin enthalten sind die jeweiligen Informationen von 68.000 Bäumen innerhalb des Stadtgebietes. Einwohner haben die Möglichkeit sich über einen bestimmten Baum in ihrer Straße zu informieren oder können eine Gießpatenschaft übernehmen. Damit stellen sie sich zur Verfügung, um den Baum während der trockenen Perioden zu gießen.²¹ Hier können theoretisch drei Handlungsfelder identifiziert werden. Ein Faktor von Smart Environment ist der Umweltschutz. Durch die zusätzliche Pflege laufen die Bäume nicht in Gefahr zu vertrocknen. Smart People betrachtet die Partizipation der Einwohner. Diese werden in den Prozess der Baumpflege auf freiwilliger Basis beteiligt. Das Vorhandensein von Begrünung in der näheren Umgebung des Wohnortes steigert die Wohnqualität. Dieser Faktor findet sich in Smart Living.²² Die Handlungsfelder können nicht immer getrennt voneinander betrachtet werden, sondern fließen ineinander über. Smart Cities haben jedoch auch den Spielraum für sich selbst Handlungsfelder zu bestimmen und müssen sich nicht zwangsläufig an der Literatur orientieren. Die Stadt Gelsenkirchen hat in ihrer 2020 veröffentlichten Digitalstrategie fünf sogenannte *Leitthemen* definiert. Neben diesen gibt es noch ein Leuchtturmprojekt, was an dieser Stelle nicht näher erläutert werden soll.²³ Werden die Leitthemen direkt mit den Handlungsfeldern verglichen können Gemeinsamkeiten festgestellt werden. Als Beispiel wird das Handlungsfeld *Smart Governance* mit dem Leitthema *Digitale und bürgerorientierte*

¹⁸Vgl. Lombardi, P. et al. (2012), S. 141-143.

¹⁹Vgl. Meier, A./ Zimmermann, H.-D. (2006), S. 5-8.

²⁰Vgl. Giffinger, R. et al. (2007), S. 11.

²¹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022a).

²²Vgl. Giffinger, R. et al. (2007), S. 12.

²³Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2020), S. 10-11.

Verwaltung verglichen. Dem Handlungsfeld der *Smart Governance* werden folgende Charakteristika zugeschrieben:²⁴

- Partizipation in der Entscheidungsfindung,
- öffentliche und soziale Services,
- transparente Verwaltung und
- politische Strategien und Perspektiven.

Die Stadt Gelsenkirchen will die Partizipation der Einwohner steigern und zu einer Mitgestaltung der Stadtentwicklung anregen. Gleichzeitig soll allen Akteuren in Gelsenkirchen Zugang zu allen Leistungen und Angeboten der Daseinsvorsorge, unabhängig von Zeit oder Ort, ermöglicht werden. Die Informationen sollen transparent über das Handeln der Stadtverwaltung informieren. Ein weiterer Kernpunkt des Vorhabens ist der *digitale Zwilling*, um so daten-gestützte Entscheidungen für die Stadtentwicklung zu treffen und effizienter zu steuern.²⁵

Die Stadt Gelsenkirchen zeigt mit ihrer Digitalstrategie, dass die persönlichen Leitthemen, bzw. Handlungsfelder nicht identisch benannt sein müssen, aber im Kern die Faktoren widerspiegeln, die eine Smart City definieren.

In dieser Arbeit wird ein Fokus auf das Thema *Mikroklima* gelegt. Bevor daher näher auf die Thematik des Klimas eingegangen werden kann, muss das zugehörige Handlungsfeld *Smart Environment* näher betrachtet werden.

2.2 Smart Environment im Fokus

In der englischen Sprache kann *Environment* auf zwei Arten verstanden werden. Zum einen bedeutet es „Umgebung“, zum anderen „Umwelt“. In der Literatur wird mit einer Smart Environment eine Umgebung beschrieben in der intelligente und smarte Prozesse umgesetzt werden können. Es sind vielmehr die Rahmenbedingungen enthalten, die eine technische Evolution ermöglichen.²⁶ In dieser Arbeit wird Environment als Umwelt verstanden. Der Fokus liegt auf der Natur.

In der Literatur gibt es verschiedene Faktoren, in denen die Umwelt smart sein kann. In Tabelle 1 sind diese dargestellt.

Tabelle 1: Faktoren der Leistungsfähigkeit von ausgewählten Dimensionen²⁷

Dimension	Faktor
Smart Environment	Attraktivität der Umweltbedingungen
	Umweltbelastungen
	Umweltschutz
	Nachhaltiger Ressourceneinsatz

²⁴Vgl. Giffinger, R. et al. (2007), S. 12.

²⁵Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2020), S. 12.

²⁶Vgl. Cook, D. J./ Das, S. K. (2007), S. 53-54.

²⁷Eigene Darstellung in Anlehnung an Giffinger, R. et al. (2007), S. 12.

Zu den jeweiligen Faktoren gibt es Kennziffern, die zeigen welche Bereiche konkret in diese einfließen. So werden beim Faktor *Umweltbelastung* die genaue Feinstaub und Luftverschmutzung erhoben, bei *Attraktivität der Umweltbedingungen* die Anzahl der Sonnenstunden und bei *nachhaltigem Ressourceneinsatz* der Verbrauch von Strom und Wasser.²⁸ Das ist aber nur möglich, wenn spezielle Sensoren verbaut worden sind, die solche Messungen ermöglichen. Generell sollten nicht nur diese Faktoren und Kennziffern betrachtet werden. So ist es auch möglich, weitere Aspekte in diese Dimension einfließen zu lassen. Die Literatur dient dabei als Ausgangspunkt für einen groben Überblick.

Umwelt- und Klimaschutz ist kein Thema, welches durch Smart Cities etabliert, sondern gefördert werden soll. Bereits im Juni 1992 fand in Rio de Janeiro eine Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung statt. Herausgearbeitet wurden Aktionsprogramme mit konkreten Handlungsempfehlungen, die Nachhaltigkeit als übergeordnetes Ziel begreifen. Darin enthalten sind nachhaltige Ressourcennutzung oder Reduzierung des Treibhauseffektes.²⁹ Ein Effekt der dadurch vor allem verhindert werden sollte, ist der sogenannte *Klimawandel*. Durch verschiedene Faktoren wird dieser beeinflusst. Eine erhöhte Kohlenstoffdioxidemission, ausgelöst durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen, löst zwei Reaktionen aus. Ca. die Hälfte der Emissionen wird vom Ozean und durch die Vegetation aufgenommen. Die andere Hälfte bleibt in der Atmosphäre. Dadurch wird der Treibhauseffekt befeuert. Die Folgen sind eine Erhöhung der globalen Oberflächentemperatur, welche das Eis der Gletscher und an den Polen schmelzen lässt. Das nun flüssig gewordene Eis fließt in die Ozeane, wodurch diese stetig steigen.³⁰ Die daraus resultierenden Folgen sind vielfältig. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Fokus auf die klimatischen Folgen gelegt. Eine weltweite Temperaturerhöhung in Kombination mit der Eisschmelze begünstigt extreme Wetterphänomene, wie länger anhaltende Trockenheit, überdurchschnittliche Regenfälle und Überflutungen.³¹ Die Weltgesundheitsorganisation prognostiziert, dass zwischen den Jahren 2030 und 2050 ca. 250.000 Menschen pro Jahr an den Folgen des Klimawandels sterben werden.³² Dabei handelt es sich um eine Prognose, jedoch sind die wirtschaftlichen und sozialen Folgen bereits erkennbar. Vom 12. bis zum 15. Juli 2021 fand ein extremer Regenfall vor allem in Deutschland, Belgien und Luxemburg statt. Dies hatte zur Folge, dass mehrere Flüsse über ihre Ufer traten und die anliegenden Landschaften überschwemmten. In Deutschland waren Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen betroffen. Dabei sind hier allein ca. 184 Menschen gestorben. Häuser sind zerstört und die Infrastruktur, wie Autobahn, Funkmasten, Straßen und

²⁸Vgl. Giffinger, R. et al. (2007), S. 23.

²⁹Vgl. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.) (2022a).

³⁰Vgl. World Meteorological Organization (Hrsg.) (2021), S. 5.

³¹Vgl. World Meteorological Organization (Hrsg.) (2021), S. 18.

³²Vgl. World Health Organization (Hrsg.) (2022a).

Brücken beschädigt worden. Neben den wirtschaftlichen und den Personenschäden sind auch Existenzen ruiniert worden. Ansässige Ladenlokale und die dortigen Weinbauern haben ihre Grundlage verloren. Der Gesamtverband der Versicherer schätzt den Schaden auf zwischen 4,5 und 5,5 Milliarden Euro.³³ Regenfälle im Sommer sind keine Seltenheit, jedoch wird durch den Klimawandel die Wahrscheinlichkeit einer höheren Intensität und somit die Gefahr von Überflutungen in der Region verstärkt.³⁴ Es gibt zwei Möglichkeiten, sich vor solchen Ereignissen zu schützen. Entweder können präventiv Maßnahmen ergriffen werden, damit solche Ereignisse nicht in der Form eintreten, oder es wird durch reaktive Maßnahmen ein höherer Schutz gewährleistet. So betreffen präventive Maßnahmen vor allem den Klimaschutz. Die aktuellste Konferenz, welche diesen in den Mittelpunkt stellt, ist die Pariser Klimakonferenz aus dem Jahr 2015, bei der das Pariser Klimaabkommen verabschiedet wurde. Aus ihrer völkerrechtlichen Pflicht resultiert, dass alle Staaten dazu verpflichtet sind einen nationalen Klimaschutzbeitrag zu leisten. Dabei geht es nicht vorrangig um die Verringerung der Emission, sondern auch um die wissenschaftliche und finanzielle Unterstützung von Entwicklungsländern, welche von Klimaschäden direkt betroffen sind. Weitere Ziele sind Wald- und Naturschutz im allgemeinen und Kooperationen in neuen nachhaltigen Energiesektoren. Ziel ist es die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen.³⁵ Zur Erreichung dieses Oberziels müssten jedoch zum einen die globale Emissionen verringert und zum anderen die Wälder, welche durch Rodung oder Katastrophen zerstört wurden, wieder aufgeforstet werden. Dabei handelt es sich um eine globale Aufgabe aller Staaten. Eine mögliche Konsequenz wäre das Auftreten eines sogenannten Rebound-Effekts. Durch die allgemeine Minimierung der Emission könnten einige Staaten dazu angehalten sein ihre Industrie vollumfänglich hochzufahren. Einzeln betrachtet wäre bei einigen Staaten eine geringere Emission vorhanden, jedoch in der globalen Betrachtung kein Unterschied spürbar. Zusätzlich sind die Staaten selbstständig in der Pflicht einen Beitrag zu leisten, der laut Abkommen nicht näher konkretisiert wird. Daher sollte nicht nur ein Fokus auf den Klimaschutz, sondern auch zusätzlich auf die sogenannte *Klimaresilienz* gelegt werden. Die Klimaresilienz ist dabei als reaktive Maßnahme zu verstehen. Dabei werden mögliche Katastrophen als Risiko in die Planung einkalkuliert. In Ländern und Regionen in denen vermehrt extreme Wetterereignisse auftreten wird bspw. die grundlegende Wasserinfrastruktur gestärkt. Dadurch soll diese auch nach schweren Überschwemmungen oder Stürmen intakt bleiben, so dass die Wasserversorgung gesichert bleibt.³⁶

2016 hat die Bundesregierung ihren Klimaschutzplan 2050 vorgestellt und 2019 in

³³Vgl. Kreienkamp, F./ et al. (2021), S. 2.

³⁴Vgl. Kreienkamp, F./ et al. (2021), S. 38.

³⁵Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2022).

³⁶Vgl. World Health Organization (Hrsg.) (2022b).

das Klimaschutzgesetz (KSG) verankert. Es werden keine genauen Projekte vorgegeben, sondern die Ziele, die mit Maßnahmen erreicht werden sollen. Die Vorgaben sind nicht starr auf eine spezifische Richtung ausgelegt, sondern solle sich an der jeweiligen aktuellen Technik orientieren.³⁷ Ein solches Vorgehen ist aus technologischer Sicht sinnvoll. Der technische Fortschritt geht immer weiter voran, so dass eine zu frühe Festlegung auf Standards den Sinn verfehlen kann. Es sind innovationsfreundliche Rahmenbedingungen gegeben, die Raum für neue Ideen lassen. Der Klimaschutzplan fokussiert zwar den Klimaschutz in Bereich der Energiewirtschaft, Gebäude, Mobilität, Industrie und Wirtschaft, sowie Landnutzung und Forstwirtschaft.³⁸ Dabei werden jedoch keine Ziele definiert, wie eine Klimaresilienz erreicht wird.

Es wurde gezeigt, wie genau Smart Environment und Klimaschutz zusammenhängen. Im weiteren Kapitel ist daher zu prüfen, wie weltweite Projekte in diesem Bereich aussehen können und bereits umgesetzt werden.

2.2.1 Beispielhafte Projekte

Die Sonderverwaltungszone Hongkong hat im Jahr 2020 den sogenannten *Smart City Blueprint 2.0* für ihre Stadt veröffentlicht. Darin enthalten sind über 130 Initiativen, die den sechs einzelnen Handlungsfeldern³⁹ zugeordnet werden können. Die Vision ist es mit Technologie und Innovationen eine starke Wirtschaft und eine hochqualitativ lebenswerte Stadt zu ermöglichen.⁴⁰ Für die Initiative *Grüne und intelligente Gebäude und Energieeffizienz* wurde eine Sammlung mit Best Practice Methoden veröffentlicht. Dabei handelt es sich nicht um ein spezifisches Projekt, sondern um einen Leitfaden, mit dem Konzepte näher erörtert werden mit denen effiziente, smarte und grüne Gebäude entstehen. IoT fungiert dabei als Grundlage der Projekte. Auf diese Weise soll eine Wissensplattform entstehen, mit der alle einstellbaren Gebäudeparameter, wie Temperatur oder Energieverbrauch, überwacht und gegebenenfalls gesteuert werden können. Ziel ist es die einzelnen Parameter zu überwachen, Analysen durchzuführen und Probleme zu beheben, bevor diese überhaupt entstehen können. Für eine einfachere Integration von weiteren Modulen und Geräten werden offene Standards verwendet. Dies hat zugleich den Vorteil, dass eine globale Übersicht entwickelt werden kann. Beim Planungsprozess von neu entstehenden Gebäuden sollen drei Aspekte berücksichtigt werden:⁴¹

- Technologische Integration und Interkonnektivität,

³⁷Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2016), S. 11.

³⁸Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2016), S. 38 - 72.

³⁹Siehe Kapitel 2.1.

⁴⁰Vgl. Stadt Hong Kong (Hrsg.) (2022), S. 2.

⁴¹Vgl. Hong Kong Green Building Council Limited (Hrsg.) (2021), S. 12.

- Datenanalyse der Gebäude und
- Cyber- und Datensicherheit.

In neuen Gebäuden wird die Infrastruktur des Netzwerks mit eingeplant. Falls im Laufe der Zeit neue Geräte entwickelt werden, soll bereits heute ein Grundstein dafür gelegt werden, damit diese in das genutzte System integriert werden. Automatisierte Datenanalysen sind zwar weit fortgeschritten, jedoch sollten die Nutzer dahingehend geschult werden, die Analyse zu verstehen und darauf aufbauend Entscheidungen zu treffen.⁴² Auf diese Weise kann bspw. gewährleistet werden, dass Nutzer die Herleitung der Analysen und die Kennziffern in ihrer Bedeutung verstehen. Trotz offener Standards sollte die Entstehung eventueller Sicherheitslücken vermieden werden. Da es sich dann um die Infrastruktur ganzer Komplexe handeln kann, wäre es attraktiv für Kriminelle in diese Systeme einzudringen und handlungsunfähig zu schalten.

Ein Hauptaugenmerk liegt vor allem auf der Klimaresilienz. Da die Sonderverwaltungszone am Meer liegt sind steigende Meeresspiegel und Taifune eine ständige Bedrohung. Eine Möglichkeit, um mit plötzlich auftretenden großen Wassermassen umzugehen, wird mit einem Wasseroberflächen Management (Surface Water Management) erreicht. Hierbei sind verschiedene Umsetzungen möglich. Durch weitere Kapazitäten unterhalb von Gebäuden, in Form von Tanks, können diese im Falle von Überschwemmung zusätzliche Wassermassen zwischenlagern. Diese Reservoirs werden so angelegt, dass bei einer Überflutung ein Teil des Wasser hereinfließt und zu einem späteren Zeitpunkt in die Kanalisation gepumpt wird. Gestützt werden könnte dies von Sensoren, die messen, wann genau eine kritische Wasserhöhe erreicht ist, damit die Reservoirs freigegeben werden. Zusätzlich sollen mithilfe von Frühwarnsystemen Personenschäden minimiert werden. Dies kann aber nur erreicht werden, wenn im Falle einer Katastrophe die Infrastruktur intakt ist, um solche Meldungen zu erhalten.⁴³

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei diesen Maßnahmen nur um eine grobe Richtlinie, welche beim Bau von neuen Gebäuden berücksichtigt werden soll. Ein solcher Leitfaden gibt jedoch einen Anhaltspunkt, um eventuelle Maßnahmen nachzulesen und bei Bedarf auch umzusetzen.

Ein konkreteres Projekt findet sich in den Niederlanden. Die Hauptstadt Amsterdam liegt größtenteils unterhalb des Amsterdamer Pegels (der deutsche Nullpunkt orientiert sich am Amsterdamer Pegel)⁴⁴ und ist somit besonders anfällig für einen steigenden Meeresspiegel.⁴⁵ Im Falle einer Überflutung würden zuerst die Kaimauern betroffen sein. Daher muss eine regelmäßige Wartung stattfinden. Das Problem ist jedoch, dass

⁴²Vgl. Hong Kong Green Building Council Limited (Hrsg.) (2021), S. 12.

⁴³Vgl. Hong Kong Green Building Council Limited (Hrsg.) (2021), S. 12 u. 15.

⁴⁴Vgl. de Lange, N. (2020), S. 165 - 166.

⁴⁵Vgl. Haasnoot, M. et al. (2020), S. 4.

Amsterdam über 200 km Kaimauern und 850 Brücken über das Stadtgebiet verteilt hat. Teilweise sind diese noch aus Holz gebaut. Dies kann im Falle einer Überschwemmung zu einer Gefahr werden. Einstürzende Kaimauern könnten darauf stehende Häuser mit in die Fluten reißen oder als Treibgut weitere Konstruktionen beschädigen.⁴⁶ Zusammen mit der Technischen Universität Delft hat die Stadt Amsterdam ein Freiluftlabor in Betrieb genommen. Dort wird unter realen Bedingungen getestet, welche Belastung die Kaimauern aushalten können, bis diese nachgeben und brechen. Auf Basis dieser Experimente wird ein Datenmodell konstruiert, das voraussagt welches Teilstück in nächster Zeit gewartet werden muss. In das Modell fließen unter anderem Daten, wie die Bodenart, die Anzahl der Stützen oder der Druck, der durch den Verkehr ausgeübt wird, ein.⁴⁷ Vor allem eine Stadt wie Amsterdam, die unter dem Meeresspiegel liegt, kann von solchen Innovationen und Projekten profitieren. Die Regierung hat erkannt, dass ein steigender Meeresspiegel und die daraus resultierenden Fluten nicht abwendbar sind. Dies spiegelt sich auch in dem nationalen Wasserplan (National Water Plan) wider. Darin enthalten sind neue Normen, welche Gebiete als besonders schützenswert angesehen werden. Es werden nicht mehr, wie in den Normen aus den 1960er Jahren, nur die Wahrscheinlichkeiten eines Hochwassers berücksichtigt, sondern auch die wirtschaftlichen Folgen. Dabei soll die Wahrscheinlichkeit bei einem Hochwasser zu sterben nicht höher als 0,0001 % betragen. Dazu sollen die Deiche in regelmäßigen Abständen auf Intaktheit geprüft, die Kanäle an kritischen Punkten erweitert und weitere Barrieren aufgezogen werden. Gleichzeitig werden die lokalen Behörden, Unternehmen und Einwohner geschult, wie sie sich im Falle einer Überschwemmung am besten schützen können.⁴⁸ An diesem Ansatz wird deutlich, dass die Regierung im Falle einer Katastrophe nicht alleine unterstützen kann. Die betroffenen Gruppen werden dahingehend geschult, sich vorbeugend mit den Themen zu beschäftigen, so dass bei Eintritt einer Hochwasserkatastrophe bereits von Seiten der Bevölkerung unterstützt werden kann.

Um jedoch frühzeitig eingreifen zu können sind Warnsysteme von großer Bedeutung, da ohne jegliche Warnung noch nicht vom Ernstfall auszugehen ist. Ein solches Warnsystem wird derzeit in Steinheim (Kreis Höxter) erprobt. Amtliche Unwetterwarnungen für ein bestimmtes Gebiet sind oft nur Vorhersagen, welche mithilfe von Wetterradar- und Satellitenbildern sowie Wettermodellen, erstellt werden. Dies ist zwar bei absehbaren Überschwemmungen, die sich durch tagelange Regenfälle im Vorfeld anmelden, sinnvoll, jedoch bei plötzlich eintretendem Starkregen zu spät. Daher wurden an drei Brücken über der Emmer Ultraschallsensoren angebracht, welche in ein

⁴⁶Vgl. Amsterdam Institute For Advanced Metropolitan Solutions (Hrsg.) (2022).

⁴⁷Vgl. TU Delft (Hrsg.) (2022).

⁴⁸Vgl. Ministry of Infrastructure and the Environment/ Ministry of Economic Affairs (Hrsg.) (2015), S. 15.

IoT-Netzwerk Daten einspeisen. Sobald das System einen kritischen Pegelstand registriert wird das Warnsystem aktiviert. Gleichzeitig wurde ein Ombrometer für geeichte Niederschlagsmessung verbaut, um die Korrelation zwischen Niederschlag und Pegelstand zu prüfen.⁴⁹ Diese Vorgehensweise zeigt exemplarisch auf, wie durch den Einsatz diverser IoT-Geräte Daten erhoben werden. Einerseits können diese den aktuellen Ist-Zustand anzeigen, andererseits kann auf diese Weise über längere Zeit ein Datensatz erhoben werden. Durch die Verschneidung weiterer Daten ist es so möglich Modelle zu simulieren, die genutzt werden können, um genauere Einsichten des Wetters zu ermöglichen.

Es wurden drei Ansätze vorgestellt, um sich an den klimatischen Gegebenheiten anzupassen. Zwar handelt es sich beim Blueprint 2.0 aus Hong Kong und dem National Water Plan der Niederlande mehr um Leitfäden, als um konkrete Projekte, jedoch können auf diese Weise Innovationen gefördert werden. Falls in diesem Prozess dann zielführende Projekte entstehen können diese dann komplett umgesetzt werden. Enge Projektstrukturen können nicht die individuellen Gegebenheiten der einzelnen Standorte erfüllen. Im Fokus sollte daher die Formulierung konkreter Ziele und Maßstäbe stehen. Ein Aspekt der jedoch pauschal erfüllt werden kann ist, wie im Beispiel der Niederlande gezeigt, dass die lokalen Stakeholder informiert und geschult werden, da sie es in erster Linie sind, die von solchen Situationen betroffen sind.

2.2.2 Definition Mikroklima

Im Fokus dieser Arbeit steht das Mikroklima. Für eine Analyse und eine daraus folgende Steuerung ist es wichtig zu wissen, was genau ein Klima definiert und worin die Unterschiede zwischen einzelnen Begriffen besteht. Zu Beginn stellt sich ebenfalls die Frage, ob es einen Unterschied zwischen dem allgemeinen Klima und dem Stadtklima gibt. In der Literatur wird unterschieden zwischen *Klima*, *Wetterlage*, *Wetter* und *Witterung*. Der Kernunterschied liegt vor allem im Betrachtungszeitraum und dem zu betrachtenden Gebiet. So beschreibt das Wetter das Zusammenspiel der einzelnen meteorologischen Faktoren, wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Wind und Bewölkung, abgegrenzt auf ein kleineres Gebiet (Stadt oder einzelne Regionen) über maximal einige Tage. Wird das zu betrachtende Gebiet erweitert, bspw. auf einen Kontinent, wird von einer Wetterlage gesprochen.⁵⁰ Bleiben die meteorologischen Faktoren über mehrere Tage hinweg konstant, wird von einer Großwetterlage gesprochen.⁵¹ Die Witterung stellt die durchschnittliche Charakteristik des Wetters über einen längeren Zeitraum (maximal monatlich) dar.⁵² Die längste zeitliche Abfolge enthält das

⁴⁹Vgl. Fraunhofer IOSB-INA (Hrsg.) (2022).

⁵⁰Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 5.

⁵¹Vgl. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2022c).

⁵²Vgl. Pott, R./ Hüppe, J. (2007), S. 6.

Klima. Hierbei wird anhand von statistischen Kennzahlen, bspw. Mittelwert, Streuung oder Häufigkeiten, der einzelnen meteorologischen Größen über einen längeren Zeitraum ermittelt und dargestellt. Für eine valide Ermittlung muss dieser dementsprechend groß sein. In der Regel beträgt der Zeitraum mindestens 30 Jahre.⁵³ Für eine aussagekräftige Analyse ist es sinnvoll die Begrifflichkeiten zu unterscheiden. Je nach Analyseergebnis ist es wichtig, diese in einen Kontext zu setzen.

Es gibt neben der oben genannten Differenzierung eine weitere Möglichkeit meteorologische Phänomene einzuordnen. Hierbei wird zwischen *Makro-*, *Meso-* und *Mikroskala* unterschieden. Die Unterscheidung erfolgt vorrangig über die räumliche Betrachtung. Phänomene, die eine globale Auswirkung von mehreren Wochen bis Monaten haben, werden der Makroskala zugeordnet. Bei der Mesoskala wird ein Gebiet zwischen 2 und 2000 Kilometer betrachtet. Die hier zu beobachtenden Phänomene überdauern von mehreren Stunden, bis hin zu Tagen. Dies können Wirbelstürme oder Unwetterfronten sein. Der kleinste Betrachtungszeitraum von mehreren Sekunden bis hin zu Stunden ist die Mikroskala. Hier werden Phänomene eingeordnet, die von 20 Meter bis zu 2 Kilometer auftreten.⁵⁴ In der vorliegenden Arbeit soll vor allem das Mikroklima näher untersucht werden. Damit ist vor allem die Skala mit ihrem Umfang der Betrachtung gemeint. Werden für eine Mikroklima-Analyse über das Stadtgebiet großflächig Erhebungen durchgeführt, ist es möglich aus den Ergebnissen die Mesoskala zu betrachten. Die Erhebungen sind vorrangig eine Wiedergabe des aktuellen Ist-Zustandes. Werden die Ergebnisse über einen längeren Zeitraum erhoben, kann dadurch die Witterung bestimmt werden. Sollten die Ergebnisse konstant über 30 Jahre erhoben werden, kann letztlich eine, wie in der Literatur definierte, Klima-Analyse stattfinden. In dieser Arbeit ist jedoch unter Mikroklima-Analyse die Betrachtung des Wetters eines Gebiets zwischen 20 Metern bis zu 2 Kilometer gemeint.

Da sich die Untersuchung auf das Stadtgebiet bezieht, ist es erforderlich zu prüfen, was genau das Stadtklima ist und von welchen zusätzlichen Faktoren dieses ggf. beeinflusst wird. Die Stadt ist in erster Linie ein nicht natürliches Konstrukt. Im Laufe der Zeit haben Menschen an Orten zusammengelassen und Städte gegründet. Dieser Prozess wird als *Urbanisierung* bezeichnet. Dazu zählt auch, dass die Landschaft an die Bedürfnisse des Menschen angepasst und umgeformt wird.⁵⁵ Das umfasst den Bau von Infrastrukturen, wie Straßen oder Gebäude und die damit verbundene Versiegelung von Bodenflächen. Da eine Stadt keine globale Größe erreicht, jedoch größer als 2 Kilometer Umfang aufweist, wird vorrangig das Mesoklima betrachtet. Wie bereits erörtert, setzt sich dieses aus mehreren Mikroklimata zusammen. Ein einzelnes Mikroklima innerhalb der Stadt wird dabei von drei Faktoren beeinflusst. Diese sind die atmosphäri-

⁵³Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 5.

⁵⁴Vgl. Orlanski, I. (1975), S. 528.

⁵⁵Vgl. Mills, G. et al. (2010), S. 228.

sche Grenzschicht, umliegende Gebäude und der dortige Boden.⁵⁶ Die atmosphärische Grenzschicht (von 0 bis zu 1500m), in welcher sich Wetterphänomene im eigentlichen Sinne bilden⁵⁷, beeinflusst das Stadtklima durch die meteorologischen Faktoren. Umliegende Gebäude verursachen u. a. Abwärme und Abgase.⁵⁸ In Fertigungsbetrieben werden bspw. Emissionen in die Umgebung ausgestoßen. In Innenstädten wird durch hohe Energienutzung zusätzliche warme Luft nach außen getragen. Dazu kommt, dass Gebäude den Windfluss in Städten verändern. An manchen Orten findet dadurch keine Zirkulation der Luft statt. Dies ist für einen Temperatúrausgleich nicht förderlich.⁵⁹ Der Boden forciert vor allem die Versiegelung des Erdbodens. Durch die Veränderung der Beschaffenheit wird Regenwasser nicht im Boden gespeichert, sondern direkt in die Kanalisation geleitet. Dadurch vermindert sich die Verdunstung und die Oberflächentemperatur kann dadurch nicht ausgeglichen werden, sondern heizt sich zusätzlich auf.⁶⁰ Wasserflächen, wie Flüsse oder Seen, zählen ebenfalls zum Boden. Sie bilden zum einen eine Luftbahn, womit ein besserer Luftaustausch innerhalb des Radius gefördert wird. Zum anderen nehmen sie die Wärme aus der Umgebung auf und sorgen durch Verdunstung für eine Abkühlung.⁶¹ Zu den genannten Faktoren müssen auch die von Einwohnern erzeugten Emissionen, wie die Fahrt von Kraftfahrzeugen, dazu gezählt werden.⁶²

Das Mesoklima der Stadt, bzw. Mikroklima mehrerer städtischen Standorte, wird durch die Beeinflussung des Menschen auf die Natur größtenteils bestimmt. Zwar gibt das Klima die Grundbedingungen vor, jedoch wird durch das Verhalten des Menschen dieses weiter verstärkt. Demnach hat die Größe einer Stadt und die Landschaft der ansässigen Unternehmen einen Einfluss. Bei vielen Industrie-Unternehmen sind die Emissionen und Abwärme der Prozesse entsprechend höher. Gleichzeitig spielt die Art und Höhe der Bebauung eine weitere Rolle. Wie stark sind die Böden versiegelt und wie hoch sind die Gebäude. Diese Faktoren prägen das Stadtklima. Ein Beispiel für dicht aneinander gewachsene Städte bildet das Ruhrgebiet. Dieses ist geprägt von einer hohen Bevölkerungsdichte. Es leben auf 4.439 km² ca. 5,1 Millionen Menschen. Das entspricht einer Bevölkerungsdichte von ca. 1.159 Einwohner je km² (Stand 2021).⁶³ Im Vergleich zu ganz Deutschland sind es 233 Einwohner je km².⁶⁴ Dies verdeutlicht, wie viele Menschen vor allem durch das jeweilige Stadtklima in der Region betroffen sind. Durch die damalige Industrie des 19. und 20. Jahrhundert sind die Städte dicht aneinan-

⁵⁶Vgl. Helbig, A./ Schirmer, H. (1999), S. 10.

⁵⁷Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 15-17.

⁵⁸Vgl. Helbig, A./ Schirmer, H. (1999), S. 11.

⁵⁹Vgl. Roesler, S./ Kobi, M. (2018), S. 232.

⁶⁰Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 374-375.

⁶¹Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 428.

⁶²Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 382.

⁶³Vgl. Regionalverband Ruhr (Hrsg.) (2021), S. 3.

⁶⁴Vgl. Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (Hrsg.) (2022).

der gewachsen⁶⁵, weshalb hier zum einen das Mesoklima (Ruhrgebiet als Landschaft) und zum anderen das Mikroklima der jeweiligen Städte betrachtet werden muss. In Rahmen dieser Arbeit wird ein Fokus auf das Mikroklima der Stadt Gelsenkirchen gelegt. Die Betrachtung des Mesoklima kann im Rahmen weitere Arbeiten durchgeführt werden.

Für die Analyse des Mikroklimas werden gewisse Technologien benötigt. Im nächsten Kapitel wird auf die notwendigen eingegangen und näher betrachtet.

3 IoT, Big Data, Datenerhebung und Auswertung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept entwickelt, um Klimadaten zu erheben. Die reine Erhebung ist jedoch nicht zielführend, wenn diese am Ort der Messung verbleiben. Daher müssen die Daten von ihrem Erhebungsstandpunkt weiter transportiert werden. Damit diese nicht nach der Verarbeitung unwiderruflich gelöscht werden, müssen sie zusätzlich langfristig gesichert und verwahrt werden. Auf diese Weise fallen größere Datenbestände an. Die Kernfrage die sich stellt ist, wie die Daten letztlich genutzt werden können. Vor ab wird jedoch festgestellt, wobei es sich um Daten konkret handelt.

3.1 Definition von Daten

Der Begriff *Daten* kann im Sprachgebrauch verschiedene Bedeutungen haben. Im Kern beinhalten diese jedoch immer Informationen. Werden Informationen für einen Computer in Nullen und Einsen übersetzt, wird im technischen Zusammenhang von Daten gesprochen. Diese Übersetzung wird Repräsentation und die Rückübersetzung Abstraktion genannt. Es wird sich auf der kleinsten Informationseinheit, dem *Bit*, bewegt. Ein Bit kann exakt zwei Zustände haben. Entweder Null oder Eins.⁶⁶ Durch die Aneinanderreihung von acht Bits sind 2^8 (256) Zustände möglich. Dies ist die nächsthöhere Einheit und wird Byte genannt.⁶⁷ Diese Grundlage ist insofern wichtig, da ein Computer nur mithilfe von solchen Zuständen rechnet. Ein weiterer wichtiger Baustein ist das *Hexadezimalsystem*. Es werden jeweils vier Bits (16 mögliche Zustände) zur einfacheren Darstellung in 16 verschiedenen Zeichen (0-9 und A-F) zusammengefasst.⁶⁸ Dadurch gibt es die Möglichkeit Buchstaben zu kodieren.⁶⁹ Mithilfe von 2^7 Bits und der *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) Codierung können lateinische Buchstaben gespeichert werden. Dabei erhält in ASCII jeder Groß- und Kleinbuchstabe, sowie verschiedene Zeichen und Befehle, eine feste Zuordnung im

⁶⁵Vgl. Regionalverband Ruhr (Hrsg.) (2021), S. 8.

⁶⁶Vgl. Gumm, H.-P./ Sommer, M. (2016), S. 4-5.

⁶⁷Vgl. Gumm, H.-P./ Sommer, M. (2016), S. 9.

⁶⁸Vgl. Gumm, H.-P./ Sommer, M. (2016), S. 7.

⁶⁹Eine Übersicht ist im Anhang in Tabelle 11 dargestellt.

Hexadezimalsystem.⁷⁰ Im Laufe der Zeit haben sich weitere Codierungen, wie UTF-8 oder Unicode etabliert. Diese sollen an dieser Stelle nicht näher ausgeführt werden. Wichtig zu erwähnen ist, dass es weltweit keinen einheitlichen Standard gibt.

Durch die Aneinanderreihung mehrerer Bits ist es möglich den Wertebereich der darzustellenden Zahl zu erweitern. Auf diese Weise ist es möglich verschiedene elementare Datentypen darzustellen. Die gängigsten sind: Ganze Zahlen (integer (int)), reelle Zahlen (float), logische Daten (boolean) und Zeichen (chars).⁷¹ Jeder dieser Datentypen hat einen bestimmten Wertebereich und zulässige Operationen. Beispielsweise haben booleans einen Wertebereich von [0; 1] (Wahr oder Falsch) und chars lassen sich nicht miteinander addieren. Die elementaren Datentypen beschreiben den kleinsten Baustein von Daten. Daraus folgend lassen sich weitere sogenannte *zusammengesetzte Datentypen* bilden. Dabei können diese auch genutzt werden um weitere zusammengesetzte Datentypen zu erstellen.⁷² Ein häufig genutzter Datentyp in diesem Zusammenhang sind sogenannte Arrays. Diese sind vergleichbar mit einer Liste. Vorab wird definiert, um welchen Basisdatentyp es sich handelt. Anschließend werden die einzelnen Daten aneinandergereiht.⁷³ Beispielsweise wird ein Array bestehend aus chars auch string genannt.⁷⁴ Die alleinige Speicherung von Informationen in mehreren Daten und deren Typen bildet jedoch noch keine konkrete Struktur. Sobald die Daten in Beziehung zu einander gesetzt werden und einer Logik folgen, wird von einer *Datenstruktur* gesprochen.⁷⁵ Zur näheren Kategorisierung gibt es drei verschiedene Kriterien für eine Datenstruktur. Diese können strukturiert, semistrukturiert und unstrukturiert sein. Strukturierte Daten sind Daten, welche konkreten Datentypen zugeordnet und eindeutig interpretierbar sind.⁷⁶ Vergleichbar ist dies mit einer Tabelle an Informationen, in der jedes Feld einen eindeutigen Wert hat. In Tabelle 2 ist ein Beispiel aufgezeigt. Dabei handelt es sich bei der „Straße“ und bei der „Stadt“ um den Datentyp *string*. Zwar handelt es sich bei der „Postleitzahl“ im engeren Sinne um eine Zahl, jedoch wird diese auch als *string* definiert. Die Felder sind eindeutig interpretierbar.

Tabelle 2: Darstellung von strukturierten Daten

Name	Beispiel
Straße	Neidenburger Straße 43
Postleitzahl	45897
Stadt	Gelsenkirchen

⁷⁰Vgl. Gumm, H.-P./ Sommer, M. (2016), S. 12-13.

⁷¹Vgl. Ollmert, H. J. (1992), S. 28-29.

⁷²Vgl. Ollmert, H. J. (1992), S. 32.

⁷³Vgl. Wirth, N. (1976), S. 11.

⁷⁴Vgl. Gumm, H.-P./ Sommer, M. (2016), S. 17.

⁷⁵Vgl. Streib, J. T./ Soma, T. (2017), S. 1.

⁷⁶Vgl. Piro, A./ Gebauer, M. (2015), S. 144.

Bei semistrukturierten Daten handelt es sich bei den einzelnen Bestandteilen um strukturierte Daten, aber sie haben in ihrer Gesamtheit keine eindeutige Struktur. Dies entsteht, wenn einzelne Felder aus mehreren unterschiedlichen strukturierten Daten bestehen.⁷⁷ In Tabelle 3 sind die einzelnen Daten des vorangegangenen Beispiels in einer Spalte zusammengefasst und dadurch semistrukturiert.

Tabelle 3: Darstellung von semistrukturierten Daten

Name	Beispiel
Adresse	Neidenburger Straße 43, 45897, Gelsenkirchen

Bei unstrukturierten Daten sind die Informationen nicht geordnet. Zwar können auch strukturierte oder semistrukturierte Daten enthalten sein, jedoch sind diese nicht eindeutig ersichtlich.⁷⁸ Als Beispiel können hier Textdateien angeführt werden. Im Kontext der Datensichtung kann es durchaus vorkommen, verschiedene dieser Kategorien vorzufinden. Daher ist es notwendig sich mit jeglicher Kategorie auseinander zu setzen um diese sinnvoll und angemessen zu speichern.⁷⁹ Ein weiterer Faktor der Daten als solche betrifft sind die sogenannten *Metadaten*. In der Literatur und im allgemeinen Sprachgebrauch haben sich verschiedene Sichtweisen hierzu etabliert, weswegen vorab eine Übersicht möglicher Definitionen gegeben wird. Häufig werden Metadaten als Daten über Daten definiert.⁸⁰ Diese Definition gibt einen groben Überblick über den Nutzen, jedoch ist diese Definition nicht konkret. Es wird zwischen vier verschiedenen Typen der Metadaten unterschieden: Deskriptive, administrative und strukturelle Metadaten.⁸¹ Deskriptive Metadaten dienen dazu, die vorhandenen Daten besser einzuordnen und zu verstehen.⁸² Das könnte bspw. bei einer gemessenen Temperatur eines Sensors, bei dem die Messung die eigentlichen Daten darstellen würde, der Sensortyp, Standort oder Zeitpunkt der Messung sein. Dies bringt eine Schwierigkeit mit sich. Je nach Sichtweise kann es sich beim Standort, Sensortyp und Zeitpunkt der Messung auch um die relevanten Daten und dadurch dann nicht um Metadaten handeln. In administrativen Metadaten sind Informationen über die Datei enthalten, wie bspw. Dateigröße, -typ, Eigentumsrechte oder Entstehungszeitpunkt. Diese Informationen dienen dem Dateimanagement, bei dem Daten eingeordnet und sortiert werden. Strukturelle Metadaten speichern Informationen darüber, wie Daten miteinander in Beziehung stehen.⁸³ Würden mehrere Messungen zum einen von verschiedenen Messstationen in einem Gebiet und zum anderen in zeitlichen Intervallen stattfinden, würden strukturelle Me-

⁷⁷Vgl. Piro, A./ Gebauer, M. (2015), S. 144.

⁷⁸Vgl. Piro, A./ Gebauer, M. (2015), S. 144-145.

⁷⁹Genauerer zur Datenspeicherung in Kapitel3.5

⁸⁰Vgl. Kramer, F. F. (2019), S. 13.

⁸¹Vgl. Riley, J. (2017), S. 6.

⁸²Vgl. Riley, J. (2017), S. 7.

⁸³Vgl. Riley, J. (2017), S. 7.

tadaten Auskunft darüber geben, in welcher zeitlichen Abfolge die Daten erhoben und in welchem spezifischen Gebiet sie stünden. Aus diesen Typen der Metadaten lassen sich bereits ihre Funktionen erkennen. Einerseits dienen sie dazu, erhobene Daten näher zu beschreiben und dadurch neue Erkenntnisse abzuleiten, aber auch um die Daten besser einzuordnen und zu sortieren. Im Kern sind es Begleitinformationen der erhobenen Daten.

Es wurde vorgestellt, wie Daten technisch zusammengesetzt sind und in welche Typen sie kategorisiert werden können. Dabei können diese unterschiedliche Strukturen aufweisen. Durch Metadaten werden bestehende Daten um weitere Informationen ergänzt. Im weiteren Verlauf ist es wichtig zu verstehen, wie Daten erhoben und transportiert werden.

3.2 Funktionsweise von Low Power Wide Area Network

Das Ziel vom Internet der Dinge ist die Kommunikation verschiedener alltäglicher Geräte und Bereiche, die vorher nicht miteinander vernetzt waren. Diese Kommunikation ist jedoch simpel gehalten, wie im folgenden Kapitel näher erörtert wird.

Vorab wird betrachtet, wie allgemein die Kommunikation in Netzwerken definiert ist. Die International Standard Organization (ISO) hat dazu ein Referenzmodell für Kommunikationsprotokolle veröffentlicht, das sogenannte Open Systems Interconnection Modell (OSI-Modell). Es regelt von der physischen Signalübertragung bis zum Anwendungsprogramm die Übertragung der Daten. Für eine bessere Darstellung wird das Protokoll in einzelne Schichten (Layer) aufgeteilt.⁸⁴ Eine Übersicht des Referenzmodells ist in Abbildung 1 dargestellt.

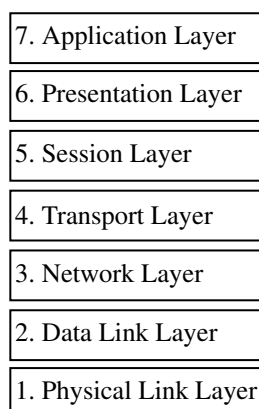


Abbildung 1: OSI-Schichtenmodell⁸⁵

Jede Schicht leistet der jeweils darüber liegenden eine Vorarbeit. Der Physical Link Layer ist für Bitübertragung zuständig. Dabei werden die jeweiligen zu versendenden Daten in Bits übersetzt und somit für die Übertragung vorbereitet. Die darüber liegende

⁸⁴Vgl. Gumm, H.-P./ Sommer, M. (2017), S. 223.

⁸⁵Eigene Darstellung in Anlehnung an Gumm, H.-P./ Sommer, M. (2017), S. 223.

Schicht (Data Link Layer) bündelt einzelne Daten in Datenpakete, fügt Adressen, Fehlerkorrekturverfahren und Quittungen hinzu. Dadurch kann zum einen der Absender ermittelt werden, eventuelle Fehler der Datenübertragung behoben und die erfolgreiche Übertragung mitgeteilt werden. Der Network Layer ermittelt den Übertragungsweg und rechnet eventuelle zusammenhängende Kosten ab. Der Transport Layer regelt die Verbindung als solche. Gemeinsam bilden die bisher genannten Layer das Transportsystem. Die darüberliegenden Schichten stellen das Anwendersystem dar. Der Session Layer regelt die Abfrage der übertragenden Daten. Das Anwendersystem wird darüber mit Anmeldungen oder Passwortabfragen verifiziert. Presentation und Application Layer dienen der Darstellung und der Anwendung der jeweiligen Daten. Dies ist vor allem abhängig vom empfangenden System.⁸⁶ Die reine Darstellung von Internetseiten würde bspw. in den Presentation Layer fallen. Eine Interaktion mit den erhaltenen Daten, wie eine Sortierung oder Abfrage, würde in Layer 7 (Application Layer) abgehandelt. Das OSI-Schichtenmodell dient hier in erster Linie dem Einstieg in das Thema der Kommunikation.

Die Hauptübertragungen im Internet der Dinge finden im Frequenzbereich statt (Physical Link Layer im OSI). Je nach Anbieter sind es entweder lizenzfreie (868/915 Megahertz (MHz), 433 MHz, 169 MHz oder 2,4 Gigahertz (GHz))⁸⁷ oder lizenzierte⁸⁸ Frequenzbänder. In Europa sind vorrangig die Frequenzbänder in 868 MHz unlizenziiert.⁸⁹ Allgemein charakterisieren sie sich vor allem über eine hohe Reichweite und einem niedrigen Energieverbrauch.⁹⁰ Ein Standard, der in diesen Bereichen agiert und für das Internet der Dinge genutzt wird, lautet Low Power Wide Area Network (LPWAN). Dazu zählt der Verlauf von einzelnen Endgeräten bis hin zu den Servern.⁹¹ Die Kernfunktionen von LPWAN ist zum einen die Sammlung von Daten und zum anderen die Ausführung von simplen Befehlen.⁹² Die Sensorik kann unterschiedliche physikalische, chemische oder biologische Größen messen.⁹³ Zu physikalischen Größen zählen bspw. Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Luftdruck. Die Aktorik löst einen Input für andere Geräte aus. Im Zuge dieser Arbeit steht jedoch die Sensorik im Vordergrund, weswegen die Aktorik nicht näher betrachtet wird.

Use-Cases die mit LPWAN betrieben werden haben ähnliche Anforderungen. Zum einen muss eine hohe Skalierbarkeit gewährleistet sein (Capacity). Es muss die Möglichkeit bestehen weitere Endgeräte hinzuzufügen, ohne dass die Datenübertragung und Stabilität des Systems darunter leidet. Dies führt zu der Herausforderung der Kosten.

⁸⁶Vgl. Gumm, H.-P./ Sommer, M. (2017), S. 224-225.

⁸⁷Vgl. Centenaro, M. et al. (2016), S. 62.

⁸⁸Vgl. del Campo, G. et al. (2020), S. 284.

⁸⁹Vgl. Kainz, A./ Bürger, M. (2016), S. 348.

⁹⁰Vgl. del Campo, G. et al. (2020), S. 284.

⁹¹Vgl. Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (2020), S. 2.

⁹²Vgl. Chaudhari, B. S./ Borkar, S. (2020), S. 26.

⁹³Vgl. James, A. et al. (2022), S. 1.

Das Netzwerk sollte im laufenden Betrieb und die Anschaffung neuer Geräte keine hohen Kosten verursachen (Cost). Gleichzeitig muss eine stabile Netzabdeckung gewährleistet sein (Coverage). Da das Netzwerk in einer Stadt vielen Störsignalen, wie Bebauungen und anderen elektronischen Geräten, ausgesetzt ist, stellt das eine Herausforderung dar. Sensoren werden oft an Orten verbaut, die nur schwer erreichbar sind und daher eine Stromzufuhr entweder nicht vorhanden ist oder das Wechseln von Batterien ein wiederkehrendes Problem darstellen würde. Deshalb sollten die Geräte energiesparend sein (Consumption). Des Weiteren sollten zusätzliche Sensoren für weitere Anwendungsszenarien einfach hinzugefügt werden können. Dadurch kann eine maßgeschneiderte Lösung ermöglicht werden (Additional specifics).⁹⁴

Der Kommunikationsfluss im LPWAN kann je nach Anforderung unidirektional oder bidirektional sein.⁹⁵ Damit ist gemeint, wie die Daten gerichtet sind. Bei einem unidirektionalen Kommunikationsfluss werden die Daten nur in eine Richtung gesendet. Ein Sensor leitet die Messdaten weiter, ist jedoch nicht in der Lage Daten zu empfangen. Dies wird auch als Uplink bezeichnet.⁹⁶ Vor allem für die Aktorik wird eine bidirektionale Verbindung benötigt in der ein Austausch darüber stattfindet, dass eine Aufgabe ausgeführt werden soll und ob diese tatsächlich durchgeführt wurde. Der Auftrag an einen Aktor, oder auch Sensor, eine Tätigkeit durchzuführen wird auch Downlink genannt.⁹⁷ Die Endpunkte, die aktorische und sensorische Aufgaben tätigen werden auch als *Nodes* bezeichnet.⁹⁸ Bei diesen Nodes handelt es sich in der Regel um Mikrocontroller. Der Aufbau eines Endgeräts ist in Abbildung 2 dargestellt.

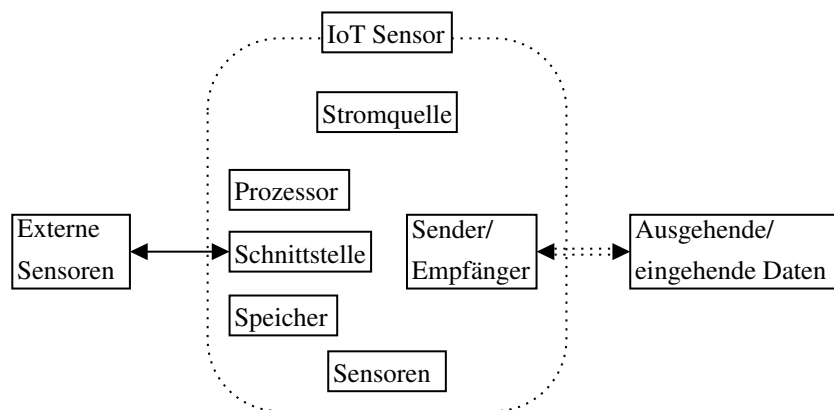


Abbildung 2: Aufbau eines Endgeräts⁹⁹

Eine Stromquelle dient dazu dem Gerät die nötige Energie zuzuführen. Da die Sensoren oft an Orten verbaut sind an denen es keine direkte Stromzufuhr gibt, werden Batterien oder Solareinheiten verbaut. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass Endgeräte

⁹⁴Vgl. Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (2020), S. 7.

⁹⁵Vgl. Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (2020), S. 7.

⁹⁶Vgl. Herrero, R. (2022), S. 232.

⁹⁷Vgl. Herrero, R. (2022), S. 228.

⁹⁸Vgl. Linnemann, M. et al. (2019), S. 11.

⁹⁹Eigene Darstellung in Anlehnung an James, A. et al. (2022), S. 39.

auch direkt an das Stromnetz angeschlossen werden. Der Prozessor dient als Recheneinheit, um die Funktion des Gerätes zu steuern und die Messungen in Bits und Bytes für die Übertragung zu übersetzen. Einige Sensortypen können direkt auf der Platine verbaut sein, wie bspw. Temperatur oder Lichtstärke. Der Speicher dient dazu die gemessenen Werte kurzzeitig zu sichern, ehe diese weitergeleitet werden. Die Sender-/Empfängereinheit dient dazu über die oben genannten Frequenzen die Messdaten zu versenden, bzw. Befehle zu empfangen. An der Schnittstelle können weitere externe Sensoren oder Aktoren verbaut werden.¹⁰⁰ Trotz der technischen Komponenten sollte bei größeren Projekten der Versuch unternommen werden, dass diese preislich ins Budget passen (Anforderung: Cost). Oft geht mit einem geringen Preis eine geringere Qualität einher. Weshalb darauf geachtet werden muss, dass die Performance nicht darunter leidet. Unter den Punkt fällt auch ein niedriger Stromverbrauch (Consumption). Je nach Anwendungsfall müssen keine Echtzeitdaten übermittelt werden. Daher ist es ratsam nur die nötigsten Daten zu übermitteln. Dies schont zum einen die Batterie und zum anderen überlastet es nicht den Empfänger.

Die Daten werden nicht direkt an eine Datenbank, sondern an ein sogenanntes *Gateway* übermittelt. Diese Basisstation enthält den Gegenpart um die gesendeten Daten zu empfangen.¹⁰¹ Dabei übernimmt das Gateway verschiedene Aufgaben. Von ihm werden die Daten der einzelnen Nodes abgerufen, verarbeitet und weitergeleitet. Gleichzeitig können die Status (Batterie, Energieverbrauch und Funktion) der einzelnen Nodes abgefragt und kontrolliert werden. Sicherheit und Datenschutz sind ebenfalls Bestandteil der Funktionen eines Gateways.¹⁰² Ein Gateway hat demnach eine Übersetzungs- und Servicefunktion und ist somit ein fester Bestandteil eines LPWAN. Im Anschluss werden die Daten an den jeweiligen Server übermittelt. Die Übertragung findet hierbei über Mobilfunk, Ethernet oder Wireless Local Area Network (WLAN) statt.¹⁰³ Wichtig zu erwähnen ist, dass während der einzelnen Übertragungen die jeweiligen Daten verschlüsselt und somit geschützt sind. Vor allem bei nicht lizenzierten Frequenzen ist dies besonders wichtig. Je nach Sensibilität der Daten muss dieser Schutz auch gewährleistet sein. Bei Daten die allgemein eher unkritisch sind und mit der Öffentlichkeit geteilt werden, sollte auch dieser Schutz bestehen. Bei fehlender Sicherheit kann nicht gewährleistet werden, dass diese eventuell extern manipuliert worden sind.¹⁰⁴

Die Technologie rund um LPWAN wurde theoretisch betrachtet. Da für Kommunikationsprotokolle im Allgemeinen das OSI-Schichtenmodell genutzt wird, muss betrachtet werden, ob eine spezielle Architektur für den Bereich IoT existiert und wie konkret

¹⁰⁰Vgl. James, A. et al. (2022), S. 39.

¹⁰¹Vgl. Linnemann, M. et al. (2019), S. 11.

¹⁰²Vgl. Aazam, M. et al. (2014), S. 5.

¹⁰³Vgl. Yegin, A. et al. (2020), S. 40.

¹⁰⁴Vgl. Chaudhari, B. S./ Borkar, S. (2020), S. 21.

diese aufgebaut ist. Es wurde mit dem OSI-Schichtenmodell jedoch eine Übersicht über die grundlegenden abzudeckenden Funktionen, wie z. B. Datenerhebung, Datentransport und Datenpräsentation gegeben. Im nächsten Unterkapitel werden daher IoT Architekturen näher erörtert und diskutiert.

3.3 Typische Netzarchitekturen

In der Literatur haben sich verschiedene Architekturen zum Thema IoT etabliert. Zum einen existiert eine Architektur mit vier und zum anderen eine mit fünf Schichten. Identisch bei beiden ist, dass vgl. mit dem OSI-Modell den nächsthöheren Schichten Dienste zur Verfügung gestellt werden. Im Vier-Schichten Modell (siehe Abbildung 3) liegen auf dem untersten Layer die Endgeräte, welche Messungen durchführen.

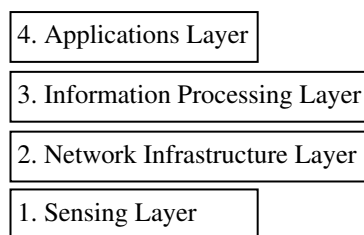


Abbildung 3: IoT Vier-Layer-Modell¹⁰⁵

Die Daten werden gesammelt und dem darüberliegenden Network Infrastructure Layer zur Verfügung gestellt. Der Network Infrastructure Layer bündelt die Funktionen vom Data Link und Network Layer des OSI. Das sind bspw. die Übertragung im allgemeinen, aber auch die Bündelung oder Erstellung von Fehlerkorrekturverfahren. Der darüberliegende Information Processing Layer händelt die Endgerätekontrolle, Sicherheitsverfahren und Informationsverarbeitung, wie Datenbankspeicherung. Der Applications Layer bietet die Möglichkeit externe Anwendungen anzuschließen und mit den erhobenen Daten weiter zu agieren.¹⁰⁶ Das Vier-Schichten Modell ist einfach gehalten. Das bedeutet, falls das vorhandene Netzwerk eine bestimmte Art von Gerätetypen beinhaltet und keine großen Datenmengen gesammelt werden, kann es unproblematisch genutzt werden. Problematisch wird es jedoch, falls unterschiedliche Daten von verschiedenen Gerätetypen gesendet werden. Durch eine höhere Skalierung der Gerätedichte, wie es in Smart Cities der Fall ist, sollte das Fünf-Layer-Modell näher betrachtet werden. Dieses ist in Abbildung 4 exemplarisch dargestellt. Die Kernfunktionen der unteren zwei Layer und des Applications Layer sind dabei identisch mit denen des Vier-Layer-Modells.

Die Hauptaufgabe des Middleware Layer ist die Verarbeitung, Bereitstellung und Spei-

¹⁰⁵Eigene Darstellung in Anlehnung an Chaudhari, B. S./ Borkar, S. (2020), S. 24.

¹⁰⁶Vgl. Chaudhari, B. S./ Borkar, S. (2020), S. 23-24.

¹⁰⁷Eigene Darstellung in Anlehnung an Syed, A. S. et al. (2021), S. 435.

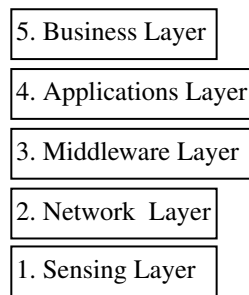


Abbildung 4: IoT Fünf-Layer-Modell¹⁰⁷

cherung der Daten aus verschiedenen Quellen sowie die Netzsicherheit.¹⁰⁸ Dies ist vor allem wichtig, wenn verschiedene Anbieter und Netzwerkart mit unterschiedlichen Protokollen genutzt werden.¹⁰⁹ Im Kapitel 3.4 wird der Unterschied der einzelnen Anbieter näher betrachtet.

Der Business Layer bildet die oberste Schicht. In diesem werden übergeordnete Funktionen übernommen. Sind bspw. im Applications Layer nur einzelne Datensätze für bestimmte Anwendungen wichtig, werden im Business Layer übergeordnete Funktionen erfüllt.¹¹⁰ Bspw. wird eine Übersicht über alle Datensätze innerhalb des Netzwerks gegeben, Datenanalysen oder Data Science Methoden durchgeführt sowie eventuelle Dashboards erzeugt.

Es besteht die Wahl zwischen einem Vier- und Fünf-Layer-Modell. Werden zusätzlich die Charakteristika eines IoT-Netzwerkes hinzugezogen, fällt die Wahl auf ein Fünf-Layer-Modell. Zu den Charakteristika zählen, dass zum einen das Netzwerk selbstständig kommuniziert und Austausch sowie Speicherung automatisch passieren. Zum anderen steuern sich die Geräte aufgrund der hohen Anzahl autonom.¹¹¹ Vor allem bei einer hohen Anzahl an Geräten kann nicht sichergestellt werden, dass diese alle vom selben Typ sind. Es kann dadurch passieren, dass verschiedene Datentypen und -sätze vom System verarbeitet werden müssen. Daher ist eine Middleware unabdingbar. Da in Smart Cities durchaus verschiedene Use-Cases realisiert werden sollen, wird in dieser Arbeit das Fünf-Layer-Modell gewählt.

Abseits von dem Fünf-Layer-Modell gibt es weitere technische Möglichkeiten Daten zu verarbeiten und einen Nutzen aus diesen zu ziehen. Konkret lauten diese: Cloud, Fog und Edge Computing. Das Cloud Computing ist auf der Stufe zwischen dem Application und Business Layer angesiedelt. Fog Computing wird im Network Layer integriert. Edge Computing findet auf der Stufe des Sensing Layers statt.¹¹² Beim Cloud Computing werden einzelne Dienste auf einem Netzwerkservers durchgeführt. Dabei

¹⁰⁸Vgl. Syed, A. S. et al. (2021), S. 435.

¹⁰⁹Vgl. Ramesh, R. et al. (2020), S. 340.

¹¹⁰Vgl. Syed, A. S. et al. (2021), S. 435.

¹¹¹Vgl. Linnemann, M. et al. (2019), S. 3-4.

¹¹²Vgl. Syed, A. S. et al. (2021), S. 435.

wird zwischen verschiedenen Modellen unterschieden. Zum einen kann auf eine bestimmte Software zurückgegriffen werden. Diese wird auf dem Netzwerkserver betrieben und auf sie kann in der Regel mit verschiedenen Endgeräten zugegriffen werden. Dieses Modell wird als *Software as a Service* bezeichnet. Ein Vorteil wäre bspw., dass rechenintensive Anwendungen nicht auf dem lokalen Computer durchgeführt werden müssen und dieser keine hohen Betriebsvoraussetzungen benötigt. Zum anderen gibt es das Modell *Platform as a Service*. Dies ist für Programmierarbeiten relevant, bei der auf einzelnen Entwicklungsumgebungen und Bibliotheken zurückgegriffen wird. Es bildet eine Plattform für kollaboratives Arbeiten mehrerer Personen und Gruppen. Das letzte Modell lautet *Infrastructure as a Service*. Hier wird unter anderem die Speicherung der Daten und die dazugehörige Infrastruktur an den Netzwerkserver übergeben. In der Regel sind hiermit vor allem Datenspeicherung und Datenbanken gemeint. Die einzelnen Modelle können fließend ineinander übergehen. Das Ziel von Cloud Computing ist die Verlagerung von Software und Hardware an einen externen Netzwerkserver (Outsourcing von Rechenleistung). Dabei ist der Server auf Abruf über verschiedene Endgeräte verfügbar und kann bei Bedarf schnell erweitert werden. Es kann zwischen verschiedenen Betreibermodellen gewählt werden. Im Falle von Unternehmen und Kommunen kann die Cloud selbst betrieben oder ein proprietärer Dienst in Anspruch genommen werden (Private Cloud). Der Zugriff bleibt allein im Unternehmen verankert. Daneben gibt es noch Community Clouds, die bspw. von Bildungseinrichtungen für Angehörige eben dieser verfügbar ist, oder öffentliche Clouds.¹¹³ Der Vorteil bei der Nutzung liegt dabei an der erhöhten Rechenleistung. Im Falle von IoT werden Daten generell auf Servern gespeichert und verarbeitet. Es bildet daher eine Standardanwendung.¹¹⁴ Im Bereich von Smart Cities sollte in Betracht gezogen werden eine private Cloud selbstständig zu verwalten. Dies erfordert zwar einen höheren Personalaufwand, jedoch sind die Daten in der Stadt verankert. Generell sollte sich die Wahl an den technischen Möglichkeiten einer Stadt orientieren.

Die zweite Möglichkeit ist einen Teil der Rechenleistung an die Gateways zu übertragen. Dort laufen die Daten der einzelnen untergeordneten Datenquellen erstmals zusammen.¹¹⁵ Dadurch können die Daten, bevor sie weiter ins System geleitet, zunächst gefiltert und aufbereitet werden. Generell besteht auch die Möglichkeit, bestimmte Anwendungen bereits auf das Gateway zu übertragen. Je nach Anwendung kann dies auch sinnvoll sein. Das könnte bspw. das Gebiet eines Gateways mit smarten Mülleimern während einer Veranstaltung sein. Sollte ein Mülleimer einen kritischen Füllzustand erreichen, könnte so die zugehörige Servicekraft direkt vom Gateway informiert und eine Leerung veranlasst werden. Der Befehl würde mit weniger Verzögerung mitgeteilt

¹¹³Vgl. Mell, P./ Grance, T. (2011), S. 2-3.

¹¹⁴Vgl. James, A. et al. (2022), S. 47.

¹¹⁵Vgl. El-Sayed, H. et al. (2018), S. 1709.

und die Daten nicht noch weiter versendet werden. Dies macht einen weiteren Vorteil deutlich. Durch die Filterung und Bündelung der Datenquellen werden nur noch die Kerninformationen gesendet. Dies spart Bandbreite und Zeit. Die Wahl zugunsten von Fog Computing ist abhängig von der Anwendung. Vor allem Anwendungen die in Echtzeit ablaufen müssen sollten mit einer solchen Technologie ausgestattet werden. Die dritte technologische Möglichkeit ist ähnlich dem Fog Computing. Das Edge Computing verlagert die Rechenleistung abermals. In diesem Fall wird sie direkt an den jeweiligen Nodes angesiedelt. Diese können auch als Kante (englisch: Edge) eines Netzwerkes angesehen werden. Die Gründe für die Verlagerung sind ähnlich mit denen des Fog Computing, nur dass in diesem Fall die Daten eines Node besondere Beachtung benötigen.¹¹⁶ Ein Anwendungsbeispiel wären autonom fahrende Autos. Aufgrund von Verzögerungen sollte die Befehlsmechanik nicht von einem weiter entfernten Netzwerkservers kommen.

In einer Mikroklima-Analyse und Steuerung kann es sinnvoll sein einzelne Konzepte zu nutzen. Dies bleibt jedoch abhängig von den Anforderungen des jeweiligen Use-Case.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der näher betrachtet werden muss ist der Network Layer, um genauer zu sein die unterschiedlich genutzten Netzwerk-Topologien. Je nach Anbieter werden andere genutzt. An dieser Stelle werden die gängigsten vorgestellt und im nächsten Kapitel den Anbietern zu geordnet. Das Gateway bildet als Verbindung zum nächsthöheren Layer die zentrale Anlaufstelle. Alle Informationen von den Nodes laufen über diesen. Im Bereich IoT haben sich *Point-to-Point*-, *Star*- und *Mesh-Netzwerke* etabliert. In einem Point-to-Point-Netzwerk ist das Gateway nicht mit jedem einzelnen Node direkt verbunden. Bspw. ist das Gateway mit Node A verbunden. Node A wiederum leitet seine eigenen Daten, die Daten von Node B und von nachgelagerten Nodes an das Gateway. Diese Verkettung würde sich weiter fortführen lassen. Ein Nachteil dieser Netzwerk-Topologie ist die fehlende Stabilität. Falls einer der zwischengelagerten Nodes vom Netzwerk getrennt wird, ist eine Kommunikation der nachgelagerten nicht möglich.¹¹⁷ Die fehlende Stabilität, unter dem Aspekt, dass große Netzwerke etabliert werden müssen, macht diese Art nicht geeignet für ein IoT Netzwerk. Eine weitere Netzwerk-Topologie ist das Star-Netzwerk. Ähnlich einem Stern gehen die Verbindungen nach außen. Alle Nodes sind direkt mit dem zentralen Gateway verbunden. Dies hat zum Vorteil, dass es stabiler als ein Point-to-Point-Netzwerk im Falle eines Node-Ausfalls ist und es erweiterbar ist. Nachteilig wäre, dass bei einem Ausfall des Gateways das ganze Netzwerk ausfällt. Dies ist jedoch bei allen Netzwerk-Topologien ein Nachteil. Sobald das Gateway ausfällt ist keine Übertragung zu den Nodes möglich. Daher sollte bei besonders sensiblen Systemen ein redundantes Sys-

¹¹⁶Vgl. El-Sayed, H. et al. (2018), S. 1709-1710.

¹¹⁷Vgl. Syed, A. S. et al. (2021), S. 443.

tem erstellt werden. Damit sind ausfallsichere Netzwerke gemeint, in denen weitere Gateways im Notfall vorhanden sind. Die letzte genutzte Netzwerk-Topologie ist ein Mesh-Netzwerk. Hierbei ist jeder Node mit einem oder mehreren weiteren verbunden. In einem vollständigen Mesh sind alle Nodes untereinander vernetzt. Bei Ausfall eines einzelnen Node ist die Kommunikation über eine alternative Route immer noch möglich. Diese hohe Ausfallsicherheit bildet einen Vorteil. Ein Nachteil ist jedoch, dass bei dieser Variante ein hoher Energieverbrauch stattfindet.¹¹⁸ In größeren Projekten oder Use-Cases in denen mehrere Gateways und Sensoren verbaut werden sind auch sogenannte Hybrid-Architekturen möglich. In diesem Fall kann jedes Subnetzwerk eines Gateways individuell erstellt werden. Zum einen wird dadurch ein Middleware Layer notwendig, der die einzelnen Netzwerke abfragen und übersetzen kann. Zum anderen können verschiedene Anbieter in einzelnen Subnetzwerken genutzt werden. Da sich im Laufe der Zeit einige Anbieter und deren Standards etabliert haben ist es notwendig diese im nächsten Unterkapitel näher zu betrachten.

3.4 LoRaWAN, ZigBee und Co.

Das Internet der Dinge hat die Art und Weise, wie Geschäftsmodelle (Business Cases) gedacht werden müssen nachhaltig verändert.¹¹⁹ Dies ist in vielen Lebensbereichen zu erkennen. Sei es im privaten Sektor, in welchem Haushaltsgeräte untereinander kommunizieren und gesteuert werden oder in der Industrie, wo ganze Produktionsstraßen autonom arbeiten und die nötigen Daten miteinander teilen. In dieser Arbeit wird vor allem der Anwendungsbereich Smart City näher betrachtet. Es muss jedoch auch geprüft werden, welche Technologien in anderen Bereichen genutzt werden, um einen Vergleich zu ziehen.

Die Kommunikation zwischen Nodes und Gateway muss nicht zwingend über ein LPWAN stattfinden. Zwar bietet ein LPWAN hohe Reichweiten, jedoch ist dies im privaten Bereich nicht notwendig. Im IoT-Fünf-Layer Modell sind dies die unteren drei Layer (Sensing, Network und Middleware). Tabelle 4 bietet eine Übersicht der verschiedenen Netzwerkarten und deren Reichweite. Zu Wireless Personal Area Networks (WPAN) zählen Technologien wie Bluetooth oder ZigBee. Mit einer Reichweite bis zu 100 m sind diese vor allem im privaten oder industriellen Sektor nutzbar. WLAN wird vorwiegend für Hochgeschwindigkeitsübertragung von Daten genutzt. Dabei liegt die Netzabdeckung im Fokus. Wireless Neighborhood Area Networks (WNAN) sind für Anwendungen bis zu 10 km Durchmesser. Hier runter fallen die Vernetzungen in kleineren Bezirken oder Campusnetze. Unter Wireless Wide Area Network (WWAN) fallen zum einen die oben erörterten LPWAN, aber auch zellulärer Mobilfunk wie 4G.¹²⁰

¹¹⁸Vgl. Baun, C. (2020), S. 26-27.

¹¹⁹Vgl. Escribano, C. P. et al. (2021), S. 52.

¹²⁰Vgl. Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (2020), S. 8-9.

Je nach Anwendungsanforderungen ist abzuwägen, welche Technologie genutzt werden muss.

Tabelle 4: Reichweite verschiedener Netzwerkkarten¹²¹

Netzwerkkart	Reichweite im Durchmesser
WPAN	100 m
WLAN	1.000 m
WNAN	10 km
WWAN	100 km

Die vorgestellten Netze definieren sich vorrangig über die genutzte Technologie. Wo bei jede Technologie diverse Anbieter vorweisen kann. Im Bereich des WPAN hat sich ZigBee etabliert. Im Jahr 2002 hat sich die heutige Connectivity Standards Alliance (ehemals ZigBee Alliance) gebildet.¹²² Ihr gemeinsames Ziel ist es einen Standard für IoT Geräte zu entwickeln. Zu dieser Allianz zählen über 400 Mitglieder.¹²³ Es existieren vier verschiedene Mitgliedsstufen:¹²⁴

- Promoter: 105.000 USD/Jahr,
- Teilnehmer: 20.000 USD/Jahr,
- adoptierendes Mitglied: 7.000 USD/Jahr und
- Partner: 0 USD/Jahr.

Promoter haben einen Sitz im Verwaltungsrat und haben ein Mitbestimmungsrecht. Gleichzeitig können sie an dem Standard mitwirken und haben dieselben Vorzüge wie die weiteren Mitgliedsstufen. Teilnehmer erhalten ebenfalls die Möglichkeit an den Standards mitzuwirken und können auf Prototypen zugreifen, um einen Entwicklungsvorteil zu haben. Adoptierende Mitglieder können auf die Dokumentenbibliothek zugreifen, haben jedoch keine Möglichkeit etwas am Standard zu verändern. Partner haben lediglich die Option mit einer höheren Mitgliedsstufe zusammenzuarbeiten, um die Produkte zu vertreiben.¹²⁵ Diese Arten der Mitgliedsstufen sind ein wichtiger Faktor. Es wird daraus ersichtlich, dass zwar ein Standard für teilnehmende Unternehmen etabliert wird, jedoch auch für die Nutzung dieses Standards gezahlt werden muss. Dies betrifft zwar nicht den Endanwender, der die Produkte nutzt, jedoch ist keine Möglichkeit vorhanden an den jeweiligen Standards mitzuwirken und im eigenen Sinne zu verändern.

Das gleichnamige Framework zeichnet sich durch vier Schichten (Layer) aus. Die untersten zwei Layer (Physical und Medium Access Control Layer) regeln die Übersetzung der Daten in Funk und sind im IoT-Fünf-Layer-Modell im Sensing Layer verortet.

¹²¹Eigene Darstellung in Anlehnung an Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (2020), S. 8.

¹²²Vgl. Lea, P. (2018), S. 157.

¹²³Vgl. Connectivity Standards Alliance (Hrsg.) (2022b).

¹²⁴Vgl. Connectivity Standards Alliance (Hrsg.) (2022a).

¹²⁵Vgl. Connectivity Standards Alliance (Hrsg.) (2022a).

Diese sind bereits durch einen Standard des Institute of Electrical and Electronics Engineers normiert. Der eigentliche Standard von ZigBee bezieht sich auf den Network Layer, welcher eine sichere Übertragung von Node zu Gateway koordiniert, und dem Application Layer. Dieser kann von dem jeweiligen Anbieter an seine Bedürfnisse angepasst werden. Das kann bspw. die Handhabung von smarten Beleuchtungssystemen sein.¹²⁶ Das eigentliche Framework von ZigBee bezieht sich somit lediglich auf zwei Layer, da die Übertragung bereits durch andere Standards abgedeckt ist. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist, dass ZigBee für den Betrieb großer Mesh-Netzwerke mit 1.000 Geräten ausgelegt ist. Dabei soll ein geringer Stromverbrauch realisiert werden.¹²⁷ Hier würde der eigentliche Nachteil von Mesh-Netzwerken (vgl. Kapitel 3.3) seine Relevanz verlieren. Des Weiteren kann durch die Hinzunahme weiterer Nodes in das Mesh-Netzwerk die Reichweite erhöht werden, so dass ein stabiler und zuverlässiger Austausch von Daten ermöglicht wird.¹²⁸ Zwar zeichnet sich ZigBee durch eine Vielzahl an Anbietern und hohe Datenübertragung (bei 2,4 GHz 250 kB/s)¹²⁹ aus, jedoch ist die Reichweite um ein ganzes Stadtgebiet mit Sensoren auszustatten nicht ausreichend. Bei Ausfall von zentralen Gateways wäre die Stabilität dennoch gefährdet. Jedoch sollte dieser Standard nicht zwangsläufig bei der Technologiewahl herausfallen. Es besteht die Möglichkeit ein eigenes Netz zu betreiben und somit nicht von einem Netzbetreiber abhängig zu sein. Es ist jedoch fraglich, wie genau die Daten gesichert sind und ob diese an externe Server übermittelt werden. Im Smart City Bereich kann es Anwendungen geben, die eine hohe Stabilität der Übertragung benötigen. Dies sollte jedoch zum Beginn anhand der Anforderungen des jeweiligen Projektes geprüft werden.

Die höchste Reichweite bieten WWANs. In diesem Bereich gibt es einige Anbieter, die einerseits als Netzbetreiber agieren und andererseits die Technologie zur Verfügung stellen. Es werden exemplarisch drei Anbieter vorgestellt. Zwar bieten sie unterschiedliche Technologien an, jedoch werden diese in der vorliegenden Arbeit nicht näher erläutert. Die Hauptunterschiede sind eher im Aufbau des jeweiligen Netzwerkes zu sehen.

Das Unternehmen Heliot Europe wurde 2017 mit dem Ziel, ein eigenes LPWAN Netzwerk zu betreiben, gegründet. Heute bietet das Unternehmen ca. 3.700 Funkstationen mit der eine Fläche von ca. 444.000 km² abgedeckt wird. In Deutschland agiert das Unternehmen unter dem Namen *Sigfox Deutschland*.¹³⁰ Ihre sogenannte Sigfox Technologie funktioniert im Grunde wie ein oben genanntes LPWAN Netzwerk und wird auch 0G-Netzwerk genannt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass das Netzwerk nicht durch den Kunden selbst aufgebaut und verwaltet wird, sondern das dies alles

¹²⁶Vgl. Farahani, S. (2008), S. 5.

¹²⁷Vgl. Krauß, M./ Konrad, R. (2014), S. 32.

¹²⁸Vgl. Krauß, M./ Konrad, R. (2014), S. 33.

¹²⁹Vgl. Aileni, R. M. et al. (2020), S. 310.

¹³⁰Vgl. Heliot Europe GmbH (Hrsg.) (2022).

durch den Betreiber geschieht. Er stellt die Netzwerkinfrastruktur vom Gateway bis zur Cloud. Der Kunde muss sich den gewünschten Sensor kaufen und die Nutzung der Infrastruktur in Form eines Abonnement. Die Sensoren senden in einem nicht lizenzierten Frequenzbereich von 868 MHz, wobei jede gesendete Nachricht maximal 12 Byte an Daten beinhalten kann.¹³¹ Das entspricht einer Nachrichtenlänge von 12 Zeichen.¹³² Pro Tag können dabei maximal 140 Nachrichten gesendet werden. Die Daten gehen vom Sensor an naheliegende Basisstationen (Gateways). Für eine bessere Netzstabilität werden die Sensoren an mehrere Basisstationen im Umkreis angeschlossen und nicht nur an ein einzelnes Gateway. Von dort werden die Daten über das Internet an die Sigfox-Cloud weitergeleitet. Hier werden die Nachrichten aller im Netz befindlichen Sensoren gespeichert und an den jeweiligen Sigfox-Benutzer weitergeleitet, so dass er auf seine Daten zugreifen kann. Über Schnittstellen können diese weiter an eine gewünschte Plattform weitergeleitet werden.¹³³ Im IoT-Fünf-Layer Modell würden die Sensing, Applications und Business Layer vom Kunden und die Layer Network und Middleware von Sigfox betrieben werden. Der Vorteil bei dieser genutzten Technologie ist, dass der Kunde sich nicht mit dem Aufbau eines Netzwerks beschäftigen muss. Es müssen lediglich Sensor und die Nutzungsgebühr bezahlt werden. Diese Nutzungsgebühr beläuft sich im privaten Bereich zwischen 5,50€ bis 9,00€ pro Gerät, je nachdem wie viele Nachrichten pro Tag versendet werden sollen (2 bis 140 Nachrichten). Die Nutzungsdauer beträgt ein Jahr und es können im privaten Bereich bis zu 1.000 Geräte dazu gebucht werden. Dies wiederum wäre auch ein Nachteil, da die Kosten jährlich bezahlt werden müssen und bei voller Auslastung von 1.000 Geräten bis zu ca. 10.000€ kosten können.¹³⁴ Hier sollte jedoch bei der Wahl der Technologie ggf. ein Angebot für Organisationen eingeholt und eine Kostengegenüberstellung zu anderen Herstellern mit Aufbau und Betrieb erstellt werden.

Ein weiterer Nachteil ist, dass die Daten nicht direkt auf den eigenen Servern abgelegt werden, sondern den Umweg über die Sigfox-Cloud nehmen. Zwar wird in diesem Fall die Sicherheit suggeriert, jedoch kann dies bei Hackerangriffen eine Sicherheitslücke darstellen. Vor allem bei kritischen Daten sollte dies stets berücksichtigt werden.

Eine weitere Möglichkeit ein LPWAN aufzubauen bildet die von Semtech hergestellte Long Range (LoRa) Technologie.¹³⁵ Im IoT-Fünf-Layer Modell regelt diese den Ablauf des Physical Layers. Durch die Hinzunahme der zwei darüber liegenden Layer wird das Netzwerk komplettiert. Diese Systemarchitektur wird auch als LoRa Wide Area Network (LoRaWAN) bezeichnet.¹³⁶ Auf die genaue Funktionsweise der Fre-

¹³¹Vgl. Sigfox Germany GmbH (Hrsg.) (2022b).

¹³²Vgl. Sigfox (Hrsg.) (2022).

¹³³Vgl. Sigfox Germany GmbH (Hrsg.) (2022b).

¹³⁴Vgl. Sigfox Germany GmbH (Hrsg.) (2022a).

¹³⁵Vgl. growth with attitude UG (Hrsg.) (2022a).

¹³⁶Vgl. growth with attitude UG (Hrsg.) (2022b).

quenzübertragung soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Daher werden nur die Besonderheiten näher betrachtet. So können bspw. übertragene Nachrichten eine Größe von maximal 243 Bytes haben.¹³⁷ Die typische Netzwerkarchitektur ist eine Sterntopologie.¹³⁸ Des Weiteren lassen sich die Nodes, bzw. das Verhalten dieser, in drei Klassen unterteilen. Diese Klassen lauten: A, B und C. Im Wesentlichen unterscheiden sich diese in der Möglichkeit Daten vom Gateway zu empfangen (Downlink). Im Grunde sind hiermit Befehle gemeint, wie die Änderung von Geräteparametern. Klasse A Geräte können nach jedem Uplink während eines kurzen Zeitfensters Daten vom Gateway empfangen. Klasse B Geräte schalten automatisch zu festgelegten Zeiten einen Downlink frei und Klasse C Geräte bieten jederzeit diese Möglichkeit. Die Wahl der Klasse hat Einfluss auf den Energieverbrauch des jeweiligen Node. Klasse A Geräte haben demnach den niedrigsten und Klasse C den höchsten Energieverbrauch.¹³⁹ Hier liegt es im Sinne des Nutzers, eine für seinen Use-Case passende Klasse auszuwählen. Wird eher selten eine Interaktion mit dem Node notwendig sein sind Klasse A Geräte eher geeignet. Wird wiederum ein Zugriff zu jeder Zeit nötig sein sind Klasse C Geräte die bessere Wahl.

Um LoRa und das zugehörige Netzwerk LoRaWAN als Standard zu etablieren, hat sich 2015 die sogenannte LoRa Alliance gegründet. Neben dem Ziel der Standardisierung des Internets der Dinge soll vor allem die Interoperabilität der Produkte zugehöriger Mitglieder gestärkt werden.¹⁴⁰ Ähnlich der Connectivity Standards Alliance existieren verschiedene Mitgliedsstufen. Gestaffelt in unterschiedlichen Beitragshöhen können höher gestellte Mitglieder Einfluss auf die Entwicklung des Standards nehmen und einen Sitz im Aufsichtsrat erhalten. Weiterhin gibt es auch die Möglichkeit nicht zahlendes Mitglied im Rahmen einer Institution zu werden.¹⁴¹ Die Nutzung eines Netzwerks kann in verschiedenen Formen betrieben werden. Die Wahl liegt hierbei zwischen privaten, öffentlichen und von einer Community betriebenen Netzwerken.¹⁴² Ein Mitglied der Allianz, die zwei der drei Typen anbietet, ist *The Things Network*. In diesem partizipieren private Personen und Institutionen um ein globales offenes LoRaWAN zu ermöglichen (Community Netzwerk). Die Mitgliedschaft ist kostenlos. Interessierte Personen haben die Möglichkeit eine niedrig begrenzte Anzahl an Geräten an das Netzwerk anzuschließen. Für kommerzielle Projekte von Unternehmen bietet sich das von denselben Betreibern errichtete *The Things Industry* an.¹⁴³ Es ist nicht ersichtlich, ob das öffentliche Netzwerk weiterhin genutzt wird.

¹³⁷Vgl. Mekki, K. et al. (2018), S. 414.

¹³⁸Vgl. growth with attitude UG (Hrsg.) (2022b).

¹³⁹Vgl. Herrero, R. (2022), S. 195-196.

¹⁴⁰Vgl. LoRa Alliance (Hrsg.) (2022a).

¹⁴¹Vgl. LoRa Alliance (Hrsg.) (2022b).

¹⁴²Vgl. LoRa Alliance (Hrsg.) (2022c).

¹⁴³Vgl. The Things Industries B. V. (Hrsg.) (2022).

Es besteht die Möglichkeit sein eigenes privates Netzwerk aufzubauen und zu betreiben. Jedoch sollten hier die Kosten für Anschaffung und Inbetriebnahme berücksichtigt werden. Neben dem Netzwerk als solches müssen auch die dazugehörigen Datenbanken geschaffen werden. Es bleibt daher immer abzuwägen, ob ein komplettes Netzwerk mit Inbetriebnahme und Wartung sowie die dazugehörige Datenbanken inklusive Soft- und Hardware selbst erstellt oder ob diese teilweise gekauft bzw. gemietet werden können.

Das letzte Beispiel forciert eine weitere Möglichkeit die Netzwerkinfrastruktur zu mieten. Die Technologie Narrowband IoT (NB-IoT) wurde vom 3rd Generation Partnership Project basiert auf dem Mobilfunkstandard Long Term Evolution (LTE). Durch eine Erweiterung an den jeweiligen Funkmasten können diese mit NB-IoT ausgestattet werden.¹⁴⁴ Klassische Mobilfunknetze haben den Nachteil, dass diese nicht durch dickere Wände oder in tiefere Ebenen gelangen können.¹⁴⁵ Im Gegensatz zu anderen Standards agiert NB-IoT nicht in nicht lizenzierten Frequenzbereichen. Die Verbindung zwischen Node und Gateway findet im lizenzierten LTE Bereich statt.¹⁴⁶ Die Mobilfunkmasten agieren dabei als Gateway, welche die Daten auf die Server transportieren. Die weiteren Vorteile, wie niedriger Energieverbrauch und breite Abdeckung, sind verglichen den anderen LPWAN identisch.¹⁴⁷ Ein Alleinstellungsmerkmal ist jedoch, dass die Übertragung durch Mobilfunk unterstützt wird. Zwar muss zum Betreiben des Netzwerks ein Mobilfunkanbieter ausgewählt werden, jedoch sind Mobilfunkmasten größtenteils innerhalb einer Stadt verbaut. Es handelt sich dabei um eine bereits vorhandene Technologie, die ggf. nur erweitert werden muss. Dies macht es für Use-Cases interessant bei denen der Aufbau eines Netzwerkes kompliziert ist¹⁴⁸ und auf ein bereits vorhandenes zurückgegriffen werden sollte (bspw. ländliche Regionen).

Es wurden drei verschiedene LPWAN Anbieter und deren Produkte sowie eine alternative Technologie vorgestellt. Die konkreten Sicherheitsmechanismen der einzelnen Anbieter wurden bewusst nicht näher betrachtet. Diese sollten jedoch in einem Penetrationstest für den jeweiligen Use-Case auf die Sicherheitsanforderungen getestet werden und könnten im Rahmen einer weiterführenden Arbeit betrachtet werden. Bei der Wahl der Technologie sollte ein Anforderungskatalog erstellt werden, in dem der Nutzer seine wichtigen Faktoren auflistet, damit anhand dieser ein quantitativer Vergleich stattfinden kann. Es ist nicht zwingend notwendig sich bei der Wahl auf nur eine Technologie zu fokussieren. Dank der genutzten Middleware ist es auch möglich mehrere Anbieter, bzw. Technologien zu nutzen und diese dann zusammenzuführen. Die genaue Verfahrensweise einer Middleware wird exemplarisch an einem Anbieter

¹⁴⁴Vgl. Herrero, R. (2022), S. 203.

¹⁴⁵Vgl. Hassan, M. B. et al. (2020), S. 124.

¹⁴⁶Vgl. Syed, A. S. et al. (2021), S. 447.

¹⁴⁷Vgl. Hassan, M. B. et al. (2020), S. 124.

¹⁴⁸Vgl. Hassan, M. B. et al. (2020), S. 142.

im Kapitel 3.7 erörtert. Des Weiteren ist es wichtig zu identifizieren, wie die erhobenen Daten weiterverarbeitet werden. Dies ist das Thema des nächsten Unterkapitels.

3.5 Datenbanksystem

Durch die jeweiligen Nodes im LPWAN werden Daten erhoben und ins Netzwerk weitergeleitet. Damit diese Daten nicht nur erhoben, sondern auch genutzt werden können, sind Datenbanksysteme notwendig. Dort werden Daten abgespeichert, verarbeitet und zur weiteren Nutzung bereitgestellt. Dabei besteht ein Datenbanksystem aus zwei Modulen. Das Datenbank-Managementsystem (DBMS) regelt die Zugriffe und die Verwaltung. Die eigentliche Datenbank (zur genaueren Begriffsabgrenzung auch Datenbasis) enthält die eigentlichen Daten.¹⁴⁹ Datenbanksysteme sollen mehrere Funktionen erfüllen:¹⁵⁰

- Langfristige Speicherung,
- Verwaltung großer Datenbestände,
- Definierung eines Datenbankmodells,
- Bereitstellung einer Datenbanksprache und Transaktionskonzepts,
- Mehrbenutzerzugriff und
- Datensicherheit.

Durch die langfristige Speicherung soll gewährleistet sein, dass Daten auch zu einem späteren Zeitpunkt abrufbar sind und nicht nach ihrer Erhebung verloren gehen. Da sich im Laufe der Zeit eine große Menge an Daten ansammelt und generell verschiedene Bereiche abgedeckt werden, können die Datenbestände umfangreich ausfallen. Das führt dazu, dass diese systematisch abgelegt werden müssen. Daher entstehen zwischen den Daten Beziehungen, welche durch ein Datenbankmodell veranschaulicht werden können. Die Datenbanksprache und das Transaktionskonzept regeln den Austausch eines Nutzers mit der Datenbank. Die Sprache regelt dabei die Weise, wie mit dem System kommuniziert wird und das Transaktionskonzept überwacht die korrekte Durchführung. Aufgrund der für mehrere Bereiche relevante Daten sollte auch ein Mehrbenutzerzugriff möglich sein. Dies ist vor allem wichtig, wenn zwei Nutzer auf dieselben Daten zugreifen möchten und diese ggf. abändern. Dadurch wird gewährleistet, dass die Daten beiden Nutzern bereitgestellt werden würden. Die Datensicherheit deckt mehrere Perspektiven ab. Zum einen sollen die Daten vor einem unerlaubten Zugriff geschützt, zum anderen vor Fehlern durch Nutzer gesichert werden. Auch bei eventuellen Störungen oder Systemabstürzen sollen die Daten abgesichert sein.

Das Transaktionskonzept gibt des Weiteren vor in welchem Rahmen der Nutzer auf die Daten zugreifen kann. Dies kann zum Beispiel das Speichern neuer Daten sein (Create), das reine Lesen ohne diese zu ändern (Read), das Verändern von bestehenden Da-

¹⁴⁹Vgl. Jarosch, H. (2016), S. 18.

¹⁵⁰Vgl. Saake, G. et al. (2010), S. 9.

ten (Update) oder das Löschen (Delete) sein.¹⁵¹ Dafür muss das Transaktionskonzept bei einem Zugriff mehrere Merkmale erfüllen, welche auch als *ACID* bekannt ist. Bei der Atomizität (Atomicity) darf eine Transaktion, bestehend aus mehreren Operationen, nur komplett oder gar nicht ausgeführt werden. Sollte es während der Transaktion einen Fehler geben, so müssen alle vorangegangenen Operationen rückgängig gemacht und auf den Pre-Transaktionszustand zurückversetzt werden. Die Konsistenz (Consistency) regelt, dass nach der Transaktion die Datenbank in einem widerspruchsfreien Zustand sein muss. Ein Beispiel könnte sein, dass Buchstaben in einem Zahlenfeld stehen und dadurch ein Widerspruch erzeugt werden würde. Bei der Isolation sollen alle Transaktionen unabhängig voneinander durchgeführt werden. Erst nach Abschluss ist diese für weitere Transaktionen einsehbar. Mit der Beständigkeit (Durability) wird geregelt, dass eine erfolgreiche Transaktion nur durch eine weitere Transaktion rückgängig gemacht werden kann.¹⁵²

Im Hinblick auf die Erstellung einer Mikroklima-Analyse sollte ein Datenbanksystem die oben genannten Kriterien erfüllen. Mehrere Nutzer sollen auf das System zugreifen und Daten ggf. abändern können, falls Fehler vorliegen. Vor allem die längerfristige Speicherung ist für eine Analyse essentiell, da erst bei der Betrachtung eines längeren Zeitraums Aussagen getroffen werden können. Das Datenbanksystem sollte für die Tätigkeit im Middleware Layer verankert werden, so dass nachgelagerte Layer die Daten zur Verfügung gestellt bekommen, jedoch keinen Schreibzugriff direkt in der Datenbank als solche haben. Bevor ein Datenbanksystem entworfen wird ist es notwendig den Unterschied zwischen Datenbanken und deren Sprachen zu kennen. Daher werden weiterführend die beiden Typen Structured Query Language (SQL) und Not only SQL (NoSQL) näher betrachtet.

3.5.1 Relationale Datenbanken

SQL wird als Datenbanksprache genutzt, um mit relationalen Datenbanken zu interagieren.¹⁵³ Bei relationalen Datenbanken werden Informationen in Tabellen gespeichert. Eine Tabelle besteht dabei aus einem Namen und einzelnen Tabellenspalten (Attribute). Dem einzelnen Attribut werden die gewünschten Merkmale aus einem vordefinierten Wertebereich zugeordnet. Diese orientieren sich an den vordefinierten Datentypen. Zur genaueren Identifikation erhält jede Tabelle ein Schlüsselmerkmal mit dem eindeutig ein jeweiliger Datensatz bestimmt werden kann. Eine Zeile in der Tabelle wird auch als Tupel bezeichnet.¹⁵⁴ In Abbildung 5 ist ein Beispiel dargestellt.

¹⁵¹Vgl. Jarosch, H. (2016), S. 15.

¹⁵²Vgl. Bodendorf, F. (2006), S. 8.

¹⁵³Vgl. Steiner, R. (2021), S. 7.

¹⁵⁴Vgl. Meier, A./ Kaufmann, M. (2016), S. 4-5.

Tabelle 5: Beispieldarstellung einer relationalen Datenbank

Sensoren		
ID#	Ort	Adresse
1	Gelsenkirchen	Neidenburger Straße 25
2	Essen	Berliner Platz

„Sensoren“ ist der Name der Tabelle. Die Spalte „ID#“ ist der eindeutige Schlüssel. Dieser darf keinem anderen Sensor in der Datenbank zugewiesen werden, da er sonst nicht mehr eindeutig wäre. In diesem Falle handelt es sich um einen künstlichen Schlüssel. Das Gegenteil wäre ein merkmalsbezogener Schlüssel. In diesem Falle wären Teile der jeweiligen Merkmale im Schlüssel repräsentiert. „Ort“ und „Adresse“ sind die jeweiligen Attribute, die den Sensor näher beschreiben. Hier kann es durchaus möglich sein, dass mehrere Sensoren an derselben Adresse verbaut sind. Eine solche Tabelle wird auch als *Relation* bezeichnet. Dabei muss jede Tabelle einen eindeutigen Tabellennamen besitzen. Die Merkmalsnamen müssen ebenfalls eindeutig sein. Die Spalten und Zeilen können beliebig erweitert werden und die Reihenfolge ist irrelevant. Ein Merkmal muss jedoch als eindeutiger Identifikationsschlüssel dienen. Ist alles erfüllt handelt es sich um ein Relationenmodell, bzw. um eine relationale Datenbank.¹⁵⁵ Diese weist verschiedene Eigenschaften auf. Die Daten werden in Tabellen abgelegt. Die Architektur des Systems trennt die eigentliche Datenbank vom Anwendungsprogramm. Die verwendete Sprache ist SQL. Zu jeder Zeit sind die Daten vor unbefugter Manipulation geschützt und es können keine fehlerhaften Transaktionen durchgeführt werden.¹⁵⁶ Für eine effizientere Speichernutzung wird eine relationale Datenbank normalisiert. Dafür werden die einzelnen Datenbestände auf das Wesentlichste reduziert. Diese Normalisierung verläuft dabei in drei Stufen, oder auch Formen genannt. Dies hat die Folge, dass einzelne Merkmale einfache Werte aufweisen (1. Normalform). In der 2. Normalform werden Datentabellen erstellt, die aus mindestens zwei Schlüsseln bestehen und die dazu gehörigen Merkmalen voll von diesen abhängig sind. In der 3. Normalform sind die Tabellen soweit bereinigt, dass die Merkmale nur vom Schlüssel, bzw. mehreren Schlüsseln, und keinem anderen Merkmal abhängig sind.¹⁵⁷

Die Speicherung von relationalen Datenbanken ist aufgrund der Tabellendarstellung einfach zu verstehen und durch die Normalisierung auf das Nötigste reduziert. Falls jedoch über einen längeren Zeitraum Daten erhoben werden und sich so große Datenbestände ansammeln sollte eine Alternative betrachtet werden, die ggf. mit den vorgestellten Prinzipien bricht.

¹⁵⁵Vgl. Meier, A./ Kaufmann, M. (2016), S. 5-6.

¹⁵⁶Vgl. Meier, A. (2018), S. 9-10.

¹⁵⁷Vgl. Steiner, R. (2021), S. 57-59.

3.5.2 NoSQL Datenbanken

Bei NoSQL handelt es sich nicht um eine Datenbanksprache wie SQL, sondern meint dabei Datenbanksysteme die nicht relational sind.¹⁵⁸ Dazu zählen verschiedenste Architekturen, wie z. B. Dokumentenspeicher (Document Stores), spaltenorientierte Datenbanken (Column-oriented) und Graphendatenbanken.¹⁵⁹ Es gibt noch eine Vielzahl mehr, jedoch sollen diese drei exemplarisch aufgezeigt werden. NoSQL Datenbanksysteme definieren sich vor allem dadurch, dass sie zum einen nicht relational sind. Zum anderen sind sie auf eine hohe Skalierbarkeit ausgerichtet. Bei der Planung steht bereits fest, dass diese im Laufe der Zeit erweitert werden müssen, es aber noch nicht feststeht, in welcher Form. Dies bringt Flexibilität mit sich. Dazu kommt, dass die Daten auf mehrere Rechner verteilt werden, um eine höhere Rechnerleistung zu erzielen.¹⁶⁰ Ausgelegt sind diese Datenbanksysteme für Datenbestände, die Big Data¹⁶¹ zugerechnet werden.¹⁶² Das Datenmodell ist eher schwach ausgestaltet, bzw. hat kein festes Schema. Im Vergleich zu einer relationalen Datenbank sind die Merkmale beliebig erweiterbar oder können gekürzt werden. Durch die Verteilung auf mehreren Speicherplätzen, werden Daten an verschiedenen Stellen repliziert. Dadurch ist das ACID Modell nicht mehr korrekt und wird durch ein alternatives Modell ersetzt, das sogenannte *BASE-Modell*.¹⁶³ BASE steht für Basically available, Soft state, Eventually consistent. Durch die Verteilung der Daten und das Agieren mit mehreren Rechnerknoten kann es vorkommen, dass Daten durch Transaktionen oder Ausfall nicht erreichbar sind. *Basically Available* meint, dass die Daten an einem Knoten meistens verfügbar sein sollten. Durch die Verteilung kommt es auch dazu, dass die Daten noch nicht alle aktualisiert worden sind und dadurch keine Konsistenz gewährleistet ist. Daher wird von *Eventually Consistent* gesprochen. Durch diese Unsicherheit ergibt sich, dass Daten richtig sein können, aber es nicht sein müssen (Soft State).¹⁶⁴

In einem Dokumentenspeicher basiert die Datenbank auf einzelnen Sammlungen, welche wiederum auf einzelnen Dokumenten basieren. Diese haben keine direkte Beziehung zueinander. Dabei können die Inhalte bereits strukturiert oder semistrukturiert sein. Gleichzeitig wird eine höhere Skalierung und Replikation unterstützt. Dies bildet einen Vorteil gegenüber relationalen Datenbanken, da hier mehr Auswahl von den zu speichernden Daten besteht. Die Speicherung erfolgt schemenfrei. Das bedeutet, dass die Merkmale frei erweiterbar sind.¹⁶⁵ Jedoch führt diese Schemenfreiheit dazu, dass

¹⁵⁸Vgl. Meier, A. (2018), S. 9.

¹⁵⁹Vgl. Meier, A. (2018), S. 43.

¹⁶⁰Vgl. Edlich, S. et al. (2010), S. 2.

¹⁶¹Vgl. Kapitel 3.6

¹⁶²Vgl. Meier, A. (2018), S. 12.

¹⁶³Vgl. Edlich, S. et al. (2010), S. 2.

¹⁶⁴Vgl. Edlich, S. et al. (2010), S. 35.

¹⁶⁵Vgl. Meier, A. (2018), S. 45-46.

bei der Übertragung in eine relationale Datenbank Merkmale nicht übertragen werden können, da sich einzelne Dokumente voneinander unterscheiden. Eine Sprache, die Dokumentenspeicher unterstützt ist JavaScript Object Notation (JSON) und wird im Kapitel 3.7 näher vorgestellt.

Eine weitere NoSQL Datenbank ist die Graphendatenbank. Anwendungsgebiete sind Bereiche, in denen einzelne reale Objekte in Beziehung zueinander stehen. Das können bspw. soziale Netzwerke, Navigations- oder Geoinformationssysteme sein.¹⁶⁶ Das Datenmodell basiert auf drei Komponenten: Knoten, Kanten und deren jeweiligen Eigenschaften.¹⁶⁷ Knoten stellen das eigentliche abzubildende Objekt dar und über Kanten sind diese miteinander verbunden. Eigenschaften für Knoten sind vergleichbar mit den Merkmalen in einer relationalen Datenbank. In Kanten und deren Eigenschaften würden die Beziehungen abgelegt werden. Das wäre vergleichbar mit einer relationalen Datenbanktabelle in der 2. Normalform. Wie bereits erwähnt steht die Untersuchung der Beziehungen im Vordergrund. Da in einer Mikroklima-Analyse eher die Messungen von Interesse sind wird diese Form der Datenbank nicht näher betrachtet.

Die letzte vorzustellende NoSQL Datenbank ist die spaltenorientierte Datenbank. Anders als bei einer relationalen Datenbank, in der die Daten in der jeweiligen Zeile gesichert werden, wird bei einer spaltenorientierten Datenbank der Inhalt in einer Spalte gespeichert.¹⁶⁸ In Tabelle 6 ist ein Beispiel der transponierten Tabelle 5.

Tabelle 6: Beispieldarstellung einer spaltenorientierten Datenbank

Sensoren		
ID	1	2
Ort	Gelsenkirchen	Essen
Adresse	Neidenburger Straße 25	Berliner Platz

Bei der spaltenorientierten Datenbank ist ein Vorteil, dass eine Analyse der einzelnen Merkmale schneller durchgeführt werden kann. Ein Nachteil ist dabei, dass das Einfügen neuer Daten, sowie das generelle Auslesen längere Zeit in Anspruch nimmt.¹⁶⁹

NoSQL Datenbanken bieten verschiedene Vorteile. Ein besonderer Aspekt ist vor allem die Flexibilität, hohe Skalierbarkeit und Schemenfreiheit von Dokumentenspeicher. Da bei einer Mikroklimaanalyse neue Sensoren oder externe Daten dazukommen können, sollte die Betreuung mehrerer Datenbankarten als Möglichkeit angesehen werden. Dadurch können die Vorteile der jeweiligen Datenbanken genutzt und die Nachteile ggf. kompensiert werden.

¹⁶⁶Vgl. Edlich, S. et al. (2010), S. 170.

¹⁶⁷Vgl. Edlich, S. et al. (2010), S. 172.

¹⁶⁸Vgl. Edlich, S. et al. (2010), S. 53.

¹⁶⁹Vgl. Edlich, S. et al. (2010), S. 53.

3.5.3 Datenbankentwurf

Bevor ein Datenbanksystem tatsächlich in Betrieb genommen wird sollte im Vorfeld eine Planung stattfinden. Vor allem bei Projekten, die Daten aus verschiedenen Quellen beziehen und sich im Laufe der Zeit noch weiterentwickeln können. Die folgenden Schritte geben einen groben Überblick über die Arbeitsschritte:¹⁷⁰

1. Datenanalyse
2. Erstellung konzeptioneller Datenbankentwurf
3. Erstellung logischer Datenbankentwurf
4. Erstellung physischer Datenbankentwurf
5. Echtbetrieb

In der Phase der Datenanalyse werden relevante Informationen des zu betrachtenden Sachverhaltes schriftlich festgehalten. Ziel ist es den Zweck der Datenbank herauszustellen. Hiermit ist nicht die Speicherung als solche gemeint, sondern der Zweck dem die Speicherung dient. Dies bildet die theoretische Grundlage der Datenbank.¹⁷¹ Hier ist es außerdem wichtig die Fachanwender, bzw. Experten des Themas miteinzubeziehen, da sie häufig über einen besseren Überblick verfügen.¹⁷² In der nächsten Phase (Erstellung konzeptioneller Datenbankentwurf) wird geprüft, wie die Daten miteinander in Beziehung stehen. Ziel ist, die einzelnen Daten aus einer globalen Perspektive zu betrachten und die Anforderungen herauszufiltern. Dies kann unter Hinzunahme der verschiedenen Datenbanken passieren. Das Ergebnis dieser Phase geht in die Erstellung eines logischen Datenbankentwurfes ein. An dieser Stelle würden die jeweilig notwendigen Datenbankarten technisch realisiert und geprüft, ob die Anforderungen erfüllt werden. Sollte dies der Fall sein wird ein physischer Datenbankentwurf erstellt. Dieser würde in etwa der zukünftigen Datenbank entsprechen, jedoch sollten die Fachanwender und Experten das System überprüfen und abnehmen. Sollten die vorherigen Phasen alle erfolgreich abgeschlossen werden, wird das System in den Echtbetrieb genommen.¹⁷³ Wichtig ist vor allem die Überprüfung der Anforderungen in Bezug auf die Eigenschaften der einzelnen Datenbanken, sowie die iterative Vorgehensweise. Sollte in einer vorherigen Phase ein Fehler oder eine Diskrepanz auftreten, sollte die Möglichkeit bestehen zurück zu dieser Phase zu gehen und sich eine geeignetere Möglichkeit zu überlegen.

Eine Datenbank erfüllt die Funktion Daten über einen längeren Zeitraum zu speichern. Dabei wird die Datenbasis immer größer. Im Falle von verschiedenen parallel laufenden Datenerhebungen erhöht sich das Tempo in dem Daten gespeichert werden. Auf diese Weise entstehen große Datenbestände, deren Umgang eine eigene Kategorie bil-

¹⁷⁰Vgl. Herrmann, F. (2018), S. 8.

¹⁷¹Vgl. Herrmann, F. (2018), S. 8.

¹⁷²Vgl. Meier, A./ Kaufmann, M. (2016), S. 86.

¹⁷³Vgl. Herrmann, F. (2018), S. 8-9.

det. Diese werden im nächsten Kapitel näher betrachtet.

3.6 Big Data

Beim Datenbankentwurf sollte bereits eine Vorstellung darüber existieren, welche Mengen an Daten gespeichert werden sollen. Da in dem hier vorgestellten Use-Case im besten Fall verschiedene Datenquellen einfließen, Daten über einen längeren Zeitraum generiert und verschiedene Datenstrukturen gespeichert werden, wird im folgenden Kapitel das Konzept von Big Data näher vorgestellt.

Big Data fokussiert die Speicherung von verschiedenen Datenstrukturen und übersteigt in der Größe die klassische Datenhaltung in Form von relationalen Datenbanken. Es haben sich fünf Charakteristika, auch bekannt als 5 V's, herausgebildet:¹⁷⁴

- Volume,
- Variety,
- Velocity,
- Value und
- Veracity.

Fallen in einer Datenbank große Datenbestände (mindestens Terabytebereich) wird das charakteristische *Volume* erreicht. Werden herkömmliche Datensätze im Vergleich zu ihrer Größe betrachtet, kann festgestellt werden, worum es sich bei einer große Datenmenge handelt. Oft werden verschiedene Bereiche über einen längeren Zeitraum repräsentiert. Vor allem im Bereich der Smart City, wo verschiedene Datenquellen für die einzelnen Anwendungen erhoben werden, fallen große Datenmengen an.¹⁷⁵ *Variety* beschreibt die Vielfalt der vorhandenen Daten. Dabei kommen diese aus verschiedenen Quellen und weisen verschiedene Strukturen auf. Wie bereits erwähnt bilden strukturierte Daten nur einen Teil. Dazu kommen unstrukturierte und semistrukturierte Daten, die vor allem eine andere Art der Speicherung als strukturierte Daten benötigen. Unter *Velocity* wird die Geschwindigkeit der Auswertung und Analyse verstanden. Für bestimmte Anwendungen sind Echtzeitanalysen essentiell. In der Analyse von kritischen Infrastrukturen ist eine verzögerte Auswertung kontraproduktiv und nicht im Sinne der Anwendung. Der Wert (*Value*) von Big Data liegt im Anwendungsbereich. Die alleinige Speicherung von Daten erstellt dabei keinen konkreten Wert. Dieser wird erst durch die jeweiligen Anwendungen kreiert. Dabei wird unterschieden, wie die Daten genutzt werden. Bei einer harten Aufteilung wird zwischen Vergangenheits- (Retrodiktion) und Zukunftsbetrachtung (Prädiktion) unterschieden.¹⁷⁶ Bei der Retrodiktion sollen Daten mit Vergangenheitsbezug den ehemaligen Zustand näher beschreiben und ggf. begreifbar machen. Bei der Prädiktion sollen zukünftige Ereignisse auf Basis ver-

¹⁷⁴Vgl. Fasel, D./ Meier, A. (2016), S. 5-6.

¹⁷⁵Vgl. Al Nuaimi, E. et al. (2015), S. 3.

¹⁷⁶Vgl. Dinov, I. D./ Velev, M. V. (2022), S. 10.

gangener Daten vorhersagbar werden. Die aktuelle Ist-Situation würde in dem Fall beiden zugehörig sein. Aktuelle Zustände werden in der Regel beschrieben, um ggf. eine Prädiktion zu ermöglichen. Daher wird in dieser Arbeit die Funktion der einzelnen Betrachtungen als Erstellung eines Werts angesehen. Eine Form wäre die Beschreibung von Zuständen (aktueller und vergangener Zustand) sowie die Ermöglichung von Prädiktion. Wie genau die Erkenntnisse genutzt werden ist abhängig von den jeweiligen Anwendungsfällen. *Veracity* beschreibt die Problematik, die bei großen Datenmengen entsteht. Nicht jeder Datensatz besitzt eine hohe Qualität oder Aussagekraft. Daher ist es wichtig qualitativ hochwertige Daten zu erkennen und eher zu berücksichtigen.¹⁷⁷ Da die vorgestellten Charakteristika bei einer großen Menge an komplexen Daten erfüllt sind, sollte diskutiert werden, ob es sinnvoll ist alle Use-Cases einer Smart City in einem solchen Format zugänglich zu machen. Im klassischen Fall sind die einzelnen Datensätze verteilt auf verschiedenen Datenbanken abgelegt, so dass diese nur per Hand miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Zum einen kann dies auch sinnvoll sein, weil die einzelnen Datensätze keinen Bezug zu einander haben (Scheinkorrelationen würden vermieden werden). Zum anderen kann es durchaus vertretbar sein, die Daten miteinander in Bezug zusetzen, um ggf. neue Erkenntnisse und einen Mehrwert zu generieren. Ein Konzept, das dies ermöglicht ist das *Data Warehouse*. Daher wird im Folgenden geprüft, was genau das Konzept besagt, wo ggf. seine Grenzen sind und was es für Alternativen geben kann.

3.6.1 Data Warehouses

Ein Data Warehouse führt Daten aus einzelnen Datenbanken zusammen und stellt diese für Analysezwecke bereit. Die Herausforderung an ein solches System liegt an dem zu verarbeitenden Datenvolumen und der Integration von heterogenen Daten. Ausgelöst durch die Größe der zu untersuchenden Datenbanken wird eine effiziente Speicherung und Verwaltung benötigt. Dadurch soll ermöglicht werden, die Daten in einem Zeitbezug zu untersuchen. Dies wird bei Datenbeständen notwendig, die über einen längeren Zeitraum erhoben worden sind. Das Ziel besteht in der Vereinheitlichung, Verknüpfung und Zusammenführung von Daten. Auf diese Weise wird eine Analyse möglich. Dies wird durch die Charakteristika verdeutlicht. Ein Data Warehouse ist fachorientiert, besitzt eine nicht flüchtige und integrierte Datenbasis, welche zeitbezogene Daten analysiert. Die Fachorientierung bezeichnet dabei den Zweck des Data Warehouses. Es soll sich an einem spezifischen Analyseziel orientieren. Eine integrierte Datenbasis entsteht durch die Verknüpfung mehrerer diverser Datenquellen. Damit sind sowohl interne, als auch externe Datenquellen gemeint. Diese Datenbasis bleibt stets erhalten und wird nicht durch Abrufe oder Manipulation geändert. Die Datenbasis ist dadurch nicht flüchtig. Durch das bereits vorgestellte große Datenvolumen

¹⁷⁷Vgl. Fasel, D./ Meier, A. (2016), S. 6.

können die Daten in einen zeitlichen Bezug miteinander verglichen werden.¹⁷⁸ Relationale Datenbanken haben den Vorteil Informationen effizient zu speichern und dass Transaktionen auf diesen schnell durchführbar sind. Da in ein Data Warehouse mehrere Datenbanken einfließen, wird das klassische Datenbankkonzept abgeändert.¹⁷⁹ Aufgrund der Komplexität an Fragen, die beantwortet werden sollen, hat sich eine multidimensionale Datenmodellierung etabliert. Dies wird dadurch erreicht, indem Daten in n-Dimensionen angelegt und betrachtet werden. „n“ steht dabei für die Anzahl an einzelnen betrachteten Attribute. Diese können sich in unterschiedlich aggregierten, bzw. konzentrierten, Zuständen befinden. Alternativ werden diese multidimensionalen Datenmodellierungen auch Datenwürfel genannt.¹⁸⁰ Die grobe Architektur eines Data Warehouse ist in Abbildung 5 dargestellt.

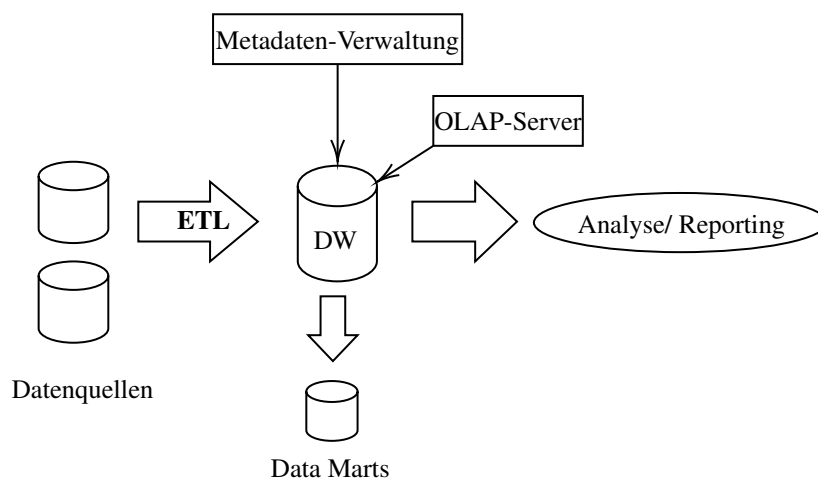


Abbildung 5: Grobe Data Warehouse Architektur¹⁸¹

In ein Data Warehouse (DW) fließen die Daten von verschiedenen Datenbanken ein. Bevor die Daten in der Basisdatenbank des Data Warehouses vorhanden sind müssen diese extrahiert, transformiert und geladen werden (ETL).¹⁸² Die Extraktion dient dazu, das Data Warehouse mit relevanten Daten zu versorgen. Hierbei werden nur die Daten aus den jeweiligen Systemen gewählt, die relevant für das übergeordnete Analysezziel sind. Der Zeitpunkt der Extraktion kann entweder zu festen Zeiten (periodisch), ereignisgesteuert oder bei Benutzung erfolgen. Je nach Datenquelle kann diese auch signalisieren, dass aktualisierte Daten zur Verfügung stehen und so eine Aktualisierung der Datenbasis auslösen.¹⁸³ Bei der Transformation werden die Daten jeweils in ein Format codiert und in die kleinsten einzelnen Bestandteile zerlegt, damit eine Konsistenz erreicht wird. Fehlende oder falsche Daten werden auf Grundlage von Algo-

¹⁷⁸Vgl. Saake, G. et al. (2010), S. 619-621.

¹⁷⁹Vgl. Farkisch, K. (2011), S. 11.

¹⁸⁰Vgl. Vaisman, A./ Zimányi, E. (2022), S. 46.

¹⁸¹Eigene Darstellung in Anlehnung an Saake, G. et al. (2010), S. 622.

¹⁸²Vgl. Saake, G. et al. (2010), S. 624.

¹⁸³Vgl. Farkisch, K. (2011), S. 60-62.

rithmen erkannt und automatisch gelöscht. Je nach Anforderung des Data Warehouses werden diese anschließend gefiltert.¹⁸⁴ Dies fördert zum einen eine hohe Datenqualität und zum anderen die Performance. Im letzten Schritt werden die so extrahierten und aufbereiteten Daten in die Basisdatenbank des Data Warehouses geladen.¹⁸⁵ Mit dem Hintergrund, dass mehrere Datenquellen einbezogen werden ist dieser Prozess wichtig. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass die Daten einheitlich im Data Warehouse abrufbar sind.

Die Metadaten-Verwaltung bildet einen weiteren wichtigen Baustein für ein Data Warehouse. Hier werden Informationen der abgerufenen Daten gespeichert, wie z. B. Datenstruktur, -formate und -typen sowie Herkunft und Speicherung der jeweiligen Datenbestände. Des Weiteren wird auch hinterlegt, wie die Daten aufbereitet wurden und welche Version der Daten vorliegen. Auf diese Weise werden die Datenmengen überschaubar und können miteinander auf der Metaebene verglichen werden.¹⁸⁶ Das Online Analytical Processing (OLAP) ist ein Werkzeug zur Untersuchung von multidimensionalen Datenmodellen. Durch die Mehrdimensionalität sind Operationen rechenintensiv und komplex.¹⁸⁷ Daher werden diese auf ein weiteres System ausgelagert.¹⁸⁸ Es gibt noch weitere Arten von Werkzeugen, jedoch sollen diese an dieser Stelle nicht näher erörtert werden. Ein Data Warehouse ist auf die Analyse des gesamten Datenbestandes ausgelegt. Einzelne Abteilungen benötigen lediglich die Übersicht eines bestimmten Sachverhaltes. Diese separaten Perspektiven werden in Data Marts dargestellt.¹⁸⁹ Auf diese Weise wird ein Realitätsausschnitt des jeweiligen Akteurs zur Verfügung gestellt. Das Ergebnis der Datenanalyse wird durch Reporting-, bzw. Analyse-Tools, dem Nutzer dar- und für weitere Verarbeitungen zur Verfügung gestellt.

Data Warehouses werden genutzt, um Daten aus verschiedenen Quellen abzurufen, aufzubereiten und für Analysezwecke zur Verfügung zu stellen. Ein Nachteil ist, dass nur relationale Datenmodelle in ein Data Warehouse aufgenommen werden können.¹⁹⁰ Im Bereich der Big Data liegen diverse Datenarten vor und es liegt ein Anspruch an Echtzeitverarbeitung vor.¹⁹¹ Aus diesem Grund ist es notwendig das Konzept des Data Warehouses zu erweitern, um dann im Anschluss die weiteren Möglichkeiten zu erörtern.

MapReduce und Data Lakes

Um Big Data zu verarbeiten, gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen kann das Sys-

¹⁸⁴Vgl. Farkisch, K. (2011), S. 62-63.

¹⁸⁵Vgl. Farkisch, K. (2011), S. 66.

¹⁸⁶Vgl. Farkisch, K. (2011), S. 45.

¹⁸⁷Vgl. Farkisch, K. (2011), S. 23.

¹⁸⁸Vgl. Saake, G. et al. (2010), S. 623.

¹⁸⁹Vgl. Vaisman, A./ Zimányi, E. (2022), S. 65.

¹⁹⁰Vgl. Saake, G. et al. (2010), S. 624.

¹⁹¹Vgl. Vaisman, A./ Zimányi, E. (2022), S. 562.

tem vertikal (vertical scaling) und zum anderen horizontal (horizontal scaling) skaliert werden. Bei einer vertikalen Skalierung werden dem vorhandenen System mehr Ressourcen zur Verfügung gestellt. Das System wird dadurch leistungsfähiger. Bei einer horizontalen Skalierung wird das vorhandene System auf mehrere Subsysteme aufgeteilt. Jedes Subsystem führt dabei einen Teil des Prozesses durch. Dieses Modell wird auch als *MapReduce* bezeichnet. Auf diese Weise können die einzelnen Teilprozesse parallel erfolgen.¹⁹² Zwar stellt dies eine Möglichkeit dar das vorhandene Big Data Volumen auf mehrere Rechner aufzuteilen, jedoch sind die verschiedenen Strukturen nicht berücksichtigt.

Aufgrund des höheren Aufkommens an semi- und unstrukturierten Daten ist das Data Warehouse Konzept nicht ausreichend. Es werden nur strukturierte Daten in einer relationalen Datenbank anvisiert. Daher ist es notwendig ein weiterreichendes Konzept hinzuzuziehen. In einem *Data Lake* werden interne und externe sowie strukturierte und unstrukturierte Daten abgespeichert. Diese werden für die Speicherung nicht näher aufbereitet und liegen in ihrer jeweiligen Rohform vor. Dadurch ist es möglich den Ansprüchen an Echtzeitverarbeitung gerecht zu werden. Die Struktur der Daten spielt erst bei der Analyse eine Rolle. Auf diese Weise werden flexible Strukturen geschaffen, um komplexere Datenstrukturen zu berücksichtigen. In einem Data Warehouse liegt die Optimierung auf wiederholte Datenbeschaffung und -verarbeitung von vorbestimmten Datenquellen.¹⁹³ In einem Data Lake ist das genaue Ziel für die Datenspeicherung noch nicht bekannt. Es liegt ein Fokus auf der Datenerhaltung. Ein Data Lake ist somit kein Ersatz für ein Data Warehouse, sondern eine Ergänzung. So können beide parallel betrieben werden. Einerseits können die Data Marts eines Data Warehouses unabhängig betrachtet werden, andererseits können die Aufbereitungsergebnisse ebenso in einen Data Lake einfließen. Das bietet den Vorteil, dass parallel noch weitere nicht relationale Datenquellen in den Data Lake aufgenommen werden. Im Anschluss können verschiedene Analyse- und Datenverarbeitungsmethoden, wie z. B. MapReduce, eingesetzt werden.¹⁹⁴

Data Lakes und Data Warehouses sind Methoden zur Sammlung und Speicherung von internen und externen Daten. Dabei profitiert ein System durch die Nutzung beider Technologien und erhält höhere Flexibilität. Einerseits können strukturierte Daten gespeichert und veredelt, andererseits unstrukturierte Daten dem Nutzer zugänglich gemacht werden. Jedoch steht nicht die reine Speicherung im Vordergrund, sondern überlagerte Analyseziele. Die Daten fließen in weitere Systeme ein, um so Analysen durchzuführen.¹⁹⁵ Diese werden im nächsten Kapitel näher betrachtet.

¹⁹²Vgl. Vaisman, A./ Zimányi, E. (2022), S. 562-563.

¹⁹³Vg. Dittmar, C./ Schulz, P. (2022), S. 24-25.

¹⁹⁴Vgl. Vaisman, A./ Zimányi, E. (2022), S. 625-626.

¹⁹⁵Vgl. Vaisman, A./ Zimányi, E. (2022), S. 626.

3.6.2 Business Intelligence

Bei einer *Business Intelligence* handelt es sich um eine Sammlung von Werkzeugen und Systemen, um dem jeweiligen Unternehmen einen Mehrwert zu generieren. Dabei werden Entscheidungsprozesse unterstützt indem Daten gesammelt, gesichert und analysiert werden.¹⁹⁶ Die vorgestellten Speichermöglichkeiten eines Data Warehouses und Data Lakes bilden demnach einen Teil dieser Business Intelligence. Weitere Teilbereiche sind bspw. das Data Mining, Big Data, Reporting, deskriptive und statistische Analysen sowie Datenvisualisierung.¹⁹⁷

Die Business Intelligence spiegelt die strategischen Anforderungen eines Unternehmens wider.¹⁹⁸ Da es sich in dieser Arbeit nicht um ein Unternehmen als solches, sondern um ein kommunales Projekt handelt, muss die Perspektive angepasst werden. Bevor ein klassisches Business Intelligence System aufgebaut wird muss eine entsprechende Datenstrategie vorliegen. Das beinhaltet unter anderem das konkrete Ziel, welches erreicht werden soll.¹⁹⁹ Das ist der Grund, weshalb Daten gespeichert, aufbereitet und weiterverarbeitet werden. Dies können Analysen der Vergangenheit, aktuelle Zustandsberichte (Reporting) oder Zukunftsprognosen, bzw. Simulationen sein. Auf diese Weise wird ein Datenmehrwert kreiert.²⁰⁰ Dieser Datenmehrwert kann auf unterschiedliche Weise in weiteren Entscheidungsprozessen einfließen und diese beeinflussen.²⁰¹ Eine Datenstrategie kann demnach auch auf Use-Cases übertragen werden. Es ist vorab wichtig zu wissen, welche Strategie verfolgt werden soll und wie der konkrete Mehrwert definiert wird.

Im Bereich der Business Intelligence werden die sogenannten Methoden der *Knowledge Discovery in Databases* genutzt. Dabei handelt es sich um die Generierung von Wissen aus Datenbanken.²⁰² Die geläufigste Methode ist das Data Mining. Dabei durchlaufen Algorithmen die Datenbestände um eventuelle Muster festzustellen. Die Aufgaben lassen sich in vier Kategorien aufteilen: Clustering, Klassifikation, Assoziationsanalyse und Generalisierung.²⁰³ Beim Clustering sollen Daten in Gruppen (Cluster) eingeteilt werden, so dass diese innerhalb der Gruppe eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Zu anderen Clustern sollen diese dabei möglichst unterschiedlich sein.²⁰⁴ Dadurch werden Daten sichtbar, die ggf. keinem Cluster zugehörig sind und somit gesondert untersucht werden müssen.

Die Klassifikation ähnelt dem Clustering. Der Unterschied ist jedoch, dass bei der

¹⁹⁶Vgl. Sadiku, M. N. O./ Musa, S. M. (2021), S. 177.

¹⁹⁷Vgl. Sadiku, M. N. O./ Musa, S. M. (2021), S. 179-180.

¹⁹⁸Vgl. Gluchowski, P. et al. (2022), S. 7.

¹⁹⁹Vgl. Gluchowski, P. et al. (2022), S. 9.

²⁰⁰Vgl. Greiner, R. et al. (2022), S. 141.

²⁰¹Vgl. Greiner, R. et al. (2022), S. 153.

²⁰²Vgl. Ester, M./ Sander, J. (2000), S. 1.

²⁰³Vgl. Ester, M./ Sander, J. (2000), S. 4-5.

²⁰⁴Vgl. Ester, M./ Sander, J. (2000), S. 45.

Klassifikation die zu befüllenden Klassen bereits bekannt sind. Die zwei Kernaufgaben sind zum einen die Zuordnung von Daten in einer Klasse, zum anderen die Generierung von Wissen über diese Klasse. Vor allem die zweite Kernaufgabe repräsentiert die Gewinnung von Informationen. Den gebildeten Klassen wird eine übergeordnete Eigenschaft zugeordnet.²⁰⁵ Bei der Assoziationsanalyse sollen Regeln zwischen den Daten herausgearbeitet werden. Ziel ist es Zusammenhänge einzelner Daten zu finden.²⁰⁶ Als Beispiel gibt es eine Datenbank mit einem zeitlichen Verlauf von Sensordaten. Diese haben die Temperatur, Niederschlagsmengen und Windgeschwindigkeit gemessen. Eine Assoziationsanalyse könnte sein, dass bei einer erhöhten Temperatur in einem bestimmten Wertebereich und einer hohen Windgeschwindigkeit die Niederschlagsmengen zunehmen. Mithilfe von einem oder mehreren ausgeprägten Merkmalen wird auf ein anderes Merkmal geschlossen. Die vierte vorgestellte Methode beinhaltet die Generalisierung. Hierbei werden die Daten schrittweise zusammengefasst. Eine solche Zusammenfassung kann aus verschiedenen Perspektiven erfolgen.²⁰⁷ Bspw. können Sensoren die im Stadtgebiet verbaut sind zu unterschiedlichen Stadtteilen und einzelnen Straßen zusammengefasst werden. Denkbar wäre auch eine Zusammenfassung nach zu erhebenden Merkmalen oder nach verbauten Herstellern.

Die vorgestellten Methoden sind nicht abschließend. Darauf aufbauend können diese mit weiteren Faktoren erweitert werden. Bei Hinzunahme von der zeitlichen Dimension kann die Assoziationsanalyse erweitert werden, um häufig auftretenden Sequenzen (Sequential Patterns) zu finden.²⁰⁸ Das Data Mining bildet eine von vielen Methoden um aus Datenbeständen Wissen zu generieren. Die hier genannte Übersicht bildet einen leichten Einstieg in die Thematik. Um Algorithmen und Methoden vorzustellen sind größere Datenbestände notwendig, um die Funktion und die daraus resultierenden Ergebnisse näher zu erörtern. Bei vorhandenen Datenbeständen kann im Rahmen weiterer Arbeiten eine Übersicht an konkreten Methoden gegeben werden.

Eine Business Intelligence ist die Symbiose aus der Hinzunahme von Daten (intern und extern), deren Speicherung, Aufbereitung und Analyse. Hierbei ist wichtig, dass bereits zu Beginn eine Strategie geschaffen wird, was konkret untersucht werden soll. Die konkrete Infrastruktur ergibt sich aus der Strategie. Die daraus resultierende Wahl hat möglicherweise Einfluss auf weitere Use-Cases, weshalb zu Beginn deutlich sein muss, ob sich für ein reines Data Warehouse, ein Data Lake oder ein Hybridsystem entschieden werden sollte. Vor allem die Automatisierung von wiederkehrenden Prozessen sollte miteinbezogen werden. Die Ergebnisse bilden den Mehrwert und nicht die Durchführung der Prozesse.

²⁰⁵Vgl. Ester, M./ Sander, J. (2000), S. 107.

²⁰⁶Vgl. Ester, M./ Sander, J. (2000), S. 159.

²⁰⁷Vgl. Ester, M./ Sander, J. (2000), S. 189.

²⁰⁸Vgl. Ester, M./ Sander, J. (2000), S. 225.

Im IoT-Fünf-Layer Modell sind Teile der Business Intelligence im Business Layer verankert. Dort werden Analysetools und Visualisierungen durchgeführt. Spezifische Daten, die für eine Anwendung wichtig sind, werden im Application Layer genutzt. Je nach Use-Case Komplexität können Prozesse auch im Business Layer durchgeführt werden. Vor allem Prozesse die eine hohe Rechenintensivität aufweisen sollten mehr Rechenleistung erhalten. Das Data Warehouse und ein Data Lake sind im Middleware Layer verankert. Wie bereits erwähnt besteht die Möglichkeit auf interne und externe Datenquellen zuzugreifen. Hier werden Prozesse benötigt, um diese in die Datenspeicherung einzuspeisen. Eine solche Leistung übernimmt die Organisation FIWARE. Diese wird im nächsten Kapitel näher vorgestellt.

3.7 FIWARE und JSON

Die FIWARE Foundation ist eine im Jahr 2016 gegründete Non-Profit-Organisation die sich zum Ziel gesetzt hat offene Standards in der Entwicklung von smarten Handlungsfelder, wie Smart Cities, Smart Energy oder Smart Industry, zu etablieren. Dies soll durch offenen Quellcode (Open Source) gefördert werden. Die entwickelten Lösungen bilden dabei ein nachhaltiges Ökosystem für smarte Use-Cases, die ohne Lizenzen genutzt werden können. Der Fokus liegt auf der Kombination von Technologien des Internets der Dinge, Big Data und Cloud Computing. Auf diese Weise sollen die erhobenen Daten der Endgeräte auf einer Plattform zusammengeführt, analysiert und visualisiert werden. Im Bereich der Smart Cities liegt der Schwerpunkt auf der Interoperabilität von großen Datenmengen aus verschiedenen Datenquellen sowie die Echtzeitverarbeitung.²⁰⁹ Es werden vor allem zwei konkrete Leistungen angeboten.²¹⁰ Zum einen dient das Framework *FIWARE Context Broker* zum Verwalten von Informationsquellen und die weitere Verarbeitung.²¹¹ Zum anderen sind *Smart Data Models* vorhanden, die als Referenzarchitektur für das Framework genutzt werden können.²¹² Da die Smart Data Models für das Framework benötigt werden, wird vorab die Struktur betrachtet.

In einem Smart Data Model sind drei Elemente enthalten: Ein Schema, Spezifikationen und Beispiele. Das Schema repräsentiert die technischen Datentypen und -struktur. In der Spezifikation sind nähere Informationen für den Nutzer gegeben. In den Beispielen ist exemplarisch aufgezeigt, wie das Modell aufgebaut ist.²¹³ Die Daten werden über den Dienst GitHub verbreitet, sodass jeder die Modelle nutzen kann. Die Schemata und Beispiele sind im JSON-Format gespeichert.²¹⁴ Dabei handelt es sich um ein

²⁰⁹Vgl. FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022d).

²¹⁰Vgl. FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022b).

²¹¹Vgl. FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022a).

²¹²Vgl. FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022c).

²¹³Vgl. FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022c).

²¹⁴Vgl. Abella, A. (2022a).

sprachenunabhängiges Datenformat, welches Objekte in für Menschen lesbaren Listen speichert. Die einzelnen Objekte werden mit ihren jeweiligen Eigenschaften abgespeichert. Vorrangig wird dieses Format zur Kommunikation zwischen Server und Client genutzt, aber auch zur Speicherung in NoSQL Datenbanken. Die Syntax baut sich folgendermaßen auf. Auf ein Objekt folgt nach einem Doppelpunkt die jeweilige Eigenschaft. Diese kann folgende Datentypen beinhalten: Nummern (int oder float), strings, boolean, Arrays, Leerwerte (null) oder weitere Objekte. Ein Beispiel ist in Abbildung 6 dargestellt.

```
{
  "name": " Westfaelische Hochschule ",
  "gruendungsjahr": 1992,
  "adresse" : {
    "strasse" : "Neidenburger Strasse 43",
    "stadt" : "Gelsenkirchen",
    "postleitzahl": "45891"}
}
```

Abbildung 6: Beispiel JSON

In diesem Beispiel wird eine Hochschule näher beschrieben. Das Objekt „name“ ist vom Typ *string* und „gruendungsjahr“ vom Typ *int*. Das Objekt „adresse“ setzt sich aus mehreren Objekten zusammen, welche gemeinsam die Adresse genauer angeben. Alle einzelnen Objekte definieren im gemeinsamen Kontext eine eindeutige Hochschule. Durch das Beispiel wird vor allem erkennbar, dass Objekte in weitere aufgeteilt werden können. Diese Aufteilung kann nach Bedarf immer tiefer erfolgen.²¹⁵

In diesem Format veröffentlicht FIWARE diverse Smart Data Models. Im Schema werden die einzelnen Objekte beispielhaft aufgezeigt, die jeweiligen Datentypen hervorgehoben und näher beschrieben. Das Ausfüllen aller Objekte ist nicht zwingend notwendig. Am Ende wird angegeben, welche Objekte ausgefüllt werden müssen.²¹⁶ Zum besseren Verständnis werden Beispiele mitgeliefert, um sich eine bessere Übersicht zu schaffen und um zu zeigen wie eine konkrete Speicherung in der Datenbank aussehen würde.²¹⁷ Auf diese Weise stehen verschiedene benötigte Datenstrukturen für diverse Use-Cases zur Verfügung. Eine weitere Möglichkeit ist es eigene Smart Data Models zu erarbeiten. Dafür bietet FIWARE ein *Data Models Lifecycle*, welcher durch Anleitungen unterstützt wird.²¹⁸

Das von FIWARE bereitgestellte Framework orientiert sich am vom Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) standardisierten Informationsmodell

²¹⁵Vgl. Friesen, J. (2016), S. 133-135.

²¹⁶Im Anhang A2 ist in Abbildung 9 ein Beispielschema gegeben.

²¹⁷Im Anhang A3 ist in Abbildung 10 ein konkretes Beispiel gegeben.

²¹⁸Vgl. FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022c).

Next Generation Service Interface-Linked Data (NGSI-LD). Dabei tragen sie aktiv zur Entwicklung des Standards bei.²¹⁹ Das NGSI-LD Metamodell besteht aus drei Klassen: Eine Entität, eine Beziehung und Eigenschaften.²²⁰ Eine Entität kann bspw. ein reales Objekt repräsentieren.²²¹ Eine Beziehung beschreibt die Verbindung einer Entität zu einer weiteren oder einer Eigenschaft. Dies kann mit der „adresse“ in Abbildung 6 verglichen werden, da diese eine eigene Entität darstellt und die Hochschule eine „adresse“ besitzt. Eigenschaften sind die konkreten Werte, die den einzelnen Objekten zugeordnet werden. Diese grundlegenden Informationen bilden die Struktur der sogenannten *Context Information* (Kontextinformation).²²² Diese sind im *Central Broker* (Broker) verankert. In Abbildung 7 ist die Architektur aufgezeichnet. Die Graphen stellen den Informationsfluss zwischen den einzelnen Komponenten dar.

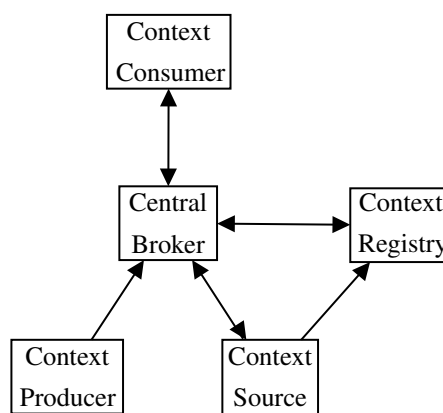


Abbildung 7: NGSI-LD Architektur²²³

Der Broker fungiert als Vermittlung zwischen *Context Producer* (Produzenten) und *Context Source* auf der einen Seite und dem *Context Consumer* (Konsumenten) auf der anderen. Dieser legt die Daten in Datenbanken nach der vorgegebenen Struktur ab. Die Produzenten greifen direkt auf den Broker zu, um Kontextinformationen zu aktualisieren. Eine Aktualisierung wird von ihnen direkt an den Broker übermittelt. Die Konsumenten beziehen dabei die jeweiligen Daten vom Broker. Aktualisierte Daten werden entweder direkt übermittelt oder die Verfügbarkeit via Benachrichtigung mitgeteilt. Die eigentliche Datenquelle bilden die Context Sources. Diese stellen dem Broker die notwendigen Kontextinformationen zur Verfügung. Gleichzeitig kommunizieren sie mit der *Context Registry*. Darin enthalten sind Informationen über Kontextinformationen. Es werden keine konkreten Werte abgelegt, sondern lediglich die Information darüber, welche Art von Kontextinformationen bereitgestellt werden kann.

²¹⁹Vgl. FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022a).

²²⁰Vgl. European Telecommunications Standards Institute (Hrsg.) (2021), S. 24.

²²¹Vgl. einer Hochschule in Abbildung 6

²²²Vgl. European Telecommunications Standards Institute (Hrsg.) (2021), S.20-23.

²²³Eigene Darstellung in Anlehnung an European Telecommunications Standards Institute (Hrsg.) (2021), S. 28-29.

Diese Metadaten können vom Broker hinsichtlich bestimmter Eigenschaften dazu genutzt werden, um bspw. Filterungen durchzuführen.²²⁴

Der *FIWARE Context Broker* bildet den Kern des Plattform-Framework. Dazu kommen diverse *Generic Enabler*. Dabei handelt es sich um angegliederte Softwareelemente. Gemeinsam mit dem Broker decken diese Funktionen wie Verwaltung, Bereitstellung und Weiterverarbeitung der Kontextinformationen weiterer Plattformen ab. Diese Dienste sind in den folgenden Elementen rund um den Context Broker aufgeteilt:²²⁵

- Der Kontextverarbeitung,
- einer Schnittstelle zu IoT-Geräten und Drittsystemen,
- einem Bereitstellungstool und
- einer Schnittstelle zum Daten/ API Management, Veröffentlichung und Monetarisierung.

Für jeden einzelnen Dienst gibt es verschiedene Softwareanbieter. Der Context Broker basiert auf dem NGSI-LD Standard und bietet Funktionen der Aktualisierung, Anfragen oder Abonnieung von Kontextinformationen verschiedener Quellen. Unter Kontext-Verarbeitung fallen Dienste, wie Weiterverarbeitung, Analysen oder Visualisierungen. Darin enthalten sind Dashboards, automatisierte Workflows oder eventbasierte Prozesse. In der Schnittstelle zu IoT-Geräten und Drittsystemen sind Dienste angesiedelt, um Daten von verschiedenen IoT-Anbietern abzurufen. Vorhanden sind bspw. Sigfox oder LoRaWAN. Außerdem können Daten auf diversen Plattfortmtypen abgerufen werden. Die Bereitstellungstools dienen dazu, die Anwendungen großflächig Nutzern zur Verfügung zu stellen. In der letzten Schnittstelle sind mehrere Dienste gebündelt. Zum einen werden Dienste zum Schutz der Daten angeboten, wie bspw. Verifizierung der Geräte und Nutzer. Daneben können Anwendungsprogrammierschnittstelle (application programming interface (API)) erstellt und verwaltet werden. Zur Veröffentlichung und Monetarisierung können die Daten direkt auf Open Data oder monetäre Plattformen veröffentlicht werden. Daneben gibt es weitere verschiedene Dienste, die nicht näher in dieser Arbeit beschrieben werden.²²⁶

Der FIWARE Context Broker wird im IoT-Fünf-Layer-Modell im Middleware Layer angesiedelt. Dies hat den Grund, da er die grundlegenden Funktionen, wie Verarbeitung, Bereitstellung und Speicherung der Daten übernimmt. Gleichzeitig können Teilfunktionen des Business Layers übernommen werden. Hier spielt das Context Registry, laut NGSI-LD Standard eine wichtige Rolle. Es werden Metadaten zur Verfügung gestellt, welche einen Überblick über die erhobenen Daten geben. Zusätzlich wird eine NoSQL Datenbank benötigt da die Daten im JSON-Format gespeichert werden. Dabei ist es fraglich, ob für diese Form der Speicherung Data Lakes genutzt werden sollten,

²²⁴Vgl. European Telecommunications Standards Institute (Hrsg.) (2021), S. 28-29.

²²⁵Vgl FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022a).

²²⁶Vgl FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022a).

da die Daten bereits relativ hochwertig durch die Modelle sind. Die Zeitreihen von aktualisierten Daten müssen für die Möglichkeit von Langzeitanalysen gespeichert werden. Es sollte jedoch auch möglich sein, dass Daten aus einer relationalen Datenbank abfragt und verarbeitet werden können. Für die Integration in einer Smart City sind bereits verschiedene Use-Cases und Smart Data Models vorhanden. Da es sich um eine Open-Source und lizenzfreie Plattform mit diversen Software-Schnittstellen handelt, sollte diese bei der Konzeption berücksichtigt werden. Jedoch sollten auch anfallende Kosten, wie Personal und deren Schulung, einkalkuliert werden.

Es wurde vorgestellt, wie Daten im Bereich Smart City abgespeichert werden und welche nach gegliederte Software genutzt werden kann. Auf Grundlage dieser Basis ist es möglich weitere Anwendungen zu entwickeln. Eine umfangreiche Möglichkeit stellt die Technologie eines *digitalen Zwilling*s dar. Im folgenden Kapitel wird näher auf dieses Thema eingegangen.

3.8 Digitaler Zwilling

Das Konzept eines digitalen Zwilling basiert darauf, dass ein digitales Konstrukt, bestehend aus Informationen über ein physikalisches System, eine eigene Entität darstellen kann.²²⁷ Konkret sind in einem digitalen Zwilling alle Informationen vorhanden, die der physikalische Gegenpart liefern würde.²²⁸ Es handelt sich demnach um eine exakte Kopie. Diese Definition lässt sich noch mit dem zeitlichen Aspekt erweitern. Durch die Hinzunahme von Echtzeitdaten ist es möglich mit einem digitalen Zwilling die aktuelle Situation zu überwachen. Im Bereich von Smart City fließen Elemente des Cloud Computing, IoT, Big Data, Datenanalyse sowie verschiedene Geoinformationen ein. Darunter fallen Gebäudeinformationen, dreidimensionale (3D) Modelle und Karten.²²⁹ Da es sich um einen breit gestreuten Handlungsbereich handelt, werden nachfolgend die einzelnen Charakteristika betrachtet.

Zusammenfassend besteht ein digitaler Zwilling aus:²³⁰

- Einem genauen Mapping,
- einer virtuellen-realen Interaktion,
- einer Simulationssoftware und
- einem intelligenten Feedbacksystem.

Ein genaues Mapping repräsentiert das digitale Model einer physischen Stadt. Darin enthalten sind Straßen, Gebäude, Flüsse und weitere Infrastruktur, wie bspw. Stromleitungen oder angebrachte Sensoren. Damit sind sowohl zweidimensionale Karten, wie auch 3D Objekte gemeint. Eine virtuelle-reale Interaktion beschreibt, dass Bewegun-

²²⁷Vgl. Grieves, M./ Vickers, J. (2017), S. 92.

²²⁸Vgl. Grieves, M./ Vickers, J. (2017), S. 94.

²²⁹Vgl. Austin, M. et al. (2020), S. 5.

²³⁰Vgl. Deren, L. et al. (2021), S. 2-3.

gen, bzw. Vorgänge, die in der physischen Stadt passieren, auch im digitalen Zwilling verfolgbar, bzw. vorhanden sind. Das kann z. B. ein Bus sein, der seine Route durch die physische Stadt fährt, welche im digitalen Zwilling gespiegelt wird. Eine darunterliegende Simulationssoftware dient zum einen dazu, die Modelle richtig zu präsentieren und anzuordnen sowie die virtuelle-reale Interaktionen abzubilden und auf dieser Grundlage das Verhalten von Bewohnern und das Eintreten von Ereignissen zu simulieren. Ein intelligentes Feedbacksystem gibt Rückschlüsse, ob die von den Nutzern konstruierte Planung oder Simulation möglich ist, bzw. negative Auswirkungen hätte. Dies kann auch in ein Frühwarnsystem von Simulationen münden, in dem kritische Punkte visualisiert und eventuelle Gegenmaßnahmen vorgeschlagen werden.

Ein digitaler Zwilling im Bereich Smart City besteht aus fünf Dimensionen. Eine Dimension repräsentiert eine physikalische Stadt (Physical). Diese wird durch digitale Modelle, worunter Karten und 3D Objekte fallen, abgebildet (Model). Beide werden durch eine Verbindung miteinander verknüpft (Connection). Im digitalen Zwilling stehen verschiedene Dienste und Funktionen, wie bspw. Simulation, Visualisierung oder Analyse zur Verfügung (Services/ Functions). Die Grundlage bilden Daten, die in der Stadt automatisch oder manuell durch Sensoren oder Messungen erhoben werden (Data).²³¹ Die einzelnen Dimensionen spiegeln sich auch in der Architektur wider.

Ein digitaler Zwilling besteht aus sechs aufbauenden Schichten, wie in Abbildung 8 dargestellt.

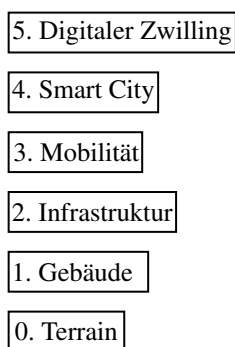


Abbildung 8: Grobe Architektur eines digitalen Zwillings²³²

Die unterste Schicht enthält Informationen über das Terrain und Basisinformationen der Stadt und des Gebiets.²³³ Das kann bspw. auf topographischen Karten oder Bodenkarten basieren. Darauf aufbauend beinhaltet die darüberliegende Schicht Informationen über Gebäude, wie Bauwerksdaten und Modelle. Die „Infrastruktur“ fügt die zugehörigen Informationen, wie Straßen, Versorgungsleitungen o. ä. ein. In der „Mobilität“ werden Bewohner und Fahrzeuge eingefügt sowie die Regeln zu ihren Bewegungen. Dabei handelt es sich um Verhaltensregeln. Das Modell eines Fahrzeuges kann bspw.

²³¹Vgl. Deren, L. et al. (2021), S. 2.

²³²Eigene Darstellung in Anlehnung an White, G. et al. (2021), S. 3.

²³³Die Nummerierung wurde aus der Quelle übernommen.

nicht über Gehwege fahren. Der Layer „Smart City“ oder auch *digitaler Layer* beinhaltet die Daten, die von den verschiedenen Sensoren im Stadtgebiet erhoben werden. Das können Themengebiete, wie Wetter, Güterverkehr, Abfallmanagement und weitere sein. Hier werden alle Daten gesammelt, die für den darüberliegenden Layer des "Digitalen Zwilling" relevant sein können. Jeder vorgegliederte Layer liefert dem nächsthöheren eine Datengrundlage. Im höchsten Layer "Digitaler Zwilling", auch virtueller Layer genannt, sind die jeweiligen Anwendungen angegliedert.²³⁴ In diese Architektur lassen sich auch die fünf Dimensionen einordnen. Die Layer 0-2 bilden den digitalen Gegenpart einer physikalischen Stadt (Physical), welche durch Modelle (Model) realisiert wird. Im Layer „Smart City“ werden Daten von Endgeräten erhoben (Data), wodurch sich der digitale Zwilling verändert (Connection). Die einzelnen Anwendungen (Services/ Functions) werden im obersten Layer umgesetzt. Es ist erkennbar, dass es sich bei einem digitalen Zwilling um ein umfangreiches Modell handelt. Daher ist es wichtig näher zu ergründen, welche Anwendungen konkret realisiert werden können.

Dadurch dass eine digitale Kopie einer Stadt zur Verfügung steht, sind die Anwendungsgebiete vielseitig. Die Datengrundlage bildet ein heterogener Datenbestand. Darin enthalten sind Geoinformationsdaten, strukturierte und unstrukturierte sowie historische und Echtzeitdaten. Denkbar sind außerdem Visualisierungen von Maßnahmen der Stadtplanung.²³⁵ Darunter fällt bspw. die Grünflächenplanung. Durch die Erweiterung von Smart City Daten können Simulationen durchgeführt werden, wie sich durch den Bau die Luftverschmutzung verändert, bzw. wie viele Personen diese Fläche besuchen würden.²³⁶ Eine weitere Möglichkeit stellt das direkte Monitoring von Umweltfaktoren dar. Bestimmte Sachverhalte lassen sich räumlich und in Echtzeit darstellen. Durch die Hinzunahme von Datenanalysetechniken, wie Machine oder Deep Learning, können Muster in den Datensätzen erkannt werden, um Modelle zu erstellen und sich zu betrachten.²³⁷ Ein besonders wichtiger Aspekt im Kontext einer Mikroklima-Analyse wäre eine Flutüberwachung, bzw. -simulation.²³⁸ Mithilfe von Gelände-, Pegel- und Niederschlagsdaten kann im Falle einer drohenden Überflutung berechnet werden, an welchen Stellen das Wasser über die Ufer tritt, bzw. welche Straßenzüge überschwemmt werden. Es kann frühzeitig mit einer Evakuierung oder Planung weiterer Maßnahmen begonnen werden. Eine Simulation könnte Einblicke darüber geben, welche Punkte besonders vital und ggf. noch nicht mit Sicherheitsvorkehrungen ausgestattet sind.

Der Stadtstaat Singapur will mit seinem digitalen Zwilling „Virtual Singapore“ 3D

²³⁴Vgl. White, G. et al. (2021), S. 2-4.

²³⁵Vgl. Deren, L. et al. (2021), S. 2-3.

²³⁶Vgl. White, G. et al. (2021), S. 5.

²³⁷Vgl. Austin, M. et al. (2020), S. 5-6.

²³⁸Vgl. Deren, L. et al. (2021), S. 9.

digitale Datenplattform etablieren. Bei Fertigstellung soll diese dem öffentlichen, privaten und Forschungssektor zur Verfügung stehen. Die Kosten belaufen sich dabei auf 73 Millionen Dollar. Als Testumgebung soll es dazu dienen bspw. die Mobilfunkabdeckung realistisch zu visualisieren. Es sollen Simulationen von Menschenansammlungen durchgeführt werden, um Evakuierungspläne für den Ernstfall vorliegen zu haben. Durch die Integration großer Datenmengen können Applikationen entwickelt werden, die bspw. die Mobilität reflektieren und eine Grundlage für verbesserte Maßnahmen bilden. Damit bildet der digitale Zwilling für Singapur die Möglichkeit neue Innovationen zu ermöglichen und einen Mehrwert für den Stadtstaat zu generieren.²³⁹ Es handelt sich um ein breit gefächertes Vorhaben einen digitalen Zwilling zu entwickeln und zu betreiben. Alle genannten Anwendungen stellen einen Prozess zur Optimierung von Smart Cities dar. Zwar benötigen nicht alle Analysen und Simulationen einen drei-dimensionalen Bezug, jedoch kann es hilfreich sein, auf diese Art und Weise einen globalen Überblick zu erhalten. Dabei können einige Teilaspekte eines digitalen Zwillings bereits in Städte genutzt werden, wie bspw. 3D-Modelle und Sensordaten für einzelne Aufgaben. Bis dieser alle relevanten Bereiche einer Stadt integriert und somit ein fester Bestandteil ist, können einige Jahre vergehen.²⁴⁰ Das Konstrukt eines digitalen Zwillings bietet einer Smart City viele Potenziale. Zur Nutzung müssen jedoch die Kompetenzen rund um die Schlüsseltechnologien, wie IoT, Big Data, Cloud Computing und Datenanalysen in der Stadt verankert sein. Das Wissen und die Fähigkeiten können zwar von externen Beratern und Unternehmen bezogen werden, jedoch muss der Betrieb und die Wartung gewährleistet werden. Vor der konkreten Planung müssen Studien durchgeführt werden, die einerseits das vorhandene Wissen in der Stadt feststellen und andererseits evaluieren wie Kosten und Nutzen miteinander in Verbindung stehen. Es gibt die Möglichkeiten abgeschwächte Formen des digitalen Zwillings für Planungszwecke zu nutzen. Wichtig ist, dass mithilfe dessen ein Mehrwert erzielt werden kann.

Im vorangegangenen Kapitel wurden Technologien vorgestellt, die in einer Smart City nutzbar sind. Die Grundlage bilden Daten in ihren unterschiedlichen Formaten. Diese werden mit Hilfe von LPWAN und Sensoren erhoben. Dabei gibt es zwei Modelle, die eine IoT-Architektur beschreiben. Im Zuge dieser Arbeit wurde das Fünf-Layer-Modell gewählt. Die Architektur bleibt im Kern bestehen, jedoch gibt es die Möglichkeit für verschiedene Anforderungen hinsichtlich der Reichweite und Netzbetriebsart unterschiedliche Anbieter auszuwählen.²⁴¹ Die Rechenleistung muss nicht zwingend per Cloud Computing erfolgen, sondern kann auch an den jeweiligen Endgeräten stattfinden. Die Wahl sollte je nach Use-Case und deren Spezifikationen er-

²³⁹Vgl. Government of Singapore (Hrsg.) (2022).

²⁴⁰Vgl. Guckenbiehl, P. et al. (2021), S. 15-17.

²⁴¹Vgl. Kapitel 3.3

folgen. Um die Daten längerfristig zugänglich zu halten müssen diese verarbeitet und gespeichert werden. Dies kann in klassischen relationalen Datenbanken oder in ihrem nicht relationalen Gegenpart erfolgen. Sobald gewisse Charakteristika hinsichtlich der Daten erfüllt sind wird auch von Big Data gesprochen. Im Gesamtkontext der Datenverarbeitung und Speicherung kann durch die Hinzunahme von Data Warehouses oder Data Lakes eine Business Intelligence genutzt werden. Auf diese Weise können strategische Anforderungen an die Daten gestellt und erfüllt werden. Darunter können Analyse- oder Reporting-Maßnahmen fallen. Eine weitere Möglichkeit Daten aus verschiedenen Bereichen in einer Smart City zu bündeln bietet der Fiware Context Broker im Zusammenhang mit einzelnen Smart Data Models. In einem digitalen Zwilling werden alle vorangestellten Technologien ganz oder zum Teil zusammengefasst, um so eine exakte Kopie der physischen Stadt, bzw. Kommune zu erstellen. Es entsteht ein digitales Ebenbild, das als Testumgebung für Simulationen, Analysen oder weitere Maßnahmen genutzt werden kann.

Die technische Grundlage einer Smart City wurde näher erörtert. Im nächsten Kapitel wird die Ist-Situation der Stadt Gelsenkirchen näher betrachtet, um dann im darauf folgenden Kapitel auf eine mögliche Umsetzung einzugehen.

4 Problemstellung in Gelsenkirchen

Die Stadt Gelsenkirchen erstreckt auf eine Fläche von 104,8 km².²⁴² Unterteilt in 18 Stadtteilen leben dort ca. 256.000 Einwohnern.²⁴³ Das entspricht einer Bevölkerungsdichte von ca. 2.528 Menschen je km². 36% des Stadtgebiets beinhalten bebaute Flächen, ca. 30% Grünflächen, wie Parks oder Wälder und 2,4% Gewässer (Stand: 2009). Durch die Stadt fließen zwei Gewässer, der Rhein-Herne-Kanal und die Em-scher.²⁴⁴ Es handelt sich um einen groben Überblick des Stadtgebiets auf dem eine Mikroklima-Analyse angewendet werden soll. Im Verlauf dieses Kapitels wird näher betrachtet, welche Technologien bereits in Gelsenkirchen für eine eventuelle Nutzung zur Verfügung stehen und welche Daten bereits erhoben werden. Dabei können auch externe Daten mit in die Konzeption einfließen, solange diese in die Thematik passen. Des Weiteren ist es wichtig zu verstehen, welche Problemfelder identifiziert und gelöst werden müssen.

4.1 Ist-Aufnahme

Derzeit gibt es in der Stadt Gelsenkirchen kein offizielles und flächendeckendes Sensornetz, mit dem Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Niederschlag oder Feuchtigkeit gemessen wird. Es befindet sich lediglich eine offizielle Messstation

²⁴²Vgl. Kuttler, W. et al. (2011), S. 5.

²⁴³Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022c).

²⁴⁴Vgl. Kuttler, W. et al. (2011), S. 5 u. 7.

an der Westfälischen Hochschule, die von eben dieser betrieben und in das Netz der MeteoGroup Nederland BV eingespeist wird.²⁴⁵ Die Messungen, die an diesem Standort stattfinden, decken jedoch nur einen sehr kleinen Teilbereich der Stadt Gelsenkirchen ab. Um eigenständig und unabhängig Wetterdaten zu erfassen werden im Open Innovation Lab (OIL) derzeit diverse Sensoren getestet. Das OIL ist ein 140 Hektar großes Areal in zentraler Lage von Gelsenkirchen. Es ist fest in der Digitalstrategie der Stadt verankert und soll diverse Ziele verfolgen. Zum einen soll durch dort erprobten Innovationen die Wettbewerbsfähigkeit der Stadt gesteigert, zum anderen die Lebensqualität der Einwohner gestärkt werden. Vor allem werden Anwendungen im Bereich Smart City erforscht und getestet. Als Treiber der Digitalisierung sollen diese dann auf das weitere Stadtgebiet oder auch auf andere Städte übertragen werden.²⁴⁶ Aktuell (Stand August 2022) gibt es sechs beispielhafte Anwendungen:²⁴⁷

- Bodenfeuchtemessung,
- Baustellentracker,
- Lärmmonitoring,
- Glatteiswarnung,
- Klimamessstationen und
- Grundwassermessung.

Abgesehen vom Baustellentracker und Lärmmonitoring sind alle anderen Anwendungsfälle relevant für eine Mikroklima-Analyse. Die einzelnen Sensoren sind auf verschiedenen Höhen angebracht. Die Grundwassermessung findet in einer Tiefe von drei Metern statt, die Bodenfeuchtemessung wenige Zentimeter unterhalb des Bodens, die Glatteiswarnung direkt auf der Oberfläche und die Klimamessstationen in mehreren Metern Höhe.²⁴⁸ Es handelt sich hierbei jedoch nicht um einen ganzheitlichen Echtbetrieb für die Stadt, sondern um die Erprobung in einem kleineren Areal. Die dort gewonnen Erkenntnisse können jedoch für eine offizielle Konzeption der Stadt Gelsenkirchen genutzt werden.

4.1.1 Datenlage

Eine Stadt muss nicht zwingend eigene Daten erheben, um Analysen für das Stadtgebiet zu erstellen. Da in einer Stadt diverse Interessensgruppen agieren ist es wichtig auch auf diese einen Fokus zu richten. Oft sammeln Institutionen, bzw. ansässige Firmen Daten im Zuge ihrer täglichen Arbeit oder Forschung. Daher lohnt es sich, während der Konzeptionsphase eines Projektes, Daten von diversen Firmen anzufragen. Einige Institutionen bieten ihre erhobenen Daten sogar frei zugänglich im Internet an.

²⁴⁵Vgl. MeteoGroup Nederland BV (Hrsg.) (2022).

²⁴⁶Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022n).

²⁴⁷Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022m).

²⁴⁸Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022n).

Das Umweltportal des Landes Nordrhein-Westfalen bietet einen guten Einstieg, um mögliche Umweltdaten für ein bestimmtes Stadtgebiet zu finden.²⁴⁹ Dieses wird vom Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen betrieben. Wird nach dem Begriff *Gelsenkirchen* gesucht finden sich zwei Arten von Messungen im Stadtgebiet. Das sind zum einen die *Pegelstände* des Rhein-Herne Kanals und zum anderen *Luftmesswerte* von zwei Standorten in Gelsenkirchen (Stand: August 2022).²⁵⁰ Bei den Messungen handelt es sich jedoch auch nur um zur Verfügung gestellte Daten und nicht vom Ministerium erhobene. Die Pegelstände werden von dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Westdeutsche Kanäle veröffentlicht. Dabei handelt es sich um eine Organisationseinheit der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Diese ist eingegliedert in das Bundesministerium für Digitales und Verkehr.²⁵¹ Die WSV hat unter anderem die Aufgabe, die Sicherheit des Schiffverkehrs zu überwachen.²⁵² Diese Aufgabe wird durch die Überwachung der Pegelstände gewährleistet. Die Messdaten setzen sich aus jeweils zwei Tabellen zusammen. Die eine beschreibt die Messstation genauer, die andere präsentiert die Messwerte. Die allgemeinen Stammdaten der Messstationen (Tabelle 7) konkretisieren die Messstation, weshalb diese auch als Metadaten betrachtet werden. Jede Messstation hat einen Namen (Messstellename) und eine eindeutige Nummer (Messstellennummer), welche den eindeutigen Schlüssel bildet. Des Weiteren werden das Gewässer und der Abschnitt in dem die Station sich befindet sowie der Betreiber benannt. Die Koordinaten sind im Gauß-Krüger-Koordinatensystem Kennziffer 3 vertortet. An dieser Stelle soll das Koordinatensystem nicht näher erläutert werden. Es ist jedoch wichtig zu wissen um welches es sich handelt. Falls die Daten genutzt werden und ein anderes Koordinatensystem die Grundlage bildet, entstehen Darstellungsfehler.²⁵³

Tabelle 7: Darstellung der allgemeinen Pegeldaten²⁵⁴

Spaltenname	Datentyp	Beispiel
Messstellename	String	Gelsenkirchen Schleuse UW
Messstellennummer	Int	27700230
Gewässer	String	Rhein-Herne-Kanal
Kilometer an der Wasserstraße	Float	23,07
Betreiber	String	WSA Westdeutsche Kanäle
Koordinate	String	Rechtswert: 3.365.027,72; Hochwert: 5.712.381,89

²⁴⁹<https://www.umweltportal.nrw.de>

²⁵⁰Vgl. Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022).

²⁵¹Vgl. Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (Hrsg.) (2022b).

²⁵²Vgl. Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (Hrsg.) (2022a).

²⁵³Vgl. Chang, K.-T. (2016), S. 36-37.

²⁵⁴Eigene Darstellung in Anlehnung an Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Hrsg.)

Die konkreten Messwerte setzen sich zusammen aus der Spalte „Geber“, einem „Messwert“ und einer „Messzeit“ (s. Tabelle 8). Der Geber ist ein deskriptives Metadatum, damit der Messwert interpretiert werden kann. Die Angabe $[m + NN]$ bezeichnet den Wasserstand in Meter über Normal-Null. Die Beziehung der beiden Datensätze lautet 1:n. Dabei werden einer Messstation n-viele Messwerte zugeordnet. Durch die Aneinanderreihung mehrerer Messwerte ergibt sich somit eine Zeitreihe. Die Webseiten-Version stellt sich jedoch als schwer maschinenlesbar heraus, da in den Spalten mehrere Informationen gespeichert sind. Die „Koordinate“ der allgemeinen Pegeldata setzt sich aus zwei Werten inklusive Präfixe zusammen. Idealerweise wären es zwei separate Werte. Die Spalte „Messzeit“ der Messwerte bietet ebenso Probleme. Diese setzt sich aus Datum und Uhrzeit zusammen. Entweder sollten diese Werte voneinander getrennt oder in einen gemeinsamen Zeitstempel gebündelt werden. Einerseits handelt es sich hierbei um ein administratives Metadatum, wodurch eine Einsortierung möglich wird. Andererseits um ein deskriptives Metadatum, da der Messwert näher beschrieben wird.²⁵⁵

Tabelle 8: Darstellung der Messwerte²⁵⁶

Spaltenname	Datentyp	Beispiel
Geber	<i>String</i>	Wasserstand [m + NN]
Messwert	<i>Float</i>	29,12
Messzeit	<i>String</i>	18.08.2022 12:17 Uhr

Die genannten Probleme liegen jedoch nur bei der Darstellung auf der Webseite vor. Der WSV bietet zusätzlich die Daten über eine REST-API an. Dabei sind die Daten im JSON-Format gespeichert.²⁵⁷ Das ist vor allem nützlich, wenn eine Einbindung auf externen Servern erfolgen soll. Die Daten der WSV können dadurch automatisiert abgerufen werden. Dabei sind auch die Probleme der Maschinenlesbarkeit behoben. In den meisten Datensätzen wurden die Koordinaten durch „longitude“ und „latitude“, welche den Längen- und Breitengrad entsprechen, ersetzt. Die Messzeit wird im „timestamp“ festgehalten. Dieser ist im ISO 8601 Format codiert.²⁵⁸ Die übrigen Dateninhalte sind identisch, haben jedoch aufgrund der Systematik von JSON eine andere Bezeichnung. In der Stadt gibt es zwei Messstellen, die in einer Klimaanalyse eingebunden werden können.

Eine weitere öffentliche Datenquelle wird vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) betrieben. Das Landesamt ist dem

(2022b).

²⁵⁵Vgl. Kapitel 3.1.

²⁵⁶Eigene Darstellung in Anlehnung an Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Hrsg.) (2022b).

²⁵⁷Vgl. Kapitel 3.7.

²⁵⁸Vgl. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Hrsg.) (2022c).

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen unterstellt und unterhält diverse Aufgabengebiete. Unter anderem sind sie für Naturschutz, Landschaftspflege, Luftreinhaltung, Gewässerschutz und Umweltanalytik zuständig. Um diese Tätigkeiten zu ermöglichen werden Daten mit eigenen Messsystemen betrieben und anschließend bewertet.²⁵⁹ In Gelsenkirchen befinden sich fünf solcher Messstellen, die für die Überwachung der Luftqualität aufgebaut wurden. Eine davon ist bereits inaktiv.²⁶⁰ Die Messstellen werden anhand ihres Standorts kategorisiert. Die möglichen Kategorisierungen sind „Hintergrund“, „Industrie“ und „Verkehr“. Diese wurde von der Europäischen Kommission im Rahmen einer Kommissionsentscheidung festgelegt. Generell bietet das daraus resultierende Amtsblatt eine fundierte Übersicht über die Vorgaben der Messungen. Die Erhebungen sollen die Überwachung von zwei übergeordneten Umweltzielen ermöglichen. Zum einen soll die Gesundheit der dort lebenden Bevölkerung erhalten, zum anderen die dort vorhandene Vegetation geschont werden.²⁶¹

Die Messstationen in Gelsenkirchen der Kategorie „Industrie“ befinden sich in direkter Nachbarschaft zu Anlagen von Uniper²⁶² und British Petroleum²⁶³. Eine weitere wird der Kategorie „Hintergrund“²⁶⁴ und die letzte nah an einer Hauptstraße „Verkehr“²⁶⁵ zugeordnet. Dabei werden verschiedene Parameter der Luftqualität überwacht. In der Vergangenheit wurden auch Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemessen. Diese Erhebung wurde mittlerweile eingestellt. Die Stationen „Verkehr“ und „Hintergrund“ liefern kontinuierliche Messungen. Das bedeutet, dass die Messwerte zu jeder Zeit abgerufen werden können, da eine laufende Erhebung stattfindet. Die gemessenen Parameter sind Feinstaub und Stickstoffoxid. Dabei wird Feinstaub anhand der Partikelgröße (PM) in zwei Kategorien unterteilt:²⁶⁶

- PM₁₀, mit einem Durchmesser von 10 Mikrometer und
- PM_{2,5}, mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 Mikrometer.

Feinstaub wird direkt an der verursachenden Quelle freigesetzt. Das können Verbrennungsmotoren, aber auch Abrieb von Straßenbeschichtungen, Bremsen oder Reifen sein. Bedenklich ist, dass Feinstaub in den menschlichen Organismus gelangen kann und dem Körper so schadet. PM₁₀ kann über die Nasenhöhlen aufgenommen werden und PM_{2,5} kann bis in die Bronchien und dadurch in den Gesundheitskreislauf gelangen.²⁶⁷ Daher ist es wichtig besonders in Ballungsgebieten solche Werte zu über-

²⁵⁹Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022g).

²⁶⁰Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022e).

²⁶¹Vgl. Europäische Kommission (Hrsg.) (2011), Anhang B.

²⁶²Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022c).

²⁶³Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022d).

²⁶⁴Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022b).

²⁶⁵Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022a).

²⁶⁶Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022a).

²⁶⁷Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022a).

wachen, um durch eventuelle Maßnahmen die Lebensqualität der Bevölkerung zu gewährleisten.

Stickstoffoxid ist eine Sammelbezeichnung diverser gasförmiger Verbindungen. Dabei werden Stickstoffdioxide (NO₂) und Stickstoffmonoxid (NO) als NO_x zusammengefasst. Die Hauptquelle sind vor allem Verbrennungen. Das können Motoren von Fahrzeugen sein oder Anlagen, die Kohle, Öl oder sonstige Stoffe verbrennen. Das schadet der Vegetation und Gesundheit von Einwohnern. Durch die Veränderung des Gleichgewichts von Stickstoff und weiteren pflanzlichen Nährstoffen schädigen diese das Ökosystem. Dies reicht von kurzfristigem Stress für die Pflanzen, wie Trockenheit oder Schädlinge, bis hin zur Versauerung des Bodens und vorzeitiges Altern der Pflanzen. Für den Menschen wirkt es wie ein Reizgas auf Schleimhäute und Atmungsorgane.²⁶⁸ Ein weiterer Parameter wird vor allem bei den Industrie-Messstationen erhoben. Dieser lautet Benzol (BTEX). BTEX wird aufgrund der niedrigen Konzentration nicht direkt vor Ort erfasst. Für die Erhebung werden an den Messstationen automatisiert Proben der Luft entnommen und nach einer gewissen Dauer im Labor genauer untersucht.²⁶⁹ Daher können diese Werte nur retrospektiv betrachtet werden.

Die einzelnen Stationen weisen unabhängig ihrer Kategorisierung jeweils die gleichen Stammdaten auf. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 9. Es wird deutlich, dass viele

Tabelle 9: Darstellung der Luftüberwachung-Stammdaten²⁷⁰

Spaltenname	Datentyp	Beispiel
EU-Kennung	<i>String</i>	DENW022
Kürzel	<i>String</i>	GELS
Messort-Adresse	<i>String</i>	45889 Gelsenkirchen Trinenkamp
Höhe über NN	<i>String</i>	30 Meter
Umgebung	<i>String</i>	vorstädtisches Gebiet
Standort	<i>String</i>	Hintergrund
Längengrad	<i>Float</i>	7,101868
Breitengrad	<i>Float</i>	51,533640
Begin der Messung	<i>String</i>	01.08.1981
Ende der Messung	<i>String</i>	01.08.2022

Daten vom Typ *string* vorliegen. Das erschwert eine maschinengestützte Schreibweise. Der eindeutige Schlüssel kann sowohl „EU-Kennung“ als auch „Kürzel“ sein. Hier müsste sich für einen entschieden werden. Die Messort-Adresse ist bei vielen Messstationen nicht eindeutig. Daher empfiehlt es sich mit den Längen- und Breitengraden zu arbeiten. Die konkreten Messwerte sind in Tabelle 10 exemplarisch an den Messdaten

²⁶⁸Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022b).

²⁶⁹Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022i).

²⁷⁰Eigene Darstellung in Anlehnung an Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022b).

der letzten 365 Tage dargestellt.

Tabelle 10: Darstellung der Luftüberwachung-Messdaten²⁷¹

Spaltenname	Datentyp	Beispiel
Datum	String	22.08.2021
Zeit	String	12:00
NO AM1H [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Int	10
NO2 AM1H [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Int	11
PM10F GM24H [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Int	15

Dieser Datensatz eignet sich besser zum Auslesen, da die Informationen voneinander getrennt erscheinen. Bspw. werden die Einheiten der Messungen direkt in der Spalte betitelt und nicht nach den jeweiligen Messwerten. Die Spalten „Datum“ und „Zeit“ könnten vergleichbar mit der Anmerkung bei den Messdaten der Pegelstände zusammen zu einem Zeitstempel codiert werden. Die Daten werden, wie von der Europäischen Kommission beschlossen²⁷², stündlich zusammengefasst, damit sich auf dieser Basis die Tageswerte und darauf folgend die Jahreswerte berechnen lassen. Die eigentlichen relevanten Daten sind: NO AM1H [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], NO2 AM1H [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] und PM10F GM24H [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Die übrigen Daten stellen Metadaten dar, die die Messwerte näher beschreiben.

Die Datensätze der WSV können unter Angabe der Quelle²⁷³ genutzt und veröffentlicht werden.²⁷⁴ Das LANUV bietet ebenfalls eine offene Lizenz an,²⁷⁵ wobei hier durch die Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0, jeglicheervielfältigung und Zusammenführung mit anderen Datensätzen ausdrücklich erlaubt sind.²⁷⁶ Generell sollte bei der Nutzung von externen Daten auf die Nutzungsbedingungen geachtet werden. Falls keine weiteren Informationen angegeben sind sollte bei dem Herausgeber der Daten nachgefragt werden, inwieweit eine Nutzung möglich ist. Die Stadt Gelsenkirchen bietet in ihrem Open-Data-Portal diverse Datensätze zur öffentlichen Nutzung an.²⁷⁷ Die Plattform ist 2017 in den Echtbetrieb gegangen und verfügt über ca. 101 Datensätze aufgeteilt in diverse Kategorien (Stand 25.08.2022). Ziel ist es die Daten Interessierten zur Verfügung zu stellen, um sich über bestimmte Themen im Stadtgebiet zu informieren und ggf. Webanwendung auf deren Basis zu realisieren.²⁷⁸ Eine weitere frei zugängliche Plattform ist das Geoportal. Ähnlich dem

²⁷¹Eigene Darstellung in Anlehnung an Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022h).

²⁷²Vgl. Europäische Kommission (Hrsg.) (2011), Anhang B.

²⁷³www.pegelonline.wsv.de.

²⁷⁴Vgl. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Hrsg.) (2022a).

²⁷⁵Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022f).

²⁷⁶Vgl. Geschäfts- und Koordinierungsstelle GovData (Hrsg.) (2022).

²⁷⁷Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022k).

²⁷⁸Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022j).

Open Data Portal werden Daten öffentlich zur Verfügung gestellt. Ein Unterschied ist jedoch, dass es sich bei den Daten um Geodaten (Daten mit einem räumlichen Bezug) handelt.²⁷⁹ Vor allem die Themenkarten im Bereich *Umwelt und Natur* können für eine Mikroklima-Analyse nützlich sein. Darunter fallen bspw. die Grundwasserverläufe im Stadtgebiet, Hitzeinseln aus dem Jahr 2011, eine Prognose von Hitzeinseln für das Jahr 2060, Starkregengefahren und viele weitere.²⁸⁰ Des Weiteren existieren verschiedene 3D-Modelle der Stadt.²⁸¹ Wie diese konkret genutzt werden können wird im Kapitel 5 näher erläutert. Da diese Datensätze bereits bei der Stadt verankert sind muss geprüft werden, inwiefern diese auch für eine Mikroklima-Analyse nutzbar sind. Ein weiterer zu prüfender Aspekt ist, wie und wo die Daten aktuell gespeichert werden. Diese Frage wird im nächsten Kapitel beantwortet.

4.1.2 Datenspeicherung

Über das Stadtgebiet von Gelsenkirchen gibt es einige Datensätze. Diese müssen jedoch nicht direkt bei der Stadtverwaltung angesiedelt sein. Daher ist es wichtig zwei Faktoren zu prüfen. Zum einen muss geprüft werden wo die bestehenden Daten hinterlegt sind und zum anderen wo neue potentielle Datensätze gespeichert werden. Folgenden werden einige Datensätze exemplarisch vorgestellt. Daten, bei denen bekannt ist, dass diese auf Landesebene erhoben wurden, werden nicht näher betrachtet.²⁸² In Gelsenkirchen existieren zwei IT-Unternehmen, die eng mit der Stadt zusammenhängen. Zum einen ist das die Gelsen-Net Kommunikationsgesellschaft mbH (Gelsen-Net) und die Gelsenkirchener Kommunale Datenzentrale Emscher-Lippe (gkd-el). Gelsen-Net ist eine Tochtergesellschaft der Stadtwerke Gelsenkirchen, welche komplett im Besitz der Stadt ist.²⁸³ Die gkd-el ist kommunaler IT-Dienstleister der Stadt. Diese ist u. a. verantwortlich für die Verwaltung der IT-Infrastruktur und Entwicklung von E-Government-Lösungen.²⁸⁴

Im Rahmen einer Recherche wurden folgende Datensätze mit potentieller Relevanz für eine Mikroklima-Analyse ermittelt²⁸⁵:

- Offene Datensätze (Open Data),
- Geodaten: Kartenform,
- Geodaten: 3D-Modelle,
- Geodaten: Straßenbefahrung und
- Daten aus dem OIL.

²⁷⁹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022h).

²⁸⁰Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022q).

²⁸¹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022f).

²⁸²Vgl. Datensätze LANUV/ WSV.

²⁸³Vgl. Stadtwerke Gelsenkirchen GmbH (Hrsg.) (2022).

²⁸⁴Vgl. Gelsenkirchener Kommunale Datenzentrale Emscher-Lippe (Hrsg.) (2022a).

²⁸⁵Es ist nicht auszuschließen, dass weitere Daten in jeweiligen Fachbereichen vorhanden sind.

Das Open Data Portal besteht aus einem Datenkatalog und einem Redaktionssystem. Mit dem Datenkatalog werden die Datensätze verwaltet, Schnittstellen zum Datenaustausch bereit- und Metadaten zur Verfügung gestellt. Das Redaktionssystem ermöglicht es den Datenkatalog zu durchsuchen und zu lesen. Zusätzlich können Open Data Plattformen des Landes oder Bundes automatisch auf die Datensätze zugreifen. Die Plattform wird von der gkd-el gehostet und die Daten liegen auf den eigenen Servern der Stadt.²⁸⁶

Die Geodaten im Kartenformat sind teilweise ebenfalls über das Open Data Portal verfügbar. Hauptbezugsquelle bildet das eigene Geoportal der Stadt. Dort besteht die Möglichkeit, sich zum einen die einzelnen Themenkarten in dem sogenannten Geo-Viewer zu betrachten. Zum anderen stehen die Daten in einem Geodatenkatalog zur Verfügung.²⁸⁷ Im Geodatenkatalog stehen auch verschiedene 3D-Stadtmodelle zur öffentlichen Verfügung.²⁸⁸ Beide Dienste sind Teil der Geodateninfrastruktur Gelsenkirchen. Unter anderem ist es ein Ziel Geodaten verschiedener Anbieter nutzbar zu machen.²⁸⁹ Daran wird erkennbar, dass bereits die Möglichkeit besteht Daten aus verschiedenen Quellen zu sammeln. Das können einzelne Fachbereiche oder externe Anbieter sein. Einige Daten werden dadurch direkt durch die Stadt erhoben oder von externen Anbietern. Die Daten sind jedoch direkt bei der Stadt nutzbar.

Die letzten Geodaten wurden im Rahmen des Projekts „GeoSmartChange“ erhoben. Mithilfe von hochauflösender und georeferenzierter Kameratechnik und einer Bildbefahrung sind 360° Panoramabilder des gesamten Stadtgebiets realisiert worden. Die Fördersumme in Höhe von 2,1 Mio. Euro wurde durch das Förderprogramm *Digitale Modellregionen NRW* gefördert.²⁹⁰ Die erhobenen Daten des Stadtgebiets sind beim Befahrungsdienstleister gehostet. Über einen lizenzierten Zugang gibt es die Möglichkeit die Bilder zu betrachten.²⁹¹ Hierbei handelt es sich demnach um Cloud Computing. Es werden die Anwendung (Software as a Service) und die Infrastruktur (Infrastructure as a Service) zur Verfügung gestellt. Dabei stellt der Dienst im Allgemeinen eine abgeschwächte Form eines digitalen Zwilling dar. Es werden zwar Informationen über Gebäude und Straßen²⁹² bereitgestellt, jedoch bildet dies nur zwei Stufen der groben Architektur eines digitalen Zwilling.²⁹³ Dies mindert jedoch nicht dem Umstand, dass diese Form bereits für Fachanwendungen, wie Baugenehmigungen oder Routenplanung, genutzt werden kann.²⁹⁴

²⁸⁶Vgl. Gelsenkirchener Kommunale Datenzentrale Emscher-Lippe (Hrsg.) (2022b).

²⁸⁷Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022g).

²⁸⁸Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022f).

²⁸⁹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022e).

²⁹⁰Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022i).

²⁹¹Vgl. Institut für Innovationsforschung und -management (Hrsg.) (2022), S. 21.

²⁹²Vgl. Institut für Innovationsforschung und -management (Hrsg.) (2022), S. 8.

²⁹³Vgl. Abbildung 8.

²⁹⁴Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022i).

Die einzelnen Datensätze aus dem OIL sind auf der urbanen Datenplattform der Stadt hinterlegt. Von dort werden diese an anwendungsorientierte Dashboards weitergeleitet.²⁹⁵ Die urbane Datenplattform wird in der Digitalstrategie als Maßnahme forciert und hat den Namen *GELSENCloud*. Ziel ist es Daten aus verschiedenen Projekten der Stadt Gelsenkirchen zu bündeln und für die Weiterverwendung via APIs zur Verfügung zu stellen.²⁹⁶ Recherchen haben jedoch nicht ergeben, ob sich diese aktuell im Echtbetrieb befindet (Stand: 31 Oktober 2022). Der Betrieb als solcher soll durch die Gelsen-Net erfolgen.²⁹⁷ Aufgrund ihrer Partnerschaft im Projekt²⁹⁸ sind die Daten für die Stadt unmittelbar nutzbar.

Die Datensätze, die der Stadt Gelsenkirchen vorliegen, sind von ihrer Struktur umfangreich. Es existieren 3D-Modelle, Geodaten des gesamten Stadtgebiets, Themenkarten sowie Echtzeitdaten. Zwar existieren noch weitere, jedoch wird in Zuge dieser Arbeit vorläufig nicht auf die weiteren eingegangen. Es ist nicht ersichtlich, dass bspw. die Geodaten der Themenkarten und 3D-Modelle in einer oder in mehreren verschiedenen Datenbanken abgelegt sind. Es wird daher davon ausgegangen, dass es sich um separate Datenbanken handelt, welche jedoch letztlich der Stadt zur Verfügung stehen. Die Daten der Straßenbefahrung sind mit Zugriffsmöglichkeiten auf externen Servern gespeichert und die erhobene Klimadaten des OIL werden in Echtzeit auf der urbanen Datenplattform hinterlegt. Daraus ergibt sich eine vielseitige Datenlandschaft. Für eine effiziente Nutzung müssen diese an einer zentralen Stelle gebündelt werden. Auf diese Weise ist es möglich sich an vorformulierte Problemstellungen zu wagen und diese zu lösen. Im nächsten Abschnitt werden einzelne Problemstellungen näher betrachtet.

4.2 Ausschnitt einzelner Probleme

Wie bereits in Kapitel 2.2 erörtert ergeben sich durch den Klimawandel verschiedene Folgen für das allgemeine Klima und daraus resultierend das Stadtklima. Im Zuge der Urbanisierung und die damit einhergehende Veränderung der Landschaft stellt das Stadtklima eine gesonderte Form dar. Es betrifft vor allem die Bevölkerung. Für eine Mikroklima-Analyse im Rahmen dieser Arbeit werden die zwei Problematiken der *Hitzeinseln* und der *Trockenheit* und dem resultierenden *Wassermangel* aufgezeigt.

Hitzeinseln

Ein städtisches Problem sind sogenannte Hitzeinseln (städtische Wärmeinseln/ Urban Heat Islands). Dabei handelt es sich um eine Überwärmung im Stadtgebiet. Charakteristisch sind höhere Oberflächen- und Lufttemperaturen verglichen zum Umland. Auf-

²⁹⁵Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022p), S. 7.

²⁹⁶Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2020), S. 28.

²⁹⁷Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022l).

²⁹⁸Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022o).

grund unterschiedlicher Flächenstrukturen innerhalb einer Stadt tritt diese Form der Überwärmung inselartig im Stadtgebiet auf. Dadurch können mehrere Hitzeinseln in einer Stadt auftreten.²⁹⁹ Eine hohe Temperatur ist nicht zwingend einhergehend mit der Entstehung von Hitzeinseln. Die Bildung wird durch diverse weitere Faktoren beeinflusst. Je höher der Versiegelungsgrad, durch bspw. Betonierung oder Asphaltierung, desto höher ist die Wärmespeicherung. Des Weiteren wird dadurch kein Wasser im Boden aufgenommen und keine Verdunstung ermöglicht. Umherstehende Gebäude begünstigen weiter den Effekt. Zum einen besteht keine Möglichkeit, dass die Wärme abweichen kann. Zum anderen kann die Luftströmung nicht für einen kühlenden Durchzug sorgen. Auf diese Weise staut sich die warme Luft in diesem Gebiet. Ein weiterer Faktor ist die Abwärme, die durch Gebäude und Fahrzeuge entsteht.³⁰⁰ Vor allem bei hohen Außentemperaturen werden Klimageräte betrieben, die die warme Luft aus Innenräumen nach außen transportieren. Zusätzlich geben solche Geräte durch ihren Betrieb eine weitere Form der Abwärme in die Luft. Aufgrund der fehlenden Luftzirkulation verbinden sich dort ausgestoßene Luftschadstoffe, wie Feinstaub oder Stickstoffoxide. Diese verbleiben dort und es erhöht die Emissionsbelastung.³⁰¹

Hitzeinseln verursachen dabei unterschiedliche Probleme bei der Bevölkerung und Vegetation. Bei Hitzeinseln in bspw. Innenstädten, bei denen nur ein kurzer Aufenthalt vorgesehen ist, kann mit einem Standortwechsel der Hitzebelastung entgegengewirkt werden. Die Bewohner dieser Gebiete können jedoch nicht ausweichen und sind besonders nachts einer Hitzebelastung ausgesetzt. Vor allem Menschen über 65 Jahre können sich schlechter an extreme Hitze anpassen und leiden unter den Folgen, wie Herzversagen oder Hitzschlägen.³⁰² Dadurch erhöht sich während Hitzeperioden die Mortalitätsrate in diesen Gebieten.³⁰³ Ein Indikator für Hitzebelastung ist die sogenannte Kühlgrenztemperatur, oder auch Feuchtkugeltemperatur (Wet Bulb Globe Temperature). Dieser Wert gibt an, welche Temperatur durch Verdunstungskühlung erreicht werden kann. Je nach Größe des Wertes wird ermittelt, wie lange sich ein Mensch an diesem Ort aufhalten kann, ohne dass seine Körpertemperatur einen kritischen Wert erreicht. Die relevanten Faktoren sind Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck.³⁰⁴ Neben dem Hitzestress gibt es noch die Emissionsbelastung, die dem Menschen schaden kann. Je nach Konzentration der Luftverunreinigung und deren Zusammensetzung entstehen diverse Effekte. Beim Menschen können Schleimhautreizungen der Augen, Nase oder Hals

²⁹⁹Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 389.

³⁰⁰Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 392.

³⁰¹Vgl. Baumüller, J. et al. (1999), S. 222.

³⁰²Vgl. Steinrücke, M. et al. (2011), S. 18.

³⁰³Vgl. Kuttler, W. (2008), S. 79.

³⁰⁴Vgl. Occupational Safety & Health Administration (Hrsg.) (2022).

sowie Atemwegsprobleme auftreten.³⁰⁵ Zusätzlich bildet der Geruch der Luftverunreinigung eine Belästigung.³⁰⁶ Pflanzen verlieren ihre Vitalität, altern vorzeitig oder sterben ab.³⁰⁷

Mithilfe von Messstationen und Messfahrten innerhalb der Stadt und im Umland werden Temperaturdifferenzen nachgewiesen.³⁰⁸ Luftverunreinigungen werden durch Emissionsmessstationen ermittelt.³⁰⁹ Mithilfe von IoT-Sensoren ergeben sich diverse Vorteile. Zum einen ist das Ziel, ein flächendeckendes Netz aufzubauen. Dadurch ergibt sich, dass in Echtzeit Daten zur Temperatur und weiteren beeinflussenden Faktoren vorliegen. Es müssen keine Befahrungen durchgeführt werden, da die Sensoren fest verbaut sind.

Die Stadt Gelsenkirchen hat bereits eine Karte von Hitzeinseln aus dem Jahr 2011 und eine Prognosekarte für das Jahr 2060 veröffentlicht.³¹⁰ Die Themenkarte „Hitzeinseln 2011“ basiert auf einer gesamtstädtischen Klimaanalyse Gelsenkirchens. Die Datenerhebung wurde mit fünf Klimafeststationen, verschiedenen Messfahrten, Messkampagnen und 24 Stunden Standortmessungen durchgeführt.³¹¹ Dabei wurden Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Windrichtung³¹², sowie verschiedene lufthygienische Größen³¹³, wie Feinstaub, Kohlenmonoxid oder Ozon, gemessen. Der Messzeitraum der Klimafeststationen betrug ein Jahr³¹⁴, die mobilen Messungen fanden an 13 Tagen/ Nächten³¹⁵ statt. Auf die weitere Vorgehensweise und Datenanalyse wird nicht näher eingegangen. Die Grundlagen der gesamtstädtischen Klimaanalyse sollten jedoch in der Konzeption einer Datenstrategie berücksichtigt werden. Ein weitere Problematik, die vor allem während Hitzeperioden auftritt, ist Trockenheit und daraus resultierender Wassermangel.

Trockenheit und Wassermangel

Trockenheit ist das Ergebnis einer Reihe von Ereignissen und Zuständen. Durch hohe Temperaturen und Sonnenstunden, sowie fehlenden Niederschlag sinkt die Bodenfeuchte. Je länger diese Zustände anhalten, desto trockener wird es. Dabei gerät vor allem die Vegetation in Ungleichgewicht. Die Folgen sind Wassermangel bei Pflanzen und daraus resultierende Schäden in Form von Sonnenbrand. Abgestorbene trockene Blätter und Geäste in Wäldern führen zu Waldbrandgefahren. Ein weiteres Problem

³⁰⁵Vgl. Koch, E. (1999), S. 275.

³⁰⁶Vgl. Koch, E. (1999), S. 283.

³⁰⁷Vgl. Koch, E. (1999), S. 279.

³⁰⁸Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 391.

³⁰⁹Vgl. Otte, U. et al. (1999), S. 300.

³¹⁰Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022q).

³¹¹Vgl. Kuttler, W. et al. (2011), S. 9.

³¹²Vgl. Kuttler, W. et al. (2011), S. 10.

³¹³Vgl. Kuttler, W. et al. (2011), S. 13.

³¹⁴Vgl. Kuttler, W. et al. (2011), S. 19.

³¹⁵Vgl. Kuttler, W. et al. (2011), S. 13.

ist Niedrigwasser in Wasserstraßen, welche vor allem die Schifffahrt betreffen.³¹⁶ Trockenheit hängt dabei eng mit der urbanen Wasserbilanz zusammen. Faktoren die diese beeinflussen sind bspw. Niederschlag, die Verdunstung von Böden und Gewässern und abfließendes Wasser. Trifft der Niederschlag z. B. auf hoch versiegelten Boden kann dieser nicht aufgenommen werden. In diesem Fall wird der Niederschlag in die Kanalisation geleitet und fließt ab. Auf diese Weise besteht keine Möglichkeit der Verdunstung. In Folge heizen die Böden weiter auf. Ein weiterer Aspekt ist, dass Grundwasser sich unter versiegelten Böden schwerer erneuern kann.³¹⁷ Dabei spielt aus nationaler Sicht das Grundwasser eine wichtige Rolle. Zwei Drittel der Trinkwassergewinnung in Deutschland wird aus Grundwasser gefördert.³¹⁸ Die Trinkwasserversorgung der Stadt Gelsenkirchen wird durch zwei Wasserwerke in Haltern und Essen gewährleistet.³¹⁹ Daher ist die Trinkwassergewinnung durch Grundwasser weniger relevant. Daneben gibt es weitere Verwendungszwecke für die Entnahme von Grundwasser. In Form von Brunnen kann dieses entnommen werden, um damit Grünflächen zu bewässern. Das können private Gärten, Parkanlagen oder Sportflächen sein. Weitere Möglichkeiten sind der Betrieb von Wärmepumpen oder die Versorgung von Industriebetrieben.³²⁰ Die Stadt Gelsenkirchen testet derzeit Grundwassersensoren, um dadurch Einblicke im Bezug zum Grundwasserspiegel zu erhalten.³²¹ Für die Pflege des Baumbestandes im Stadtgebiet können Gießpatenschaften übernommen werden.³²² Auf diese Weise wird die Pflege und Bewässerung während anhaltenden Trockenphasen von der Bevölkerung übernommen.³²³ Es bleibt jedoch zu klären, wie mit den Bäumen verfahren wird, bei denen keine Patenschaft übernommen worden ist.

Mithilfe einer Mikroklima-Analyse sollen Einblicke in den klimatischen Zustand einer Stadt ermöglicht werden. Es stellt sich die Frage, ob dies mit IoT-Sensorik, dem Aufbau eines Netzes und den zugehörigen Technologien ermöglicht werden kann und wie eine Konzeption dieses Vorhabens aussieht. Dieser Aspekt wird im nächsten Kapitel näher betrachtet.

5 Gesamtkonzeption für Gelsenkirchen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapiteln aus der Theorie in die Praxis übertragen. Das Resultat bildet eine Konzeption einer Mikroklima-Analyse und Steuerung für die Stadt Gelsenkirchen. Darauf aufbauend bleibt zu klä-

³¹⁶Vgl. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2022b).

³¹⁷Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 401-403.

³¹⁸Vgl. Endlicher, W. (2013), S. 102.

³¹⁹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022r)

³²⁰Vgl. Stadt Münster (Hrsg.) (2022).

³²¹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022m).

³²²Vgl. Kapitel 2.1

³²³Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022a).

ren, welchen Nutzen die gesammelten Daten noch weiter erfüllen können. Der Ablauf orientiert sich am Fünf-Layer-Modell und beginnt mit der untersten Ebene. Danach folgen die darüber liegenden (Bottom-Up-Prinzip). Wie bereits im Kapitel 3.6.2 vorgestellt sollte eine entsprechende Datenstrategie mit Zielformulierung vorliegen. Dadurch wird gewährleistet, dass der Grund und die Verwendung für die Datensammlung feststeht. Hierfür können zwei Perspektiven eingenommen werden. Zum einen sollen Lösungen der genannten Probleme in Kapitel 4.2 erarbeitet und zum anderen die Maßnahmen aus der Digitalstrategie der Stadt Gelsenkirchen durchgeführt werden.

Im Bezug auf Hitzeinseln sollen solche durch die Sammlung und Auswertung von Echtzeitdaten erkannt, vor ihnen gewarnt und zukünftige prognostiziert bzw. simuliert werden. Zwar wurden bereits im Rahmen einer gesamtstädtischen Klimaanalyse Daten erhoben, jedoch beziehen sich diese auf die Jahre 2010 und 2011.³²⁴ Es bleibt daher zu prüfen, in welchen Zeitabständen aktuelle Daten benötigt werden, um valide Aussagen in Bezug auf das Klima treffen zu können. In der Digitalstrategie der Stadt Gelsenkirchen sind bereits Maßnahmen vorhanden, die auf einer Mikroklima-Analyse aufbauen. Die Maßnahme *Umweltdaten-Sensorik* hat zum Ziel eine flächendeckende Sensorik zum Sammeln von Umweltdaten einzurichten. Daneben existiert die Maßnahme *Digitalisierung der Einsatzplanung und Dokumentation von Leistungen in der Grünpflege* bei der durch digitalen Maßnahmen eine Optimierung der Pflegemaßnahmen für städtische Grünflächen vorgesehen ist.³²⁵ Zusammenfassend sind die Ziele der in dieser Arbeit angedachten Mikroklima-Analyse und Steuerung folgende:

- Sammlung von relevanten Klimadaten im gesamten Stadtgebiet,
- Verschneidung relevanter Daten für Analyse- und Prognosezwecke,
- Darstellung aktueller Klimawerte,
- Bestimmung von potentiellen Maßnahmen zum Entgegenwirken bestimmter Zustände,
- Erhaltung der Natur während Hitzeperioden und
- Entlastung der Grünpflegebetriebe.

Diese übergeordneten Ziele sollen mithilfe der hier vorliegenden Konzeption gelöst werden können. Die ersten drei sind der Mikroklima-Analyse und die drei weiteren der Steuerung zu zuordnen. Im nächsten Schritt werden die relevanten Klimadaten identifiziert, um eine entsprechende Sensorik auszuwählen. Außerdem ist es wichtig zu wissen, wie genau diese platziert werden müssen.

Sensorenproblematik

Die Grundlage einer Analyse bilden Daten. Im Fall von einer Mikroklima-Analyse

³²⁴Vgl. Kuttler, W. et al. (2011), S. 13 und 19.

³²⁵Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2020), S. 34.

werden entsprechende Klimadaten benötigt. Über den Sensing Layer³²⁶ können Klimadaten eines Areals und Informationen über den Zustand bestimmter Grünflächen erhoben werden. Beginnend mit den Grünflächen muss die zentrale Information zugänglich sein, wie hoch die Bodenfeuchte ist. Auf diese Weise soll erkennbar werden, welche Grünflächen während Hitzeperioden eine zusätzliche Bewässerung benötigen.³²⁷ Da es im Stadtgebiet über 68.000 Bäume gibt und für einige eine Gießpatenschaft übernommen werden kann³²⁸, müssen die übrigen Bäume identifiziert werden, die repräsentativ für eine Gruppe innerhalb des Stadtgebiets sind. Auf diese Weise sollen nur so wenig Bäume wie möglich mit Sensoren ausgestattet werden, wobei der Aussagegehalt der Daten am höchsten ist.

Zur Überwachung von Klimadaten können verschiedene Stationstypen aufgebaut werden. Dazu zählen Hauptstationen (principal stations), Referenzstationen (reference stations) oder urbane Stationen (urban stations). Diese unterscheiden sich hauptsächlich im Messumfang und -zeitraum. Hauptstationen messen u. a. Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Niederschlag, Sonnenstunden und -strahlung. Referenzstationen sind dazu ausgelegt 30 Jahre konstant Werte zu messen. Dazu müssen verschiedene Bedingungen erfüllt sein. Das sind z. B. gleichbleibende umliegende Bebauungen, eine hohe Robustheit der Station bei Wetterereignissen oder Beeinflussungen durch Verkehr. Auf diese Weise bleiben die Ergebnisse konstant. Gleichzeitig können diese zum Vergleich herangezogen werden, bspw. bei der Bestimmung von Hitzeinseln. Urbane Stationen messen die gleichen Werte wie Hauptstationen, werden jedoch um Messungen rund um die Luftverunreinigung erweitert. Zusätzlich liefern diese Ergebnisse die Grundlage zur Berechnung von Hitzestress in urbanen Gebieten in Form der Feuchtkugeltemperatur.³²⁹ Um das gesamte Stadtgebiet effizient abzudecken, müssen die Standorte bestimmte Bedingungen erfüllen. Zum einen dürfen diese nicht zu nah beieinander stehen, dadurch würde unter Umständen ein Gebiet doppelt erhoben werden. Zum anderen dürfen diese nicht zu weit voneinander entfernt platziert werden, da sonst die Gefahr besteht ein Gebiet dazwischen zu übersehen. Dafür können urbane Klimazonen herangezogen werden. Die Unterschiede liegen jeweils in der Bebauung, der Höhe der Gebäude, der Versiegelung der Flächen und der darin liegende Vegetationen. Eine urbane Klimazone mit eng gebauten Hochhäusern und Straßen besitzt andere Charakteristika als bspw. ein Park. Vorrangig geht es darum, die einzelnen Klimazonen zu identifizieren und die Sensoren entsprechend anzubringen.³³⁰ Für die Identifizierung von einzelnen Klimazonen können auch entsprechende Messfahr-

³²⁶Vgl. Abbildung 4.

³²⁷Vgl. Steinrücke, M. et al. (2011), S. 42.

³²⁸Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022a).

³²⁹Vgl. World Meteorological Organization (Hrsg.) (2019), S. 26-27.

³³⁰Vgl. Oke, T. R. (2006), S. 10-11.

ten herangezogen werden, um so die Unterschiede im Stadtgebiet hervorzuheben.³³¹ Die Identifikation möglicher Messstandorte sollte in Kooperation mit jeweiligen Institutionen vorgenommen werden.

Ein Projekt, welches das gesamte Stadtklima fokussiert ist die Soester *BürgerWOLKE*. Hierbei soll mit einem niedrigen Kostenaufwand eine solide Datengrundlage über das Stadtklima in Echtzeit ermöglicht werden. Es wurden 100 Sensoren im gesamten Stadtgebiet verteilt und über 10 Gateways mit einem Server verbunden. Zusätzlich existiert eine Referenzstation, um die erhobenen Daten zu validieren.³³² 50 Sensoren werden von Privatpersonen betrieben.³³³ Es stellt sich die Frage, ob ein solches Modell auch auf Gelsenkirchen übertragen werden kann, indem ein Teil der Sensoren von Privatpersonen betrieben werden können. Dazu muss geklärt werden, wer die Kosten der Anschaffung und Betreuung übernimmt.

Sobald die Sensoren angebracht sind müssen diese noch über ein entsprechendes Netzwerk die Daten an einen Server übermitteln. Dies wird im nächste Abschnitt betrachtet.

Datenübertragungsproblematik

Wie im Kapitel 3.4 vorgestellt existieren diverse Technologien und Anbieter um Sensoren miteinander zu vernetzen³³⁴. Aufgrund des abzudeckenden Areals sollte ein Wireless Wide Area Network, konkret ein LPWAN, gewählt werden. Laut ihrer Digitalstrategie bestrebt die Stadt Gelsenkirchen die Bereitstellung eines LoRaWan-Funknetz über das gesamte Stadtgebiet einzurichten.³³⁵ Aus diesem Grund sollte diese Infrastruktur auch zum Erfassen von Klimadaten genutzt werden. Dies bildet den Vorteil, dass die Nutzung des Netzwerk keine Lizenzgebühren erfordert und die Übertragung einzelner Nachrichten nicht bezahlt werden muss. Es bleibt zu klären, ob Areale vorhanden sind, bei denen eine andere Übertragungstechnologie vorteilhafter wäre. Das Hauptaugenmerk muss dabei auf dem Aufbau eines stabilen und zuverlässigen Netzwerks liegen. Während die jeweiligen Sensoren keinen Stromanschluss benötigen, müssen diese bei der Platzierung der Gateways berücksichtigt werden. Des Weiteren muss bei den Sensoren eine Prüfung stattfinden, welche Klasse genutzt werden soll. Entsprechend den Anforderungen, dass lediglich Daten erhoben und weitergeleitet werden müssen, sollte zwischen Klasse A (Änderungen am Gerät kurz nach Uplink) oder B (Änderung am Gerät in festen Zeitfenstern) gewählt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Größe der Nachrichten von 248 Bytes im Vergleich zu anderen Anbietern. Eine weitere Möglichkeit wäre die Nutzung eines proprietären Netzwerks. Dabei kön-

³³¹Vgl. Otte, U. et al. (1999), S. 292.

³³²Vgl. Stadt Soest (Hrsg.) (2022b).

³³³Vgl. Stadt Soest (Hrsg.) (2022a).

³³⁴Vgl. Network Layer Abbildung 4

³³⁵Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2020), S. 27.

nen auch lizenzierte Frequenzbereiche genutzt werden.³³⁶ Dies kann von Vorteil sein, falls das städtische Funknetz ausfällt oder überlastet ist. Für eine genaue Gegenüberstellung und Abwägung ist eine Machbarkeitsstudie hilfreich. Zusätzlich bleibt zu prüfen, wie Informationen für die Übertragung zusammengelegt und codiert werden müssen. Die jeweiligen Metadaten sollen nicht vom Endgerät gespeichert oder verarbeitet werden. Fog- oder Edge-Computing bei denen die Rechenleistung auf den Endgeräte, bzw. den Gateways, durchgeführt werden, sind irrelevant. Die Daten geben nur in Kombination und globaler Betrachtung einen Mehrwert. Daher werden diese beiden Formen des Computings nicht näher berücksichtigt. Ein Aspekt der weitere Recherche benötigt sind externe Datenquellen.

Externe Datenquellen

In Kapitel 4.1.1 wurden bereits einige externe Datenquellen vorgestellt. Die Pegel­daten des WSA Westdeutsche Kanäle kann für die Überwachung von Niedrigwasser des Rhein-Herne Kanals genutzt werden. Zusätzlich sollten bei der Emschergenossen­schaft Lippeverband (EGLV) weitere Daten über die Emscher angefragt werden. Der Aufgabenbereich der EGLV ergänzt sich um die Abwasserreinigung, Sicherung des Abflusses und Hochwasserschutz.³³⁷ Daher sollte ein Datenzugriff angefragt werden, da dadurch weitere Einsichten betreffend der Emscher, Abwasserkanäle und Schmutz­wasserläufe erlangt werden können.

Für die Überwachung der Luftqualität kann auf die Daten des LANUV zurückgegrif­fen werden. Da sich bereits fünf Messstellen im Stadtgebiet befinden, sollte sich bei der Planung und Inbetriebnahme weiterer mit dem LANUV abgesprochen werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass eine einheitliche Überwachung stattfindet und die Daten bei Bedarf auch dem LANUV zur Verfügung gestellt werden können.

Bei Zugriff auf Daten externer Unternehmen muss auf die korrekte Übernahme geach­tet werden. Darunter fallen eventuelle falsche Codierungen, beschädigte Datensätze oder die korrekte Nutzung einzelner Datentypen. Dadurch soll die Maschinenlesbar­keit gefördert werden und erhalten bleiben. Für die weitere Verarbeitung werden die Daten längerfristig gespeichert.

Datenspeicherung

Im Rahmen einer späteren Erweiterung von Anwendungsfällen und den dadurch anfal­lenden Daten müssen diese in jeweils separaten Datenbanken gespeichert werden. Je nach Anforderung wird ein anderes DBMS gewählt. Für die Speicherung der erhobe­nen Klimadaten bietet sich eine Zeitreihendatenbank an. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass der erhobene Parameter und der Zeitpunkt in den Fokus rücken. Die erhobe-

³³⁶Vgl. Kapitel 3.4

³³⁷Vgl. Emschergenossenschaft Lippeverband (Hrsg.) (2022).

nen Werte werden nicht nachträglich verändert und bleiben konstant.³³⁸ Die jeweiligen Metadaten über die einzelnen Stationen sind auch relevant, werden dabei aber von den erhobenen Werten getrennt gespeichert. Auch wenn diese nicht laufend geändert werden, sollte eine gewisse Flexibilität bestehen, um diese zu erweitern oder zu kürzen, ohne dass die Datenbank darunter leidet. Aus diesem Grund werden die Metadaten in NoSQL gespeichert. Zur Verwendung kann der Aufbau der Smart Data Models von FIWARE herangezogen werden.³³⁹ Diese sollten jedoch um die „Zuordnung einer urbanen Klimazone“, „Meter über den Boden“, „Inbetriebnahme“, „Letzte Kontrolle“, „Platzierung“ und „Angaben über den Sensor“ erweitert werden. Durch die Zuordnung einer Klimazone können die Erhebungen identischer Zonen miteinander verglichen werden. Meter über den Boden gibt einen Hinweis darüber, wo die Sensoren verbaut sind. Inbetriebnahme und letzte Kontrolle sollen Aufschluss über das Installationsdatum und den letzten Kontrollgang geben. Dadurch kann die Wartung kontrolliert werden. Die Platzierung soll angeben, ob sich die Sensoren im öffentlichen Raum oder auf privaten Grundstücken befinden. Zusätzlich sollten Adressangaben getätigt werden, um die Sensoren bei privaten Grundstücken besser identifizieren zu können. Dies kann jedoch nur unter dem Aspekt passieren, dass die Daten datenschutzrechtlich konform gespeichert werden. Unter Angaben über den Sensor können Hersteller, Modell oder weitere Informationen gespeichert werden. Dieser Datenumfang ist für spätere übergeordnete Analysen von Bedeutung. Allgemein werden die Smart Data Models für eine potentielle spätere Verwendung auf der FIWARE Plattform benötigt. Dabei sollen Datenplattformen die Speicherung und Nutzung von Daten aus verschiedenen Quellen unterstützen.³⁴⁰ Die Herausforderungen liegen vor allem in der Verarbeitungsgeschwindigkeit, der Heterogenität und im Volumen der Daten sowie der Automatisierung des Datenflusses.³⁴¹ Im Rahmen einer Mikroklima-Analyse fallen zwar keine großen Datenbestände an, jedoch kann bereits im kleineren Rahmen die Nutzung verschiedener Plattformen erprobt werden.

Managementplattform

Die Nutzung der Daten auf einer Datenplattform kann verschiedene Funktionen erfüllen. So soll die GELSENcloud weiteren Anwendung die Daten zur Verfügung stellen und miteinander verschneiden.³⁴² Bei FIWARE stehen neben der Zurverfügungstellung, die Analyse und Visualisierung im Vordergrund.³⁴³ Die Wahl eines Anbieters soll an dieser Stelle nicht näher erläutert, sondern es sollen vielmehr die Gemeinsamkeiten

³³⁸Vgl. Grzesik, P./ Mrozek, D. (2020), S. 373-374.

³³⁹Vgl. Abbildung 9 im Anhang.

³⁴⁰Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.) (2022).

³⁴¹Vgl. Strohbach, M. et al. (2015), S. 260 u. 264.

³⁴²Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2020), S. 28.

³⁴³Vgl. FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.) (2022a).

der Anbieter hervorgehoben werden. Dabei können die o. g. genannten Funktionen einerseits dem Business Layer und andererseits dem Application Layer zugeordnet werden. Da es sich bei einer Analyse um die Erschließung tieferer Einblicke in die Daten handelt und dafür eine größere Datenmenge notwendig ist, wird diese dem Business Layer zu geordnet. Im Falle der Visualisierung einer einzelnen Anwendung, z. B. der Darstellung des aktuellen Mikroklimas, wird diese im Application Layer angesiedelt. Bei Analysen werden tiefere Einblicke in die Daten ermöglicht.³⁴⁴ Es können vergangene Daten analysiert und zukünftige simuliert werden.³⁴⁵ Für die Ermöglichung von Analysen muss ein konkretes Analyseziel vorliegen. Im Bereich der Klimaüberwachung gibt es u. a. das DPSIR Modell. Es setzt sich zusammen aus den treibenden Kräften (Driving Forces), Auswirkungen (Pressures), Status (State), Wirkungen (Impacts) und Reaktionen (Response). Die einzelnen Faktoren beeinflussen sich dabei gegenseitig.³⁴⁶ Anhand dieses Modells hat das LANUV diverse Indikatoren ermittelt und den einzelnen Faktoren zugeordnet.³⁴⁷ So werden bspw. die Klimaentwicklung und Auswirkungen auf Mensch und Umwelt näher betrachtet. In der Klimaentwicklung sind es bspw. Mittelwerte der Lufttemperatur oder des Niederschlags. Bei den Umweltauswirkungen wird z. B. die mittlere jährliche Bodentemperatur oder der Grundwasserstand ermittelt. Die Auswirkungen am Menschen können anhand der jährlichen Anzahl von Tagen mit Wärmebelastung dargestellt werden.³⁴⁸ Ziel ist es eine umfangreiche Betrachtung des Klimas und den resultierenden Folgen zu ermöglichen.³⁴⁹ Die Berechnung der jeweiligen Indikatoren kann in der gewählten Datenplattform verankert und als Datenbasis für wiederkehrende Klimaanalysen genutzt werden. Daneben existieren weitere Verfahren, die beim Vorliegen längerer Zeitreihen, genutzt werden können. Dazu zählen statistische Verfahren, wie Regressions- oder Klassifizierungsmodelle³⁵⁰, bis hin zur Nutzung von künstlicher Intelligenz³⁵¹. Für die Konzeption weiterer Analysemaßnahmen im Bereich der Data Science müssen jedoch umfangreiche Daten vorliegen.

Die aktuellen Klimadaten bilden dabei die Grundlage für weitere Anwendungen. Darunter fällt auch die Darstellung in einem Dashboard.

³⁴⁴Vgl. Syed, A. S. et al. (2021), S. 435.

³⁴⁵Vgl. Greiner, R. et al. (2022), S. 141.

³⁴⁶Vgl. Smeets, E./ Weterings, R. (1999), S. 6-7.

³⁴⁷Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2021), S. 12.

³⁴⁸Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2021), S. 16-18.

³⁴⁹Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2021), S. 12.

³⁵⁰Vgl. Papp, S. et al. (2022), S. 198.

³⁵¹Vgl. Papp, S. et al. (2022), S. 262.

Anwendungen

In Dashboards können verschiedene visuelle Komponenten dargestellt werden. Der Vorteil liegt hierbei auf der Konzentration bestimmter Bereiche. Das können bspw. einzelne Stadtgebiete oder Themenbereiche sein. Bei der Darstellung des Mikroklimas bieten sich operationale Dashboards an. Der Fokus liegt auf der Überwachung von Echtzeitdaten. Dabei müssen die wichtigsten Kerninformationen auf einen Blick erkennbar sein.³⁵² Die Klimadaten können dabei auf verschiedene Weisen dargestellt werden. Zum einen kann der räumliche Bezug nach Stadtteilen oder urbane Klimazonen erfolgen. So können diese untereinander verglichen werden. Zum anderen können Daten nach meteorologischen Größen sortiert und dargestellt werden. Auf diese Weise kann ein schneller Überblick des Stadtgebiets erfolgen.

Die aktuellen Klimadaten können auch Grundlage für Benachrichtigungen sein. Die City-App Gelsenkirchen bieten einen zentralen Zugang zu städtischen Themen, wie bspw. Nachrichten.³⁵³ Es wäre denkbar, dass sobald eine hohe Feuchtkugeltemperatur registriert wird, den Nutzern eine automatisierte Nachricht durch das System zugesendet wird, bestimmte Gebiete zu meiden. Ähnlich verhält es sich mit Benachrichtigungen bzgl. Hochwassergefahren oder Starkregen. Auf diese Weise kann die Sicherheit der Bevölkerung erhöht werden.

Die Daten können auch in Form von Open Data der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Auf dieser Basis können Interessierte ihre eigenen Anwendungen entwickeln.³⁵⁴ Bspw. wurden auf diese Weise in Amsterdam mehrere Anwendungen entwickelt, die verschiedene Bereiche, wie Mobilität oder Tourismus, fokussieren. Im Rahmen eines Wettbewerbs konnten Entwickler ihre Anwendung einreichen, solange ein offener Datensatz verwendet wurde. Die Weiterentwicklung und Kommerzialisierung der Anwendungen wurden im Anschluss gefördert.³⁵⁵ Durch solche Verfahrensweisen können Innovationen im Stadtgebiet gefördert werden.

Digitaler Zwilling

In Kapitel 3.8 wurde bereits das Konzept des digitalen Zwillings vorgestellt. Die Stadt Gelsenkirchen nutzt einen digitalen Zwilling, der sich jedoch von der hier genannten Definition unterscheidet. Zwar wird das Stadtgebiet durch Panoramabilder und entsprechender Laserverfahren genau abgebildet³⁵⁶, jedoch entspricht dies nur einer von vier Charakteristika (genaues Mapping).³⁵⁷ Die Stadt verfügt jedoch über die weiteren

³⁵²Vgl. Vaisman, A./ Zimányi, E. (2022), S. 200-202.

³⁵³Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022b).

³⁵⁴Vgl. Europäische Kommission (Hrsg.) (2022).

³⁵⁵Vgl. Waag Futurelab (Hrsg.) (2022).

³⁵⁶Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022i).

³⁵⁷Vgl. Deren, L. et al. (2021), S. 2-3.

Ressourcen, um die einzelnen Schichten³⁵⁸ aufzubauen. Es sind verschiedene Karten zur Bebauung und Gelände, 3D-Modelle und Infrastruktur vorhanden.³⁵⁹ In Kombination mit Klimadaten in Echtzeit lässt sich ein digitaler Zwilling wie in Kapitel 3.8 erstellen. Darin könnten bspw. Klimasimulation und -modelle dargestellt und durchgeführt werden. Auf diese Weise simuliert der Kreis Lippe Starkregen- und Hochwasserszenarien. Diese sind vor allem für die Planung und Beurteilung von Bauvorhaben von Relevanz. Die Basis bildet eine topographische Oberflächenanalyse.³⁶⁰ Ähnlich einem Dashboard können die Klimadaten auch im räumlichen Bezug angezeigt werden. Weitere Nutzungsmöglichkeiten können mithilfe von weiteren Daten erschlossen werden. Dabei bilden die hier genannten lediglich einen Anhaltspunkt, wozu ein digitaler Zwilling genutzt werden könnte.

Mithilfe der vorliegenden technischen Konzeption kann eine Mikroklima-Analyse erfolgen. Klimadaten werden automatisiert erhoben und gespeichert. Echtzeitdaten können dazu genutzt werden den jeweiligen aktuellen Klimazustand der einzelnen Erhebungsräume darzustellen. Über einen längeren Erhebungszeitraum entstehen Datenreihen mit denen Analysen durchgeführt werden können. Zwar benötigen Klimaanalysen per Definition 30 Jahre³⁶¹, jedoch kann auf diese Weise das Mikroklima (räumliche Gebiete bis 2 km)³⁶² näher betrachtet werden. Jedoch sollte daher frühzeitig mit der Erhebung begonnen werden, um Klimaanalysen zu ermöglichen. Für die Konzeption von Steuerungsmaßnahmen sind diese Gebiete von Relevanz. Dabei kann ein digitaler Zwilling unterstützen, um die jeweiligen Gebiete digital abzubilden. Mit diesem Ebenbild können bspw. Baumaßnahmen visuell und im räumlichen Kontext dargestellt werden.

Da der komplette Aufbau eines LPWAN mit entsprechender Sensorik und Datenspeicherung keine wiederkehrende Aufgabe, sondern ein komplexes Vorhaben darstellt, handelt es sich demnach um ein Projekt.³⁶³ Zu diesen Zweck wird im folgenden Kapitel eine grobe Übersicht über einen möglichen Projektverlauf gegeben.

6 Ablaufplan Gelsenkirchen

Der Aufbau eines Netzwerks mit Sensorik und Datenspeicherung erstreckt sich auf das gesamte Stadtgebiet und in verschiedene Teilbereiche. Daher ist es notwendig bereits vor der Planung ein interdisziplinäres Projektteam zusammenzustellen, das in den jeweiligen Teilbereichen über Kompetenzen verfügt. Es wird Wissen über Klimadaten und deren Erhebungen, Aufbau und Betreuung eines LPWAN, Datenspeicherung

³⁵⁸Vgl. Abbildung 8

³⁵⁹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022d).

³⁶⁰Vgl. Kreis Lippe (Hrsg.) (2022).

³⁶¹Vgl. Hupfer, P. et al. (2005), S. 5.

³⁶²Vgl. Orlanski, I. (1975), S. 528.

³⁶³Vgl. von Känel, S. (2020), S. 23.

und -architektur, Stadtplanung sowie eine Projektleitung benötigt. Bei Bedarf können auch externe Berater eingekauft werden.³⁶⁴ Da der deutsche Wetterdienst³⁶⁵ und das LANUV³⁶⁶ über die Expertise von Klima und- Umweltdaten verfügen sollten diese als Berater mit in die Planung einbezogen werden. Zu beachten ist, dass Projektmitglieder während Tätigkeiten am Projekt nicht ihren Kernaufgaben in ihrer jeweiligen Abteilung nachgehen. Daher sind entsprechende Absprachen zu treffen.³⁶⁷ Gemeinsam wird vor eigentlichem Projektstart ein Projektsteckbrief erarbeitet. Darin sollten die wichtigsten Kerninformationen, wie bspw. Projektziel, -phasen, -organisation und verfügbare Ressourcen festgehalten werden. Diese Informationen bilden die Grundlage für den Projektstrukturplan.³⁶⁸ In diesem wird das Projekt in kleine Teilprojekte, Teilaufgaben und einzelne Arbeitspakete aufgeteilt. Dadurch entsteht eine strukturierte Übersicht, an welcher im späteren Verlauf der Fortschritt kontrolliert werden kann.³⁶⁹ Die einzelnen Teilprojekte lauten³⁷⁰:

- Teilprojekt 1: Aufbau Sensorik,
- Teilprojekt 2: Aufbau Netzwerk,
- Teilprojekt 3: Aufbau Datenbank und
- Teilprojekt 4: Aufbau Datenplattform.

Die einzelnen Arbeitspakete und Teilaufgaben orientieren sich jeweils am Ziel des übergeordneten Teilprojekts. Für das Testen der Technologie eignet sich das Areal des OIL. Da bereits dort unterschiedliche Sensoren und Netzwerke getestet werden, können die dort gewonnen Erkenntnisse in die Projektplanung und Durchführung einfließen.³⁷¹ Für die Durchführung des Projektes stehen diverse Phasenmodelle zur Verfügung. Zur Auswahl stehen das klassische, agile oder hybride Projektmanagement. Im klassischen Projektmanagement wird der Ablauf von Beginn an in einzelnen Phasen geplant. Das Ergebnis einer Phase bildet die Voraussetzung der weiteren Phasen.³⁷² Dabei wird sich eng am vorgegebenen Projektziel orientiert. Agiles Projektmanagement folgt einem flexibleren Vorgehen. Das Projekt wird in einzelne Etappen unterteilt, wobei am Ende einer Etappe ein funktionsfähiges Zwischenprodukt entsteht. Dieses wird mit den Anforderungen verglichen, um dann entweder weiter daran zu arbeiten oder neue Lösungswege zu ergründen. Dieses Projektmanagement stammt aus der Softwareentwicklung, welches sich durch schnell ändernde Rahmenbedingun-

³⁶⁴Vgl. Bergmann, R./ Garrecht, M. (2021), S. 325.

³⁶⁵Vgl. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2022a).

³⁶⁶Vgl. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2022g).

³⁶⁷Vgl. Bergmann, R./ Garrecht, M. (2021), S. 322.

³⁶⁸Vgl. Bergmann, R./ Garrecht, M. (2021), S. 331.

³⁶⁹Vgl. von Känel, S. (2020), S. 166-168.

³⁷⁰Eine grobe Übersicht eines möglichen Projektstrukturplans ist in Abbildung 12 im Anhang dargestellt.

³⁷¹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2022m).

³⁷²Vgl. von Känel, S. (2020), S. 61.

gen kennzeichnet.³⁷³ Im hybriden Projektmanagement werden einzelne Projektphasen oder Teilprojekte entweder klassisch oder agil durchgeführt.³⁷⁴ Auf diese Weise kann das ganze Projekt klassisch angelegt sein und einzelne Teilprojekte, wie z. B. der Aufbau der Datenbank oder Datenplattform agil durchgeführt werden. Alle Phasenmodelle haben die Gemeinsamkeit, dass bei auftretenden Fehlern zur vorherigen Phase zurückgekehrt werden kann, um einen alternativen Lösungsansatz durchzuführen.³⁷⁵

Im Rahmen dieser Arbeit kann jedoch keine genaue Projektplanung stattfinden. Diese sollte von entsprechenden Experten durchgeführt werden. Im Laufe des Projektes können Probleme auftreten, die vorher nicht bekannt waren. Daher bietet der hier genannte Ablaufplan einen groben Überblick, wie dieser aussehen könnte. Jedoch sind im Laufe dieser Arbeit noch offene Probleme und Fragen aufgetreten. Diese werden im nächsten Abschnitt erläutert.

6.1 Offene Probleme und Fragen

Sobald die einzelnen Teilprojekte in der Testphase sind stellt sich vor allem die Frage, wer für die Betreuung und Wartung der Sensorik und des Netzwerks zuständig ist. Dies kann entweder ein an der Kommunalverwaltung angesiedeltes Unternehmen, wie bspw. die gkd-el oder Gelsen-Net, oder ein externes sein. Dies bildet jedoch ein Problem auf kommunalpolitischer Ebene. Einerseits soll das aufgebaute Netzwerk für weitere Projekte genutzt werden, andererseits bildet der Betrieb und die erforderliche Wartung einen Aufwand. Diese Problematik sollte zu Beginn der Projekts geklärt werden. Eine weitere offene Frage ist die Wahl der Datenplattform. In der Digitalstrategie der Stadt Gelsenkirchen ist der Aufbau der GELSENcloud vorgesehen.³⁷⁶ Es ist nicht ersichtlich, ob es sich um eine eigene Entwicklung oder eine gekaufte Leistung handelt. Zusätzlich stellt sich die Frage, ob bspw. FIWARE eingebunden werden kann, da dort bereits verschiedene Use-Cases und Smart Data Models zur Verfügung stehen. Eine weitere Möglichkeit bildet die sogenannte *Gaia-X*. Dabei handelt es sich um eine Datenplattform die für Kommunen entwickelt wurde. Dort sollen auch weitere Stakeholder der Städte und Kommunen die Möglichkeit haben Daten hochzuladen. Ziel ist es hierbei eine bundesweite Lösung anzubieten, die die eigene Datensouveränität bewahrt.³⁷⁷ Es stehen verschiedene Datenplattformen zur Auswahl. Daher müssen die jeweiligen Vor- und Nachteile abgewogen werden. Dies kann Gegenstand einer anschließenden Forschungsarbeit sein. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Datenhoheit und Kooperation weiterer Stakeholder und ihre Daten. Erhobene Daten stellen durch Analysen einen Mehrwert für Unternehmen dar. Dadurch sind sie für diese ei-

³⁷³Vgl. Bergmann, R./ Garrecht, M. (2021), S. 347-348.

³⁷⁴Vgl. von Känel, S. (2020), S. 76.

³⁷⁵Vgl. von Känel, S. (2020), S. 61-62.

³⁷⁶Vgl. Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.) (2020), S. 28.

³⁷⁷Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.) (2022).

ne wichtige Ressource.³⁷⁸ Jedoch existiert derzeit keine gesetzliche Grundlage, die Eigentumsrechte vorsieht. Zwar können von Menschen geschaffenen Daten dem Urheberrecht unterliegen, jedoch fallen maschinell erzeugte Daten nicht darunter. Eine Ausnahme bilden hierbei Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse sowie personenbezogene Daten im Kontext der EU-Datenschutzgrundverordnung.³⁷⁹ Dies zeigt, dass es schwierig ist einen Datenurheber auszumachen. Daher sollte sich generell die Frage gestellt werden, ob Daten öffentlich angeboten werden können. Dabei bildet die Verschneidung der Datensätze die Problematik. Es ist vorab nicht erkennbar, ob sich sensible oder personenbezogene Daten durch die Verschneidung von mehreren Datensätzen ergeben. Dies sollte vor allem bei der Veröffentlichung und dem Teilen mit externen Partnern berücksichtigt werden. Im Falle einer Mikroklima-Analyse sollten sich jedoch keine Probleme ergeben. Das sollte aber von einem Datenschutzbeauftragten verifiziert werden.

Sobald sich die Klimasensorik im Echtbetrieb befindet und entsprechende Daten vorliegen können Maßnahmen geplant und durchgeführt werden. Zu diesem Zweck werden im nächsten Kapitel einige Maßnahmen exemplarisch vorgestellt.

6.2 Maßnahmen im Bereich Smart Environment

Es existieren verschiedene Maßnahmen, die zu einem verbesserten Klima führen können. Auf diese Weise kann das Klima in entsprechenden Gebieten gesteuert werden. Einige Maßnahmen erfordern größere Bebauungen, andere benötigen einen geringeren Eingriff. So können bspw. im Bereich von Hitzeinseln offene Wasserflächen geschaffen werden. In Form von Springbrunnen oder Wasserzerstäubern verdunstet das austretende Wasser und kühlt auf diese Weise den aufgeheizten Bereich. Gleichzeitig wird die Luftfeuchtigkeit erhöht. Eine Alternative stellt die Dachbegrünung dar. Durch kleine Grünflächen auf Dächern kann bereits das Aufheizen von Dächern verhindert werden. Gleichzeitig wird in diesen Niederschlag aufgefangen, der durch Verdunstung die Luft im Umkreis abkühlt. Bei Starkregen dienen sie gleichzeitig dazu den Niederschlag mit Zeitverzug in die Kanalisation abzugeben.³⁸⁰ Im Falle anhaltender Hitzeperioden muss jedoch Wasser eingespart werden, weswegen auf diese Weise kein Trinkwasser verbraucht werden sollte. Um nicht auf Trinkwasser zurückzugreifen wird in Stuttgart eine weitere Maßnahme getestet. Dort werden Dachablaufwasser und Grauwasser zur Bewässerung einer begrünten Fassade und für ein benachbartes Urban Gardening Projekt genutzt. Der Niederschlag wird direkt in einer 7 m³ großen Zisterne aufgefangen. Das verschmutzte Grauwasser wird durch einen pflanzlichen Bodenfilter aufbereitet. Auf diese Weise kann Wasser für die spätere Nutzung gespeichert wer-

³⁷⁸Vgl. Papp, S. et al. (2022), S. 459.

³⁷⁹Vgl. Froese, J./ Straub, S. (2021), S. 88-90.

³⁸⁰Vgl. Steinrücke, M. et al. (2011), S. 38.

den.³⁸¹ In Kombination mit einer Dachbegrünung könnte während Hitzeperioden die notwendigste Bewässerung durchgeführt werden. Eine solche Maßnahme kann auch zur Bewässerung von Bäumen genutzt werden. Je nach Standort können die Grünpflegebetriebe auf dieses Wasser zugreifen. Mithilfe der Baum-App und verteilten Bodensensoren können die Baumbestände identifiziert werden, die eine zusätzliche Bewässerung benötigen. Auf diese Weise wird die Natur während Hitzeperioden erhalten und die Grünpflegebetriebe werden entlastet. Eine letzte Maßnahme wird in der Stadt Wien umgesetzt. Aufgrund der hohen Versiegelung und Verdichtung des Bodens in Städten haben die Wurzeln von Bäumen keine Möglichkeit weiter im Erdreich durchzudringen. Mit dem sogenannten „Schwammstadt-Prinzip“ wird unterhalb des Straßenraums der Boden entsiegelt und durch eine Schicht aus grobkörnigem Schotter und wasserspeichernden Materialien ersetzt. Auf diese Weise wird einsickerndes Wasser zurückgehalten und der jeweilige Baum kann dieses über die Wurzeln aufnehmen. Gleichzeitig verbleibt überschüssiges Wasser im Boden, welches bei höheren Temperaturen verdunsten kann.³⁸² Diese Maßnahme stellt bei besonders schützenswerten Bäumen eine Möglichkeit der Pflege dar. Bei größeren Baumbeständen müssen entsprechend viele Böden ersetzt werden. Des Weiteren ist nicht genau ersichtlich, ob auf diese Weise den jeweiligen Bäumen geschadet werden kann.

Die hier vorgestellten Maßnahmen sollen einen ersten Einblick ermöglichen. Mithilfe einer Mikroklima-Analyse können Gebiete identifiziert werden, in denen eine entsprechende Maßnahme angebracht ist. Sobald eine Maßnahme durchgeführt wurde bietet die aufgebaute Sensorik gleichzeitig ein Kontrollinstrument. Da das Mikroklima von verschiedenen Faktoren abhängt kann eine Veränderung nicht uneingeschränkt auf eine durchgeführte Maßnahme zurückgeführt werden.³⁸³ Dabei muss die Besonderheit der Referenzstationen gewahrt werden. Aufgrund ihrer Beschaffenheit 30 Jahre konstante Daten zu erheben, sollten daher keine Maßnahmen im direkten Umfeld geplant und durchgeführt werden. Andererseits könnten die Referenzdaten verfälscht werden.³⁸⁴ Es ist auch zu beachten, dass nicht jede Maßnahme auf die selbe Weise für die einzelnen Kommunen umzusetzen ist. Daher empfiehlt es sich einzelne Maßnahmen gegenüberzustellen. Das Projekt „Urban Governance Toolbox“ ist eine Sammlung von einzelnen Maßnahmen hinsichtlich klimaresilienter städtischer Entwicklung. Dabei werden durchgeführte Maßnahmen systematisch dokumentiert und zur Verfügung gestellt.³⁸⁵ Dies bildet eine Möglichkeit auf eine Sammlung von Maßnahmen zurück-

³⁸¹Vgl. Deutscher Städte und Gemeindebund (DStGB)/ Deutsches Institut für Urbanistik (Difu) (Hrsg.) (2022), S. 23-24.

³⁸²Vgl. Stadt Wien (Hrsg.) (2022).

³⁸³Vgl. Helbig, A./ Schirmer, H. (1999), S. 10.

³⁸⁴Vgl. World Meteorological Organization (Hrsg.) (2019), S. 26.

³⁸⁵Vgl. Deutscher Städte und Gemeindebund (DStGB)/ Deutsches Institut für Urbanistik (Difu) (Hrsg.) (2022), S. 47-48.

zugreifen.

In diesem Kapitel wurde vorgestellt, in welchem Rahmen der Aufbau einer Mikroklimaüberwachung stattfinden kann. Die einzelnen Bestandteile, um eine Analyse und daraus Steuerungsmaßnahmen durchzuführen wurden näher betrachtet. Es bleiben offene Fragen und Probleme, die im Rahmen eines Projektes beantwortet werden sollten. Im letzten Kapitel wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick für weitere Arbeiten gegeben.

7 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption einer Mikroklima-Analyse und Steuerung für die Stadt Gelsenkirchen. Das Konstrukt einer Smart City bietet unterschiedliche Möglichkeiten, um ein solches Konzept zu erreichen. Vor der eigentlichen Konzeption eines Projektes in diesem Kontext ist es wichtig die einzelnen Handlungsfelder in die Betrachtung einzubeziehen. Nicht jede Stadt oder Kommune muss sich streng an die Literatur halten, sondern kann auch eigene Handlungsfelder, bzw. Leitthemen formulieren. Diese fokussieren unterschiedliche Bereiche in denen eine Kommune gestalten kann. Die Handlungsmöglichkeiten ergeben sich hierbei aus der Technologie. Im Rahmen der Durchführung ist es erforderlich ein stadtweites Netzwerk aufzubauen mit dem Klimadaten erhoben und transportiert werden können. Dazu stehen verschiedene Anbieter und Technologien zur Auswahl. An der Vielzahl der Anbieter ist erkennbar, dass sich immer mehr Organisationen zu Allianzen oder Dachverbänden zusammenschließen. Auf diese Weise haben sie Einfluss auf die Entwicklung und Etablierung von Standards. Es kann von Vorteil sein, einen einheitlichen Standard anzuwenden. Dies kann jedoch im Rahmen von weiteren Arbeiten und Marktanalysen geprüft werden. Nicht jeder Standard kann auf die Rahmenbedingungen der jeweiligen Nutzer angewendet werden. Ebenso müssen sich die jeweiligen Smart Cities für eine eigene Architektur entscheiden. In dieser Arbeit wurde zwar das Fünf-Layer-Modell gewählt, aber andere Voraussetzungen und Rahmenbedingungen können die Wahl auf ein anderes Modell legen. Die Architektur wird u. a. durch die genutzten Anwendungsfälle definiert. Es handelt sich nicht um eine Blaupause für jede Stadt.

Ein weiterer Aspekt ist die Speicherung großer Datenbestände. In dieser Arbeit wurde nur ein Teil von potentiell erheblichen Daten betrachtet. Unter der Einbeziehung weiterer Anwendungsfälle steigt der Umfang und die Größe stetig weiter an. Die Wahl eines passenden Datenbanksystems und entsprechenden Datenbanken ist dabei von enormer Bedeutung. Aufgrund ihrer jeweiligen Strukturierung ist nicht jede Form der Speicherung anwendbar. In Kombination mit weiteren Daten ergeben sich immer größere Datenstrukturen, die bei unsachgemäßer Speicherung und Handhabung nicht effektiv nutzbar sind. In diesem Kontext muss abgewogen werden, inwieweit neue Berufsfelder im kommunalen Kontext geschaffen werden. Das kann z. B. ein Datenarchitekt sein.

Diese Frage stellt sich ebenso bei der Verortung von Projekten im Smart City Bereich. Die Konzeption und Durchführung kann in entsprechenden Abteilungen erfolgen, jedoch muss der praktische Betrieb und die Wartung sichergestellt werden. Dies kann entweder an externe Unternehmen ausgegliedert oder an bestehende kommunale Einrichtungen angesiedelt werden. Zu diesem Zweck bestünde auch die Möglichkeit ein kommunales Smart City Unternehmen zu gründen. Dort könnte die Expertise rund um Smart City und die genutzten Technologien gebündelt werden. Des Weiteren ist unter dem Aspekt der Datensicherheit zu klären, an welchem Standort Daten gespeichert und ob sie zur freien Verfügung gestellt werden dürfen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob es möglich ist die Daten zur Monetarisierung zu nutzen. Auf der vorhandenen Datengrundlage können Geschäftsmodelle und Innovationen entstehen. In weiteren Forschungsarbeiten kann näher erörtert werden, ob eine Monetarisierung rechtlich möglich ist, welche Datenbestände zur Verfügung gestellt werden können und wie ein solches Vorhaben ausgestaltet werden kann.

Mit den zusätzlich vorliegenden Klimadaten ist es möglich einen digitalen Zwilling zu entwickeln, der über die vier vorgestellten Charakteristika verfügt. Im Rahmen weiterführenden Forschungsarbeiten können weitere mögliche Datenlieferanten erschlossen werden. In diesem Zusammenhang müssen entsprechende Anwendungsfälle näher erörtert und konzipiert werden. Die Stadt Gelsenkirchen verfügt durch ihre Digitalstrategie bereits über die notwendigen politische Rahmenbedingungen. Zusätzlich liegt ein Testareal vor, auf dem verschiedene Anbieter im kleineren Umfang getestet werden können. Dies bildet gute Grundvoraussetzungen, um den digitalen Wandel selbst zu gestalten.

Schlussendlich dienen entwickelte Instrumente, wie bspw. eine Mikroklima-Analyse, dazu die kommunale Verwaltung zu entlasten und die Stadt lebenswerter zu gestalten.

8 Literaturverzeichnis

- Aazam, M./ Hung, P. P./ Huh, E.-N.: Smart Gateway Based Communication for Cloud of Things, in: *2014 IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, 2014, o. S.
- Abella, A.: smart-data-models/dataModel.Weather/WeatherObserved/schema.json, Online im Internet: URL: <<https://github.com/smart-data-models/dataModel.Weather/blob/c96201d463edb5d5e431e6103c79701b50c6a507/WeatherObserved/schema.json>> (Abruf: 23. 10. 2022), 2022a.
- Abella, A.: Smart-Data-Models/dataModel.WeatherObserved/Examples/Example.Json, Online im Internet: URL: <<https://github.com/smart-data-models/dataModel.Weather/blob/c96201d463edb5d5e431e6103c79701b50c6a507/WeatherObserved/examples/example.json>> (Abruf: 23. 10. 2022), 2022b.
- Aileni, R. M./ Suci, G./ Sukuyama, C. A. V./ Pasca, S./ Maheswar, R.: Internet of Wearable Low-Power Wide-Area Network Devices for Health Self-Monitoring, in: Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (Hrsg.), *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, (Elsevier Science), London 2020, S. 307–325.
- Al Nuaimi, E./ Al Neyadi, H./ Mohamed, N./ Al-Jaroodi, J.: Application of Big Data to Smart Cities, in: *Journal of Internet Services and Applications* 6/25, 2015, o. S.
- Amsterdam Institute For Advanced Metropolitan Solutions (Hrsg.): How Can the Historic Quay Walls of Amsterdam Be(Come) Future-Proof?, Online im Internet: URL: <<https://www.ams-institute.org/urban-challenges/resilient-cities/how-can-historic-quay-walls-amsterdam-become-future-proof/>> (Abruf: 05. 09. 2022), 2022.
- Austin, M./ Delgoshaei, P./ Coelho, M./ Heidarinejad, M.: Architecting Smart City Digital Twins: Combined Semantic Model and Machine Learning Approach, in: *Journal of Management in Engineering* 36/4, 2020, o. S.
- Baumüller, J./ Baumbach, G./ Hoffmann, U.: Emission, Umwandlung, Immission, in: Helbig, A./ Baumüller, J./ Kerschgens, M. J. (Hrsg.), *Stadtklima und Luftreinhaltung*, (Springer), Berlin, Heidelberg 1999, S. 167–271.
- Baun, C.: Computernetze kompakt - Eine an der Praxis orientierte Einführung für Studium und Berufspraxis, 5. Auflage. (Springer Vieweg), Berlin 2020.
- Bergmann, R./ Garrecht, M.: Organisation und Projektmanagement, 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. (Springer Gabler), Berlin 2021.
- Bodendorf, F.: Daten- und Wissensmanagement, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. (Springer), Heidelberg 2006.

- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): Neue Leipzig-Charta: Die transformative Kraft der Städte für das Gemeinwohl, (o. A.), Bonn 2021.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): Laufende Stadtbeobachtung - Raumabgrenzungen, Online im Internet: URL: <<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raubeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp.html>> (Abruf: 21.07.2022), 2022.
- Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (Hrsg.): Bevölkerungsdichte, Online im Internet: URL: <<https://www.deutschlandatlas.bund.de/DE/Karten/Wo-wir-leben/006-Bevoelkerungsdichte.html>> (Abruf: 13.09.2022), 2022.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, (o. A.), Berlin 2016.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.): Die Klimakonferenz in Paris, Online im Internet: URL: <<https://www.bmu.de/themen/klimaschutz-anpassung/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen>> (Abruf: 30.08.2022), 2022.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.): Cloudbasierte Datenplattform für smarte Kommunen, Online im Internet: URL: <<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Digitale-Welt/GAIA-X-Use-Cases/smart-city-datenplattform.html>> (Abruf: 04.11.2022), 2022.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.): Agenda 21, Online im Internet: URL: <<https://www.bmz.de/de/service/lexikon/agenda-21-13996>> (Abruf: 30.08.2022), 2022a.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.): Folgen des Klimawandels, Online im Internet: URL: <<https://www.bmz.de/de/themen/klimawandel-und-entwicklung/folgen-des-klimawandels-124774>> (Abruf: 08.11.2022), 2022b.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.): Stadt und Klima, Online im Internet: URL: <<https://www.bmz.de/de/themen/klimawandel-und-entwicklung/stadt-und-klima>> (Abruf: 08.11.2022), 2022c.
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.): Smart Cities: Stadtentwicklung Im Digitalen Zeitalter, Online im Internet: URL: <<https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/stadt-wohnen/staedtebau/smart-cities/smart-cities-node.html>> (Abruf: 08.11.2022), 2022.

- Caragliu, A./ Del Bo, C./ Nijkamp, P.: Smart Cities in Europe, in: *Journal of Urban Technology* 18/2, 2011, S. 65–82.
- Centenaro, M./ Vangelista, L./ Zanella, A./ Zorzi, M.: Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios, in: *IEEE Wireless Communications* 23/5, 2016, S. 60–67.
- Chang, K.-T.: Introduction to Geographic Information Systems, 8. Auflage. (McGraw-Hill Education), New York 2016.
- Chaudhari, B. S./ Borkar, S.: Design Considerations and Network Architectures for Low-Power Wide-Area Networks, in: Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (Hrsg.), *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, (Elsevier Science), London 2020, S. 15–35.
- Chaudhari, B. S./ Zennaro, M.: Introduction to Low-Power Wide-Area Networks, in: Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (Hrsg.), *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, (Elsevier Science), London 2020, S. 1–13.
- Connectivity Standards Alliance (Hrsg.): Become Member, Online im Internet: URL: <<https://csa-iot.org/de/Mitglied-werden/>> (Abruf: 23. 09. 2022), 2022a.
- Connectivity Standards Alliance (Hrsg.): Unsere Mitglieder, Online im Internet: URL: <<https://csa-iot.org/de/Mitglieder/>> (Abruf: 23. 09. 2022), 2022b.
- Cook, D. J./ Das, S. K.: How Smart Are Our Environments? An Updated Look at the State of the Art, in: *Pervasive and Mobile Computing* 2/3, 2007, S. 53–73.
- De Lange, N.: Geoinformatik in der Theorie und Praxis - Grundlagen von Geoinformationssystemen, Fernerkundung und digitaler Bildverarbeitung, 4. Aufl. (Springer Spektrum), Berlin, Heidelberg 2020.
- Del Campo, G./ Gomez, I./ Canada, G./ Piovano, L./ Santamaria, A.: Guidelines and Criteria for Selecting the Optimal Low-Power Wide-Area Network Technology, in: Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (Hrsg.), *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, (Elsevier Science), London 2020, S. 281–305.
- Deren, L./ Wenbo, Y./ Zhenfeng, S.: Smart City Based on Digital Twins, in: *Computational Urban Science* 1/4, 2021, o. S.
- Deutscher Städte und Gemeindebund (DStGB)/ Deutsches Institut für Urbanistik (Difu) (Hrsg.): Hitze, Trockenheit und Starkregen - Klimaresilienz in der Stadt der Zukunft, (o. A.), Berlin 2022.

- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Aufgaben des DWD, Online im Internet: URL: <https://www.dwd.de/DE/derdwd/aufgaben/aufgaben_node.html> (Abruf: 06. 11. 2022), 2022a.
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): DWD zur extremen Trockenheit in Deutschland, Online im Internet: URL: <https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2022/20220812_trockenheit_news.html> (Abruf: 02. 11. 2022), 2022b.
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Großwetterlage, Online im Internet: URL: <<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100932&lv3=101084>> (Abruf: 07. 09. 2022), 2022c.
- Dinov, I. D./ Velev, M. V.: Data Science - Time Complexity, Inferential Uncertainty, and Spacekime Analytics, (De Gruyter), Berlin, Boston 2022.
- Dittmar, C./ Schulz, P.: Architekturen und Technologien für Data Lakes, in: Gluchowski, P./ Leisten, F./ Presser, G. (Hrsg.), *Architekturen für BI & Analytics - Konzepte, Technologien und Anwendungen*, (dpunkt.verlag), Heidelberg 2022, S. 23–37.
- Edlich, S./ Friedland, A./ Hampe, J./ Brauer, B.: NoSQL - Einstieg in die Welt nicht-relationaler Web 2.0 Datenbanken, (Hanser), München 2010.
- Emschergenossenschaft Lippeverband (Hrsg.): Emschergenossenschaft - Überblick, Online im Internet: URL: <<https://www.eglv.de/emscher-lippe/emschergenossenschaft/>> (Abruf: 04. 11. 2022), 2022.
- Endlicher, W.: Stadtökologie, in: Mieg, H. A./ Heyl, C. (Hrsg.), *Stadt - Ein interdisziplinäres Handbuch*, (J.B. Metzler), Stuttgart 2013, S. 97–119.
- Escribano, C. P./ Theologou, N./ Likar, M./ Tryferidis, A./ Tzouvaras, D.: Business Models and Use Cases for the IoT, in: Zivkovic, C./ Guan, Y./ Grimm, C. (Hrsg.), *IoT Platforms, Use Cases, Privacy, and Business Models - With Hands-on Examples Based on the VICINITY Platform*, (Springer), Cham 2021, S. 51–80.
- Ester, M./ Sander, J.: Knowledge Discovery in Databases - Techniken und Anwendungen, (Springer), Berlin Heidelberg 2000.
- Europäische Kommission (Hrsg.): Amtsblatt der Europäischen Union - Durchführung der Kommission vom 12. Dezember 2011 mit Bestimmungen zu den Richtlinien 2004/107/EG und 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf den Austausch von Informationen und die Berichterstattung über die Luftqualität (2011/850/EU), (o. A.), o. A. 17. 12. 2011.

- Europäische Kommission (Hrsg.): Open Data Portal, Online im Internet: URL: <<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/open-data-portals>> (Abruf: 05. 11. 2022), 2022.
- European Telecommunications Standards Institute (Hrsg.): Context Information Management (CIM); NGSI-LD API, (ETSI), Sophia Antipolis 2021.
- Farahani, S.: ZigBee Wireless Networks and Transceivers, (Elsevier), Oxford 2008.
- Farkisch, K.: Data-Warehouse-Systeme kompakt - Aufbau, Architektur, Grundfunktionen, (Springer), Berlin, Heidelberg 2011.
- Fasel, D./Meier, A.: Was versteht man unter Big Data und NoSQL?, in: Fasel, D./Meier, A. (Hrsg.), *Big Data - Grundlagen, Systeme und Nutzungspotenziale*, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2016, S. 3–16.
- FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.): Components, Online im Internet: URL: <<https://www.fiware.org/catalogue/>> (Abruf: 23. 10. 2022), 2022a.
- FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.): Smart Cities, Online im Internet: URL: <<https://www.fiware.org/about-us/smart-cities/>> (Abruf: 23. 10. 2022), 2022b.
- FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.): Smart Data Models, Online im Internet: URL: <<https://www.fiware.org/smart-data-models/>> (Abruf: 23. 10. 2022), 2022c.
- FIWARE Foundation e. V. (Hrsg.): What Is the FIWARE Foundation, Online im Internet: URL: <<https://www.fiware.org/foundation/>> (Abruf: 23. 10. 2022), 2022d.
- Fraunhofer IOSB-INA (Hrsg.): Echtzeit-Frühwarnsystem für Starkregen-Ereignisse, Online im Internet: URL: <<https://www.lemgo-digital.de/index.php/en/umweltprojekte/107-earlyflooding>> (Abruf: 05. 09. 2022), 2022.
- Friesen, J.: Java XML and JSON, (Apress), Berkeley 2016.
- Froese, J./ Straub, S.: Wem gehören die Daten? – Rechtliche Aspekte der digitalen Souveränität in der Wirtschaft, in: Hartmann, E. A. (Hrsg.), *Digitalisierung souverän gestalten - Innovative Impulse im Maschinenbau*, (Springer Vieweg), Berlin 2021, S. 86–97.
- Gelsenkirchener Kommunale Datenzentrale Emscher-Lippe (Hrsg.): gkd-el: Firmenprofil, Online im Internet: URL: <<https://www.gkd-el.de/de/Funktionsnavigation/Firmenprofil.asp>> (Abruf: 29. 10. 2022), 2022a.
- Gelsenkirchener Kommunale Datenzentrale Emscher-Lippe (Hrsg.): Open Data für Gelsenkirchen, Online im Internet: URL: <https://www.gkd-el.de/de/Web-Services/Open_Data.asp> (Abruf: 28. 10. 2022), 2022b.

- Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (Hrsg.): Aufgaben der WSV, Online im Internet: URL: <https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/gdws/01_ueber-uns/aufgaben/aufgaben-node.html>, 2022a.
- Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (Hrsg.): Organisationsplan der WSV, Online im Internet: URL: <https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/gdws/01_ueber-uns/organigramm/Organisationsplan_WSV_pdf.html;jsessionid=4124CDC1FBB0250BF1814DD909FC639D.live11313?nn=1214012>, 2022b.
- Geschäfts- und Koordinierungsstelle GovData (Hrsg.): Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0, Online im Internet: URL: <<https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>> (Abruf: 24.08.2022), 2022.
- Giffinger, R./ Fertner, C./ Kramar, H./ Kalasek, R./ Milanović, N./ Meijers, E.: Smart Cities – Ranking of European Medium-Sized Cities, (Centre of Regional Science, Vienna University of Technology), Wien 2007.
- Gluchowski, P./ Leisten, F./ Presser, G.: Einführung in die BIA-Architekturen, in: Gluchowski, P./ Leisten, F./ Presser, G. (Hrsg.), *Architekturen für BI & Analytics - Konzepte, Technologien und Anwendungen*, (dpunkt.verlag), Heidelberg 2022, S. 3–22.
- Government of Singapore (Hrsg.): Virtual Singapore, Online im Internet: URL: <<https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>> (Abruf: 26.10.2022), 2022.
- Greiner, R./ Berger, D./ Böck, M.: Analytics und Artificial Intelligence - Datenprojekte mehrwertorientiert, agil und nachhaltig planen und umsetzen, (Springer Gabler), Wiesbaden 2022.
- Grieves, M./ Vickers, J.: Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems - New Findings and Approaches, in: Kahlen, F.-J./ Flumerfelt, S./ Alves, A. (Hrsg.), *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*, (Springer), Cham 2017, S. 85–113.
- growth with attitude UG (Hrsg.): Was ist LoRa?, Online im Internet: URL: <<https://www.lora-wan.de/lora/>> (Abruf: 03.10.2022), 2022a.
- growth with attitude UG (Hrsg.): Was ist LoRaWAN? LoRaWAN - Low Power Wide Area Network, Online im Internet: URL: <<https://www.lora-wan.de/>> (Abruf: 03.10.2022), 2022b.
- Grzesik, P./ Mrozek, D.: Comparative Analysis of Time Series Databases in the Context of Edge Computing for Low Power Sensor Networks, in: Krzhizhanovskaya,

- V. V./ Závodszy, G./ Lees, M. H./ Dongarra, J. J./ Sloot, P. M. A./ Brissos, S./ Teixeira, J. (Hrsg.), *Computational Science – ICCS 2020: 20th International Conference Amsterdam, The Netherlands, June 3-5, 2020 Proceedings, Part V*, (Springer), Cham 2020, S. 371–383.
- Guckenbiehl, P./ Hess, S./ Mumme, M./ Swarat, G./ Vogt-Hohenlinde, S./ Burton, S./ Roscher, K.: *Der Digitale Zwilling für smarte Städte – zwischen Erwartungen und Herausforderungen: Was wir in der Zukunft erwarten können und wo wir heute stehen*, (Fraunhofer-Gesellschaft e. V.), München 2021.
- Gumm, H.-P./ Sommer, M.: *Band 1: Programmierung, Algorithmen und Datenstrukturen*, Informatik. (De Gruyter Oldenbourg), Berlin 2016.
- Gumm, H.-P./ Sommer, M.: *Band 2: Rechnerarchitektur, Betriebssysteme, Rechnernetze*, Informatik. (De Gruyter Oldenbourg), Berlin 2017.
- Haasnoot, M./ Kwadijk, J./ Alphen, J./ Le Bars, D./ Hurk, B./ Diermanse, F./ Van der Spek, A./ Oude Essink, G./ Delsman, J./ Mens, M.: *Adaptation to Uncertain Sea-Level Rise; How Uncertainty in Antarctic Mass-Loss Impacts the Coastal Adaptation Strategy of the Netherlands*, in: *Environmental Research Letters* 15, 2020, o. S.
- Harrison, C./ Eckman, B./ Hamilton, R./ Hartswick, P./ Kalagnanam, J./ Paraszczak, J./ Williams, P.: *Foundations for Smarter Cities*, in: *IBM Journal of Research and Development* 54/4, 2010, S. 1–16.
- Hassan, M. B./ Ali, E. S./ Mokhtar, R. A./ Saeed, R. A./ Chaudhari, B. S.: *NB-IoT: Concepts, Applications, and Deployment Challenges*, in: Chaudhari, B. S./ Zenaro, M. (Hrsg.), *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, (Elsevier Science), London 2020, S. 119–144.
- Helbig, A./ Schirmer, H.: *Wirkungsfaktoren im mikro- und mesoklimatischen Scale*, in: Helbig, A./ Baumüller, J./ Kerschgens, M. J. (Hrsg.), *Stadtklima und Luftreinhaltung*, (Springer), Berlin, Heidelberg 1999, S. 6–14.
- Heliot Europe GmbH (Hrsg.): *Heliot Europe - Der führende, unabhängige IoT Netzbetreiber in Europa*, Online im Internet: URL: <<https://www.heliotgroup.com/ueberuns/>> (Abruf: 03. 10. 2022), 2022.
- Herrero, R.: *Fundamentals of IoT Communication Technologies*, (Springer), Cham 2022.
- Herrmann, F.: *Datenorganisation und Datenbanken - Praxisorientierte Übungen mit MS Access 2016*, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2018.

- Hong Kong Green Building Council Limited (Hrsg.): Hong Kong Smart Green Building Design - Best Practice Guidebook, (Hong Kong Green Building Council Limited), Hong Kong 2021.
- Hupfer, P./ Kuttler, W./ Chmielewski, F.-M./ Pethe H. (Hrsg.): Witterung und Klima, 11., überarbeitete und erweiterte Auflage. (B. G. Teubner Verlag), Wiesbaden 2005.
- Institut für Innovationsforschung und -management (Hrsg.): Die digitale Transformation der Kommunalverwaltung erfolgreich gestalten — Ein Leitfaden am Beispiel der Einführung eines »Digitalen Zwillings« in den Kommunen der Emscher-Lippe-Region, (Institut für Innovationsforschung und -management (ifi)), Bochum 2022.
- Jaekel, M./ Bronnert, K.: Die digitale Evolution moderner Großstädte - Apps-basierte Geschäftsmodelle für neue Urbanität, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2013.
- James, A./ Seth, A./ Mukhopadhyay, S. C.: IoT System Design - Project Based Approach, (Springer), Cham 2022.
- Jarosch, H.: Grundkurs Datenbankentwurf - Eine beispielorientierte Einführung für Studierende und Praktiker, 4., überarbeitete und aktualisierte Auflage. (Springer Vieweg), Wiesbaden 2016.
- Kainz, A./ Bürger, M.: Die IoT-Kommunikation der Zukunft – LPWAN & LTE Evolution, in: *Elektrotechnik & Informationstechnik* 133/7, 2016, S. 348–350.
- Klein, C./ Kaefer, G.: From Smart Homes to Smart Cities: Opportunities and Challenges from an Industrial Perspective, in: Balandin, S./ Moltchanov, D./ Kouchev, Y. (Hrsg.), *Next Generation Teletraffic and Wired/ Wireless Advanced Networking - 8th International Conference, NEW2AN and 1st Russian Conference on Smart Spaces, ruSMART 2008 St. Petersburg, Russia, September 2008, Proceedings*, (Springer), Berlin, Heidelberg 2008, S. 260.
- Koch, E.: Überblick über die Wirkung von Luftverunreinigung auf Mensch, Tier, Pflanzen, Boden und Materialien, in: Helbig, A./ Baumüller, J./ Kerschgens, M. J. (Hrsg.), *Stadtklima und Luftreinhaltung*, (Springer), Berlin, Heidelberg 1999, S. 272–288.
- Kramer, F. F.: Ein allgemeiner Ansatz zur Metadaten-Verwaltung, (Logos Verlag), Berlin 2019.
- Krauß, M./ Konrad, R.: Drahtlose ZigBee-Netzwerke: Ein Kompendium, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2014.
- Kreienkamp, F./ et al.: Rapid Attribution of Heavy Rainfall Events Leading to the Severe Flooding in Western Europe During July 2021, Online im Internet: URL:

<<https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>> (Abruf: 30. 08. 2022), 2021.

Kreis Lippe (Hrsg.): Starkregen und Hochwasser: Kreis stellt Digitalen Zwilling zur Verfügung - Kreis Lippe, Online im Internet: URL: <<https://www.kreis-lippe.de/kreis-lippe/aktuelles/meldungen/fachbereich-geoinfo-kataster-immobilien/starkregen-und-hochwasser-kreis-stellt-digitalen-zwilling-zur-verfuegung.php>> (Abruf: 05. 11. 2022), 2022.

Kuttler, W.: Hitzewellen in großen Städten: Folgen für die Gesundheit und Gegenmaßnahmen, in: Lozán, J. L./ Breckle, S.-W./ Grassl, H./ Kasang, D./ Weisse, R. (Hrsg.), *Warnsignal Klima: Extremereignisse*, (Wissenschaftliche Auswertungen), Hamburg 2008, S. 76–82.

Kuttler, W./ Mersmann, M./ Barlag, A.-B.: Gesamtstädtische Klimanalyse Gelsenkirchen - Darstellung und Bewertung der klimatischen und lufthygienischen Situation unter zusätzlicher Berücksichtigung des globalen Klimawandels, (Universität Duisburg Essen), Essen 2011.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Klimabericht NRW 2021 Klimawandel und seine Folgen – Ergebnisse aus dem Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring, (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)), Recklinghausen 2021.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Gelsenkirchen Kurt-Schumacher-Straße (VGES), Online im Internet: URL: <<https://www.lanuv.nrw.de/luqs/messorte/steckbrief.php?ort=VGES>> (Abruf: 23. 08. 2022), 2022a.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Gelsenkirchen-Bismarck (GELS), Online im Internet: URL: <<https://www.lanuv.nrw.de/luqs/messorte/steckbrief.php?ort=GELS>> (Abruf: 23. 08. 2022), 2022b.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Gelsenkirchen-Hassel Pawiker Straße (SCHO3), Online im Internet: URL: <<https://www.lanuv.nrw.de/luqs/messorte/steckbrief.php?ort=SCHO3>> (Abruf: 23. 08. 2022), 2022c.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Gelsenkirchen-Scholven Fünfhäuserweg (SCHO5), Online im Internet: URL: <<https://www.lanuv.nrw.de/luqs/messorte/steckbrief.php?ort=SCHO5>> (Abruf: 23. 08. 2022), 2022d.

- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): LANUV - Messplan 2022, Online im Internet: URL: <https://www.lanuv.nrw.de/luqs/messorte/Messplan_2022.xlsx> (Abruf: 22. 08. 2022), 2022e.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): LANUV Karten- und Downloaddienste, Online im Internet: URL: <<https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/daten-und-informationsdienste/karten-und-downloaddienste>> (Abruf: 23. 08. 2022), 2022f.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): LANUV stellt sich vor, Online im Internet: URL: <<https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/lanuv-stellt-sich-vor>> (Abruf: 22. 08. 2022), 2022g.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Messwerte - VGES, Online im Internet: URL: <<https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/luft/temes/365tage/VGES.csv>> (Abruf: 23. 08. 2022), 2022h.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Stationen zur diskontinuierlichen Messung, Online im Internet: URL: <<https://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/diskontinuierliche-messungen>> (Abruf: 23. 08. 2022), 2022i.
- Lea, P.: Internet of Things for Architects – Architecting IoT Solutions by Implementing Sensors, Communication Infrastructure, Edge Computing, Analytics, and Security, (Packt Publishing), Birmingham, Mumbai 2018.
- Linnemann, M./ Sommer, A./ Leufkes, R.: Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft - Praxisbuch zu Technik, Anwendung und regulatorischen Randbedingungen, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2019.
- Lombardi, P./ Giordano, S./ Farouh, H./ Yousef, W.: Modelling the Smart City Performance, in: *Innovation: The European Journal of Social Science Research* 25/2, 2012, S. 137–149.
- LoRa Alliance (Hrsg.): About LoRa Alliance, Online im Internet: URL: <<https://loralliance.org/about-lora-alliance/>> (Abruf: 04. 10. 2022), 2022a.
- LoRa Alliance (Hrsg.): LoRa Alliance Membership, Online im Internet: URL: <<https://loralliance.org/membership-benefits/>> (Abruf: 04. 10. 2022), 2022b.
- LoRa Alliance (Hrsg.): LoRaWAN Networks: Your LPWAN Network Your Way, Online im Internet: URL: <<https://loralliance.org/private-networks/>> (Abruf: 04. 10. 2022), 2022c.

- Meier, A.: *Werkzeuge der digitalen Wirtschaft: Big Data, NoSQL & Co.: Eine Einführung in relationale und nicht-relationale Datenbanken*, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2018.
- Meier, A./ Kaufmann, M.: *SQL- & NoSQL-Datenbanken*, 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. (Springer Vieweg), Berlin Heidelberg 2016.
- Meier, A./ Zimmermann, H.-D.: *Digitales Entwicklungsmodell Smarter Städte*, in: Meier, A./ Portmann, E. (Hrsg.), *Smart City - Strategie, Governance Und Projekte*, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2006, S. 3–18.
- Mekki, K./ Bajic, E./ Chaxel, F./ Meyer, F.: *Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT*, in: *PerIoT'18 - Second International Workshop on Mobile and Pervasive Internet of Things*, 2018, S. 413–418.
- Mell, P./ Grance, T.: *The NIST Definition of Cloud Computing - Recommendations of the National Institute of Standards and Technology*, (National Institute of Standards and Technology (NIST)), Gaithersburg 2011.
- MeteoGroup Nederland BV (Hrsg.): *Wetterstation Gelsenkirchen-Westfälische Hochschule - Messwerte*, Online im Internet: URL: <https://wetterstationen.meteomedia.de/?map=Nordrhein-Westfalen&station=104130> (Abruf: 12.08.2022), 2022.
- Mieg, Harald A.: *Einleitung: Perspektiven der Stadtforschung*, in: Mieg, H. A./ Heyl, C. (Hrsg.), *Stadt - Ein interdisziplinäres Handbuch*, (J.B. Metzler), Stuttgart 2013, S. 1–14.
- Mills, G./ Cleugh, H./ Emmanuel, R./ Endlicher, W./ Erell, E./ McGranahan, G./ Ng, E./ Nickson, A./ Rosenthal, J./ Steemer, K.: *Climate Information for Improved Planning and Management of Mega Cities (Needs Perspective)*, in: *Procedia Environmental Sciences* 1, 2010, S. 228–246.
- Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): *Umweltportal - Suche nach "Gelsenkirchen"*, Online im Internet: URL: <https://www.umweltportal.nrw.de/suche?q=Gelsenkirchen> (Abruf: 18.08.2022), 2022.
- Ministry of Infrastructure and the Environment/ Ministry of Economic Affairs (Hrsg.): *National Water Plan 2016-2021*, (o. A.), Den Haag 2015.
- Nam, T./ Pardo, T. A.: *Conceptualizing Smart City with Dimensions of Technology, People, and Institutions*, in: Chun, S. A./ Luna-Reyes, L./ Atluri, V. (Hrsg.), *The*

Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference - Digital Government Innovation in Challenging Times, (ACM Press), College Park, Maryland 2011, S. 282–291.

Occupational Safety & Health Administration (Hrsg.): OSHA Technical Manual (OTM) - Section III: Chapter 4 | Occupational Safety and Health Administration, Online im Internet: URL: <https://www.osha.gov/otm/section-3-health-hazards/chapter-4#step1_optionb> (Abruf: 03. 11. 2022), 2022.

Oke, T. R.: Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites, (World Meteorological Organization (WMO)), Genf 2006.

Ollmert, H. J.: Datenstrukturen und Datenorganisation, 2., korrigierte Auflage. (R. Oldenbourg Verlag), München, Wien 1992.

Orlanski, I.: A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Process, in: *Bulletin of the American Meteorological Society* 56/5, 1975, S. 527–530.

Otte, U./ Baumüller, J./ Koch, E.: Meßnetze, Meßverfahren, in: Helbig, A./ Baumüller, J./ Kerschgens, M. J. (Hrsg.), *Stadtklima und Luftreinhaltung*, (Springer), Berlin, Heidelberg 1999, S. 289–316.

Papp, S./ Weidinger, W./ Munro, K./ Ortner, B./ Cadonna, A./ Langs, G./ Licandro, R./ Meir-Huber, M./ Nikolić, D./ Toth, Z./ Vesela, B./ Wazir, R./ Zauner, G.: Handbuch Data Science und KI - Mit Machine Learning und Datenanalyse Wert aus den Daten generieren, (Hanser), München 2022.

Piro, A./ Gebauer, M.: Definition von Datenarten Zur Konsistenten Kommunikation Im Unternehmen, in: Hildebrand, K./ Gebauer, M./ Hinrichs, H./ Mielke, M. (Hrsg.), *Daten- Und Informationsqualität - Auf Dem Weg Zur Information Excellence*, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2015, S. 141–154.

Pott, R./ Hüppe, J.: Spezielle Geobotanik - Pflanzen - Klima - Boden, (Springer), Berlin, Heidelberg 2007.

Ramesh, R./ Arunachalam, M./ Atluri, H. K./ Kumar S, C./ Anand, S. V. R./ Arumugam, P./ Amrutur, B.: LoRaWAN for Smart Cities: Experimental Study in a Campus Deployment, in: Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (Hrsg.), *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, (Elsevier Science), London 2020, S. 327–345.

Regionalverband Ruhr (Hrsg.): Metropole Ruhr - Die Region in Zahlen, (RVR), Essen 2021.

Riley, J.: Understanding Metadata – What Is Metadata, and What Is It for?, (National Information Standards Organization (NISO)), Baltimore 2017.

- Roesler, S./ Kobi, M.: Microclimates and the City -Towards an Architectural Theory of Thermal Diversity, in: Roesler, S./ Kobi, M. (Hrsg.), *The Urban Microclimate as Artifact - Towards an Architectural Theory of Thermal Diversity*, (Birkhäuser), Basel 2018, S. 12–24.
- Saake, G./ Sattler, K.-U./ Heuer, A.: Datenbanken - Konzepte und Sprachen, 4. Auflage. (mitp), Frechen 2010.
- Sadiku, M. N. O./ Musa, S. M.: A Primer on Multiple Intelligences, (Springer), Cham 2021.
- El-Sayed, H./ Sankar, S./ Prasad, M./ Puthal, D./ Gupta, A./ Mohanty, M./ Lin, C.-T.: Edge of Things: The Big Picture on the Integration of Edge, IoT and the Cloud in a Distributed Computing Environment, in: *IEEE Access* 6, 2018, S. 1706–1717.
- Sigfox (Hrsg.): Payload, Online im Internet: URL: <<https://build.sigfox.com/payload>> (Abruf: 03. 10. 2022), 2022.
- Sigfox Germany GmbH (Hrsg.): Sigfox buy - Buy connectivity, Online im Internet: URL: <<https://buy.sigfox.com/buy/597f056bec48b70001cead27/discovery?numberOfDevices=1&subscriptionLevel=ultra>> (Abruf: 03. 10. 2022), 2022a.
- Sigfox Germany GmbH (Hrsg.): Technologie - Sigfox Germany GmbH, Online im Internet: URL: <<https://sigfox.de/technologie/>> (Abruf: 03. 10. 2022), 2022b.
- Smeets, E./ Weterings, R.: Environmental Indicators: Typology and Overview, (European Environmen Agency (EEA)), Kopenhagen 1999.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Vernetzte Stadt Gelsenkirchen - Integrierte Strategie der digitalen Stadt Gelsenkirchen, (o. A.), Gelsenkirchen 2020.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Baum-App Gelsenkirchen, Online im Internet: URL: <https://www.gelsenkirchen.de/de/Stadtprofil/Stadtthemen/Die_vernetzte_Stadt/Leitthemen_und_Projekte/Energie_und_Umwelt/Baum-App_Gelsenkirchen.aspx> (Abruf: 29. 07. 2022), 2022a.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): City-App Gelsenkirchen, Online im Internet: URL: <https://www.gelsenkirchen.de/de/stadtprofil/stadtthemen/die_vernetzte_stadt/leitthemen_und_projekte/lebensqualitaet_und_teilhabe/city_app.aspx> (Abruf: 03. 11. 2022), 2022b.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Gelsenkirchen - Stadtfakten, Online im Internet: URL: <<https://www.gelsenkirchen.de/de/stadtprofil/stadtfakten/index.aspx>> (Abruf: 03. 11. 2022), 2022c.

- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Geodaten, Online im Internet: URL: <https://www.gelsenkirchen.de/de/_meta/Buergerservice/Onlinedienste/Geoportal/Geodaten.aspx> (Abruf: 05. 11. 2022), 2022d.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Geodateninfrastruktur Gelsenkirchen, Online im Internet: URL: <https://www.gelsenkirchen.de/de/_meta/buergerservice/onlinedienste/geoportal/geodateninfrastruktur_gelsenkirchen.aspx> (Abruf: 30. 10. 2022), 2022e.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Geodatenkatalog, Online im Internet: URL: <[https://gdi.gelsenkirchen.de/mapapps/resources/apps/full-page-sdi/index.html?lang=de#/>](https://gdi.gelsenkirchen.de/mapapps/resources/apps/full-page-sdi/index.html?lang=de#/) (Abruf: 30. 10. 2022), 2022f.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Geoportal - Nutzungsbedingungen, Online im Internet: URL: <https://www.gelsenkirchen.de/de/_meta/Buergerservice/Onlinedienste/Geoportal/Nutzungsbedingungen.aspx> (Abruf: 29. 10. 2022), 2022g.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Geoportal Gelsenkirchen, Online im Internet: URL: <https://www.gelsenkirchen.de/de/_meta/Buergerservice/Onlinedienste/Geoportal/index.aspx> (Abruf: 25. 08. 2022), 2022h.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): GeoSmartChange, Online im Internet: URL: <https://www.gelsenkirchen.de/de/Stadtprofil/Stadtthemen/Die_verbnetzte_Stadt/Leitthemen_und_Projekte/Digitale_und_Buergerorientierte_Verwaltung/GeoSmartChange.aspx> (Abruf: 30. 10. 2022), 2022i.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Open Data Gelsenkirchen, Online im Internet: URL: <https://www.gelsenkirchen.de/de/Rathaus/Buergerbeteiligung/Open_Data/> (Abruf: 25. 08. 2022), 2022j.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Open Data Portal Gelsenkirchen, Online im Internet: URL: <<https://opendata.gelsenkirchen.de/>> (Abruf: 25. 08. 2022), 2022k.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Open Innovation Lab, Online im Internet: URL: <<https://oil.gelsenkirchen.de/de/default.aspx>> (Abruf: 12. 08. 2022), 2022l.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Open Innovation Lab - Blick ins Labor, Online im Internet: URL: <https://openinnovationlab.gelsenkirchen.de/de/Blick_ins_Labor.aspx> (Abruf: 12. 08. 2022), 2022m.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Open Innovation Lab - Über das OIL, Online im Internet: URL: <https://oil.gelsenkirchen.de/de/Ueber_das_OIL.aspx> (Abruf: 12. 08. 2022), 2022n.

- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Open Innovation Lab - Unsere Partner, Online im Internet: URL: <https://oil.gelsenkirchen.de/de/Partner_werden.aspx#Unsere%20Partner> (Abruf: 12. 08. 2022), 2022o.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Projektdokumentation Open Innovation Lab, (Stadt Gelsenkirchen), Gelsenkirchen 2022p.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Themenkarten - Karten für jeden Anwendungszweck, Online im Internet: URL: <https://www.gelsenkirchen.de/de/_meta/Buergerservice/Onlinedienste/Geoportal/Themenkarten.aspx> (Abruf: 25. 08. 2022), 2022q.
- Stadt Hong Kong (Hrsg.): Hong Kong Smart City Blueprint 2.0, (City of Hong Kong), Hong Kong 2022.
- Stadt Münster (Hrsg.): Grundwasser, Online im Internet: URL: <<https://www.stadt-muenster.de/umwelt/wasser/grundwasser>> (Abruf: 02. 11. 2022), 2022.
- Stadt Soest (Hrsg.): BürgerWOLKE, Online im Internet: URL: <<https://digital-soest.de/projekte/projekte-infrastruktur/57-buergerwolke>> (Abruf: 03. 11. 2022), 2022a.
- Stadt Soest (Hrsg.): Was Ist Die "BürgerWOLKE"?, Online im Internet: URL: <<https://digital-soest.de/projekte/projekte-infrastruktur/2-uncategorised/106-buergerwolke>> (Abruf: 03. 11. 2022), 2022b.
- Stadt Wien (Hrsg.): Schwammstadt-Prinzip Macht Bäume Für Den Klimawandel Fit, Online im Internet: URL: <<https://www.wien.gv.at/umwelt/parks/schwammstadt.html>> (Abruf: 06. 11. 2022), 2022.
- Stadtwerke Gelsenkirchen GmbH (Hrsg.): Portrait - Stadtwerke Gelsenkirchen, Online im Internet: URL: <<https://www.stadtwerke-gelsenkirchen.de/portrait.html>> (Abruf: 28. 10. 2022), 2022.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Stadtbevölkerung steigt bis 2030 weltweit um eine Milliarde, Online im Internet: URL: <https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/07/PD18_253_91.html> (Abruf: 22. 07. 2022), 2021.
- Steiner, R.: Grundkurs Relationale Datenbanken - Einführung in die Praxis der Datenbankentwicklung für Ausbildung, Studium und IT-Beruf, 10., aktualisierte Auflage. (Springer Vieweg), Wiesbaden 2021.
- Steinrücke, M./ Düttemeyer, D./ Hasse, J./ Rösler, C./ Lorke, V.: Handbuch Stadtklima - Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel, (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen), Düsseldorf 2011.

- Streib, J. T./ Soma, T.: Guide to Data Structures - A Concise Introduction Using Java, (Springer), Cham 2017.
- Strohbach, M./ Ziekow, H./ Gazis, V./ Akiva, N.: Towards a Big Data Analytics Framework for IoT and Smart City Applications, in: Xhafa, F./ Barolli, L./ Barolli, A./ Papajorgji, P. (Hrsg.), *Modeling and Processing for Next-Generation Big-Data Technologies - With Applications and Case Studies*, (Springer), Cham 2015, S. 257–282.
- Syed, A. S./ Sierra-Sosa, D./ Kumar, A./ Elmaghraby, A.: IoT in Smart Cities: A Survey of Technologies, Practices and Challenges, in: *Smart Cities* 4/2, 2021, S. 429–475.
- The Things Industries B. V. (Hrsg.): What Is the Difference Between the Things Industries and the Things Network?, Online im Internet: URL: <<http://www.thethingsindustries.com/news/what-difference-between-things-industries-and-things-network/>> (Abruf: 04. 10. 2022), 2022.
- TU Delft (Hrsg.): The Battle of the Amsterdam Quayside Bulge, Online im Internet: URL: <<https://www.tudelft.nl/en/ceg/research/stories-of-science/the-battle-of-the-amsterdam-quayside-bulge>> (Abruf: 05. 09. 2022), 2022.
- Umweltbundesamt (Hrsg.): Feinstaub, Online im Internet: URL: <<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/feinstaub>> (Abruf: 23. 08. 2022), 2022a.
- Umweltbundesamt (Hrsg.): Stickstoffoxide, Online im Internet: URL: <<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/stickstoffoxide>> (Abruf: 23. 08. 2022), 2022b.
- Vaisman, A./ Zimányi, E.: Data Warehouse Systems - Design and Implementation, Second Edition. (Springer), Berlin 2022.
- Von Känel, S.: Projekte und Projektmanagement, (Springer Gabler), Wiesbaden 2020.
- Waag Futurelab (Hrsg.): Apps for Amsterdam, Online im Internet: URL: <<https://waag.org/en/project/apps-amsterdam/>> (Abruf: 05. 11. 2022), 2022.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Hrsg.): Nutzungsbedingungen PEGELONLINE, Online im Internet: URL: <<https://www.pegelonline.wsv.de/gast/nutzungsbedingungen>> (Abruf: 18. 08. 2022), 2022a.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Hrsg.): Pegeldata - Pegelnummer 27700230, Online im Internet: URL: <<https://m.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelnr=27700230>> (Abruf: 18. 08. 2022), 2022b.

- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (Hrsg.): Pegelonline REST-API Dokumentation, Online im Internet: URL: <<https://www.pegelonline.wsv.de/webservice/dokuRestapi;jsessionid=9EA2F0F66192261EFE011FBDE23A8992>> (Abruf: 18. 08. 2022), 2022c.
- White, G./ Zink, A./ Codecá, L./ Clarke, S.: A Digital Twin Smart City for Citizen Feedback, in: *Cities - The International Journal of Urban Policy and Planning* 110, 2021, o. S.
- Wirth, N.: *Algorithms + Data Structures = Programs*, (Prentice-Hall), Englewood Cliffs, New Jersey 1976.
- World Health Organization (Hrsg.): Climate Change and Health, Online im Internet: URL: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>> (Abruf: 30. 08. 2022), 2022a.
- World Health Organization (Hrsg.): Delivering Climate-Resilient Water and Sanitation in Africa and Asia, Online im Internet: URL: <<https://www.who.int/news/item/01-01-2018-delivering-climate-resilient-water-and-sanitation-in-africa-and-asia>> (Abruf: 05. 11. 2022), 2022b.
- World Meteorological Organization (Hrsg.): *Manual on the High-quality Global Data Management Framework for Climate*, (World Meteorological Organization), Genf 2019.
- World Meteorological Organization (Hrsg.): *Climate Indicators and Sustainable Development - Demonstrating the Interconnections*, WMO 1271. (World Meteorological Organization), Genf 2021.
- Yegin, A./ Kramp, T./ Dufour, P./ Gupta, R./ Soss, R./ Hersent, O./ Hunt, D./ Sornin, N.: LoRaWAN Protocol: Specifications, Security, and Capabilities, in: Chaudhari, B. S./ Zennaro, M. (Hrsg.), *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, (Elsevier Science), London 2020, S. 37–63.
- Zech, T.: Stadt und Land - eine Beziehungsgeschichte, Online im Internet: URL: <<https://www.deutschland.de/de/topic/leben/stadt-und-land-fakten-zu-urbanisierung-und-landflucht>> (Abruf: 22. 07. 2022), 2018.

9 Anhang

Anhang A1: Übersicht von Dezimal-, Binär- und Hexadezimalzahlen

Tabelle 11: Übersicht von Dezimal-, Binär- und Hexadezimalzahlen

Dezimalzahl	Binär	Hexadezimal
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

Anhang A2: Beispielschema Smart Data Models anhand von smarterer Wetterbeobachtung

```

{
  "$schema": "http://json-schema.org/schema#",
  "$schemaVersion": "0.3.1",
  "modelTags": "IUDX",
  "$id":
  "https://smart-data-models.github.io/dataModel.Weather/WeatherObserved/schema.js
  on",
  "title": "Weather Observed schema - Smart Data Models",
  "description": "An observation of weather conditions at a certain place and
  time. This data model has been developed in cooperation with mobile operators
  and the GSMA.",
  "type": "object",
  "allOf": [
    {
      "$ref":
      "https://smart-data-models.github.io/data-models/common-schema.json#/definitions
      /GSMA-Commons"
    },
    {
      "$ref":
      "https://smart-data-models.github.io/data-models/common-schema.json#/definitions
      /Location-Commons"
    },
    {
      "$ref":
      "https://smart-data-models.github.io/dataModel.Weather/weather-schema.json#/defi
      nitions/Weather-Commons"
    },
    {
      "properties": {
        "type": {
          "type": "string",
          "enum": [
            "WeatherObserved"
          ],
          "description": "Property. NGSI Entity type. It has to be
          WeatherObserved"
        },
        "dateObserved": {
          "$ref":
          "https://smart-data-models.github.io/data-models/common-schema.json#/definitions
          /dateObserved"
        },
        "temperature": {
          "$ref":
          "https://smart-data-models.github.io/dataModel.Weather/weather-schema.json#/defi
          nitions/Weather-AirConditions/properties/temperature"
        },
        "relativeHumidity": {
          "$ref":
          "https://smart-data-models.github.io/dataModel.Weather/weather-schema.json#/defi
          nitions/Weather-AirConditions/properties/relativeHumidity"
        },
        "precipitation": {

```

```

        "type": "number",
        "minimum": 0,
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'. Amount of
water rain registered. Units:'Liters per square meter'. "
    },
    "solarRadiation": {
        "type": "number",
        "minimum": 0,
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'. The solar
radiation observed measured in Watts per square. Units:'w/m2'"
    },
    "pressureTendency": {
        "oneOf": [
            {
                "type": "string",
                "enum": [
                    "falling",
                    "raising",
                    "steady"
                ]
            },
            {
                "type": "number"
            }
        ],
        "description": "Property. Enum:'falling, raising, steady'. Is the
pressure rising or falling? It can be expressed in quantitative terms or
qualitative terms."
    },
    "dewPoint": {
        "type": "number",
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'.
Units:'Celsius degrees'. The dew point encoded as a number. Observed temperature
to which air must be cooled to become saturated with water vapor"
    },
    "refDevice": {
        "anyOf": [
            {
                "type": "string",
                "minLength": 1,
                "maxLength": 256,
                "pattern": "^[\\w\\-\\.\\{\\}\\$\\+\\*\\[\\]\\`|~^@!,:\\\\\\\\]+$",
                "description": "Property. Identifier format of any NGSI entity"
            },
            {
                "type": "string",
                "format": "uri",
                "description": "Property. Identifier format of any NGSI entity"
            }
        ],
        "description": "Relationship. Model:'https://schema.org/URL'. A
reference to the device(s) which captured this observation."
    },
    "streamGauge": {

```

```

        "type": "number",
        "minimum": 0,
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'. The water
level surface elevation observed by Hydrometric measurement sensors, namely a
[Stream Gauge](https://en.wikipedia.org/wiki/Stream_gauge) expressed in
centimeters. Units:'centimeters'"
    },
    "snowHeight": {
        "type": "number",
        "minimum": 0,
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'. The snow
height observed by generic snow depth measurement sensors, expressed in
centimeters. Units:'centimeters'"
    },
    "uvIndexMax": {
        "type": "number",
        "minimum": 0,
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'. The
maximum UV index for the period, based on the World Health Organization's UV
Index measure.
[http://www.who.int/uv/intersunprogramme/activities/uv_index/en/](http://www.who
.int/uv/intersunprogramme/activities/uv_index/en/) the values between 1 and 11
are the valid range for the index. The value 0 is for describing that no signal
is detected so no value is stored."
    },
    "aqiMajorPollutant": {
        "type": "string",
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Text'. Major
pollutant in the Air Quality Index (AQI).\"
    },
    "aqiMajorPollutantForecast": {
        "type": "string",
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Text'. Forecasted
major air pollutant in the Air Quality Index (AQI) over a certain duration in
future.\"
    },
    "airTemperatureForecast": {
        "type": "number",
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'.
Forecasted value of air temperature over a certain duration in future.\"
    },
    "precipitationForecast": {
        "type": "number",
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'.
Forecasted rainfall over a certain duration in future.\"
    },
    "airQualityIndex": {
        "type": "number",
        "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'. Air
quality index is a number used to report the quality of the air on any given
day.\"
    },
    "relativeHumidityForecast": {
        "type": "number",

```

```

      "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'.
Forecasted relative humidity (water vapour in air) over a certain duration in
future"
    },
    "illuminance": {
      "type": "number",
      "description": "Property. Observed instantaneous ambient light
intensity. Units:'Lux'"
    },
    "airQualityIndexForecast": {
      "type": "number",
      "description": "Property. Model:'https://schema.org/Number'.
Forecasted overall Air Quality Index (AQI) over a certain duration in future."
    },
    "airTemperatureTSA": {
      "type": "object",
      "description": "Property. Air temperature time series aggregation",
      "$ref":
"https://smart-data-models.github.io/dataModel.Environment/Environment-schema.js
on#/definitions/TimeSeriesAggregation"
    }
  }
},
"required": [
  "id",
  "type",
  "dateObserved",
  "location"
]
}

```

Abbildung 9: JSON-Schema WeatherObserved³⁸⁶

³⁸⁶Vgl. Abella, A. (2022a).

Anhang A3: Beispiel Smart Data Models anhand von smarterer Wetterbeobachtung

```
{
  "id": "Spain-WeatherObserved-Valladolid-2016-11-30T07:00:00.00Z",
  "type": "WeatherObserved",
  "address": {
    "addressLocality": "Valladolid",
    "addressCountry": "ES"
  },
  "atmosphericPressure": 938.9,
  "dataProvider": "TEF",
  "dateObserved": "2016-11-30T07:00:00.00Z",
  "location": {
    "type": "Point",
    "coordinates": [
      -4.754444444,
      41.640833333
    ]
  },
  "precipitation": 0,
  "pressureTendency": 0.5,
  "relativeHumidity": 1,
  "source": "http://www.aemet.es",
  "stationCode": "2422",
  "stationName": "Valladolid",
  "temperature": 3.3,
  "windDirection": 135,
  "windSpeed": 2,
  "illuminance": 1000,
  "refDevice": "device-0A3478",
  "streamGauge": 50,
  "snowHeight": 20,
  "uvIndexMax": 1.0
}
```

Abbildung 10: JSON-Beispiel WeatherObserved³⁸⁷

³⁸⁷Vgl. Abella, A. (2022b).

Anhang A4: Grober Projektstrukturplan Mikroklima-Analyse

Tabelle 12: Grober Projektstrukturplan Mikroklima-Analyse

Teilprojekt	Teilaufgabe	Arbeitspaket
1. Aufbau Sensorik	1.1 Standortbestimmung	1.1.1 Standortanalyse
		1.1.2 Standortauswahl
	1.2 Sensorenauswahl	1.2.1 Anbietervergleich
	1.3 Erstellung Prototyp	1.3.1 Test
		1.3.2 Validierung
	1.4 Aufbau Sensorik	1.4.1 Verbauen der Sensorik
	1.5 Testen	1.5.1 Validierung
1.5.1 Übergabe in Echtbetrieb		
2. Aufbau Netzwerk	2.1 Anbietersauswahl	2.1.1 Anbietervergleich
	2.2 Standortbestimmung	2.2.1 Standortanalyse
		2.2.2 Standortauswahl
	2.3 Aufbau Sensorik	2.3.1 Verbauen der Sensorik
	2.4 Testen	2.4.1 Validierung
2.4.2 Übergabe in Echtbetrieb		
3. Aufbau Datenbank	3.1 Datenbankauswahl	3.1.1 Datenbankvergleich
	3.2 Test	3.2.1 Testen mit Testdaten
		3.2.2 Testen mit erhobenen Klimadaten
		3.2.3 Validierung
3.2.4 Übergabe in Echtbetrieb		
4. Aufbau Datenplattform	4.1 Anbietersauswahl	4.1.1 Anbietervergleich
	4.2 Test	4.2.1 Testen Übergabe Datenbank/ Datenplattform
		4.2.2 Validierung
		4.2.3 Übergabe in Echtbetrieb

10 Eidesstattliche Versicherung

Zerria, Yasin

Name, Vorname

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit mit dem Titel

**Datenstrukturen und digitaler Zwilling –
Konzeption einer Mikroklima-Analyse und Steuerung
für die Stadt Gelsenkirchen**

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Gelsenkirchen, 11. November 2022,

Ort, Datum, Unterschrift