

Bachelorarbeit

Einsatz von LoRaWAN und Algorithmen – Konzeption einer Müllentleerungsstrategie im Bereich Smart Waste am Beispiel der Stadt Gelsenkirchen

Titel der Arbeit

Yasin Zerria, Gelsenkirchen

Name, Geburtsort

Wirtschaft

Studiengang

Wirtschaft

Fachbereich

Westfälische Hochschule Gelsenkirchen, Bocholt, Recklinghausen

Hochschule

Prof. Dr. Karin Küffmann

Erstprüferin/Erstprüfer

Prof. Dr. Jürgen Propach

Zweitprüferin/Zweitprüfer

30. September 2020

Abgabedatum

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Smart City	4
2.1 Definition von Smart City	4
2.2 Smart Waste als Teilgebiet von Smart City	5
2.2.1 Smart Waste-Konzepte	7
2.2.2 Smart Waste-Technologien	11
2.2.3 Geeignete Datenmodelle	13
3 Anwendbare Algorithmen	17
3.1 Pathfinding	17
3.1.1 Grundlagen	17
3.1.2 Optimale Routenfindung bei der Müllentleerung	22
3.2 Predictive Analytics	25
3.2.1 Grundlagen	25
3.2.2 Müllentleerungsprognosen	28
4 Anwendungsbeispiel der Stadt Gelsenkirchen	31
4.1 Die Stadt Gelsenkirchen	31
4.2 Umsetzung der Technologie	33
4.3 Mögliche Erweiterungen	37
5 Fazit und Ausblick	39
6 Literaturverzeichnis	42
7 Anhang	47
8 Eidesstattliche Versicherung	57

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

App	Applikation
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
IoT	Internet of Things
LAN	Local Area Network
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low-Power-Wide-Area-Network
LTE	Long-Term Evolution
MHz	Megahertz
MSE	Mean Squared Error
OIL	Open Innovation Lab
TSP	Traveling Salesman-Probleme
WLAN	Wireless Local Area Network

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	LoRaWAN-Infrastruktur	12
Abbildung 2:	Entity-Relationship-Modell der Füllstandsdatenbank	16
Abbildung 3:	Dijkstra-Algorithmus in Pseudocode	18
Abbildung 4:	Ausgangsgraph nach Programmzeile 2 des Dijkstra-Algorithmus	19
Abbildung 5:	Ausgabegraph mit endgültigen Gewichten	19
Abbildung 6:	Graph aus Abbildung 4 in Matrixform	20
Abbildung 7:	Floyd-Warshall-Algorithmus in Pseudocode	21
Abbildung 8:	$D^{(6)}$ von Abbildung 6 berechnet mithilfe des Floyd-Warshall- Algorithmus	21
Abbildung 9:	Modifizierter Graph	22
Abbildung 10:	$D^{(8)}$ von Abbildung 9 berechnet mithilfe des Floyd-Warshall- Algorithmus	23
Abbildung 11:	Entscheidungsbaum für Abbildung 10	24
Abbildung 12:	Prognose- und Beobachtungswerte eines niedrig frequentierten Mülleimers	29
Abbildung 13:	Softwarearchitektur der Anwendungs-App	35
Abbildung 14:	Ausgangsgraph des Beispiels	47
Abbildung 15:	$D^{(0)}$	48
Abbildung 16:	$D^{(1)}$	48
Abbildung 17:	$D^{(2)}$	48
Abbildung 18:	$D^{(3)}$	48
Abbildung 19:	$D^{(4)}$	48
Abbildung 20:	$D^{(5)}$	48
Abbildung 21:	Prognose- und Beobachtungswerte eines mäßig frequentierten Mülleimers	56
Abbildung 22:	Prognose- und Beobachtungswerte eines stark frequentierten Müll- eimers	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Faktoren der Leistungsfähigkeit von ausgewählten Dimensionen . .	6
Tabelle 2: Prognosetabelle für einen niedrig frequentierten Mülleimer	28
Tabelle 3: Tabelle <i>S</i> nach Iteration 1 des Dijkstra-Algorithmus	47
Tabelle 4: Tabelle <i>S</i> nach Iteration 5 des Dijkstra-Algorithmus	47
Tabelle 5: Mithilfe von R erstellte Simulationstabelle für Mülleinwürfe	54
Tabelle 6: Prognosetabelle für einen mäßig frequentierten Mülleimer	55
Tabelle 7: Prognosetabelle für einen hoch frequentierten Mülleimer	55

1 Einleitung

Die Digitalisierung bietet Kommunen und Unternehmen neue Gestaltungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Prozesse der Daseinsvorsorge. Immer mehr Objekte des öffentlichen Lebens sind miteinander vernetzt. Die verschiedenen Technologien und Anwendungen werden unter dem Begriff *Smart City* zusammengefasst.¹ Diese Vernetzungen eröffnen neue Möglichkeiten und Chancen. Das könnte z. B. eine intelligente Verkehrsüberwachung, bei der die Ampeln im Sekundentakt bestimmen können, wie hoch das Verkehrsaufkommen ist² oder die digitale Beantragung von Verwaltungsleistungen³ sein. Damit alle Bereiche von der Digitalisierung profitieren können, muss für eine solche Vernetzung eine entsprechende Infrastruktur aufgebaut werden. Interessant sind vor allem die Prozesse, die mithilfe von computergestützten Algorithmen effizienter gestaltet werden können. Das können z. B. eine intelligente Verkehrsüberwachung oder die bedarfsgerechte Entleerung von Abfallbehältern sein. In dieser Arbeit werden Algorithmen für den Bereich *Smart Waste* vorgestellt. Zunächst erfolgt dafür eine Konkretisierung der Problemstellung.

1.1 Problemstellung

Müll wird sowohl von Privatpersonen als auch von Unternehmen in die dafür vorgesehenen Mülleimern oder -containern entsorgt. In Deutschland wird Müll in fünf Kategorien unterteilt (Leichtverpackung, Behälterglas, Papier/Pappe/Karton, Restmüll und Bioabfall).⁴ Zusätzlich gibt es öffentliche Mülleimer, bzw. Papierkörbe, in denen unterwegs angefallener Müll entsorgt werden kann. Diese befinden sich verteilt im gesamten Stadtgebiet. Einige von diesen Papierkörben sind trotz regelmäßiger Entleerung oft überfüllt. Darüber hinaus verursacht auf dem Boden liegender Müll ein unschönes Stadtbild.

Ein weiteres Problem besteht in der eigentlichen Müllentleerung. Leerungen werden derzeit in einem bestimmten Turnus durchgeführt. Dabei kann es zu drei Situationen kommen:

1. Der Müllbehälter ist optimal gefüllt, die Leerung wurde zur richtigen Zeit veranlasst.
2. Der Müllbehälter ist zu voll.
3. Der Müllbehälter ist kaum gefüllt, bzw. leer.

Ein überfüllter Mülleimer sorgt dafür, dass sich der Müll auf der Straße sammelt. Eine zusätzliche Reinigung wird nötig, die durch eine vorzeitige Entleerung hätte verhindert werden können. Ein kaum gefüllter Mülleimer ist für die Fachkraft vergleichbar ineffizient, da eine Kontrolle der Mülleimer erst nach Anfahrt durchgeführt werden

¹Vgl. Caragliu, A. et al. (2011) S. 67.

²Vgl. Stadt Darmstadt (2020).

³Vgl. Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (2020).

⁴Vgl. Duales Holding System (2020).

kann und eine Entleerung noch nicht notwendig ist. Es werden somit alle Mülleimer angefahren, da über deren Zustand im Vorhinein keine Informationen zugänglich sind. Des Weiteren ist von Interesse, wie sich ein Füllstand in der nächsten Zeit voraussichtlich entwickeln wird. Damit Müllentsorgungsbetriebe effizient planen können, ist es hilfreich, die Füllstände der jeweiligen Mülleimer zu prognostizieren. Es könnten somit Mülleimer identifiziert werden, die häufiger oder seltener entleert werden müssen. Auf Grundlage einer Vorhersage könnte eine dynamische Routenplanung zu Effizienzsteigerungen führen. Starre, im Vorfeld, geplante Touren erfüllen nicht den Zweck einer bedarfsgerechten Entleerung.

1.2 Zielsetzung

Um ein sauberes Stadtbild sicherzustellen, können einige Maßnahmen ergriffen werden. Dafür wird im Folgenden ein Konzept erarbeitet, das zum einen den aktuellen Füllstand einzelner Mülleimer angeben kann und zum anderen eine optimale Route plant, um die gefüllten Behälter effektiv und zeitsparend zu leeren. Für die Anwendung müssen Daten über einen bestimmten Zeitraum erhoben werden, um mithilfe von Prognoseverfahren bestimmen zu können, wann eine Leerung bereits im Vorfeld sinnvoll erscheint, da in der nächsten Zeit eine erhöhte Nutzung erwartet wird. Optimierte Routen und Prognosen können unter der Verwendung verschiedener Algorithmen berechnet werden. Die wirtschaftliche Motivation liegt darin, eine Kostenverringerung durch Zeitersparnisse für die Entsorgungsbetriebe und ein saubereres Stadtbild zu schaffen. Um den Aufbau und die Funktionsweise geeigneter Algorithmen zu erklären, wird das Themenfeld, in dem diese genutzt werden sollen, näher erörtert. Anhand von Literaturrecherche wird in Kapitel 2 der Begriff *Smart City* definiert und eingegrenzt. Dabei wird ausschließlich auf das Themengebiet der Müllentsorgung eingegangen. Auf die Darstellung der einzelnen Handlungsfelder wird verzichtet. Anschließend werden ein Überblick über Umsetzungen von Smart Waste in verschiedenen internationalen Städten gegeben und Konzepte verglichen. Für die Umsetzung der in dieser Arbeit thematisierten Strategie wird die benötigte Technologie erklärt. Dazu wird die Übertragungstechnologie *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) an einem Anwendungsbeispiel im Bereich der Müllentleerung erläutert. Sobald die Technologie als Grundlage erklärt wurde, wird dargestellt, wie die Daten gespeichert und aufbereitet werden müssen.

Auf die erhobenen Daten können im Anschluss Algorithmen zur Routenfindung und Prognosen angewendet werden. Diese werden in Kapitel 3 dargestellt und mithilfe von Beispielen näher erörtert. Im Anschluss werden die Verfahren auf das konkrete Beispiel der Müllentleerung angewendet. Die Algorithmen zur Routenfindung werden anhand eines Pseudocodes erklärt. Anschließend wird das Prognoseverfahren der *exponentiellen Glättung* detaillierter vorgestellt. Da zur Vorstellung der Berechnung keine

Echtdaten zur Verfügung stehen, wurde mit der Programmiersprache *R* eine Datensimulation erarbeitet, die die Füllstände für mehrere Mülleimer einer Woche simuliert. Die Ergebnisse werden daraufhin in Kapitel 4 auf das Anwendungsbeispiel der Stadt Gelsenkirchen übertragen. Die Stadt Gelsenkirchen bietet als digitale Modellkommune des Landes Nordrhein-Westfalen gute Voraussetzungen, um neue Technologien zu testen und einzuführen.⁵ Für eine Übertragung ist es wichtig, dass die aktuelle Situation der Stadt, im Hinblick auf die digitale Infrastruktur und den lokalen Stakeholdern näher betrachtet wird, um zu erörtern, welche Grundlagen bereits vorhanden sind und welche Maßnahmen noch ergriffen werden müssen, um eine Anwendung von Smart Waste-Konzepten zu ermöglichen. Im Anschluss werden mögliche Erweiterung dargestellt. Abschließend wird ein Fazit gezogen und ein Ausblick formuliert. Die Ausgangslage für die Recherche bildet die Sichtung von Literatur. Die Algorithmen und Prognoseverfahren werden aus verschiedenen Lehrbüchern⁶ übernommen und sachlich analysiert. Aus Gründen der Lesbarkeit wird in dieser Arbeit die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Die Verwendung der männlichen Form soll daher als geschlechtsunabhängig verstanden werden.

⁵Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020c) S. 8.

⁶Algorithmen - Eine Einführung (2013) und Deskriptive Statistik(2001/2016).

2 Smart City

Laut einer Studie haben im Jahr 2019 bereits 153 Städte weltweit eine Smart City-Strategie veröffentlicht. Das sind 111 Strategien mehr als im Jahr 2017 und die Tendenz ist steigend. Davon befinden sich ca. 63 Städte in Europa.⁷ Im folgenden Kapitel wird der Begriff *Smart City* näher erläutert. Darauf aufbauend soll eine Einordnung des Teilgebiets *Smart Waste* vorgenommen und beispielhafte Konzepte verschiedener Städte vorgestellt werden. Außerdem wird geklärt, welche Technologien konkret für die Konzeption einer Müllentleerungsstrategie benötigt und welche Datenmodelle genutzt werden können.

2.1 Definition von Smart City

Es gibt mehrere Möglichkeiten eine Stadt als solche zu definieren. Als Kriterium kann z. B. die Bevölkerungszahl herangezogen werden. Liegt diese bei mindestens 5.000 Einwohnern, wird von einer Stadt gesprochen.⁸ Eine andere Möglichkeit ist die Betrachtung der Bevölkerungsdichte und der daraus resultierenden Vernetzung der Einwohner über die Infrastruktur der Stadt. Dabei bezieht sich Infrastruktur nicht ausschließlich auf den Straßenverkehr, sondern auf alle Bereiche der menschlichen Interaktion, wie z. B. die Kommunikation über die Telefonanlagen. Diese Infrastruktur wird durch verschiedene Akteure bereitgestellt bzw. reguliert. Versorgungsbetriebe beliefern die Einwohner mit Strom oder Wasser und die Stadtverwaltung regelt administrative Abläufe. Außerdem werden durch niedergelassene Unternehmen Arbeitsplätze zur Verfügung gestellt.⁹ Die Stadt stellt somit ein Gesamtkonstrukt dar, welches durch die Interaktionen verschiedenster Akteure entsteht. Eben diese Akteure bilden im Smart City-Ansatz die Stakeholder, die in "smarte" Prozesse eingebunden werden.¹⁰ Dies wird nochmal deutlich, wenn die Charakteristika herausgearbeitet werden.

In der Literatur gibt es verschiedene Definitionen des Begriffs *Smart*. Häufig wird dieser im Zusammenhang mit *Smart Home* genannt, der seit den 1990er Jahren verwendet wird. Smart Home bezeichnet einerseits die angestrebte erhöhte Benutzerfreundlichkeit innerhalb von Wohngebäuden¹¹, andererseits wird der Begriff "smart" mit intelligent, integrativ oder effizient gleichgesetzt¹². Die genaue Herkunft oder Definition wird an dieser Stelle nicht weiter erörtert. Im Fokus sollen vielmehr die Handlungsfelder und Charakteristika stehen, die in einer Smart City vorhanden sind.

Mithilfe von Handlungsfeldern können konkrete Maßnahmen kategorisiert werden, um zu prüfen, ob die definierten Ziele erreicht wurden. Diese orientieren sich im Kern an

⁷Vgl. Roland Berger GmbH (2019) S. 4-5.

⁸Vgl. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2020a).

⁹Vgl. Jaekel, M./ Bronnert, K. (2013) S. 1-2.

¹⁰Vgl. Jaekel, M. (2015) S. 18.

¹¹Vgl. Saringer-Bory, B. et al. (2012) S. 11.

¹²Vgl. Jaekel, M./ Bronnert, K. (2013) S. 9.

den folgenden Charakteristika einer Smart City¹³:

- 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.

Die genannten Punkte stellen die Basis dar, an der sich Maßnahmen orientieren sollen. Um letztendlich die Leistungsfähigkeit zu bewerten, wurden verschiedene Handlungsfelder definiert. In einigen Quellen werden sieben Handlungsfelder (Smart Economy, Smart Governance, Smart Mobility, Smart Environment, Smart Living, Smart Citizen und Smart Education)¹⁴, in anderen sechs (Smart Economy, Smart Governance, Smart Mobility, Smart Environment, Smart Living und Smart People)¹⁵ genannt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Unterteilung in sechs Handlungsfelder gewählt, da *Smart People* und *Smart Citizen* simultan genutzt und die in *Smart Education* (sieben Handlungsfelder) enthaltene Bildung in *Smart People* (sechs Handlungsfelder) eingeordnet werden kann.

Maßnahmen können nicht immer eindeutig einem Handlungsfeld zugeordnet werden. Die Stadt Wien hat bspw. das Projekt "autofreie Mustersiedlung" entwickelt und eingeführt. Das beinhaltet die Verpflichtung, dass die Anwohner eines Wohnkomplexes kein eigenes Auto besitzen. Im Gegenzug erhalten sie Zugriff auf ein Auto aus einem Carsharing-Pool.¹⁶ Einerseits werden die Einwohner (Smart People), andererseits die Mobilität (Smart Mobility) angesprochen. Das Ziel ist hierbei CO₂ und Geld für den Bau von Tiefgaragen zu sparen. Das ersparte Geld soll dafür in Bereiche der Wohngemeinschaft investiert werden. Hier wird deutlich, dass oft mehrere Handlungsfelder mit einer Maßnahme abgedeckt werden können. Im Folgenden wird der Begriff *Smart Waste* definiert und die möglichen Handlungsfelder dargestellt.

2.2 Smart Waste als Teilgebiet von Smart City

Waste ist der englische Begriff für Abfall und bezeichnet damit die zusammenhängende Abfallwirtschaft. Dabei geht es im Kern darum, die Stadthygiene und die damit verbundene Lebensqualität und Gesundheit der Einwohner zu verbessern. Gleichzeitig

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

¹⁴Vgl. Meier, A./ Zimmermann, H.-D. (2016) S. 5-8.

¹⁵Vgl. Giffinger, R. et al. (2007) S. 10-11.

¹⁶Vgl. Stadt Wien (2020).

soll die Umwelt geschützt werden, indem schädliche Stoffe nicht in die Natur gelangen. Dies geschieht in Deutschland auf Grundlage des Kreislaufwirtschaftsgesetzes.¹⁷ Bei Betrachtung der Erfolgsfaktoren von Smart Environment (Tabelle 1), zeigen sich einige Gemeinsamkeiten mit dem Kreislaufwirtschaftsgesetz. In diesem wird in §6 eine Hierarchie von Maßnahmen beschrieben und welche Auswirkung auf Mensch und Umwelt besondere Beachtung benötigen. Dabei wird eine Rangfolge von Maßnahmen definiert¹⁸:

1. Vermeidung
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. Recycling
4. Sonstige Verwertung
5. Beseitigung

Besonders folgende Auswirkungen sollen bei der Durchführung der Maßnahmen berücksichtigt werden¹⁹:

- die zu erwartenden Emissionen,
- das Maß der Schonung von natürlichen Ressourcen,
- die einzusetzende oder zu gewinnende Energie und
- die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, in Abfällen zur Verwertung oder in daraus gewonnenen Erzeugnissen.

Tabelle 1: Faktoren der Leistungsfähigkeit von ausgewählten Dimensionen²⁰

Dimension	Faktor
Smart Environment	Umweltschutz
	Umweltverschmutzung
	Nachhaltiger Ressourceneinsatz
	Attraktivität der Umweltbedingungen

Der Erfolg von Smart Environment wird schließlich mit dem Erfolg der Abfallwirtschaft gemessen. Vor allem die Faktoren *Umweltschutz* und *Nachhaltiger Ressourceneinsatz* finden sich im Kreislaufwirtschaftsgesetz in den zu beachtenden Auswirkungen unter *die zu erwartenden Emissionen* und *das Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen* wieder. Demnach kann Smart Waste und die damit verbundene Abfallwirtschaft dem Handlungsfeld Smart Environment zugeordnet werden. Im Themenfeld Smart Waste werden Konzepte und Maßnahmen zusammengefasst, die die Abfallwirtschaft digitalisieren und so eine ökologische Nachhaltigkeit gewährleisten.

¹⁷Vgl. Tietz, H.-P. (2007) S. 291-292.

¹⁸Vgl. §6 Absatz 1 KrWG.

¹⁹Vgl. §6 Absatz 2 KrWG.

²⁰In Anlehnung an Giffinger, R. et al. (2007) S. 23.

In den folgenden Unterkapiteln werden beispielhafte Konzepte von Städten vorgestellt und die benötigte Technologie erklärt. Anschließend erfolgt die Herleitung eines Datenmodells, in dem die Daten entsprechend verarbeitet werden können.

2.2.1 Smart Waste-Konzepte

Viele Städte planen Smart Waste-Konzepte oder setzen diese bereits um. Nachfolgend werden einige Konzepte bzw. Maßnahmen der Städte Seoul und Stockholm, der Gemeinden Feldkirchen bei Graz und Riegersburg, sowie das europäische Projekt *Smart Waste* vorgestellt. Diese Strategien wurden ausgewählt, um Beispiele von Städten in unterschiedlicher Größe zu geben und um eine Kooperation im europäischen Raum vorzustellen. Es gibt Parallelen zwischen den Konzepten der jeweiligen Städte, dennoch ist jedes Konzept individuell und innovativ gestaltet.

Die südkoreanische Hauptstadt Seoul hat ca. 10 Millionen Einwohner (Stand 1. Quartal 2020), die am Tag ungefähr 9.493 Tonnen Müll im Haushalt produzieren (Stand 2018).²¹ Zu diesem häuslichen Müll kommt noch der hinzu, welcher in Mülleimern des öffentlichen Bereichs entsorgt wird. Vor allem die, die an Orten des Nachtlebens zu finden sind, waren oft überfüllt und die Entsorgungsbetriebe waren mit der Straßenreinigung im Rückstand. Die Folgen waren ständig überfüllte Mülltonnen und schmutzige Straßen. Die vermeintliche Lösung des Problems fand das ortsansässige Unternehmen Ecube Labs. Das Problem waren nicht die Kapazitäten der Mülleimer, sondern die Zusammensetzung des Mülls der darin entsorgt wurde. Oft wurden Plastikflaschen oder ähnlich sperrige Gegenstände eingeworfen, die aufgrund ihres Volumens, für die Überfüllung verantwortlich waren. Als Lösung wurden Mülltonnen eingesetzt, die über eine eingebaute und über solarbetriebene Müllpresse verfügen und so nach einer bestimmten Zeit den Inhalt komprimieren. Zusätzlich wurden Sensoren eingebaut und mit einem Netzwerk verbunden, um den aktuellen Füllstand zu übertragen. So können die Entleerungen besser geplant und koordiniert werden.²² Durch diese Maßnahmen konnten 66 % der üblichen Müllentleerung der einzelnen Mülleimer und 83 % der damit verbundenen Kosten eingespart werden. Außerdem ist sowohl die Anzahl der überfüllten Mülleimer, als auch das Ausmaß des daneben liegenden Abfalls gesunken.²³ Allein durch die Vielzahl an Müllpressen und den Aufbau eines Überwachungssystems konnte so der Umweltverschmutzung entgegengewirkt werden. Dieses Beispiel beschreibt ein technisches Konzept von Smart Waste, das auf Mechanik und Sensorik aufbaut.

Ein weiteres Beispiel findet sich in Österreich. Im Bundesland Steiermark befinden sich die Marktgemeinden Feldkirchen bei Graz und Riegersburg. Beide Gemeinden

²¹Vgl. Seoul Solution (2020).

²²Vgl. Herranz, A. (2020).

²³Vgl. Ecube Labs (2020).

haben unter 6.500 Einwohner.^{24 25} In Kooperation hat die Saubermacher AG mit dem Unternehmen Energie Steiermark ein Smart Village Projekt für diese Gemeinden ins Leben gerufen. Drei der Maßnahmen können dem Bereich Smart Waste zugeordnet werden und werden daher detaillierter vorgestellt. Die Müllwagen, welche zur Abholung genutzt werden, verfügen über Wertstoffscanner. Diese scannen den häuslichen Restmüll während er verladen wird. Dadurch können Fehlwürfe identifiziert werden, welche die Entsorgungskosten von Restmüll immens erhöhen.²⁶ Nur durch die bloße Ankündigung des Einsatzes eines Wertstoffscanners konnte die Fehlwurfquote auf 38 % gesenkt werden. Ziel ist es nachzuvollziehen, wie es zu diesen Fehlwürfen kam und wie die Einwohner im Hinblick auf Mülltrennung aufgeklärt werden können. Hier setzt die weitere Maßnahme *Daheim* an. Dabei handelt es sich um eine Smartphone-Applikation (App), die den Einwohner über verschiedene Themen informiert. So werden einerseits die nächsten Leerungen angekündigt, andererseits Beispiele gegeben, wie Müll korrekt getrennt wird. Durch die Zusammensetzung der Fehlwürfe kann gezielt darüber informiert werden, welche Stoffe in den Restmüll gehören und welche nicht.²⁷ Die dritte Maßnahme ist ähnlich der aus Seoul. Dabei werden ebenso Sensoren verbaut, die den aktuellen Füllstand der jeweiligen Tonne messen. Auf Grundlage dieser Messungen haben die Entsorger die Möglichkeit ihre Touren besser zu planen.²⁸ Bei diesem Konzept spielen die Einwohner eine wichtige Rolle. Das Ziel der Maßnahme stellt die Aufklärung der Einwohner über die Bereiche der Müllentsorgung dar, bei denen zuvor Lücken im allgemeinen Verständnis festgestellt wurden. Diese Lücken konnten durch die Verwendung des Wertstoffscanners identifiziert werden. An dieser Stelle wird erneut deutlich, dass Maßnahmen nicht immer genau einem Handlungsfeld zugewiesen werden können.²⁹ Einerseits betreffen die Maßnahmen die Einwohner (Smart People), andererseits die Umwelt (Smart Environment). Ein weiteres Konzept wird in Stockholm umgesetzt. Die schwedische Hauptstadt beheimatet ca. 2,38 Millionen Menschen (Stand 4. Quartal 2019)³⁰ und hat sich mit der *Vision2030* das Oberziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 eine der saubersten, sichersten und schönsten Städte der Welt zu werden. Dabei wurden in ihrem Umweltprogramm sechs Unterziele definiert, wovon eins lautet: *”Umwelteffizientes Entsorgungsmanagement”*.³¹ Es soll weniger Müll produziert und mehr recycelt werden. Dafür werden derzeit 30 Maßnahmen umgesetzt.³² Die Maßnahme, die folgend näher erörtert wird,

²⁴Feldkirchen bei Graz: 6308 Einwohner (Stand 2018), vgl. Statistik Austria (2020a).

²⁵Riegersburg: 4922 Einwohner (Stand 2018), vgl. Statistik Austria (2020b).

²⁶Vgl. Energie Steiermark/Saubermacher AG (2020).

²⁷Vgl. Piron, R. (2020).

²⁸Vgl. Energie Steiermark/Saubermacher AG (2020).

²⁹Vgl. Kapitel 2.1.

³⁰Vgl. Statistics Sweden(2020).

³¹Vgl. Stadt Stockholm (2020b) S. 5-7.

³²Vgl. Stadt Stockholm (2020a).

nennt sich *Underground Waste Management*. Dabei handelt es sich um ein Rohrsystem im Untergrund. Mithilfe von Absaugvorrichtungen wird ein Unterdruck in den Rohren erzeugt, die den Müll zur Entsorgungsstation befördern. Über Sammelstellen an der Oberfläche wird der Müll entsorgt sowie zwischengelagert, bis entsprechende Kapazitäten erreicht werden, um ihn anschließend in das Untergrundsystem zu schleusen. Dabei wird eine Geschwindigkeit von bis zu 70 km/h erreicht. Die Absaugvorrichtung kann dabei einen Radius von zwei Kilometern abdecken.³³ Es ist möglich, dass unterschiedliche Abfallarten die gleichen Rohre benutzen. Dafür wird der Abfall in die jeweilige Eingangsschleuse geworfen. Die Eingänge werden in Plastik, Restmüll, Kompost und Altpapier getrennt. Sobald das System registriert, dass eine Schleuse gefüllt ist, wird geprüft, ob die vorgesehene Strecke anderweitig belegt ist. Ist sie aktuell ungenutzt, wird die Schleuse geöffnet und der Unterdruck aufgebaut. In der Entsorgungsstation wird das Abfallgut direkt dem jeweiligen Entsorgungscontainer zugeführt.³⁴ Ein Projekt in Stockholm, das diese Maßnahme nutzt, heißt *Stockholm Royal Seaport*. Dafür wurde ein Untergrundrohrsystem aufgebaut, welches an 400 Eingangsschleusen angebunden ist. Dort können Papier, Restmüll, Plastik und Straßenmüll entsorgt werden. 12.000 Haushalte haben Zugang zu diesem System und es können täglich bis zu 10 Tonnen entsorgt werden. Somit konnte die Nutzung von Müllfahrzeugen um 90 % minimiert werden. Zusätzlich wird der Müll im Rohrsystem nicht unter Einsatz fossiler Brennstoffen transportiert, sondern mit Elektrizität. Die Straßenabfalleimer leeren sich dabei selber und es entsteht nicht das Problem überfüllter Mülltonnen.³⁵

Das nächste Beispiel ist kein Konzept im klassischen Sinne, sondern ein Kontrollinstrument und wird von *Interreg Europe* umgesetzt. *Interreg* steht für eine grenzüberschreitende Zusammenarbeit innerhalb Europas und ist Bestandteil der Struktur- und Investitionspolitik der Europäischen Union. Es existieren drei Ausrichtungen: A, B und C. Ausrichtung A beschreibt die Zusammenarbeit zwischen benachbarten Regionen. Ausrichtung B beinhaltet die Kooperation von nationalen, kommunalen und regionalen Partnern. Ausrichtung C fokussiert die interregionale Zusammenarbeit und fördert den Erfahrungsaustausch und Kooperationsnetzwerke.³⁶ Aus dem *Interreg IV C* hat sich die Initiative *Interreg Europe* entwickelt.³⁷ Gefördert mit Mitteln aus dem europäischen Fond für regionale Entwicklung haben sich verschiedene Projekte emanzipiert, wobei eines den Bereich *Smart Waste* thematisiert. Hierbei handelt es sich um die Zusammenarbeit von sechs Partnern aus ganz Europa (Litauen, Dänemark, Niederlande, Belgien, Italien und Bulgarien). Lokale Konzepte der Kooperationspartner im Bereich des Entsorgungsmanagement sollen näher analysiert werden. Dabei wird

³³Vgl. Envac Group (2020b).

³⁴Vgl. Stadt Stockholm (2020c).

³⁵Vgl. Envac Group (2020a).

³⁶Vgl. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2020b).

³⁷Vgl. Interreg Europe (2020c).

im ersten Schritt, mit den lokalen Stakeholdern und den von der Initiative bereitgestellten Experten, eine Methodik erarbeitet, um die lokalen Konzepte zu evaluieren. Auf diesem Weg soll festgestellt werden, welche Maßnahmen des Konzepts besonders erfolgreich sind und welche nur schwache Effekte erzielen. Mit diesen Ergebnissen können die erfolgreichen Maßnahmen weiter verstärkt und für die Zukunft übernommen werden, während die schwächeren verbessert werden können. Die Resultate sind vor allem verbesserte Maßnahmen, eine erhöhte Beteiligung der Stakeholder und die Sensibilisierung der Bevölkerung.³⁸ Zwar werden bei diesem Projekt keine neuen Konzepte oder Maßnahmen generiert, jedoch werden die vorhandenen verbessert und die Möglichkeit zum Austausch der Kooperationsstädte gegeben.

Als ein Beispiel der von der EU geförderten Konzepte soll die Vorgehensweise am Projekt *Recycle Service 2025* aus Apeldoorn (Niederlande) vorgestellt werden. Dieses orientiert sich am niederländischen Ziel, dass im Jahr 2020 der Restmüll pro Person/Jahr auf 80 kg und für das Jahr 2025 auf 30 kg reduziert wird. Die Trennrate im Jahr 2025 soll 75 % betragen und für das Jahr 2030 ist eine zirkulierende Kreislaufwirtschaft geplant. Für die Evaluation wurden 18 Maßnahmen identifiziert und den jeweiligen Themenfeldern zugeordnet. Die Maßnahmen umfassen unter anderem eine App, die als Informationsquelle für die Einwohner dient oder ein separates Bezahlmodell, bei dem das gezahlt wird, was entsorgt wurde. Die Themenfelder sind: Prävention, Vorbereitung für eine Wiedernutzung, Recycling, andere Verwertung, Energie-Verwertung und Beseitigung. Nach der Kategorisierung konnten die positiven Folgen der Maßnahmen identifiziert werden. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Diversität der Maßnahmen eine Balance der einzelnen Themenfelder besteht. Vor allem durch frühzeitige Einwohnerbeteiligung fühlten sich die Einwohner in den Prozess eingebunden und sind dazu geneigt die Maßnahmen umzusetzen. Im ersten Quartal 2020 lag der pro Kopf anfallende Restmüll bei 66 kg und die Trennrate bei 79 %. Es sind auch Herausforderungen offen gelegt worden, wie bspw. ob das Bezahlmodell weiterhin sinnvoll ist, wenn Einwohner weniger Restmüll entsorgen.³⁹ Interreg Europe bietet den teilnehmenden Kommunen einen guten Ansatz um sogenannte *Good Practices* herauszufiltern, an den übrigen Maßnahmen weiterzuarbeiten und stetig zu verbessern. Die Initiative ist ein Beispiel dafür, dass Smart Waste-Konzepte auch die Beteiligung der Einwohner erfordern können und dass die Konzepte in Bezug auf Stärken und Schwächen analysiert werden müssen.

Die dargestellten Konzepte stellen einige Beispiele der existierenden und individuellen Smart Waste-Umsetzungen dar. Wie in zwei Beispielen bereits erwähnt, wird häufig Sensorik verbaut, welche dafür sorgt, dass Mülleimer an ein Netzwerk angeschlossen werden und kommunizieren. Im nächsten Kapitel werden die Technologien für eine

³⁸Vgl. Interreg Europe (2020b).

³⁹Vgl. Interreg Europe (2020a).

smarte Müllentleerungsstrategie vorgestellt.

2.2.2 Smart Waste-Technologien

Im folgenden Unterkapitel wird geklärt, welche Technologien für die Umsetzung von Smart Waste-Konzepten notwendig sind. Diese werden auch allgemein im Kontext der Smart City verwendet und als *Internet der Dinge* oder *Internet of Things* (IoT) bezeichnet. Im IoT sind Objekte des täglichen Lebens miteinander vernetzt und kommunizieren. Durch die Integration von Sensoren und kleinen Computern werden diese Objekte "intelligent", bzw. "smart". Einerseits ist durch die Vernetzung alltäglicher Objekte das IoT allgegenwärtig, andererseits ist die Technik so verbaut, dass sie aus der visuellen Wahrnehmung verschwindet und unsichtbar wird. Die erhobenen Daten werden dabei automatisch generiert und versendet, wobei die einzelnen Teilsysteme autonom agieren.⁴⁰ Die genaue Funktionsweise wird konkret an dem Beispiel Smart Waste erfolgen. Dabei muss eine Möglichkeit entwickelt werden, wie der Entsorgungsbetrieb den genauen Füllstand seiner Abfallbehälter messen kann, ohne jeden einzeln anzufahren und zu prüfen. Dafür muss im Vorfeld ein geeigneter Sensor verbaut werden. Im Entsorgungsbereich hat sich hierfür Ultraschall etabliert.⁴¹ Die Sensoren werden auch als Endpunkte (Nodes) bezeichnet, haben technisch jedoch nur die Möglichkeit Messungen durchzuführen. Für eine Übertragung müssen diese noch mit einem Sendergerät ausgestattet werden. Über niederfrequente Funkwellen werden die Daten an eine Basisstation (Gateway) weitergeleitet. Die Menge der zu übertragenden Daten ist mit wenigen Kilobits die Sekunde zwar gering, jedoch kann eine Entfernung von bis zu 40 Kilometern realisiert werden. Durch den niedrigen Datenverkehr ergeben sich auch Vorteile der Langlebigkeit der Batterien an den Endpunkten. Diese haben eine Lebenszeit von bis zu zehn Jahren.⁴² Das Gateway bildet die Brücke zwischen physischer und virtueller Welt. Einerseits werden die Daten von den Nodes empfangen, andererseits werden diese an einen Netzwerk-Server weitergeleitet. Die Übertragung kann dabei über Bluetooth, Mobilfunk, WLAN oder LAN erfolgen.⁴³ Die Übertragung von den Endpunkten bis zum Netzwerk-Server wird auch als *Low-Power-Wide-Area-Network* (LPWAN) bezeichnet. Sobald die Daten auf einem Netzwerk-Server sind, können diese von den jeweiligen Applikationen abgerufen und verarbeitet werden.⁴⁴ Die Abbildung 1 stellt die einzelnen Verbindungen grafisch dar.

Mehrere Unternehmen bieten den Aufbau und Inbetriebnahme von LPWAN, mit den enthaltenen Services, der notwendigen Technik und den Protokollen an. Zunächst muss erörtert werden, welche Anforderungen an das System gestellt werden und was für

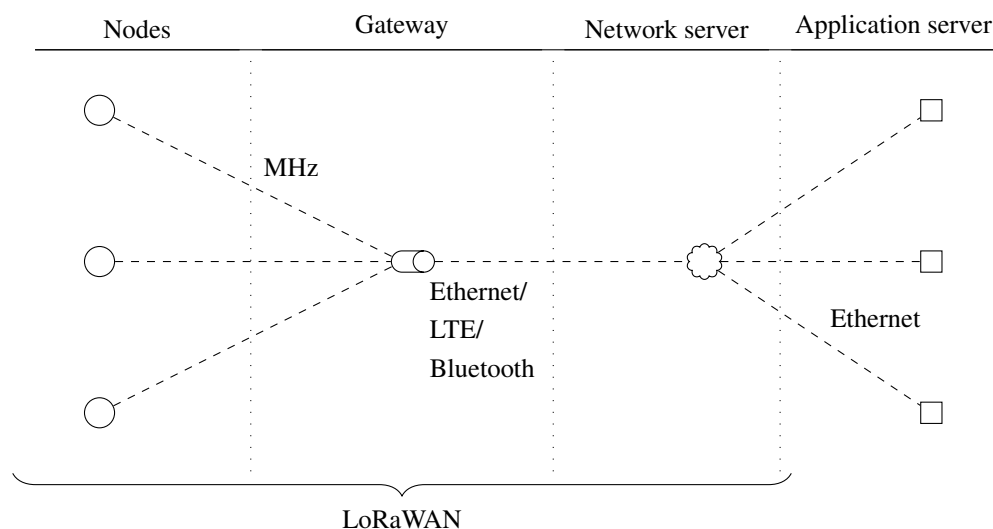
⁴⁰Vgl. Horvath, S. (2020).

⁴¹Vgl. Linnemann, M. et al. (2019) S. 90-92.

⁴²Vgl. Linnemann, M. et al. (2019) S. 6.

⁴³Vgl. The Things Network (2020b).

⁴⁴Vgl. Linnemann, M. et al. (2019) S. 11-12.

Abbildung 1: LoRaWAN-Infrastruktur⁴⁵

den konkreten Use-Case benötigt wird. Mögliche Kriterien können bspw. sein, wie hoch die Reichweite ist, ob auf ein vorhandenes Netzwerk zurückgegriffen werden soll oder wie sensibel die übertragenden Daten sind. Um vor allem nicht abhängig von anderen Unternehmen zu sein und die volle Kontrolle über seine Daten zu behalten, kann der Open-Source-Ansatz LoRaWAN als LPWAN mit der dazugehörigen Funktechnologie *LoRa* von Semtech verwendet werden. Auf diese Weise kann sich jede Privatperson oder jedes Unternehmen ihr eigenes LPWAN aufbauen. Dabei wird der Datenschutz mit verschiedenen Schichten der Verschlüsselung sichergestellt.⁴⁶ Zusätzlich ist es möglich sein privates Netzwerk zu erstellen. Dadurch ergeben sich monetäre Vorteile. Durch den Open-Source-Ansatz müssen keine Lizenzkosten oder Nutzungsgebühren getragen werden. Es bleiben jedoch Kosten für den Betrieb und selbstständige Wartung.⁴⁷ Ein weiterer Vorteil ist, dass bei dem Aufbau eines eigenen Netzes die Datensouveränität bestehen bleibt. Die Betreiber können eigenständig das Netz planen und sind nicht auf Subunternehmer angewiesen. Falls das nötige Wissen nicht vorhanden ist, kann auf ein Netzwerk von externen Beratern zurückgegriffen werden. Die *LoRa Alliance* hat sich zur Aufgabe gemacht, die LoRaWAN-Technologie weiterzuentwickeln und zu fördern. Dieser Non-Profit-Organisation haben sich bereits über 500 Unternehmen bzw. Institutionen als Mitglieder angeschlossen.⁴⁸

Ein weiterer technischer Vorteil von LoRaWAN sind die in drei Kategorien einzuteilenden Endpunkte. Mit diesen kann der Rhythmus bestimmt werden, wann Daten gesendet bzw. empfangen werden können. Je nach Anwendungsfall besteht die Auswahl zwischen Geräten der Klassen A, B und C. Diese Unterteilung ist jedoch nur für Endanwendungen von Bedeutung, bei denen Befehle empfangen werden müssen.

⁴⁵Eigene Darstellung in Anlehnung an The Things Network (2020c).

⁴⁶Vgl. growth with attitude UG (2020).

⁴⁷Vgl. Linnemann, M. et al. (2019) S. 22.

⁴⁸Vgl. Lora Alliance (2020).

Grundsätzlich besteht bei jeder Klasse die Möglichkeit, dass die Messgeräte Daten zu vorher fest definierten Zeiten versenden. Bei Klasse A wird nach jeder Sendung ein Zeitfenster festgelegt, in dem Daten empfangen werden können. Bei Geräten der Klasse B kann der Server einen Datenempfang ankündigen, indem ein kleines Datenpaket gesendet wird. Anschließend wird ein Zeitfenster eingerichtet, um die Befehlsdaten zu empfangen. Bei der Klasse C ist der Empfang jederzeit möglich.⁴⁹ Für Use-Cases bei denen vorrangig Daten gemessen werden sollen eignet sich am besten die Klasse A. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit den Füllstand eines mit LoRaWAN ausgerüsteten Mülleimers zu empfangen. Da jedoch nur der aktuelle Stand gesendet wird, muss eine Möglichkeit geschaffen werden, diese Daten zu verarbeiten und zu speichern. Das wird im nächsten Unterkapitel dargestellt.

2.2.3 Geeignete Datenmodelle

Im Internet der Dinge werden große Datenmengen versendet und empfangen. Um eine gute Übersicht zu behalten und diese Daten später auswerten zu können, müssen diese in einer Datenbank gespeichert werden. Da die Sensoren nur aktuelle Daten versenden, müssen weitere Informationen erschlossen werden. Im folgenden Unterkapitel werden theoretisch passende Datenmodelle und Datenbanken für die Konzeption einer smarten Müllentleerungsstrategie erstellt. Diese bilden die Grundlage für die spätere Anwendung von Algorithmen.

Sobald eine Stadt mithilfe von LoRaWAN und Sensoren eine Infrastruktur zur Messung und Lenkung von Alltagsobjekten aufgebaut hat, ist ein Schritt in Richtung Digitalisierung getätigt. Auf den Netzwerk-Servern können anschließend im Sekunden-takt neue Daten empfangen werden. Gleichzeitig müssen die gesammelten Daten für weitere Nutzungen zur Verfügung gestellt und verarbeitet werden. Der Oberbegriff zu diesem Thema ist *Datenmanagement*. Es gibt drei Aspekte, die im Folgenden näher erläutert werden: *Datenarchitektur*, *Datentechnik* und *Datennutzung*.⁵⁰ Das erste Problem ist der Umgang mit den Daten. Diese kommen als einzelne Informationen auf dem Server an. Ohne Kontext sind diese jedoch nicht nutzbar. Daher müssen sie ausreichend aufbereitet werden. Dieses Problem ist Teil der Datentechnik.

In einigen Netzwerk-Paradigmen werden die Daten verarbeitet und anschließend auf einem Server hinterlegt. Dabei handelt es sich um eine Mischform aus *Cloud*- und *Edge-Computing*.⁵¹ Es werden vier Ebenen definiert:

- die Cloud,
- die innere Edge,
- die mittlere Edge und

⁴⁹Vgl. The Things Network (2020a).

⁵⁰Vgl. Fasel, M./ Meier, A. (2016) S. 14.

⁵¹Vgl. Chang, C. et al (2019) S. 8.

- die äußere Edge.

Die äußere und mittlere Edge sind hierbei identisch, wie die äußeren Knoten und Gateways aus dem LoRaWAN-Netzwerk. Die dort erhobenen, bzw. gespeicherten Daten werden an die Rechner der inneren Edge weitergeleitet. Dort werden sie aufbereitet und verarbeitet. Bei LoRaWAN findet die Verarbeitung auf dem Applikationsserver statt. Das Zentrum bildet die Cloud. Dabei handelt es sich um einen Netzwerk-Server, auf dem die Daten gespeichert werden und zum Abruf bereitstehen. Das Paradigma bietet zwei entscheidende Vorteile. Zum einen wird keine Verarbeitung auf den Netzwerk-Servern durchgeführt und Arbeitsleistung geschont. Zum anderen hat diese Form der Verarbeitung eine geringere Latenz, sodass Daten schneller aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden können.⁵² Wie die genaue Netzwerk-Architektur und die Kommunikation der einzelnen Ebenen stattfindet, wird an dieser Stelle nicht näher erläutert.

Sobald die Daten aufbereitet sind, müssen sie in Datenbanken gespeichert werden. Das wird als Datenarchitektur bezeichnet. In der Datennutzung werden die Daten zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt.

Da nicht nur ein einzelner Bereich einer Stadt, sondern mehrere Bereiche Daten senden, kann so eine große Menge an Daten entstehen, die auch als *Big Data* bezeichnet werden. Big Data lässt sich durch 5 Vs charakterisieren.

- Volume
- Variety
- Velocity
- Value
- Veracity

Volume bezeichnet dabei die Menge an Daten, die zur Verfügung stehen. Diese liegt dabei mindestens im Terabyte-Bereich. Unter Variety wird die Struktur verstanden, in der die Daten vorhanden sind. Diese können bereits strukturiert, semi-strukturiert oder unstrukturiert, bspw. in Form von Text, Video oder Grafik, vorhanden sein. Velocity steht für die Geschwindigkeit in der die Daten verarbeitet werden. Bei Big Data werden Daten in Echtzeit ausgewertet. Mit dem Begriff Value wird impliziert, dass die Daten einen Wert besitzen und zur Wertsteigerung eines Unternehmen beitragen. Veracity beschreibt die Qualität der Daten. Bei großen Datenbeständen sind nicht alle Daten informativ. Aus einigen lassen sich keine weiteren Information gewinnen. Durch Algorithmen und den daraus resultierenden Schlussfolgerungen kann festgestellt werden, ob die Daten verarbeitet werden können oder nicht.⁵³ Werden jetzt die einzelnen Charakteristika der Big Data mit den Daten verglichen, die in einer Smart City anfallen, können die Gemeinsamkeiten erkannt werden. Wenn eine gesamte Stadt in den

⁵²Vgl. Chang, C. et al (2019) S. 8-9.

⁵³Vgl. Fasel, M./ Meier, A. (2016) S. 5-6.

einzelnen Handlungsfeldern einer Smart City⁵⁴ Daten erhebt, wird das definierte Volumen von Big Data erreicht. Die erhobenen Daten können von verschiedener Struktur sein und müssen teilweise in Echtzeit bearbeitet werden. Durch die Verarbeitung der Daten kann ein Mehrwert für die Stadt bspw. im Smart Waste-Bereich geschaffen werden, wenn dadurch die Stadt sauber bleibt. Außerdem müssen die Daten in Kategorien eingeteilt werden. Diese beziehen sich darauf, ob die Daten nur temporär gespeichert oder für spätere Berechnungen genutzt werden.

Bevor Daten gespeichert werden können, muss die passende Datenbank entworfen und aufgebaut werden. Zur Veranschaulichung wird Bezug zur Müllentleerungsstrategie genommen. Es gibt drei Arten von Datenbanken: hierarchische, objektorientierte und relationale.⁵⁵ Aufgrund der hohen Dynamik der Daten fällt für den Bereich der Smart City die Entscheidung auf eine relationale Datenbank. Diese bietet vor allem drei Vorteile. Alle Daten werden in Tabellen abgelegt. So können neue Informationen oder Tabellen in den vorhandenen Datenbeständen angehängt werden. Gleichzeitig haben mehrere Benutzer die Möglichkeit auf die Datenbank zuzugreifen, ohne andere Aktionen zu behindern. Der dritte Vorteil ist die Wahrung der Datenintegrität. Daten haben einen Schutz vor unbefugter Manipulation oder Löschung.⁵⁶

In diesem Beispiel sind zwei Informationen vorher bekannt. Jede Mülltonne erhält eine *ID* und *Geokoordinaten*. Die *ID* ist der eindeutige Schlüssel zur Identifikation. Die *Geokoordinaten* sind numerisch und enthalten die X- und Y-Koordinate. In regelmäßigen Abständen werden die Füllstände übertragen. Damit die historischen Füllstände abrufbar bleiben, wird eine neue Entität für die Füllstände geschaffen, diese wird *Füllstand* genannt. Somit kann jeder einzelne Füllstand zurückverfolgt werden. Als Attribute werden *FüllstandID*, *Füllstand*, *Tag*, *Uhrzeit* und *Änderung* hinzugefügt. Die *FüllstandID* ist der eindeutige Schlüssel für die Identifikation. In den Attributen *Uhrzeit* und *Tag*, werden die Zeitangaben und der Tag der Messung in einem numerischen Format gespeichert. Die Trennung dient dazu, dass später einzelne Tage ausgegeben werden können, um die Füllstände zurückzuverfolgen. Im *Füllstand* wird der Füllstand der jeweiligen Messung in Prozent gespeichert. Das Attribut *Änderung* entsteht durch die Subtraktion des vorherigen Füllstands mit dem aktuellen. Daraus können auch negative Zahlen resultieren. Ein negatives Vorzeichen steht dabei für eine Leerung. In Abbildung 2 ist ein Entity-Relationship-Modell abgebildet, welches die einzelnen Attribute und Beziehungen aufschlüsselt.

Die unterstrichenen Attribute bilden die eindeutigen Schlüssel. Jeder Mülleimer hat n Füllstände. Somit wird die Verknüpfung zu vergangenen Werten deutlich. Sobald ein Füllstand aktualisiert wird, erhält dieser eine neue FüllstandID. Hinterlegt werden die

⁵⁴Vgl. Kapitel 2.1.

⁵⁵Vgl. Bühler, P. et al. (2019) S. 52.

⁵⁶Vgl. Fasel, M./ Meier, A. (2016) S. 10-11.

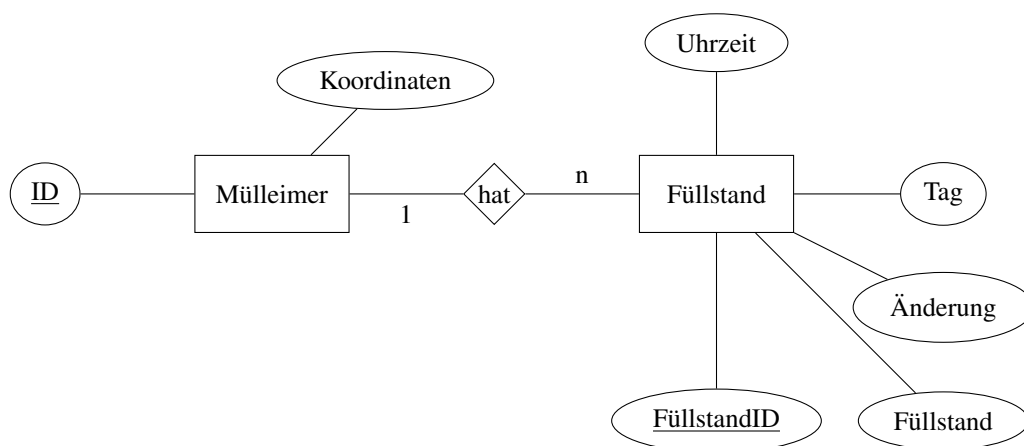


Abbildung 2: Beispiel eines Entity-Relationship-Modell für eine Füllstandsdatenbank

aktuelle Uhrzeit, der Tag, der Füllstand und die Änderung zum vorherigen Füllstand. In der Abbildung ist eine einfache Skizze dargestellt. Es lassen sich beliebig viele Entitäten und Attribute hinzufügen. Weitere Aufschlüsselungen sind auch möglich. Die Daten können ebenfalls in Tabellenform dargestellt und visualisiert werden. Für die Zwecke einer Datenbank bildet dieses Modell die unterste Ebene.

Bei einer relationalen Datenbanken liegt auf dieser Schicht das *Managementsystem*. Mit diesem werden die Daten in die Datenbank eingefügt, bearbeitet und abgefragt. Diese darauf liegende Schicht koppelt die eigentliche Datenbank von möglichen Applikationen ab. Das fördert zum einem die Sicherheit und zum anderen die Performance. Beide Systeme bilden zusammen das *relationale Datenbanksystem*⁵⁷. Bei der Anwendung mit LoRaWAN kann das gesamte Datenbanksystem auf dem Applikationsserver liegen oder die Datenbank wird weiter auf einen anderen Server verlagert. Dies ist jedoch abhängig vom Anwendungsfall und soll nicht näher thematisiert werden.

Im Idealfall wurden bis zu diesem Schritt Daten erhoben und gespeichert. Für einige Anwendungen reicht die bloße Speicherung als Form der Archivierung, für andere beginnt anschließend ein weiterer Schritt. Im Bereich Big Data soll durch die Nutzung von Datenanalyseverfahren nach weiteren Informationen gesucht werden. Dieses Themenfeld wird auch als *Data Mining* bezeichnet. Hier treffen verschiedene Gebiete, wie die Statistik oder künstliche Intelligenzen, aufeinander.⁵⁸ Der weitere Umgang mit der Datenbank und welche Informationen daraus gezogen werden können wird im nächsten Kapitel behandelt.

⁵⁷Vgl. Fasel, M./ Meier, A. (2016) S. 10.

⁵⁸Vgl. Runkler, T. A. (2015) S. 2.

3 Anwendbare Algorithmen

Das folgende Kapitel beschreibt den Kern der Müllentleerungsstrategie. Auf Grundlage der Standorte sollen Algorithmen berechnen, welche die optimale Route zur Müllentleerung ist. Daneben soll ein Verfahren angewendet werden, um individuelle Prognosen des jeweiligen Füllstandes zu treffen. Zunächst wird die allgemeine Vorgehensweise erklärt. Anschließend wird diese auf die Problemstellung übertragen.

3.1 Pathfinding

Algorithmen zur Routenfindung bzw. *Pathfinding* werden heute alltäglich genutzt. Diese finden sich in Navigationsgeräten für den privaten oder kommerziellen Gebrauch. Es wird dem mathematische Teilgebiet der *Graphentheorie* zugeordnet. Die ersten Ansätze wurden bereits im 18. Jahrhundert konzipiert. 1736 formulierte Leonhard Euler das Königsberger Brückenproblem, in dem es darum geht, sieben Brücken und vier Landstücke in einem Spaziergang zu überqueren.⁵⁹ Das hier behandelte Fallbeispiel beinhaltet zwar nicht das Brückenproblem, basiert jedoch auf der Graphentheorie. Es soll der kürzeste Weg zwischen zwei oder mehr Punkten gefunden werden. Im folgenden Unterkapitel werden dafür zwei Algorithmen vorgestellt, näher erläutert und miteinander verglichen. Anschließend wird einer ausgewählt, auf die Problemstellung übertragen und angewendet.

3.1.1 Grundlagen

In der Graphentheorie wird ein Netzwerk in einen zweidimensionalen Graphen übertragen. Punkte in diesem Graphen werden *Knoten* und die Wege zwischen zwei Knoten *Kanten* genannt. Die Länge einer Kante wird als *Gewicht* bezeichnet. Alle Algorithmen berechnen den kürzesten Weg, haben aber unterschiedliche Eigenschaften. Grundsätzlich muss eine Kante nicht eine Strecke in Metern repräsentieren, sondern es können auch Kosten in Form von Währung, Zeit oder Ähnlichem sein.⁶⁰ Im Folgenden werden die Algorithmen von *Dijkstra*, *Bellmann & Ford* und *Floyd & Warshall* fokussiert.

Der Bellmann-Ford-Algorithmus hat die Besonderheit, dass die Kanten auch negativ gewichtet sein können.⁶¹ Dies ist der Fall, wenn die Kanten bspw. Kosten und Erträge repräsentieren. In einem Anwendungsfall, bei dem die Route mit den geringsten Kosten berechnet werden muss, eignet sich dieser Algorithmus. Weil in dem Anwendungsbeispiel nach der kürzesten Strecke in Metern gesucht wird, kann dieser Algorithmus nicht genutzt werden.

Der Floyd-Warshall-Algorithmus ist für dieses Anwendungsbeispiel besser geeignet. Es wird nicht der kürzeste Weg zwischen Start- und Endknoten ermittelt, sondern die

⁵⁹Vgl. Aigner, M. (2015) S. 33.

⁶⁰Vgl. Cormen, T. H. et al. (2013) S. 655.

⁶¹Vgl. Cormen, T. H. et al. (2013) S. 663.

kürzesten Wege zwischen allen Knotenpaaren. Das Ergebnis ist eine Matrix in der Größe $n \times n$, wobei n die Anzahl der Knoten ist.⁶² Der Algorithmus ist geeignet, wenn sich die Start- und Endpunkte einer Route oft ändern und präventiv bereits die kürzesten Wege bekannt sein sollten.

Der Dijkstra-Algorithmus berechnet den kürzesten Weg zwischen einem variablen Startknoten und allen weiteren Knoten. Dabei ist er schneller als der Bellmann-Ford-Algorithmus.⁶³ Viele weitere Algorithmen bauen auf dem Algorithmus von Dijkstra auf, daher wird er als Grundlage im ersten Schritt detailliert erläutert.

Dijkstra-Algorithmus

Dijkstras Algorithmus berechnet den kürzesten Weg zwischen einem Startknoten und allen weiteren Knoten in einem Graphen $G = (V, E)$. V steht für die Menge der Knoten (vertex) und E für die Menge der Kanten (edges). Beide werden jeweils in Listen bzw. Tupel hinterlegt. Da keine negativen Gewichte erlaubt sind, gilt die Voraussetzung $w(u, v) \geq 0$ für alle Kanten $(u, v) \in E$. w steht für das Gewicht von Knoten u zu Knoten v , welche in dem Tupel der Kanten (E) enthalten sind.⁶⁴ Folgend wird der konkrete Ablauf des Algorithmus⁶⁵ beschrieben und anschließend näher erläutert.

- 1 Initialisiere den Graphen G mit dem Startknoten s
- 2 Erstelle Tabelle S
- 3 Erstelle Warteschlange Q
- 4 **Wiederhole:** Solange Q nicht leer ist
 - 5 Nimm vom aktuellen Knoten den nachfolgenden Knoten mit dem geringsten Gewicht
 - 6 Prüfe, ob das neu errechnete Gewicht kleiner ist, als das gespeicherte
 - 7 Falls es kleiner ist, ersetze das Gewicht in Tabelle S
 - 8 Wiederhole Schritte 5-8 für die übrigen Nachfolger
 - 9 Wenn alle Nachfolger besucht worden sind, lösche den aktuellen Knoten aus der Warteschlange Q
 - 10 Stelle die Nachfolger in aufsteigenden Kantengewichten nach vorne in die Warteschlange Q
- 11 **Ende**

Abbildung 3: Dijkstra-Algorithmus in Pseudocode

In Zeile 1 wird der zu betrachtende Graph mit dem Startknoten s definiert. Zeile 2 erstellt eine Tabelle S , die mit allen Knoten des Graphen gefüllt ist. Darin wird gespeichert, welcher der direkte Vorgänger eines Knotens ist und wie hoch das geringste Gewicht ist, um diesen zu erreichen. Bei der Erstellung wird das Gewicht des Startknotens auf 0 und alle weiteren auf ∞ gesetzt. Der Startknoten hat sich selbst als Vor-

⁶²Vgl. Cormen, T. H. et al. (2013) S. 705-706.

⁶³Vgl. Cormen, T. H. et al. (2013) S. 670.

⁶⁴Vgl. Cormen, T. H. et al. (2013) S. 670.

⁶⁵Vgl. Cormen, T. H. et al. (2013) S. 671.

gänger. In Zeile 3 wird die Warteschlange Q erstellt. Darin enthalten sind alle Knoten des Graphen, mit ihren jeweiligen verbundenen Knoten und Kantengewichten. Zeile 4 leitet die Schleife ein. Solange sich noch ein Objekt in Q befindet, wird die Schleife ausgeführt. In Zeile 5 werden alle nachfolgenden Knoten betrachtet. Es wird derjenige mit dem kleinsten Gewicht $w(\text{aktueller Knoten}, \text{nachfolgender Knoten})$ ausgewählt. Wenn das neue Gewicht kleiner als das gespeicherte in der Tabelle S ist, wird das neue Gewicht eingetragen und der aktuelle Knoten als Vorgänger gespeichert (s. Zeile 6-7). Zeile 8 behandelt die Wiederholung für die übrigen Nachfolger. Wenn alle nachfolgenden Knoten geprüft worden sind, wird der aktuelle Knoten in Zeile 9 aus der Warteschlange Q gelöscht. Anschließend wird in Zeile 10 die Warteschlange Q manipuliert, damit die direkten Nachfolger des aktuellen Knotens als nächstes abgefragt werden. Sobald alle Knoten aus der Warteschlange gelöscht wurden, endet der Algorithmus in Zeile 11. Zur Veranschaulichung ist ein Beispiel mit einem Graphen und sechs Knoten skizziert. In Abbildung 4 ist der Ausgangsgraph und in Abbildung 5 der Endgraph dargestellt. Beide wurden mit der Tabelle S verknüpft.⁶⁶

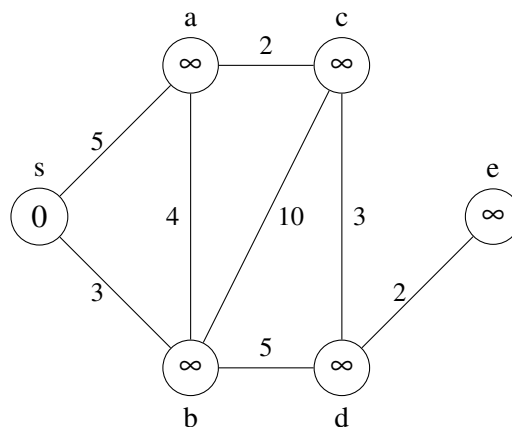


Abbildung 4: Ausgangsgraph nach Programmzeile 2 des Dijkstra-Algorithmus

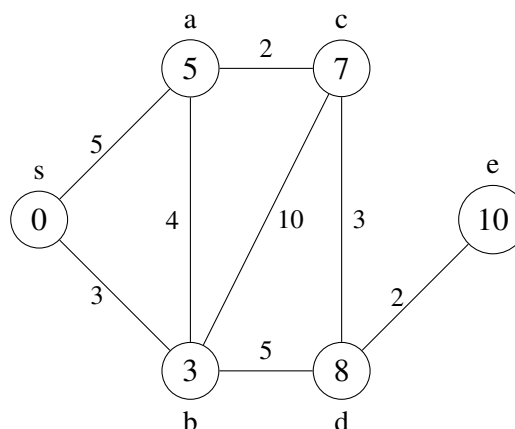


Abbildung 5: Ausgabegraph mit endgültigen Gewichten

⁶⁶Die Warteschlange Q und die Tabelle S nach der ersten und vor der letzten Iteration sind im Anhang A1 abgebildet.

Der Dijkstra-Algorithmus eignet sich für die Identifikation der kürzesten Strecke von einem Startpunkt zu mehreren möglichen Endpunkten. Sobald der Startpunkt verlassen wurde, muss ein neuer Durchlauf vom aktuellen Punkt gestartet werden. Mit Hinblick auf die Problemstellung, bei der mehrere Punkte hintereinander mit der kürzesten Strecke abgefahren werden sollen, sollte ein anderer Algorithmus in Betracht gezogen werden. Der Floyd-Warshall-Algorithmus stellt eine geeignete Alternative dar.

Floyd-Warshall-Algorithmus

Dieser Algorithmus basiert auf der Theorie, dass der kürzeste Weg zwischen zwei nicht benachbarten Knoten (bspw. a und c), der Weg über die Zwischenknoten (b) ist. Die Verbindungen zum Zwischenknoten ($a - b$, $b - c$) sind dabei der jeweilige kürzeste Weg. Die gleiche Theorie wird auch angewendet, um den kürzesten Weg zweier direkt benachbarter Knoten zu bestimmen, wenn ggf. der Umweg über einen Zwischenknoten kürzer ist.⁶⁷ Die Ausgangslage bildet erneut ein Graph $G = (V, E)$. Es werden zwei Matrizen der Größe $n \times n$ erstellt. Als Endprodukt stehen in der Matrix D die kürzesten Wege der jeweiligen Knotenpaare und in Matrix N die jeweiligen Zwischenknoten. Im Folgenden werden ausschließlich die Zwischenschritte von einem Ausgangsgraph G zu Matrix D erläutert. Zu Beginn des Algorithmus ist in D jeweils der direkte Weg von zwei Knoten und der Weg zu sich selbst (0) abgebildet. Falls es keinen bekannten Weg gibt, wird vorläufig der Weg mit ∞ geschätzt. In Abbildung 6 ist der Graph aus Abbildung 4 in Matrixform, vor Beginn des Algorithmus, dargestellt.

	a	b	c	d	e	s
a	0	4	2	∞	∞	5
b	4	0	10	5	∞	3
c	2	10	0	3	∞	∞
d	∞	5	3	0	2	∞
e	∞	∞	∞	2	0	∞
s	5	3	∞	∞	∞	0

Abbildung 6: Graph aus Abbildung 4 in Matrixform

Die Matrix D wird rekursiv in jedem einzelnen Durchlauf verbessert. In Abbildung 7 ist der konkrete Ablauf beschrieben.⁶⁸

In Programmzeile 1 wird der Zähler n für alle Schleifen festgesetzt. Dieser ist identisch mit der Anzahl der Knoten im Graphen. Sobald eine Schleife begonnen wird, repräsentiert der Zähler jeweils einen Knoten des Graphen. In Programmzeile 2 wird die Matrix D erstellt. Diese wird auch als Matrix vor der ersten Iteration bezeichnet ($D^{(0)}$). Diese bildet die Ausgangslage und wird in jeder Rekursion verbessert. Die erste Schleife, die in Programmzeile 3 initialisiert wird, erstellt die neue Matrix ($D^{(k)}$)

⁶⁷Vgl. Cormen, T. H. et al. (2013) S. 706.

⁶⁸Vgl. Cormen, T. H. et al. (2013) S. 707.

```

1 Setze Variable  $n$  auf die Anzahl der Knoten
2 Erstelle Matrix  $D^{(0)}$ 
3 Wiederhole solange bis Zähler  $k = n$  ist:
4   Erstelle Matrix  $D^{(k)}$ 
5   Wiederhole solange bis Zähler  $i = n$  ist:
6     Wiederhole solange bis Zähler  $j = n$  ist:
7       Nimm  $d_{ij}^{(k-1)}$  (Ergebnis  $a$ )
8       Addiere  $d_{ik}^{(k-1)}$  mit  $d_{kj}^{(k-1)}$  (Ergebnis  $b$ )
9       Vergleiche  $a$  und  $b$  und setze in Zelle  $d_{ij}^{(k)}$  das kleinere Ergebnis
10    Ende
11  Ende
12 Ende

```

Abbildung 7: Floyd-Warshall-Algorithmus in Pseudocode

in Programmzeile 4. In Programmzeile 5 und 6 beginnen die Schleifen für die Zeilen (Schleife i) und für die Spalten der Matrix (Schleife j). Sobald alle Spalten einer Zeile bearbeitet wurden, geht es in die nächste Zeile. Die Programmzeilen 7 bis 9 bilden die Grundlage des Algorithmus. In Programmzeile 7 wird die Zelle der jeweiligen Iteration (i, j) von der Vorgängermatrix $D^{(k-1)}$ gespeichert. In Programmzeile 8 wird jeweils die Vorgängermatrix $D^{(k-1)}$ geladen. Daraus werden die Zellen d_{ik} (Zeile (i) und Spalte (Nummer der aktuellen Iteration)) und d_{kj} (Zeile (Nummer der aktuellen Iteration) und Spalte (j)) miteinander addiert. In Programmzeile 9 werden beide Ergebnisse miteinander verglichen und das kleinere Ergebnis wird in die aktuelle Zelle der Matrix $D^{(k)}$ gesetzt. In die Vorgängermatrix N wird, sobald eine Zelle bearbeitet wurde, der entsprechende Knoten eingesetzt.

Diese Schleifen werden solange wiederholt, bis alle Knoten untereinander verglichen worden sind. In Matrix $D^{(n)}$ sind anschließend die Knotenpaare mit den jeweils kürzesten Wegen abzulesen. In der Zeile stehen die Start- und in den Spalten die Endknoten. In Abbildung 8 ist die endgültige Matrix $D^{(6)}$ für die in Abbildung 6 beschriebene Matrix dargestellt.⁶⁹ Die verbesserten Gewichte sind hervorgehoben.

	a	b	c	d	e	s
a	0	4	2	5	7	5
b	4	0	6	5	7	3
c	2	6	0	3	5	7
d	5	5	3	0	2	8
e	7	7	5	2	0	10
s	5	3	7	8	10	0

Abbildung 8: $D^{(6)}$ von Abbildung 6 berechnet mithilfe des Floyd-Warshall-Algorithmus

⁶⁹Im Anhang A2 sind die einzelnen Durchgänge von $D^{(k)}$ abgebildet und die Änderungen hervorgehoben.

Die durch den Floyd-Warshall-Algorithmus berechnete Matrix D dient als Grundlage, um die optimale Route mit mehreren Zwischenzielen zu finden.

3.1.2 Optimale Routenfindung bei der Müllentleerung

Da sich der Dijkstra-Algorithmus nicht für mehrere Zwischenziele eignet, wird im Folgenden der Floyd-Warshall-Algorithmus für die Berechnung der effizientesten Routenplanung angewandt. Dafür wird dieser auf dem Gebiet der Kartographie genutzt. Die Knoten stellen in diesem Kontext Straßenkreuzungen und die Kanten Straßen dar. Es müssen zusätzlich weitere Anpassungen vorgenommen werden. Da Mülleimer nicht auf einer Kante dargestellt werden können, müssen diese als Knoten festgelegt werden. Dafür werden die Straßen, auf denen die Mülleimer stehen, getrennt und mit dem neuen Knoten *Mülleimer* verbunden. Somit kann der Algorithmus die Strecken zu den neuen Knoten berechnen. Eine solche Modifikation ist in Abbildung 9 abgebildet.

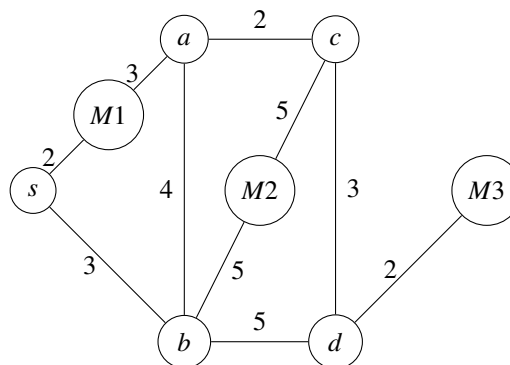


Abbildung 9: Modifizierter Graph

Der abgebildete Graph orientiert sich an den Graphen aus Abbildung 5. Es wurden drei Mülleimer hinzugefügt, die durch den Prefix M gekennzeichnet sind. $M1$ und $M2$ sind Mülleimer, die sich auf einer Straße befinden. Diese teilen die Straße (Kante) zwischen $s - a$ und $b - c$. Mülleimer $M3$ befindet sich an einer Straßenkreuzung (Knoten) und übernimmt die Position des ehemaligen Knotens e .

Eine weitere Anpassung betrifft das Gebiet in dem die Leerung vorgenommen wird. Dieses muss vor der Berechnung klar abgegrenzt sein, damit unnötige Wege mit dem Algorithmus nicht berechnet werden. Für dieses Beispiel wird ein abgegrenztes Gebiet wie bspw. ein Park oder die Innenstadt gewählt. Die zu leerenden Mülleimer und das Areal sind vor Beginn bekannt und in einer Karten-Datenbank hinterlegt. Es soll die Möglichkeit bestehen, die Tour an einem beliebigen Ort oder beim ersten zu leerenden Mülleimer zu starten. Die Tour wird gestartet, sobald genug Mülleimer einen ausreichenden Füllstand aufweisen. Dabei stehen sich der Leerungsbedarf der Mülleimer und die Entsorgungskosten entgegen. In den Entsorgungskosten können bspw. Personal-, Behälter- und Fahrzeugkosten enthalten sein. Wenn der Leerungsbedarf

überwiegt kann die Leerung begonnen werden.⁷⁰ Sobald die Leerung initiiert werden soll, gibt der Entsorgungsmitarbeiter seinen Startpunkt im Gebiet an. Die Applikation, welche Zugriff auf die durch LoRaWAN erhobenen Daten und die Karten-Datenbank hat, errechnet, welcher Weg der optimale ist. Bei der Routenfindung eignet sich als Optimum der kürzeste Weg. Hier wird von einem Status Quo ausgegangen, der annimmt, dass der kürzeste Weg auch gleichzeitig der schnellste ist. In der Logistik gibt es ähnliche Anforderungen an die Tourenplanung. Jede Destination sollte in einer optimalen Reihenfolge abgefahren werden. Diese Problematik spiegelt sich in dem *Traveling Salesman-Probleme (TSP)* wider. Einem Handelsvertreter wird die Aufgabe gegeben eine Anzahl von Kunden in verschiedenen Orten zu besuchen. Die Reihenfolge ist frei wählbar, wobei Start- und Endpunkt identisch sein müssen. Es soll die kürzeste Strecke zurückgelegt und kein Knoten darf mehr als einmal besucht werden.⁷¹ Dieses Beispiel kann auf die Thematik übertragen werden, wenn jeder Mülleimer einen Knoten darstellt. Je größer und verkanteter der Graph ist, desto aufwändiger sind die Berechnungen.

Das Anwendungsbeispiel hat nicht dieselben Anforderungen wie das TSP und durch das abgegrenzte Gebiet ist es nicht umfangreich verkantet. Dadurch können einfache Heuristiken, wie z. B. Entscheidungsbäume, angewendet werden.⁷² Entscheidungsbäume dienen in der Prozessoptimierung zur Bewertung von Entscheidungen. Dabei wird jede Möglichkeit in einer Verzweigung dargestellt und gewichtet. Werden alle Möglichkeiten aufgezeichnet, kann auf der untersten Stufe das Resultat der jeweiligen Entscheidungen abgelesen werden.⁷³ In diesem Beispiel bildet der Startknoten die Wurzel des Entscheidungsbaums. Da nur die Knoten mit Mülleimern besucht werden sollen, werden alle als mögliche Entscheidungen angegeben und gewichtet. Die Gewichtung wird aus der Ergebnismatrix D des Floyd-Warshall-Algorithmus entnommen. Die Ergebnismatrix $D^{(8)}$ für die Abbildung 9 ist in Abbildung 10 notiert.

	S	A	B	C	D	$M1$	$M2$	$M3$
S	0	5	3	7	8	2	8	10
A	5	0	4	2	5	3	7	7
B	3	4	0	6	5	5	5	7
C	7	2	6	0	3	5	5	5
D	8	5	5	3	0	8	8	2
$M1$	2	3	5	5	8	0	10	10
$M2$	8	7	5	5	8	10	0	10
$M3$	10	7	7	5	2	10	10	0

Abbildung 10: $D^{(8)}$ von Abbildung 9 berechnet mithilfe des Floyd-Warshall-Algorithmus

⁷⁰Vgl. Kranert, M./ Cord-Landwehr, K. (2010) S. 124-125.

⁷¹Vgl. Domschke, W. (1997) S. 100.

⁷²Vgl. Domschke, W. (1997) S. 132.

⁷³Vgl. Grüning, R./ Kühn, R. (2017) S. 150-151.

In den jeweiligen Verzweigungen werden die Knoten besucht und gewichtet, die vorher noch nicht besucht wurden. Dies wird solange wiederholt, bis alle Mülleimer gelistet sind. Die unterste Stufe bildet wieder der Startknoten, da die Tour dort enden soll. Werden die einzelnen Verzweigungen addiert, können die jeweiligen Gesamtstrecken als Resultat abgelesen werden. Von diesen wird die Strecke mit der kleinsten Summe der Gewichten und demnach die kürzeste Strecke gewählt. Dadurch wird die Reihenfolge der Leerung bestimmt. Der Entscheidungsbaum für dieses Beispiel ist in Abbildung 11 dargestellt.

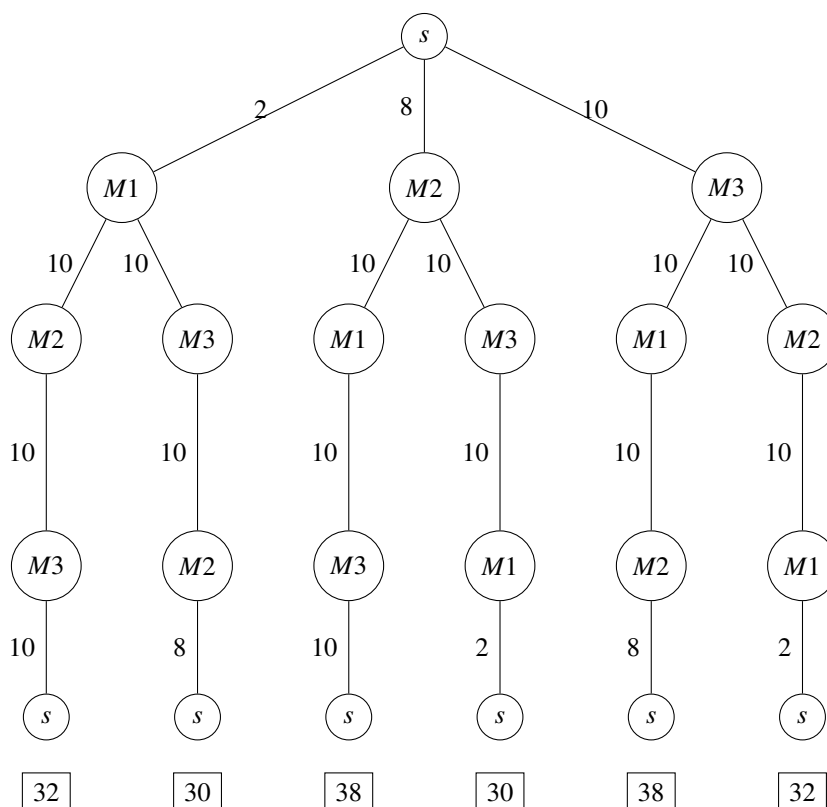


Abbildung 11: Entscheidungsbaum für Abbildung 10

Da zwei Routen in diesem Fall dasselbe Resultat aufweisen (30), kann eine von diesen frei gewählt werden.

Für die genaue Route können entweder die Zwischenknoten aus der durch den Floyd-Warshall-Algorithmus generierten Vorgängermatrix N gezogen werden, oder es wird der Dijkstra-Algorithmus angewandt. Dafür wird der Algorithmus nach jedem Zwischenbesuch initiiert. Auf die hier dargestellte Weise kann die kürzeste Strecke optimal berechnet werden. Um Strecken im Voraus optimal planen zu können, werden im letzten Schritt Prädiktionsmethoden evaluiert und diskutiert, ob sie eine geeignete Möglichkeit für dieses Anwendungsbeispiel darstellen.

3.2 Predictive Analytics

Große Datenbestände dienen der Informationsgewinnung. Diese wiederum sollen den Wert des Unternehmens steigern.⁷⁴ Um solche Informationen zu erhalten, müssen diese erschlossen werden. Hier setzt das Data-Mining an. Der Prozess sieht dabei vor, dass Daten gesammelt (Vorbereitung), aufbereitet (Vorverarbeitung), analysiert (Analyse) und genutzt (Nachbereitung) werden.⁷⁵ Mithilfe von Analysemethoden der *Business Analytics* sollen Vorhersagen für die Zukunft getroffen werden. Die Business Analytics umfasst drei Teilbereiche: die deskriptive, prädiktive und präskriptive Analyse. In der deskriptiven Analyse wird ein Beschreibungsmodell entworfen, welches die Auswertung der Daten in den Fokus stellt. Die reine Betrachtung der Daten steht im Vordergrund. In der prädiktiven Analyse werden Wirkungszusammenhänge analysiert und ein Erklärungsmodell konstruiert. Dabei stehen die Ursachen für die Entstehung der Werte im Vordergrund und es sollen zukünftige Werte prognostiziert werden. Im Bereich der präskriptiven Analyse werden aus den Ergebnissen der Prognosen Handlungsempfehlungen abgeleitet. Dafür wird ein Entscheidungsmodell erstellt.⁷⁶ Im folgenden Unterkapitel wird die *Zeitreihenanalyse* als ein mögliches Verfahren für die Anwendung im Bereich Smart Waste erläutert.

3.2.1 Grundlagen

Die Zeitreihenanalyse stellt einen Teilbereich der *Zeitreihenbetrachtung* dar und versucht eine abhängige Variable mithilfe des zeitlichen Ablaufs zu erklären (innere Methode). Der andere Bereich ist die *Ökonometrie*. Dieser versucht wiederum die Variable im zeitlichen Ablauf mit anderen Variablen zu erklären (äußere Methode). Bei der Zeitreihenbetrachtung handelt es sich um ein Themengebiet der Statistik.⁷⁷

Für dieses Fallbeispiel wählen wir die Zeitreihenanalyse. Es wird die allgemeine Vorgehensweise erklärt. Zwar wäre die Ökonometrie die geeignetere Variante, da viele Faktoren den Füllstand eines Mülleimers bestimmen könnten, jedoch liegen keine weiteren Faktoren in diesem Fallbeispiel vor.

Die Aufgaben der Zeitreihenanalyse setzen sich zusammen aus der Deskription, sowie der Diagnose und Prognose. Vor allem die Prognose ist für dieses Fallbeispiel von Interesse.⁷⁸ Eine Zeitreihe lässt sich in vier Komponenten zerlegen, welche einen Einfluss vorweisen: Die *Trendkomponente* (m_t), die *Konjunkturkomponente* (c_t), die *Saisonkomponente* (s_t) und die *Restkomponente* (u_t). Der Index t definiert den Zeitpunkt der Messung. Die Trendkomponente beinhaltet die Tendenz einer Zeitreihe. Diese kann durch höhere Besucherströme und damit erhöhten Abfallaufkommen oder

⁷⁴Vgl. Kapitel 2.2.3, 5 Vs von Big Data.

⁷⁵Vgl. Runkler, T. A. (2015) S. 3.

⁷⁶Vgl. Gluchowski, P. (2016) S. 276.

⁷⁷Vgl. Kosfeld, R. et al. (2016) S. 281.

⁷⁸Vgl. Kosfeld, R. et al. (2016) S. 282.

technischen Fortschritt beeinflusst werden. Die Konjunkturkomponente spiegelt zyklische Schwankungen wider. Dafür müssen die Zeitreihen eine Laufzeit von mindestens vier Jahren vorweisen. Da eine Trennung zwischen Trend- und Konjunkturkomponente nicht möglich ist, werden beide in der *glatten Komponente* (g_t) zusammengefasst. Die Saisonkomponente bildet jahreszeitliche Einflüsse ab. Diese werden in die Kategorien *natürliche*, *institutionelle* und *kalenderbedingte Faktoren* unterteilt. Unter natürlichen Faktoren werden Einflüsse der Natur, wie Jahreszeiten oder Sonnenauf- und Sonnenuntergang, zusammengefasst. Die institutionellen Faktoren beinhalten bspw. Ferien oder Feiertage. Kalenderbedingte Faktoren umschließen Unregelmäßigkeiten der einzelnen Monate bspw. die Anzahl der Tage.⁷⁹ Eine Zeitreihe y_t wird, wenn Konjunktur- und Saisonkomponente zusammengefasst werden, definiert als: $y_t = g_t + s_t + u_t$. Dabei handelt es sich um ein *additives Modell*, welches annimmt, dass sich die einzelnen Komponenten nicht verstärken.⁸⁰ Durch die Methode der kleinsten Quadrate oder des gleitenden Durchschnitts kann die Trendkomponente errechnet werden. Bei der Methode der kleinsten Quadrate werden der Ordinatenabschnitt a und das Steigungsmaß b für die Trendfunktion $m_t = a + b \cdot t$ berechnet. Die Methode des gleitenden Durchschnitts bildet eine Folge von Mittelwerten. Dazu wird ein Stützbereich definiert und der mittlere Wert durch den Mittelwert ersetzt. Durch eine Rekursion wird der gleitende Durchschnitt errechnet. Darauf aufbauend werden die Konjunktur-, Saison- und Restkomponente berechnet. Dies ist für die Diagnose wichtig, um ein erklärendes Modell zu erstellen. Mithilfe einer Fortschreibung kann auch mit diesem Modell eine Prognose getroffen werden.⁸¹

Für dieses Fallbeispiel wird mithilfe der *exponentiellen Glättung erster Ordnung*⁸² eine Prognose getroffen. Dabei wird angenommen, dass einzelne Werte einer Zeitreihe um einen Wert streuen. Zufällige Abweichungen werden ausgeglichen und nicht näher betrachtet. Der Prognosewert \hat{y}_{t+1} wird dabei rekursiv mithilfe des vorangegangenen Prognosewertes \hat{y}_t und des Beobachtungswertes y_t gebildet. Die Rekursionsformel lautet:

$$\hat{y}_{t+1} = (1 - \alpha) \cdot \hat{y}_t + \alpha \cdot y_t, 0 < \alpha < 1.$$

Der Faktor α dient dazu, die Gewichtung der einzelnen Prognosewerte anzugeben. Je kleiner dieser Wert ist, desto mehr Bedeutung erhalten weiter zurückliegende Zeitreihenwerte. Einmalige Ausreißer werden nicht stark berücksichtigt, jedoch wird sich einem einsetzenden Trend schwächer angenähert. Anders verhält es sich, wenn der Gewichtungsfaktor gegen 1 strebt. Neuere Zeitreihenwerte erhalten eine größere Bedeutung. An einen Trend wird sich schneller angepasst und Ausreißer fließen stärker

⁷⁹Vgl. Kosfeld, R. et al. (2016) S. 282 - 284.

⁸⁰Vgl. Kosfeld, R. et al. (2016) S. 284.

⁸¹Vgl. Kosfeld, R. et al. (2016) S. 286 - 306.

⁸²Die *exponentielle Glättung zweiter Ordnung* wird nicht näher erläutert.

in das Modell ein.⁸³ Im weiteren Verlauf wird eine Möglichkeit angegeben, um einen idealen Gewichtungsfaktor zu wählen. In der Literatur wird ein Faktor zwischen 0,1 und 0,3 empfohlen, da den vergangenen Werten noch genügend Gewicht zugesprochen wird.⁸⁴ Um den Prognosewert \hat{y}_1 für die erste Berechnung zu erhalten, genügt es, wenn y_0 ein Wert in der Nähe der Zahlenwertreihe zugewiesen wird. Dieser wird durch die Fortschreibung vernachlässigt. Jeder Wert der Zeitreihe erhält auf diese Weise einen Prognosewert. Werden diese für den Betrachtungszeitraum analysiert, wird dies *ex post-Prognose* genannt. Wird ein Prognosewert nach dem Beobachtungszeitraum gebildet, wird dies *ex ante-Prognose* genannt.⁸⁵ Die *ex ante-Prognose* ist für diese Anwendung von Interesse. Die Prognosewerte lassen sich immer weiter fortschreiben, jedoch verlieren sie immer mehr ihre Validität. Daher empfiehlt es sich zwei folgende Zeitreihenwerte zu prognostizieren. Die Formel der exponentiellen Glättung lässt sich durch die Fehlerkorrekturformel verbessern. Diese lautet:

$$\hat{y}_{t+1} = \hat{y}_t + \alpha \cdot e_t$$

e_t wird errechnet, indem der Prognosewert von dem Beobachtungswert subtrahiert wird ($e_t = y_t - \hat{y}_t$). Falls der alte Prognosewert unter oder über dem Beobachtungswert liegt, wird dieser in die entsprechende Richtung angepasst. Dadurch wird die Prognose selbstständig korrigiert.⁸⁶ Die Wahl eines geeigneten Gewichtungsfaktors α kann die Prognosefähigkeit verbessern. Als Kennziffer für den Vergleich von Gewichtungsfaktoren eignet sich die Formel der mittleren quadratischen Fehler (mean squared error (MSE))⁸⁷:

$$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2.$$

Mit dieser Kennziffer lassen sich die Ergebnisse von unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren vergleichen. Je niedriger die Kennziffer ist, desto besser ist die Voraussagefähigkeit.

Zusammenfassend sind die Schritte für eine exponentielle Glättung erster Ordnung in folgender Reihenfolge durchzuführen:

1. Beobachtungswerte bestimmen,
2. Prognosewerte mithilfe der Rekursionsformel bilden,
3. Fehlerkorrekturformel anwenden und
4. Gewichtungsfaktor mithilfe des MSEs verbessern.

Die Anwendung der exponentiellen Glättung wird im nächsten Unterkapitel auf dieses Fallbeispiel übertragen.

⁸³Vgl. Pinnekamp, H.-J./ Siegmann, F. (2001) S. 182.

⁸⁴Vgl. Kosfeld, R. et al. (2016) S. 311.

⁸⁵Vgl. Kosfeld, R. et al. (2016) S. 308.

⁸⁶Vgl. Kosfeld, R. et al. (2016) S. 309 - 310.

⁸⁷Vgl. Kosfeld, R. et al. (2016) S. 311.

3.2.2 Müllentleerungsprognosen

Mithilfe der exponentiellen Glättung erster Ordnung sollen für dieses Anwendungsbeispiel Prognosen getroffen werden. Die Vorgehensweise wird auf städtische Müllcontainer übertragen. Weil keine Echtzeiten zu diesem Thema vorliegen, wird mithilfe der Programmiersprache *R* ein Programm geschrieben, dass Daten simuliert.⁸⁸ Der Beobachtungszeitraum ist eine Woche und es werden Einwürfe für zehn Müllcontainer simuliert. Der Füllstand wird jeweils für die Zeiten 0:00, 6:00, 12:00 und 18:00 Uhr angegeben.⁸⁹ Diese Uhrzeiten wurden gewählt, da lediglich maximal zwei nachfolgende Beobachtungszeiträume prognostiziert werden können und somit eine Prognose für 12 Stunden gezogen werden kann. Dies wird erneut erweitert, indem jeder Tag zwei kumulierte Füllstände (6:00 und 18:00) enthält. Mithilfe von LoRaWAN sind zwar Zeitangaben im Minutentakt möglich, dies würde bei einer Prognose jedoch keinen Mehrwert liefern. Durch eine nähere Bestimmung der Frequentierung können Füllstände simuliert werden, die zwischen einer niedrigen und hohen Nutzung variieren. Beispielhaft wird die exponentielle Glättung erster Ordnung an einem niedrig frequentierten Müllcontainer erläutert. Die Prognosetabelle ist in Tabelle 2 abgebildet. Der Gewichtungsfaktor beträgt 0,2. Werden die Prognosewerte für "Mo2, 6:00" und "Mo2, 18:00"

Tabelle 2: Prognosetabelle für einen niedrig frequentierten Müllcontainer

Tag/Zeit	y_t	\hat{y}_t	$y_t - \hat{y}_t$	$\hat{y}_t + \alpha \cdot e_t$
Mo 6:00	7	7	0	7
Mo 18:00	30	7	23	11,6
Di 6:00	8	11,6	-3,6	10,88
Di 18:00	29	10,88	18,12	14,504
Mi 6:00	5	14,504	-9,504	12,6032
Mi 18:00	29	12,6032	16,3968	15,88256
Do 6:00	7	15,88256	-8,88256	14,106048
Do 18:00	25	14,106048	10,893952	16,2848384
Fr 6:00	7	16,2848384	-9,2848384	14,42787072
Fr 18:00	38	14,42787072	23,57212928	19,14229658
Sa 6:00	5	19,14229658	-14,14229658	16,31383726
Sa 18:00	44	16,31383726	27,68616274	21,85106981
So 6:00	6	21,85106981	-15,85106981	18,68085585
So 18:00	40	18,68085585	21,31914415	22,94468468

fortgeführt, ergeben diese: "Mo2, 6:00" = $(1 - 0,2) \cdot 22,94 + 0,2 \cdot 40 = 26,35$ und "Mo2, 18:00" = $(1 - 0,2) \cdot 26,35 + 0,2 \cdot 26,35 = 26,35$. Da keine Beobachtungswerte für y_t vorliegen, muss auf den gebildeten korrigierten Prognosewert $\hat{y}_t + \alpha \cdot e_t$ zurückgegriffen werden. Es wird damit gerechnet, dass der Füllstand sich bei beiden Zeiten um 26,35 Prozentpunkte erhöhen wird. Nach derselben Vorgehensweise wurden für einen mittleren und stark frequentierten Müllcontainer die Prognosetabellen erstellt.⁹⁰ Zur Veranschaulichung sind in der Abbildung 12 die Beobachtungs- und Prognosewerte

⁸⁸Der Quellcode ist im Anhang A3 beigelegt.

⁸⁹Die einzelnen Füllstände sind im Anhang A3 hinterlegt.

⁹⁰Diese befinden sich im Anhang A3.

eines Mülleimers in einer schwach besuchten Gegend als Kurven in ein Koordinatensystem eingezeichnet. Es ist erkennbar, dass die Einwürfe abends sinken und morgens

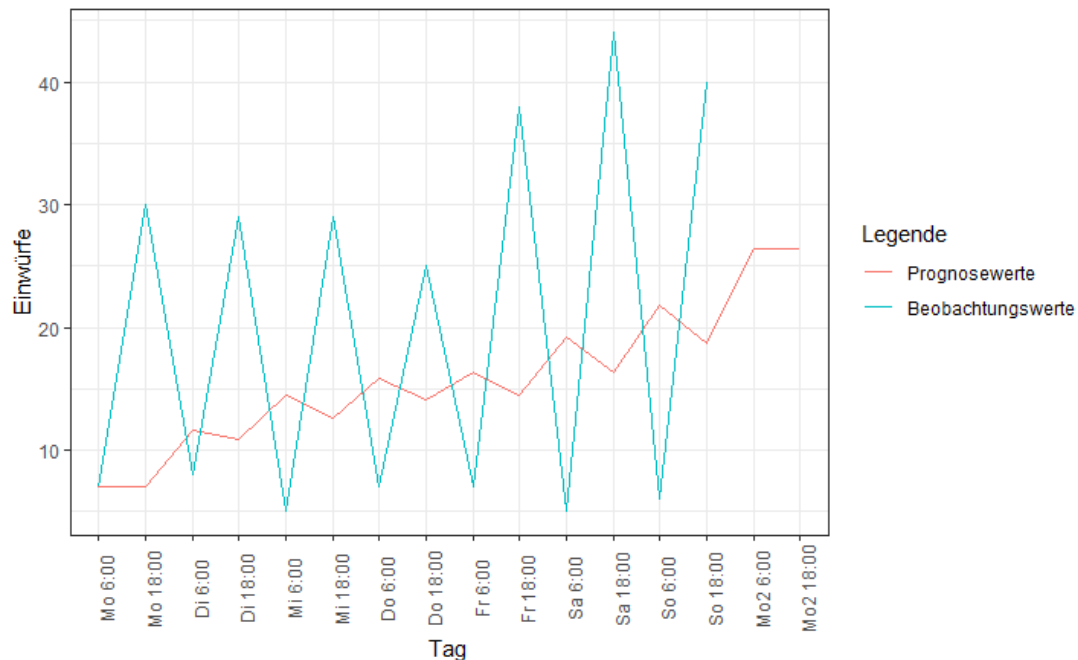


Abbildung 12: Prognose- und Beobachtungswerte eines niedrig frequentierten Mülleimers

steigen. Weil für den folgenden Montag noch keine Beobachtungen vorliegen, kann nur ein Prognosewert abgelesen werden. Wird die Annahme getroffen, dass der folgende Montag ähnliche Einwürfe wie der vorherige hat, kann es sein, dass die Prognose für 18:00 Uhr stimmen wird, die für 6:00 Uhr nicht. Jedoch sind Daten simuliert und daher nicht validiert, da diese nur als Visualisierung einer konkreten Anwendung genutzt werden. Ähnlich verhält es sich mit den Prognosen für einen mäßig oder stark frequentierten Mülleimer.⁹¹ Sollten diese unter realen Einflüssen ähnliche Ergebnisse liefern, könnte in Betracht gezogen werden, diese Form der Prognose zum anteiligen Bestimmen eines zukünftigen Füllstandes zu nutzen.

Für genauere Prognosen sollten Beobachtung von mindestens einem Jahr vorliegen. Da Wochentage im jährlichen Verlauf durch viele Faktoren beeinflusst werden ist davon auszugehen, dass sich die Vergleichbarkeit der Wochentage in jeder fortschreitenden Woche verschlechtert. Diese sind vergleichbar mit den Kategorien der Saisonkomponente. Durch natürliche Faktoren wie Sonnenauf- und untergang, könnte die Frequentierung z. B. am Wochenende beeinflusst werden, je nachdem wie lange die Sonne scheint. Ähnlich verhält es sich mit den Jahreszeiten. Je nach Standort spielen außerdem institutionelle Faktoren eine Rolle. Es müssten Ferien oder Feiertage berücksichtigt werden, die dafür sorgen, dass die Frequentierung zu- oder abnimmt. Mülleimer in der Nähe von Schulen würden in den Ferien weniger stark genutzt, als bspw. ein Mülleimer im Park. Mögliche Veranstaltungen in der Nähe könnten zu einer Zunah-

⁹¹Diese können im Anhang A3 nachgeschlagen werden.

me führen, weswegen auch gleichzeitig die Geokoordinaten solcher Standorte wichtig sind. Abgesehen von den genannten Kategorien kommt auch hinzu, dass das Wetter als Variable berücksichtigt werden müsste. Bei wolkenfreiem Wetter sind die Leute möglicherweise eher dazu geneigt nach draußen zu gehen als z. B. bei Regen. Bei langfristigen Beobachtungen müssten zwei ähnliche Wochentage verglichen werden. Dazu sollten die jeweiligen Wochentage der Kalenderwoche von aufeinanderfolgenden Jahren miteinander verglichen werden. Dies würde zumindest sicherstellen, dass eine gewisse Vergleichbarkeit besteht.

Prognosen müssen sich nicht bewahrheiten. Sie dienen dazu, dass Situationen besser eingeschätzt werden können, wenn keine weiteren Informationen vorhanden sind. Für einen Zustand, der durch viele Faktoren bestimmt wird, eignet sich eher ein ökonometrisches Modell.⁹² Dennoch müsste in einem Feldexperiment geprüft werden, ob das Verfahren für die Bestimmung von späteren Füllständen geeignet ist oder nicht. Alternativ könnten andere Verfahren, wie bspw. *neuronale Netze*, programmiert und getestet werden. Falls das Verfahren für städtische Abfalleimer nicht geeignet ist, könnte geprüft werden dieses auf größere Container wie Papier oder Altglas zu übertragen.

In diesem Abschnitt wurden die zwei grundlegenden Schritte für die Entwicklung einer möglichen Müllentleerungsstrategie vorgestellt. Mit der optimalen Routenfindung sollen die Leerungen effektiver gestaltet und durch Predictive Analytics Füllstände prognostiziert werden. Im folgenden Kapitel wird diskutiert, inwiefern dieses Vorgehen in der Stadt Gelsenkirchen umgesetzt werden kann.

⁹²Vgl. Pinnekamp, H.-J./ Siegmann, F. (2001) S. 229 - 230.

4 Anwendungsbeispiel der Stadt Gelsenkirchen

Die benötigte Technologie und die Vorgehensweise der Algorithmen wurde in den vorherigen Kapiteln beschrieben. Diese werden auf das Anwendungsbeispiel übertragen. Im folgenden Kapitel werden die Stadt Gelsenkirchen und potenziell involvierte Stakeholder vorgestellt. Es wird erörtert welche zusätzlichen Leistungen benötigt werden, um die Müllentleerungsstrategie umzusetzen.

4.1 Die Stadt Gelsenkirchen

Die Stadt Gelsenkirchen wird in 18 Stadtteile unterteilt in denen zusammen ca. 265.000 Einwohner (Stand 2020) leben.⁹³ Für die städtische Abfallentsorgung ist die eigenbetriebsähnliche Einrichtung *Gelsendienste* zuständig. Deren Betriebsausschuss gehören durch Mitglieder des Stadtrates gewählte Personen und Mitglieder des Personalrats der Stadt Gelsenkirchen an. Die Betriebsleitung wird durch den Rat der Stadt bestellt und abberufen.⁹⁴ Daraus kann geschlussfolgert werden, dass es sich bei Gelsendienste um ein städtisches Unternehmen handelt. Für die städtische Informationsinfrastruktur ist die *GELSEN-NET Kommunikationsgesellschaft mbH* zuständig. Unter anderem treiben sie den Glasfaserausbau im gesamten Stadtgebiet voran.⁹⁵ Als Tochterunternehmen der *Stadtwerke Gelsenkirchen*, welche sich zu 100 % im Besitz der Stadt Gelsenkirchen befinden, kann auch dieses Unternehmen vorwiegend als städtisch bezeichnet werden.⁹⁶

Die Stadt Gelsenkirchen hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Digitalisierung innerhalb der Kommune und Region voranzutreiben. Dies geschieht unter der Dachmarke *Vernetzte Stadt*. In 2017 wurde auf der operativen Ebene die Stabsstelle Vernetzte Stadt als Dienststelle der Stadt aufgestellt.⁹⁷ Dabei wurde die Stadt Gelsenkirchen bereits in diversen Bereichen wie bspw. Zukunftsstadt 2030+ (2018), Fellow City der Digital City Challenge (2019) und als digitale Modellkommune des Landes Nordrhein-Westfalen (2019) ausgezeichnet.⁹⁸ Im Jahr 2020 wurde eine Digitalstrategie veröffentlicht, in der detailliert beschrieben wird, wie die Digitalisierung umgesetzt werden soll. Dafür wurde das Ziel definiert, dass die Stadt im Jahr 2030 eine gemeinsam gestaltete, nachhaltige Stadt der kurzen Wege wird. Außerdem soll Gelsenkirchen Vorreiter der Digitalisierung und ein starker Wirtschaftsstandort werden.⁹⁹ Hieran werden die Ähnlichkeiten zu den Charakteristika einer Smart City deutlich.¹⁰⁰ Die Vision soll durch

⁹³Vgl. Stadt Gelsenkirchen(2020b).

⁹⁴Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2015).

⁹⁵Vgl. GELSEN-NET (2020).

⁹⁶Vgl. Stadtwerke Gelsenkirchen (2020).

⁹⁷Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020c) S. 7.

⁹⁸Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020c) S. 8.

⁹⁹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020c) S. 11.

¹⁰⁰Vgl. Kapitel 2.1.

fünf Leitthemen erreicht werden¹⁰¹:

- Digitale und bürgerorientierte Verwaltung,
- Energie und Umwelt,
- Lebensqualität und Teilhabe,
- Smarte und nachhaltige Mobilität und
- Smarte Wirtschaft.

Jedes Leitthema wird dabei in weitere Handlungsfelder und in darauf basierende Maßnahmen unterteilt. Das Leitthema *Energie und Umwelt* beinhaltet als Handlungsfeld das *Abfallmanagement* und als konkrete Maßnahme ein *intelligentes Abfallmanagement (Smart Waste)*. Diese Maßnahme sieht vor, dass Sensoren für unterschiedliche Müllbehältertypen verbaut werden, um so eine Füllstandskontrolle zu ermöglichen. Die Ausführung ist für das Jahr 2021 geplant.¹⁰² Es wird jedoch nur die reine Kontrolle und nicht die mögliche Weiterverarbeitung der Daten angesprochen. Damit lässt sich die in dieser Arbeit thematisierte Müllentleerungsstrategie konkret in die Digitalstrategie der Stadt Gelsenkirchen einordnen. Die automatische Routenbestimmung zu gefüllten Behältern in Kombination mit der Voraussage der Füllstände können als Erweiterung der Maßnahme betrachtet und ergänzt werden. Weswegen im Folgenden nicht mehr von der Müllentleerungsstrategie, sondern von einer konkreten Müllentleerungsmaßnahme gesprochen wird. Für die Umsetzung eines LoRaWAN-Netzwerks ist im Handlungsfeld *Technische Infrastruktur* des Leitthemas *Digitale und Bürgerorientierte Verwaltung* eine konkrete Maßnahme vorgesehen. Bis Ende 2020 soll eine flächendeckende Funknetzinfrastruktur im gesamten Stadtgebiet umgesetzt werden.¹⁰³ An dieses Funknetz müssten die vorgesehenen Sensoren der Müllbehälter angeschlossen werden. Bei erfolgreicher Umsetzung wäre eine entsprechende Infrastruktur gegeben.

Für die Realisierung dieser konkreten Maßnahme muss im Vorfeld geprüft werden, wie das städtische Entsorgungssystem aufgebaut ist. Über das gesamte Stadtgebiet sind ca. 1.000 Papierkörbe verteilt. Davon sind 400 Behälter im Innenstadtbereich, die bis zu viermal täglich geleert werden müssen. Mülleimer in stark frequentierten Bereichen werden bis zu drei- und an weniger stark frequentierten Bereichen einmal, wöchentlich entleert.¹⁰⁴ Dabei fallen die Leerungen unter die Handreinigung, welche innerhalb der Straßenreinigung erfasst wird. Im Jahr 2019 wurden ca. 5.673 t Müll in diesem Bereich entsorgt.¹⁰⁵ Es wird nicht näher unterschieden, welche Mengen in der Straßenreinigung und Handreinigung anfallen. Auf die genannten Papierkörbe soll die zuvor definierte Maßnahme angewendet werden.

¹⁰¹ Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020c) S. 12 - 14.

¹⁰² Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020c) S. 33.

¹⁰³ Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020c) S. 37.

¹⁰⁴ Vgl. Gelsendienste (2020).

¹⁰⁵ Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020a) S. 3.

Es wurde vorgestellt, welche Technologien in Gelsenkirchen geplant und als Grundlage nötig sind. Eine mögliche Umsetzung wird im nächsten Unterkapitel vorgestellt.

4.2 Umsetzung der Technologie

Für eine Umsetzung müsste im Vorfeld geklärt werden, welche Stakeholder zu beteiligen sind. Weil die Durchführung der Maßnahme nicht zur täglichen Routine der einzelnen Stellen gehört, wird geprüft, ob es sich hierbei um ein Projekt handelt. Ein Projekt wird als neuartige und komplexe Aufgabe definiert, die die Beteiligung mehrerer Stellen erfordert und dabei zeitlich begrenzt ist.¹⁰⁶ Die Umsetzung erfordert die Partizipation mehrerer Stellen, welche unter diesen Umständen als neuartig bezeichnet werden kann. Bei einem vorhandenem LoRaWAN-Netzwerk erfordert die Maßnahme, die Verbauung von Sensoren und die Aufbereitung der Daten. Dies ist eine komplexe Aufgabe. Zwar fallen im Anschluss an die Umsetzung Tätigkeiten wie z. B. Wartung oder Überwachung an, jedoch ist die reine Umsetzung zeitlich begrenzt. Daher kann die Maßnahme als Projekt definiert werden. Aus diesem Grund müssten jeweils Vertreter der GELSEN-NET, der Gelsendienste und der Stadt Gelsenkirchen zusammenkommen und das Projekt planen. Die GELSEN-NET wäre zuständig für die Bereitstellung der technischen Infrastruktur und müsste in Zusammenarbeit mit den Gelsendiensten die Sensoren verbauen und anschließen. Die Stabsstelle Vernetzte Stadt würde stellvertretend für die Stadt als Auftraggeber und Projektleitung agieren. Im Vorfeld muss das Projektziel genau definiert werden. Daraus lassen sich wiederum Meilensteine ableiten, die für eine Feinplanung benötigt werden.¹⁰⁷ Das Ziel ist die Vernetzung sämtlicher Mülleimer im städtischen Bereich mit anschließender automatisierter Verarbeitung der Daten und Handlungsempfehlungen. Diese könnten unter anderem effiziente Routenplanungen der Müllentleerung darstellen. Ein Meilenstein könnte z. B. die Programmierung eines Prototypen sein, der automatisiert eine abzufahrende Route planen würde. Daraus ableitend müssen unter Abstimmung aller Beteiligten die Messgrößen zur Bewertung des Erfolgs, der Aufwand der Umsetzung, eventuelle Risiken und der Nutzen definiert werden.¹⁰⁸ Der Aufwand setzt sich aus den Kosten der Programmierung, der Verbauung der Sensoren, der Überwachung, der restlichen Personalkosten und übrige einmalige und laufende Kosten zusammen. Die kompletten Kosten für den Aufbau der LoRaWAN-Infrastruktur sollten nicht beachtet werden, da der Ausbau eine Investition darstellen würde, mit der auch andere Projekte realisiert werden könnten. Hier sollte berücksichtigt werden Bereitstellungskosten hinzuzuziehen. Der Nutzen wäre eine optimale Routenplanung, mit der die Müllentleerungskosten der städtischen Betriebe gesenkt, bzw. der Entleerungsprozess optimiert

¹⁰⁶Vgl. Kraus, G./ Westermann, R. (2010) S. 12.

¹⁰⁷Vgl. Kraus, G./ Westermann, R. (2010) S. 22.

¹⁰⁸Vgl. Kraus, G./ Westermann, R. (2010) S. 47 - 49.

werden könnte. Außerdem könnte so dem Problem der überfüllten Mülleimer entgegen gewirkt werden, da ohne persönliche Kontrolle geprüft werden kann, wie der aktuelle Füllstand ist. Eventuelle Risiken müssten von allen Beteiligten in Betracht gezogen werden und es sollten speziell Risiken, die das Personal betreffen frühzeitig behandelt werden. Das könnten unter anderem die Umsetzung der Routen oder die Akzeptanz der neuen Vorgehensweise sein. Generell muss untersucht werden inwieweit das Personal, das sich mit der Reinigung befasst, in den Prozess eingebunden werden kann. Oft verfügen sie über Wissen, welches in der Konzeptionsphase von großer Bedeutung sein kann. Allgemein können sie als Experten bezeichnet werden. Mithilfe von Expertenbefragungen können potenzielle Risiken identifiziert werden.¹⁰⁹ Experten können ebenfalls weitere Erfahrungswerte einbringen, die für das Projekt nützlich sein können. Eventuelle Messgrößen müssten durch die Beteiligten bestimmt werden. Im Bezug auf dieses Projekt können es bereits vernetzte Mülleimer oder Zeitersparnis der Reinigungskräfte sein. Die Vernetzung sämtlicher Mülleimer im städtischen Bereich würde ein Teilprojekt des gesamten Projekts darstellen. Hinzukommt die Programmierung einer Applikation, mit der die Routenplanung kommuniziert werden kann. Dafür muss im Vorfeld bekannt sein, wie eine Tour kommuniziert wird und welche Kommunikationsmittel den Mitarbeitern zur Verfügung stehen. Im Idealfall hätte jede Reinigungskraft ein Diensthandy, mit dem dynamische Routen empfangen würden. Die Alternative wäre eine vorher festgelegte Tour. Damit die Routenplanung dynamischer wird, sollte auf eine Smartphone-App zurückgegriffen werden. Diese müsste zusätzlich zu der Verbauung der Sensoren programmiert werden und stellt ebenfalls ein Teilprojekt dar. Die Programmierung orientiert sich dabei an dem Basismodell für Softwareentwicklung. In diesem werden fünf Phasen durchlaufen¹¹⁰:

Phase 0: Auftragsklärung

Phase 1: Konzeption

Phase 2: Design

Phase 3: Realisierung

Phase 4: Einführung

Die Hauptphasen einer Programmierung beginnen mit Phase 1. Die Auftragsklärung wird im folgenden Prozess nur selten geändert, weswegen hier von Phase 0 gesprochen wird.¹¹¹ Während der Auftragsklärung muss vor allem geprüft werden, ob die Software letztlich wirtschaftlich ist und sich lohnt. Dies kann in diesem Fall bspw. dann gegeben sein, wenn die Mitarbeiter sich nicht mehr aktiv um die Routenplanung kümmern müssen und lediglich die App nutzen können. Zum anderen muss die Machbarkeit geprüft werden und ob die benötigten Ressourcen zur Verfügung stehen.¹¹² Da sich keiner der

¹⁰⁹Vgl. Zimmermann, J. et al. (2006) S. 24.

¹¹⁰Vgl. Brandt-Pook, H. /Kollmeier, R. (2008) S. 6.

¹¹¹Vgl. Brandt-Pook, H. /Kollmeier, R. (2008) S. 7.

¹¹²Vgl. Brandt-Pook, H. /Kollmeier, R. (2008) S. 10.

Projektpartner aktiv mit der Programmierung einer App auseinandersetzt, müsste hier der Auftrag an ein externes Unternehmen übergeben werden. Die konkrete Idee für die App sieht vor, dass durch eine Standortangabe und die Auswahl eines Gebiets, die optimale Route zur Entleerung der darin befindlichen Mülleimer ausgegeben wird. Hierbei würden durch das Verfahren zur Prognoseermittlung auch die Mülleimer berücksichtigt werden, die zum Zeitpunkt der Leerung keinen kritischen Stand erreicht haben, bei denen jedoch geschätzt wird, dass diese in naher Zukunft einen erreichen werden. Diese Anforderungen müssen in der Phase der Konzeption berücksichtigt werden und bilden den Leistungsumfang. Weitere Themen in der Konzeption sind Lösungsalternativen, ein Lasten- und Pflichtheft und eine Nutzwertanalyse. Im Lastenheft sind die funktionalen Anforderungen des Auftraggebers dargestellt und dem gegenüber steht das Pflichtenheft. Darin enthalten sind die funktionalen Anforderungen des Auftragnehmers, zu deren Ausführung er sich verpflichtet. Die Nutzwertanalyse gewichtet alternative Lösungen und sorgt dafür, dass diese miteinander vergleichbar werden. Außerdem muss geklärt sein, welche Daten zur Verfügung stehen (Datenhaushalt) und wie groß die zu verarbeitenden Datensätze sind (Kennzahlen).¹¹³ In der Phase des Designs muss erörtert werden, wie die Architekturen der Software und Hardware miteinander verbunden sind, wie einzelne Komponenten der Softwarearchitektur agieren und wie diese mithilfe der Programmierung in das Anwendungssystem integriert werden kann. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 13 eine mögliche Softwarearchitektur für die Endanwendung einer dynamischen Routenplanung dargestellt.

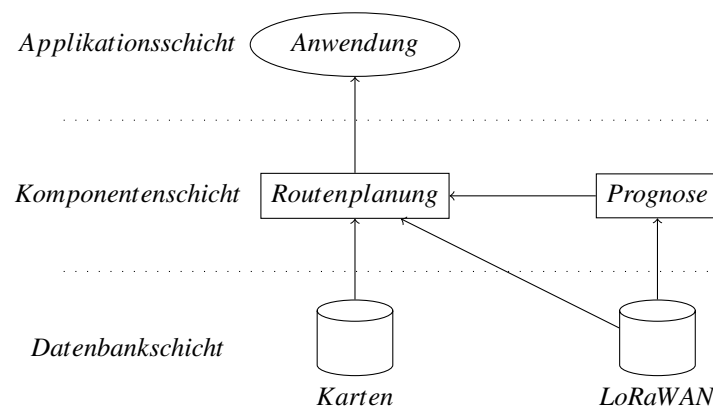


Abbildung 13: Softwarearchitektur der Anwendungs-App

In diesem Fall ist die Softwarearchitektur in drei Schichten eingeteilt. Es gibt die Datenbankschicht, die Komponentenschicht und die Applikationsschicht. In der Datenbankschicht sind zwei Datenbanken abgebildet. In der Datenbank *Karten* sind alle Straßen, Straßenkreuzungen und Mülleimer enthalten, die für die Bildung eines Graphen notwendig sind. In der *LoRaWAN* Datenbank sind die aktuellen und historischen Füllstände der Mülleimer hinterlegt. Diese Daten basieren auf den Messdaten, die mit

¹¹³Vgl. Brandt-Pook, H. /Kollmeier, R. (2008) S. 12-15.

der Nutzung des LoRaWAN-Netzwerkes gesammelt werden. In der Komponente *Routenplanung* findet die Berechnung der Routenplanung statt. Hier werden die Standorte aus der Datenbank *Karten* und die Füllstände aus der Datenbank *LoRaWAN* für die optimale Route verwendet. Die Komponente *Prognose* berechnet mithilfe von Prognoseverfahren zukünftige Füllstände, die in die Komponente *Routenplanung* einfließen. In der Applikationsschicht befindet sich die Endanwendung. Diese erhält die von der Komponente Routenplanung aufbereiteten Daten und dient der Darstellung für den Endanwender. Die Komponentenschicht sollte sich nicht auf dem Anwendungssystem befinden, damit die Rechenleistung nicht durch die Ressourcen des Smartphones begrenzt wird. Die Applikationsschicht sollte keine Berechnungen durchführen, sondern lediglich der reinen Darstellung dienen. Die Verbindung zwischen Komponentenschicht und Datenbankschicht kann über Ethernet erfolgen, wohingegen der Austausch der Komponente und Applikation über Mobilfunk stattfinden sollte. Die Phase 3 beinhaltet die eigentliche Programmierung und basiert auf den Erarbeitungen der vorherigen Phasen.

Falls es unerwartete Schwierigkeiten bei der Realisierung geben sollte, kann auch zu der vorherigen Phase *Design* zurückgekehrt werden. Falls das Design nicht stimmig ist, könnte erneut die Phase *Konzeption* eingeleitet und überarbeitet werden. Die letzte Phase beinhaltet das fertige Produkt. Wenn alle Komponenten ausreichend getestet wurden, wird die Software in den Echtbetrieb überführt. Dies schließt auch die Schulung der Anwender und die Wartung des Systems mit ein.¹¹⁴ Es ist wichtig, dass parallel zu den einzelnen Phasen Tests stattfinden. Ziel hierbei ist, dass Fehler früh genug erkannt und behandelt werden können. Früh gefundene Fehler können so rechtzeitig behoben werden und es besteht nicht die Gefahr, dass diese unnötige Kosten im weiteren Verlauf verursachen.¹¹⁵

Die Softwareentwicklung muss nicht anhand des Basismodells erstellt werden. Es soll nur ein möglicher Ablauf veranschaulicht werden. So gibt es noch weitere Modelle der Entwicklung. Eins ist das *Wasserfallmodell*, in dem die Ergebnisse der vorherigen Phase in die nächste einfließen. Ein weiteres Beispiel wäre das *V-Modell*. Dabei werden zwei Seiten definiert. Auf der einen Seite steht die Konzeption. Hierbei wird zuerst die Anforderung festgelegt, woraus ein Grobentwurf entwickelt wird, der in einen Feinentwurf einfließt. Die letzte vorläufige Phase der Konzeptionsseite ist die Modulimplementation. Auf diese Phase folgen die einzelnen Testphasen. Darin werden die erstellten Module, anschließend die Integration untereinander und schließlich die Systemintegration geprüft. Wenn alle Tests erfolgreich sind, wird das Produkt abgenommen. Dies sind die Phasen der Integrationsseite.¹¹⁶ Welches Modell zur Ent-

¹¹⁴Vgl. Brandt-Pook, H. /Kollmeier, R. (2008) S. 19.

¹¹⁵Vgl. Brandt-Pook, H. /Kollmeier, R. (2008) S. 23.

¹¹⁶Vgl. Brandt-Pook, H. /Kollmeier, R. (2008) S. 29-31.

wicklung gewählt wird, sollte mit den zuständigen Entwicklern abgesprochen werden. Alle Modelle weisen untereinander Ähnlichkeiten in der Vorgehensweise auf. Auf die Ausgangsidee folgt eine Konzeption, welche ausgestaltet werden muss. Diese Ausgestaltung muss programmiert und getestet werden. Bei Zufriedenheit wird das Produkt abgenommen und in den Betrieb genommen.

Sobald die Programmierung der App stattgefunden hat, muss das System unter realen Bedingungen getestet werden. Dafür eignet sich das in Gelsenkirchen geplante *Open Innovation Lab (OIL)*. Auf der Fläche des Arena Parks in Gelsenkirchen soll ein Testlabor entstehen, in dem neue Smart City-Technologien erprobt werden sollen.¹¹⁷ Für diesen Anwendungsfall können testweise Mülleimer mit LoRaWAN-Technologie ausgestattet und mit der App verknüpft werden. Sobald die Tests erfolgreich sind, können im gesamten Stadtgebiet Sensoren verbaut werden und anschließend das System in die Nutzung übergehen. Jedoch sollte beachtet werden, dass das System noch nicht optimal ist und noch einige Fehler auftreten, die erst im späteren Verlauf sichtbar werden. Daher muss das komplette System im Anschluss gewartet und aktualisiert werden. Generell muss mit laufenden Kosten für die Instandhaltung gerechnet werden. Wer diese Kosten trägt, sollte ebenso wie der volle Zugriff auf die generierten Daten und Zugänge zu den Komponenten, im Vorfeld geklärt werden. In diesem Fall sollten die Gelsendienste und GELSEN-NET Zugriffe erhalten, da die Daten über die Infrastruktur der GELSEN-NET übertragen werden und die Daten direkt die Gelsendienste betreffen. Sobald die Maßnahme im gesamten Stadtgebiet eingerichtet wurde, die zuständigen Mitarbeiter geschult wurden und sich das System im Echtbetrieb befindet, kann das Projekt als abgeschlossen betrachtet werden. Jede weitere Änderung liegt im Zuständigkeitsbereich der jeweiligen Projektpartner. Im folgenden Unterkapitel wird diskutiert, welche möglichen Erweiterungen an das System anknüpfen können. Es werden mögliche Ideen vorgestellt, jedoch nicht näher erörtert.

4.3 Mögliche Erweiterungen

Damit mögliche Erweiterungen betrachtet werden können, muss analysiert werden, an welcher Stelle des Prozesses Optimierungen vorgenommen werden können. Der Prozess beginnt damit, dass ein Einwohner seinen Müll in einem Mülleimer entsorgt. Der Füllstand erhöht sich mit der Zeit und wird bei Bedarf geleert. Der Müll in Papierkörben ist ein Mischtyp. Oft werden Müllsorten darin entsorgt, die nicht in diesen gehören.¹¹⁸ Den Personen, die ihren Müll darin entsorgen, fehlt ggf. die Information, wie Müll korrekt getrennt wird. Oft gibt es auch keine Möglichkeit den Müll zu trennen, weswegen hier zwei Erweiterungen möglich wären. Zum einen könnten die Straßenmülleimer erweitert werden. Es würden Entsorgungsbehälter platziert, in denen

¹¹⁷Vgl. Gelsenkirchen (2020c) S. 56-57.

¹¹⁸Vgl. Gelsendienste (2020).

spezifischer getrennt werden kann, wie z. B. nach Plastik, Papier und Restmüll. Zum anderen könnte durch die Platzierung von Hinweisschildern auf korrekte Mülltrennung aufmerksam gemacht werden. Alternativ könnte mithilfe der *Smartphone-Bürger-ID* oder der *Gelsenkirchen-App* der Hinweis direkt an die Bürger übermittelt werden. Dabei handelt es sich um Smartphone-Apps die verschiedene Dienste zur Verfügung stellen.¹¹⁹ Dies ähnelt der Maßnahme in Österreich, in der die Haushalte mit der App *Daheim* aufgeklärt werden.¹²⁰ Hier können weitere Formen der Aufklärung im Hinblick auf Nachhaltigkeit betrieben werden, bspw. welche Recyclingmöglichkeiten zur Verfügung stehen oder wie Plastikmüll vermieden werden kann. Anschließend muss geprüft werden, ob solche Maßnahmen zum gewünschten Erfolg führen. Eine andere Erweiterung würde den Füllstand betreffen. Hier können in Anlehnung an das Konzept in Seoul Müllpressen in den Mülleimern verbaut werden.¹²¹ Dadurch könnte das Volumen effizienter ausgelastet und der Inhalt bei Bedarf komprimiert werden. Dies könnte einige Leerungen einsparen. Die letzte Erweiterung könnte eine autonome bzw. teil-autonome Leerung der Behälter vorsehen. In der Digitalstrategie von Gelsenkirchen ist bereits die Einrichtung einer Teststrecke für solche Zwecke geplant.¹²² Konkret könnte ein Müllentleerungsfahrzeug zu den einzelnen Mülleimer fahren und diese autonom leeren. Die andere Möglichkeit könnte ein teil-autonomes System vorsehen, indem ein Fahrer das Fahrzeug lenkt, der Leerungsprozess jedoch autonom durchgeführt wird. Dabei müsste die aktuelle Gesetzeslage zum autonomen Fahren beachtet werden. Damit effiziente Erweiterungen formuliert werden können, muss zunächst die Problemstellung konkret und detailliert definiert werden. Ein falscher Einwurf der Personen kann auf diese Weise nicht gleich behandelt werden wie ein zu geringes Volumen der Mülleimer oder die bedarfsgerechte Entsorgung. Im nächsten Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit kurz zusammengefasst und ein abschließendes Fazit gezogen.

¹¹⁹Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020c) S. 23.

¹²⁰Vgl. Kapitel 2.2.1.

¹²¹Vgl. Kapitel 2.2.1.

¹²²Vgl. Stadt Gelsenkirchen (2020c) S. 33.

5 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Konzeption für eine Müllentleerungsstrategie im Bereich Smart Waste am Beispiel der Stadt Gelsenkirchen vorgenommen. Die Einordnung von Smart Waste in den Smart City-Kontext wurde erörtert und es wurden Beispiele gegeben, welche Konzepte andere Städte bereits umsetzen. Es wurde gezeigt, dass eine konkrete Maßnahme nicht genau einem Handlungsfeld zugewiesen werden kann. Oft können mehrere Handlungsfelder durch eine Maßnahme abgedeckt werden, weswegen die Ziele, die erreicht werden sollen, fokussiert werden müssen. Die für die Umsetzung von Maßnahmen benötigte Technologie wurde anhand von LoRaWAN erklärt. Dabei handelt es sich um eine Grundlagentechnologie auf der weitere Maßnahmen aufbauen. Die Bandbreite an Sensoren bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Messung von physikalischen Größen, wie z. B. Füllvolumen oder Temperatur. Vor dem Aufbau eines LPWAN muss definiert werden, wie und wo die Daten verarbeitet werden. Dazu wurden zwei Netzwerk-Paradigmen vorgestellt. In diesem Anwendungsfall ist es von Vorteil, wenn die Speicherung und Verarbeitung von Daten separat durchgeführt werden. Bei dieser Hybridform von Cloud- und Edge-Computing wird der Server, auf dem die erhobenen Daten gespeichert werden, nicht durch die Durchführung von Algorithmen behindert. Jede Anwendung hat dabei Zugriff auf die benötigten Daten. Durch die erfüllten 5 Vs fällt die Thematik unter Big Data. Vor allem durch die Erhebung in Echtzeit wird die Datenbank konstant erweitert. Hier bietet sich eine relationale Datenbank an, die neue Datenbestände ohne weiteres einpflegen kann.

In dem konkreten Anwendungsfall wurden Möglichkeiten vorgestellt, wie aus den erhobenen Daten ein Mehrwert generiert werden kann. Für eine Routenplanung sind die Messdaten von Interesse, damit eine Tour nur die bereits gefüllten Mülleimer berücksichtigt. Der Floyd-Warshall-Algorithmus bietet in Kombination mit einem Entscheidungsbaum einen Ansatz, um dynamische Routen planen zu können. Um Validität und Reliabilität zu prüfen, sollte eine Pilotstudie durchgeführt werden. In diesem Rahmen kann ebenfalls die Funktionalität verschiedener Algorithmen miteinander verglichen werden. Das hat den Zweck, dass geprüft wird, ob der Algorithmus unter Realbedingungen funktioniert. Ähnlich verhält es sich mit der exponentiellen Glättung. Hier muss auch geprüft werden, ob korrekte Werte widerspiegelt werden und ob ggf. auf ein anderes Verfahren oder eine andere Technik, bspw. neuronale Netze, zurückgegriffen werden muss. Der Vergleich einzelner Verfahren kann, sobald Echtdaten vorliegen, in einer weiterführenden Arbeit analysiert werden.

Die Stadt hat mit ihrer Digitalstrategie bereits einen Überblick über Leitthemen, Handlungsfelder und Maßnahmen gegeben, sodass die entwickelte Strategie als Maßnahme übernommen werden kann. Die Realisierung sollte dabei als Projekt stattfinden, wobei zwei Teilprojekte durchgeführt werden müssen. Zum einen das Verbauen der Sensoren, inklusive Aufbau des Netzwerkes, und zum anderen die Programmierung der App.

Es bleibt jedoch zu klären, ob die gesamten Papierkörbe im städtischen Gebiet mit LoRaWAN vernetzt werden sollten. Den Umständen entsprechend, dass die Papierkörbe im innerstädtischen Bereich bis zu viermal täglich geleert werden müssen, sollte in Betracht gezogen werden, die Maßnahme auf die übrigen Papierkörbe des städtischen Bereichs zu übertragen. Bei diesen kämen solche Sonderfälle nicht in Frage. Die erarbeitete Verfahrensweise der Algorithmen könnte auf andere Entsorgungstypen angewendet werden. Auf ähnliche Weise könnten z. B. Füllstände von Glas- oder Papiercontainern überwacht werden. Dafür sind die im Kapitel 2.2.2 genannten Sensoren basierend auf Ultraschall jedoch nicht geeignet, daher muss eine andere technische Lösung gefunden werden. Welche genau das ist müsste anhand von Experimenten ermittelt werden. Generell muss geprüft werden, ob die gesamte Maßnahme für das Stadtbild und die Pflege förderlich ist. Die Kostenersparnisse durch eine effiziente Routenplanung muss denen der herkömmlichen Routenplanung gegenübergestellt werden. In die Kalkulation sollten ebenfalls Begleitforschungen im Rahmen von z. B. Fokusgruppen eingehen und können in Form von Gruppendiskussionen umgesetzt werden. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei denen eine Kleingruppe über ein bestimmtes Thema diskutiert. Begleitet wird dies durch einen Moderator.¹²³ Auf diese Weise können die Einwohner in den Entscheidungsprozess eingebunden werden. Dabei kann erörtert werden, inwiefern ein eventuell sauberes Stadtbild positiv wahrgenommen wird.

Für die Mülleimer in stark frequentierten Bereichen, wie der Innenstadt oder nahe von Veranstaltungsräumen, könnte geprüft werden, ob sich ein Entsorgungssystem unterhalb der Oberfläche, wie bspw. in Stockholm, rentieren würde. Die täglichen Leerungen würden wegfallen und es bestünde keine Gefahr, dass sich Müll auf dem Boden neben den Papierkörben sammelt. Die auf diese Weise gesparte Arbeitskraft kann z. B. dann in die Straßenreinigung investiert werden. Dies sollte als Lösungsalternative betrachtet werden und in die Konzeptphase des Projekts einfließen.

Die beschriebene Technologie und Verfahrensweise der Algorithmen kann als Grundlage für weitere Projekte genutzt werden. Die Übertragbarkeit auf andere Maßnahmen ist nicht durch Lizenzen oder Ähnliches eingeschränkt. Auch kann die Gewichtung der Graphen nach anderen Kriterien vorgenommen werden. Zum Testen dieser Maßnahme bietet sich das Leuchtturmprojekt OIL an. Generell bildet dieses Reallabor gute Voraussetzungen, um weitere Maßnahmen im Bereich Smart City zu erproben. Eine erfolgreiche Umsetzung würde die Charakteristika einer Smart City¹²⁴ zum Teil erfüllen. Der Aufbau und die Nutzung der Sensoren kann eine ökonomische Leistungsfähigkeit ermöglichen, wenn auf diese Weise Kostenersparnisse realisiert werden. Ein Zugriff der Unternehmen auf das LoRaWAN-Netzwerk kann einerseits die Stadtentwicklung im Bezug auf ebendiesen fördern, andererseits kreative und moderne Industrien er-

¹²³Vgl. Schulz, M. (2012) S. 9.

¹²⁴Vgl. Kapitel 2.1.

möglichen. Wenn ein sauberes Stadtbild von den Einwohnern positiv aufgenommen wird, würden diese auch durch die Technologieintegration profitieren. Eine ökologische Nachhaltigkeit wäre geboten, wenn der Müll dadurch fachgerecht entsorgt und dem Kreislauf erneut zugeführt werden kann. An dieser Stelle muss die Maßnahme ggf. erweitert werden, indem nicht nur eine Beseitigung, sondern auch eine Vorbereitung zur Wiederverwendung stattfindet.¹²⁵ Eine Chancengleichheit für Einwohner im Hinblick auf Nutzung der Technologie ist konkret in dieser Maßnahme nicht vorgesehen. Würde eine Smartphone-App jedoch Bezug auf diese Maßnahme nehmen, in dem Informationen über die App verbreitet werden, muss jeder Einwohner Zugriff auf diese haben, damit dieser Punkt erfüllt wird. Unter den Aspekten bzw. mit einigen Erweiterungen kann die hier dargestellte Maßnahme somit ein erfolgreiches Smart City-Konzept im Bereich Smart Waste darstellen.

Falls das in dieser Arbeit erarbeitete Konzept als unzureichend identifiziert wird, müssen Alternativen entwickelt werden. Allgemein kann die Stadt Gelsenkirchen nach einer erfolgreichen Umsetzung als Vorreiter solcher Technologien agieren und anderen Städten und Kommunen als Experte zur Seite stehen. Bereits jetzt ist die Stadt Gelsenkirchen in viele Projekte im Bereich Smart City involviert und könnte daher als Vorbild für weitere Kommunen neue Technologien einsetzen und erproben. Generell ist die in dieser Arbeit thematisierte Müllentleerungsstrategie nur eine von vielen Maßnahmen, die im Bereich Smart City umgesetzt werden können. Es behandelt den Teilbereich eines von sechs bzw. sieben Handlungsfeldern. In zukünftigen Arbeiten sollten weitere dieser Handlungsfelder fokussiert werden, um bestehende Smart City-Konzepte zu erweitern. Dabei muss jede Strategie auf die jeweilige Kommune abgestimmt werden und auf deren bereits bestehende Infrastruktur aufbauen.

¹²⁵Vgl. Kapitel 2.2.

6 Literaturverzeichnis

- Aigner, M.: Graphentheorie - Eine Einführung aus dem 4-Farben Problem, 2. Aufl. (Springer Spektrum), Stuttgart 2015.
- Brandt-Pook, H./ Kollmeier, R.: Softwareentwicklung kompakt und verständlich - Wie Softwaresysteme entstehen, (Vieweg + Teubner), Wiesbaden 2008.
- Bühler, P./ Schlaich, P./ Sinner, D.: Datenmanagement - Daten, Datenbanken, Datensicherheit, (Springer Vieweg), Berlin 2019.
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.): Stadt- und Gemeindetypen in Deutschland, Online im Internet: *URL* :<<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp.html?nn=2544954>>. (Abruf: 11.08.2020).
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.): Was ist Interreg?, Online im Internet: *URL* :<<https://www.interreg.de/INTERREG2014/DE/Interreg/WasistINTERREG/wasistinterreg-node.html>>. (Abruf: 18.09.2020).
- Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (Hrsg.): Onlinezugangsgesetz, Online im Internet: *URL* :<<https://www.bmi.bund.de/DE/themen/moderne-verwaltung/verwaltungsmodernisierung/onlinezugangsgesetz/onlinezugangsgesetz-artikel.html>>. (Abruf: 17.09.2020).
- Caragliu, A./ Del Bo, C./ Nijkamp, P.: Smart Cities in Europe, in: *Journal of Urban Technology* 18/2 (2011), S. 65–82.
- Chang, C./ Srirama, S. N./ Buyya, R.: Internet of Things (IoT) and New Computing Paradigms, in: Buyya, R./ Srirama, S. (Hrsg.), *Fog and Edge Computing - Principles and Paradigms*, Wiley Series on Parallel and Distributed Computing. (Wiley), Hoboken, New Jersey, USA 2019, S. 3 –23.
- Cormen, T. H./ Leiserson, C. E./ Rivest, R./ Stein, C.: Algorithmen - Eine Einführung, 4. Aufl. (Oldenbourg Verlag), München 2013.
- Domschke, W.: Rundreisen und Touren, 2. Bd., Logistik, 4. Aufl. (R. Oldenbourg Verlag), München, Wien 1997.
- Duales System Holding (Hrsg.): Das A&O des Recyclings ist saubere Mülltrennung, Online im Internet: *URL* :<<https://www.gruener-punkt.de/de/muelltrennung-muell-trennen>>. (Abruf: 23.07.2020).
- Ecube Labs(Hrsg.): Case Study: City of Seoul, Online im Internet: *URL* :<<https://www.ecubelabs.com/references/city-of-seoul/>>. (Abruf: 19.08.2020).

Energie Steiermark (Hrsg.) & Saubermacher AG (Hrsg.): Steirische Pilotprojekte: Mit KI erfolgreich gegen Müllberge und smarter Technologie zu mehr (Energie-)Effizienz, Online im Internet: *URL* :<https://saubermacher.at/content/uploads/Presseinfo_E-STMK_Saubermacher-Ergebnisse_Smart-Village_27.06.2019.pdf>. (Abruf: 19.08.2020).

Envac Group (Hrsg.): Stockholm Royal Seaport, Online im Internet: *URL* :<<https://www.envacgroup.com/casestudies/stockholm-royal-seaport-nds/>>. (Abruf: 23.08.2020).

Envac Group (Hrsg.): The Envac system, behind the scenes, Online im Internet: *URL* :<<https://www.envacgroup.com/the-envac-system-behind-the-scenes/>>. (Abruf: 23.08.2020).

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. 3–17.

GELSEN-NET (Hrsg.): Das GigaBit-Netz der GELSEN-NET, Online im Internet: *URL* :<<https://www.gelsen-net.de/Unternehmen/Unser-Netz-0323475657.html>>. (Abruf: 14.09.2020).

Gelsendienste (Hrsg.): „Wir sind aufnahmebereit!“, Online im Internet: *URL* :<https://www.gelsendienste.de/Strassenreinigung/Unsere_Leistungen/Strassenreinigung/Papierkoerbe.asp>. (Abruf: 14.09.2020).

Giffinger, R./ Fertner, C./ Kramar, H./ Kalasek, R./ Pichler-Milanović, N./ Meijers, E.: Smart cities: Ranking of European medium-sized cities, (Centre of Regional Science, Vienna University of Technology), Wien 2007.

Gluchowski, P.: Business Analytics - Grundlagen, Methoden und Einsatzpotenziale, in: *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* Ausgabe 03/16 (2016), S. 273 –286.

growth with attitude UG (Hrsg.): Was ist LoRaWAN?, Online im Internet: *URL* :<<https://www.lora-wan.de/>>. (Abruf: 25.08.2020).

Grünig, R./ Kühn, R.: Prozess zur Lösung komplexer Entscheidungsprobleme - Ein heuristischer Ansatz, 5. Aufl. (Springer Gabler), Berlin 2017.

Herranz, A., Tomorrow.City (Hrsg.): Success story: Smart litter bins in Seoul, Online im Internet: *URL* :<<https://www.smartcitylab.com/blog/urban-environment/success-story-smart-litter-bins-in-seoul/>>. (Abruf: 19.08.2020).

Horvath, S., Deutscher Bundestag (Hrsg.): Aktueller Begriff - Internet der Dinge, Online im Internet: *URL* :<<https://www.bundestag.de/resource/blob/192512/>>.

cfa9e76cdf - 46f34a941298efa7e85c9 / internet _ der _ dinge - data . pdf>. (Abruf: 24. 08. 2020).

Interreg Europe (Hrsg.): Apeldoorn evaluated its waste management policy, Online im Internet: *URL* :<<https://www.interregeurope.eu/smartwaste/news/news-article/9627/apeldoorn-evaluated-its-waste-management-policy/>>. (Abruf: 18. 09. 2020).

Interreg Europe (Hrsg.): Innovation in Waste Management Policies, Online im Internet: *URL* :<<https://www.interregeurope.eu/smartwaste/>>. (Abruf: 18. 09. 2020).

Interreg Europe (Hrsg.): What is Interreg Europe, Online im Internet: *URL* :<<https://www.interregeurope.eu/about-us/what-is-interreg-europe/>>. (Abruf: 18. 09. 2020).

Jaekel, M.: Smart City wird Realität: Wegweiser für neue Urbanitäten in der Digitalmoderne, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2015.

Jaekel, M./ Bronnert, K.: Die digitale Evolution moderner Großstädte - Apps-basierte innovative Geschäftsmodelle für neue Urbanität, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2013.

Kosfeld, R./ Eckey, H. F./ Türck, M.: Deskriptive Statistik : Grundlagen - Methoden - Beispiele - Aufgaben, 6. Aufl. (Springer Gabler), Wiesbaden 2016.

Kranert, M./ Cord-Landwehr, K. (Hrsg.): Einführung in die Abfallwirtschaft, 4. Aufl. (Vieweg + Teubner Verlag), Wiesbaden 2010.

Kraus, G./ Westermann, R.: Projektmanagement mit System - Organisation, Methoden, Steuerung, 4. Aufl. (Gabler), Wiesbaden 2010.

Linnemann, M./ Sommer, A./ Leufkes, R.: Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft - Praxisbuch zu Technik, Anwendung und regulatorischen Randbedingungen, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2019.

LoRa Alliance (Hrsg.): About LoRa Alliance, Online im Internet: *URL* :<<https://loralliance.org/about-lora-alliance>>. (Abruf: 25. 08. 2020).

Meier, A./ Zimmermann, H.-D.: Digitales Entwicklungsmodell smarterer Städte, in: Meier, A./ Portmann, E. (Hrsg.), *Smart City - Strategie, Governance und Projekte*, (Springer Vieweg), Wiesbaden 2016, S. 3–18.

Pinnekamp, H.-J./ Siegmann, F.: Deskriptive Statistik - mit einer Einführung in das Programm SPSS, 4. Aufl. (R. Oldenbourg Verlag), München, Wien 2001.

Piron, R., Österreichischer Kommunal-Verlag GmbH (Hrsg.): Erste Smart Village-Projekte zeigen Erfolge, Online im Internet: *URL* :<<https://kommunal.at/erste-smart-village-projekte-zeigen-erfolge>>. (Abruf: 19. 08. 2020).

- Roland Berger GmbH (Hrsg.): The Smart City Breakaway - How a small group of leading digital cities is outpacing the rest, 2019.
- Runkler, T. A.: Data Mining - Modelle und Algorithmen intelligenter Datenanalyse, 2. Aufl. (Springer Vieweg), Wiesbaden 2015.
- Saringer-Bory, B./ Mollay, U./ Neugebauer, W./ Pol, O.: SmartCitiesNet - Evaluierung von Forschungsthemen und Ausarbeitung von Handlungsempfehlungen für "Smart Cities", (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie), Wien 2012.
- Schulz, M.: Quick and easy!? Fokusgruppen in der angewandten Sozialwissenschaft, in: Schulz, M./ Mack, B./ Renn, O. (Hrsg.) (Hrsg.), *Fokusgruppen in der empirischen Sozialwissenschaft - Von der Konzeption bis zur Auswertung*, (Springer VS), 2012, S. 9 –22.
- Seoul Solution (Hrsg.): The Statistic of Seoul, Online im Internet: *URL* :<<https://www.seoulsolution.kr/en/content/statistic-seoul>>. (Abruf: 19.08.2020).
- Stadt Darmstadt (Hrsg.): Story: Mobilität, Online im Internet: *URL* :<<https://www.digitalstadt-darmstadt.de/story-mobilitaet/>>. (Abruf: 17.09.2020).
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Betriebssatzung der Stadt Gelsenkirchen für den Betrieb Gelsendienste, (Stadt Gelsenkirchen), Gelsenkirchen 2015.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Feststellung des Jahresabschlusses von GELSENDIENSTE über das Wirtschaftsjahr 2019, (Stadt Gelsenkirchen), Gelsenkirchen 2020.
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Stadtfakten, Online im Internet: *URL* :<<https://www.gelsenkirchen.de/de/Stadtprofil/Stadtfakten/index.aspx>>. (Abruf: 14.09.2020).
- Stadt Gelsenkirchen (Hrsg.): Vernetzte Stadt Gelsenkirchen - Integrierte Strategie der digitalen Stadt Gelsenkirchen, (Stadt Gelsenkirchen), Gelsenkirchen 2020.
- Stadt Stockholm (Hrsg.): Best Practices - Waste Management, Online im Internet: *URL* :<[https://smartcitysweden.com/best-practice/?FocusArea\[\]=26&Layout=default&Page=1](https://smartcitysweden.com/best-practice/?FocusArea[]=26&Layout=default&Page=1)>. (Abruf: 22.08.2020).
- Stadt Stockholm (Hrsg.): Green IT - Green IT strategy for the City of Stockholm, Online im Internet: *URL* :<<https://international.stockholm.se/globalassets/ovriga-bilder-och-filer/green-it-strategy.pdf>>. (Abruf: 20.08.2020).
- Stadt Stockholm (Hrsg.): Underground Waste Management, Online im Internet: *URL* :<<https://smartcitysweden.com/best-practice/8/underground-waste-management/>>. (Abruf: 19.08.2020).

Stadt Wien (Hrsg.): Ohne Auto in Wien, Online im Internet: *URL* :<<https://smartcity.wien.gv.at/site/autofrei-wohnen/>>. (Abruf: 11.08.2020).

Stadtwerke Gelsenkirchen (Hrsg.): Stadtwerke Gelsenkirchen - Portrait, Online im Internet: *URL* :<<https://www.stadtwerke-gelsenkirchen.de/portrait.html>>. (Abruf: 14.09.2020).

Statistics Sweden (Hrsg.): Population in the country, counties and municipalities on 31 December 2019 and Population Change in 2019, Online im Internet: *URL* :<<https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/population/population-composition/population-statistics/pong/tables-and-graphs/yearly-statistics--municipalities-counties-and-the-whole-country/population-in-the-country-counties-and-municipalities-on-31-december-2019-and-population-change-in-2019/>>. (Abruf: 20.08.2020).

Statistik Austria (Hrsg.): Einwohnerzahl und Komponenten der Bevölkerungsentwicklung (Feldkirchen bei Graz), Online im Internet: *URL* :<<https://www.statistik.at/blickgem/pr1/g60608.pdf>>. (Abruf: 20.08.2020).

Statistik Austria (Hrsg.): Einwohnerzahl und Komponenten der Bevölkerungsentwicklung (Riegersburg), Online im Internet: *URL* :<<https://www.statistik.at/blickgem/pr1/g62386.pdf>>. (Abruf: 20.08.2020).

The Things Network (Hrsg.): Classes, Online im Internet: *URL* :<<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes.html>>. (Abruf: 26.08.2020).

The Things Network (Hrsg.): Gateways, Online im Internet: *URL* :<<https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/>>. (Abruf: 25.08.2020).

The Things Network (Hrsg.): LoRaWAN Architecture, Online im Internet: *URL* :<<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture.html>>. (Abruf: 01.09.2020).

Tietz, H.-P.: Systeme der Ver- und Entsorgung - Funktionen und räumliche Strukturen, (Teubner Verlag), Wiesbaden 2007.

Zimmermann, J./ Stark, C./ Rieck, J.: Projektplanung - Modelle, Methoden, Management, (Springer), Berlin, Heidelberg 2006.

7 Anhang

Anhang A1: Beispiel des Dijkstra-Algorithmus

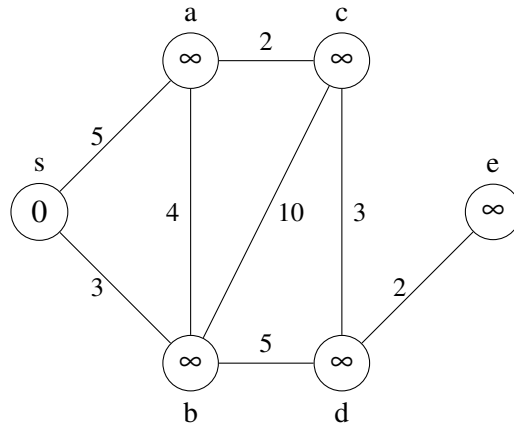


Abbildung 14: Ausgangsgraph des Beispiels

Tabelle 3: Tabelle S nach Iteration 1 des Dijkstra-Algorithmus

	Vorgänger	geringstes Gewicht
s	s	0
a	s	5
b	s	3
c	/	∞
d	/	∞
e	/	∞

Warteschlange Q nach Iteration 1 des Dijkstra-Algorithmus: b, a, c, d, e

Tabelle 4: Tabelle S nach Iteration 5 des Dijkstra-Algorithmus

	Vorgänger	geringstes Gewicht
s	s	0
a	s	5
b	s	3
c	a	7
d	b	8
e	d	10

Warteschlange Q vor der letzten Iteration des Dijkstra-Algorithmus: e

Anhang A2: Durchläufe des Floyd-Warshall-Algorithmus

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>s</i>
<i>a</i>	0	4	2	∞	∞	5
<i>b</i>	4	0	10	5	∞	3
<i>c</i>	2	10	0	3	∞	∞
<i>d</i>	∞	5	3	0	2	∞
<i>e</i>	∞	∞	∞	2	0	∞
<i>s</i>	5	3	∞	∞	∞	0

Abbildung 15: $D^{(0)}$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>s</i>
<i>a</i>	0	4	2	∞	∞	5
<i>b</i>	4	0	6	5	∞	3
<i>c</i>	2	6	0	3	∞	7
<i>d</i>	∞	5	3	0	2	∞
<i>e</i>	∞	∞	∞	2	0	∞
<i>s</i>	5	3	7	∞	∞	0

Abbildung 16: $D^{(1)}$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>s</i>
<i>a</i>	0	4	2	9	∞	5
<i>b</i>	4	0	6	5	∞	3
<i>c</i>	2	6	0	3	∞	7
<i>d</i>	9	5	3	0	2	8
<i>e</i>	∞	∞	∞	2	0	∞
<i>s</i>	5	3	7	8	∞	0

Abbildung 17: $D^{(2)}$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>s</i>
<i>a</i>	0	4	2	5	∞	5
<i>b</i>	4	0	6	5	∞	3
<i>c</i>	2	10	0	3	∞	7
<i>d</i>	5	5	3	0	2	8
<i>e</i>	∞	∞	∞	2	0	∞
<i>s</i>	5	3	7	8	∞	0

Abbildung 18: $D^{(3)}$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>s</i>
<i>a</i>	0	4	2	5	7	5
<i>b</i>	4	0	6	5	7	3
<i>c</i>	2	6	0	3	5	7
<i>d</i>	5	5	3	0	2	8
<i>e</i>	7	7	5	2	0	10
<i>s</i>	5	3	7	8	10	0

Abbildung 19: $D^{(4)}$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>s</i>
<i>a</i>	0	4	2	5	7	5
<i>b</i>	4	0	6	5	7	3
<i>c</i>	2	6	0	3	5	7
<i>d</i>	5	5	3	0	2	8
<i>e</i>	7	7	5	2	0	10
<i>s</i>	5	3	7	8	10	0

Abbildung 20: $D^{(5)}$

Anhang A3: Müllprognosen Simulation

```
# Pakete
# install.packages("xtable")
library(xtable)
library(data.table)
# Generierung von zufaelligen Verteilungen
## Arbeitsverzeichnis setzen
setwd("C:/Users/Yasin/Desktop/Bachelor Arbeit/Simulation")

# Muelleimer erstellen -----

## Seed setzen, fuer immer die gleichen Ergebnisse
set.seed(1401)
## ID: 10 Muelleimer
ID <- c(1:10)
## Variable fuer Frequentierung (1 wenig bis 2 viele Leute)
fre <- runif(10, min=1, max=2)
## Hintergrund Datensatz erstellen
muelleimer <- data.frame(ID = ID, fre = fre)
setDT(muelleimer)

## Region
muelleimer[, region := 0L]
muelleimer[ID %in% c(1,4,9), region := 1]
muelleimer[ID %in% c(2, 10), region := 2]
muelleimer[ID %in% 3, region := 3]
muelleimer[ID %in% c(5,6,7,8), region := 4]

muelleimer[, region := factor(region, levels = c(1, 2, 3,4),
                              labels = c("Buer", "Erle", "Horst", "Resse"))]

# Montag -----
set.seed(33)
## Anzahl, Mittelwert und Std Abw angeben
## Simulierte Stunden 0 Uhr, 6 Uhr, 12 Uhr, 18 Uhr
Mo0 <- rnorm(10, 2, 1); Mo0 <- Mo0[Mo0 > 0 & Mo0 < 100]
## auf ganze Zahlen runden
Mo0 <- round(Mo0)
# fuer alle Stunden wiederholen
Mo6 <- rnorm(10, 5, 1); Mo6 <- Mo6[Mo6 > 0 & Mo6 < 100]
Mo6 <- round(Mo6)
Mo12 <- rnorm(10, 10, 3); Mo12 <- Mo12[Mo12 > 0 & Mo12 < 100]
Mo12 <- round(Mo12)
Mo18 <- rnorm(10, 15, 4); Mo18 <- Mo18[Mo18 > 0 & Mo18 < 100]
Mo18 <- round(Mo18)

# Datensatz fuer Montag erstellen
Montag <- data.frame(ID = ID, fre = fre, Mo0 = Mo0, Mo6 = Mo6, Mo12 = Mo12,
                    Mo18 = Mo18)
setDT(Montag)
# mit der fre Variable Gewichten
Montag[, Mo0 := Mo0 * fre]
Montag[, Mo6 := Mo6 * fre]
Montag[, Mo12 := Mo12 * fre]
Montag[, Mo18 := Mo18 * fre]
# Variablen mit Fuellstand aufsummieren
Montag[, Moges := sum(Mo0, Mo6, Mo12, Mo18, na.rm = FALSE), by = ID]
```

```

Montag[, fre := NULL] # fre Variable loeschen
Montag[, Mo0 := round(Mo0)]
Montag[, Mo6 := round(Mo6)]
Montag[, Mo12 := round(Mo12)]
Montag[, Mo18 := round(Mo18)]
Montag[, Moges := round(Moges)]

## Datensatze mergen
muellges <- merge(muellleimer, Montag, by = "ID")

# Annahme: Dienstag bis Freitag in etwa wie Montag, deswegen gleiche
Verteilungen waehlen

# Dienstag -----

set.seed(42)
Di0 <- rnorm(10, 2, 1); Di0 <- Di0[Di0 > 0 & Di0 < 100]
## auf ganze Zahlen runden
Di0 <- round(Di0)
# fuer alle Stunden wiederholen
Di6 <- rnorm(10, 5, 1); Di6 <- Di6[Di6 > 0 & Di6 < 100]
Di6 <- round(Di6)
Di12 <- rnorm(10, 10, 3); Di12 <- Di12[Di12 > 0 & Di12 < 100]
Di12 <- round(Di12)
Di18 <- rnorm(10, 15, 4); Di18 <- Di18[Di18 > 0 & Di18 < 100]
Di18 <- round(Di18)

Dienstag <- data.frame(ID = ID, fre = fre, Di0 = Di0, Di6 = Di6, Di12 =
Di12, Di18 = Di18)
setDT(Dienstag)

# mit der fre Variable Gewichten
Dienstag[, Di0 := Di0 * fre]
Dienstag[, Di6 := Di6 * fre]
Dienstag[, Di12 := Di12 * fre]
Dienstag[, Di18 := Di18 * fre]
# Variablen mit Fuellstand aufsummieren
Dienstag[, Diges := sum(Di0, Di6, Di12, Di18, na.rm = FALSE), by = ID]
Dienstag[, fre := NULL] # fre Variable loeschen
Dienstag[, Di0 := round(Di0)]
Dienstag[, Di6 := round(Di6)]
Dienstag[, Di12 := round(Di12)]
Dienstag[, Di18 := round(Di18)]
Dienstag[, Diges := round(Diges)]

## Datensatze mergen
muellges <- merge(muellges, Dienstag, by = "ID")

# Mittwoch -----

set.seed(1658)
Mi0 <- rnorm(10, 2, 1); Mi0 <- Mi0[Mi0 > 0 & Mi0 < 100]
## auf ganze Zahlen runden
Mi0 <- round(Mi0)
# fuer alle Stunden wiederholen
Mi6 <- rnorm(10, 5, 1); Mi6 <- Mi6[Mi6 > 0 & Mi6 < 100]
Mi6 <- round(Mi6)

```

```

Mi12 <- rnorm(10, 10, 3); Mi12 <- Mi12[Mi12 > 0 & Mi12 < 100]
Mi12 <- round(Mi12)
Mi18 <- rnorm(10, 15, 4); Mi18 <- Mi18[Mi18 > 0 & Mi18 < 100]
Mi18 <- round(Mi18)

# Datensatz fuer Mittwoch erstellen
Mittwoch <- data.frame(ID = ID, fre = fre, Mi0 = Mi0, Mi6 = Mi6, Mi12 =
Mi12, Mi18 = Mi18)
setDT(Mittwoch)
# mit der fre Variable Gewichten
Mittwoch[, Mi0 := Mi0 * fre]
Mittwoch[, Mi6 := Mi6 * fre]
Mittwoch[, Mi12 := Mi12 * fre]
Mittwoch[, Mi18 := Mi18 * fre]
# Variablen mit Fuellstand aufsummieren
Mittwoch[, Miges := sum(Mi0, Mi6, Mi12, Mi18, na.rm = FALSE), by = ID]
Mittwoch[, fre := NULL] # fre Variable loeschen
Mittwoch[, Mi0 := round(Mi0)]
Mittwoch[, Mi6 := round(Mi6)]
Mittwoch[, Mi12 := round(Mi12)]
Mittwoch[, Mi18 := round(Mi18)]
Mittwoch[, Miges := round(Miges)]

## Datensaeetze mergen
muellges <- merge(muellges, Mittwoch, by = "ID")

# Donnerstag -----
set.seed(5)
Do0 <- rnorm(10, 2, 1); Do0 <- Do0[Do0 > 0 & Do0 < 100]
## auf ganze Zahlen runden
Do0 <- round(Do0)
# fuer alle Stunden wiederholen
Do6 <- rnorm(10, 5, 1); Do6 <- Do6[Do6 > 0 & Do6 < 100]
Do6 <- round(Do6)
Do12 <- rnorm(10, 10, 3); Do12 <- Do12[Do12 > 0 & Do12 < 100]
Do12 <- round(Do12)
Do18 <- rnorm(10, 15, 4); Do18 <- Do18[Do18 > 0 & Do18 < 100]
Do18 <- round(Do18)

# Datensatz fuer Donnerstag erstellen
Donnerstag <- data.frame(ID = ID, fre = fre, Do0 = Do0, Do6 = Do6, Do12 =
Do12, Do18 = Do18)
setDT(Donnerstag)
# Mit der fre Variable Gewichten
Donnerstag[, Do0 := Do0 * fre]
Donnerstag[, Do6 := Do6 * fre]
Donnerstag[, Do12 := Do12 * fre]
Donnerstag[, Do18 := Do18 * fre]
# Variablen mit Fuellstand aufsummieren
Donnerstag[, Doges := sum(Do0, Do6, Do12, Do18, na.rm = FALSE), by = ID]
Donnerstag[, fre := NULL] # fre Variable loeschen
Donnerstag[, Do0 := round(Do0)]
Donnerstag[, Do6 := round(Do6)]
Donnerstag[, Do12 := round(Do12)]
Donnerstag[, Do18 := round(Do18)]
Donnerstag[, Doges := round(Doges)]

## Datensaeetze mergen

```



```

muellges <- merge(muellges, Donnerstag, by = "ID")

# Freitag -----
set.seed(987)
Fr0 <- rnorm(10, 2, 1); Fr0 <- Fr0[Fr0 > 0 & Fr0 < 100]
## auf ganze Zahlen runden
Fr0 <- round(Fr0)
# fuer alle Stunden wiederholen
Fr6 <- rnorm(10, 5, 1); Fr6 <- Fr6[Fr6 > 0 & Fr6 < 100]
Fr6 <- round(Fr6)
Fr12 <- rnorm(10, 10, 3); Fr12 <- Fr12[Fr12 > 0 & Fr12 < 100]
Fr12 <- round(Fr12)
Fr18 <- rnorm(10, 15, 4); Fr18 <- Fr18[Fr18 > 0 & Fr18 < 100]
Fr18 <- round(Fr18)

# Datensatz fuer Freitag erstellen
Freitag <- data.frame(ID = ID, fre = fre, Fr0 = Fr0, Fr6 = Fr6, Fr12 =
Fr12, Fr18 = Fr18)
setDT(Freitag)
# Mit der fre Variable Gewichten
Freitag[, Fr0 := Fr0 * fre]
Freitag[, Fr6 := Fr6 * fre]
Freitag[, Fr12 := Fr12 * fre]
Freitag[, Fr18 := Fr18 * fre]
# Variablen Fuellstand aufsummieren
Freitag[, Frges := sum(Fr0, Fr6, Fr12, Fr18, na.rm = FALSE), by = ID]
Freitag[, fre := NULL] # fre Variable loeschen
Freitag[, Fr0 := round(Fr0)]
Freitag[, Fr6 := round(Fr6)]
Freitag[, Fr12 := round(Fr12)]
Freitag[, Fr18 := round(Fr18)]
Freitag[, Frges := round(Frges)]

## Datensatze mergen
muellges <- merge(muellges, Freitag, by = "ID")

# Samstag -----
# Annahme Sa und So Mittag und Abend mehr als unter der Woche
set.seed(2222)
Sa0 <- rnorm(10, 2, 1); Sa0 <- Sa0[Sa0 > 0 & Sa0 < 100]
## auf ganze Zahlen runden
Sa0 <- round(Sa0)
# fuer alle Stunden wiederholen
Sa6 <- rnorm(10, 5, 1); Sa6 <- Sa6[Sa6 > 0 & Sa6 < 100]
Sa6 <- round(Sa6)
Sa12 <- rnorm(10, 20, 5); Sa12 <- Sa12[Sa12 > 0 & Sa12 < 100]
Sa12 <- round(Sa12)
Sa18 <- rnorm(10, 20, 5); Sa18 <- Sa18[Sa18 > 0 & Sa18 < 100]
Sa18 <- round(Sa18)

# Datensatz fuer Samstag erstellen
Samstag <- data.frame(ID = ID, fre = fre, Sa0 = Sa0, Sa6 = Sa6, Sa12 =
Sa12, Sa18 = Sa18)
setDT(Samstag)
# Mit der fre Variable Gewichten
Samstag[, Sa0 := Sa0 * fre]
Samstag[, Sa6 := Sa6 * fre]
Samstag[, Sa12 := Sa12 * fre]

```

```

Samstag[, Sa18 := Sa18 * fre]
# Variablen Fuellstand aufsummieren
Samstag[, Sages := sum(Sa0, Sa6, Sa12, Sa18, na.rm = FALSE), by = ID]
Samstag[, fre := NULL] # fre Variable loeschen
Samstag[, Sa0 := round(Sa0)]
Samstag[, Sa6 := round(Sa6)]
Samstag[, Sa12 := round(Sa12)]
Samstag[, Sa18 := round(Sa18)]
Samstag[, Sages := round(Sages)]

## Datensatze mergen
muellges <- merge(muellges, Samstag, by = "ID")

# Sonntag -----
set.seed(676767)
So0 <- rnorm(10, 2, 1); So0 <- So0[So0 > 0 & So0 < 100]
## auf ganze Zahlen runden
So0 <- round(So0)
# fuer alle Stunden wiederholen
So6 <- rnorm(10, 5, 1); So6 <- So6[So6 > 0 & So6 < 100]
So6 <- round(So6)
Sol2 <- rnorm(10, 20, 5); Sol2 <- Sol2[Sol2 > 0 & Sol2 < 100]
Sol2 <- round(Sol2)
Sol8 <- rnorm(10, 20, 5); Sol8 <- Sol8[Sol8 > 0 & Sol8 < 100]
Sol8 <- round(Sol8)

# Datensatz fuer Sonntag erstellen
Sonntag <- data.frame(ID = ID, fre = fre, So0 = So0, So6 = So6, Sol2 =
Sol2, Sol8 = Sol8)
setDT(Sonntag)
# Mit der fre Variable Gewichten
Sonntag[, So0 := So0 * fre]
Sonntag[, So6 := So6 * fre]
Sonntag[, Sol2 := Sol2 * fre]
Sonntag[, Sol8 := Sol8 * fre]
# Variablen Fuellstand aufsummieren
Sonntag[, Soges := sum(So0, So6, Sol2, Sol8, na.rm = FALSE), by = ID]
Sonntag[, fre := NULL] # fre Variable loeschen
Sonntag[, So0 := round(So0)]
Sonntag[, So6 := round(So6)]
Sonntag[, Sol2 := round(Sol2)]
Sonntag[, Sol8 := round(Sol8)]
Sonntag[, Soges := round(Soges)]

## Datensatze mergen
muellges <- merge(muellges, Sonntag, by = "ID")

# Datensatz speichern -----
## csv
fwrite(muellges, file = "sim.daten.csv", sep = "\t")
## Tex Table
Tabelle <- xtable(muellges, auto = TRUE, latex.environments = "center")
print(Tabelle, file="Simdaten.tex")

```

Tabelle 5: Mithilfe von R erstellte Simulationstabelle für Mülleinwürfe

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
fre	1,780362316	1,495979029	1,658561196	1,092245136	1,156593127	1,164628555	1,199228054	1,238746774	1,246723726	1,85970544
region	Buer	Erle	Horst	Buer	Resse	Resse	Resse	Resse	Buer	Erle
Mo0	4	3	7	2	3	2	2	2	2	2
Mo6	9	7	10	5	6	6	7	9	4	7
Mo12	27	15	15	13	10	16	11	12	12	15
Mo18	21	21	33	17	21	21	18	15	27	26
Moges	61	46	65	38	40	45	38	38	46	50
Di0	5	1	3	3	2	2	5	2	5	4
Di6	11	10	7	5	6	7	6	2	4	11
Di12	16	7	15	15	19	10	11	6	14	15
Di18	30	27	32	14	20	9	14	15	6	28
Diges	62	46	56	38	46	29	36	26	29	58
Mi0	5	3	3	1	2	5	1	1	2	2
Mi6	7	7	7	4	8	7	7	5	7	11
Mi12	23	18	10	7	13	9	2	10	17	26
Mi18	30	33	8	22	10	29	17	21	24	20
Miges	66	61	28	34	34	50	28	37	51	60
Do0	2	4	2	2	5	1	2	1	2	4
Do6	11	6	7	5	5	6	5	4	6	9
Do12	23	19	23	13	14	10	17	17	10	13
Do18	28	28	40	22	24	22	13	9	10	26
Doges	64	58	71	43	47	40	37	31	29	52
Fr0	4	3	5	2	3	1	1	1	1	2
Fr6	11	6	12	5	6	6	6	5	6	11
Fr12	27	10	8	13	12	8	14	11	7	17
Fr18	27	28	38	25	20	21	17	25	25	22
Frges	68	48	63	46	40	36	38	42	40	52
Sa0	4	4	7	3	2	2	2	4	5	6
Sa6	12	6	7	2	7	7	5	7	6	11
Sa12	28	30	23	23	23	19	25	25	21	33
Sa18	20	34	38	21	25	19	31	33	21	46
Sages	64	75	75	49	58	47	64	69	54	97
So0	4	4	3	2	1	1	2	2	4	4
So6	5	9	10	4	3	5	5	6	7	7
So12	34	39	30	20	20	27	26	24	20	43
So18	30	28	33	20	15	30	20	24	16	24
Soges	73	81	76	46	39	63	54	56	47	78

Tabelle 6: Prognosetabelle für einen mäßig frequentierten Mülleimer

Tag/Zeit	y_t	\hat{y}_t	$y_t - \hat{y}_1$	$\hat{y}_t + \alpha \cdot e_t$
Mo 6:00	10	10	0	10
Mo 18:00	36	10	26	15,2
Di 6:00	11	15,2	-4,2	14,36
Di 18:00	34	14,36	19,64	18,288
Mi 6:00	10	18,288	-8,288	16,6304
Mi 18:00	51	16,6304	34,3696	23,50432
Do 6:00	10	23,50432	-13,50432	20,803456
Do 18:00	47	20,803456	26,196544	26,0427648
Fr 6:00	9	26,0427648	-17,0427648	22,63421184
Fr 18:00	38	22,63421184	15,36578816	25,70736947
Sa 6:00	10	25,70736947	-15,70736947	22,56589558
Sa 18:00	64	22,56589558	41,43410442	30,85271646
So 6:00	13	30,85271646	-17,85271646	27,28217317
So 18:00	67	27,28217317	39,71782683	35,22573854
Mo2 6:00		41,58059083		
Mo2 18:00		41,58059083		

Tabelle 7: Prognosetabelle für einen hoch frequentierten Mülleimer

Tag/Zeit	y_t	\hat{y}_t	$y_t - \hat{y}_1$	$\hat{y}_t + \alpha \cdot e_t$
Mo 6:00	9	9	0	9
Mo 18:00	41	9	32	15,4
Di 6:00	15	15,4	-0,4	15,32
Di 18:00	43	15,32	27,68	20,856
Mi 6:00	13	20,856	-7,856	19,2848
Mi 18:00	46	19,2848	26,7152	24,62784
Do 6:00	13	24,62784	-11,62784	22,302272
Do 18:00	39	22,302272	16,697728	25,6418176
Fr 6:00	13	25,6418176	-12,6418176	23,11345408
Fr 18:00	39	23,11345408	15,88654592	26,29076326
Sa 6:00	17	26,29076326	-9,290763264	24,43261061
Sa 18:00	79	24,43261061	54,56738939	35,34608849
So 6:00	11	35,34608849	-24,34608849	30,47687079
So 18:00	67	30,47687079	36,52312921	37,78149663
Mo2 6:00		43,62519731		
Mo2 18:00		43,62519731		

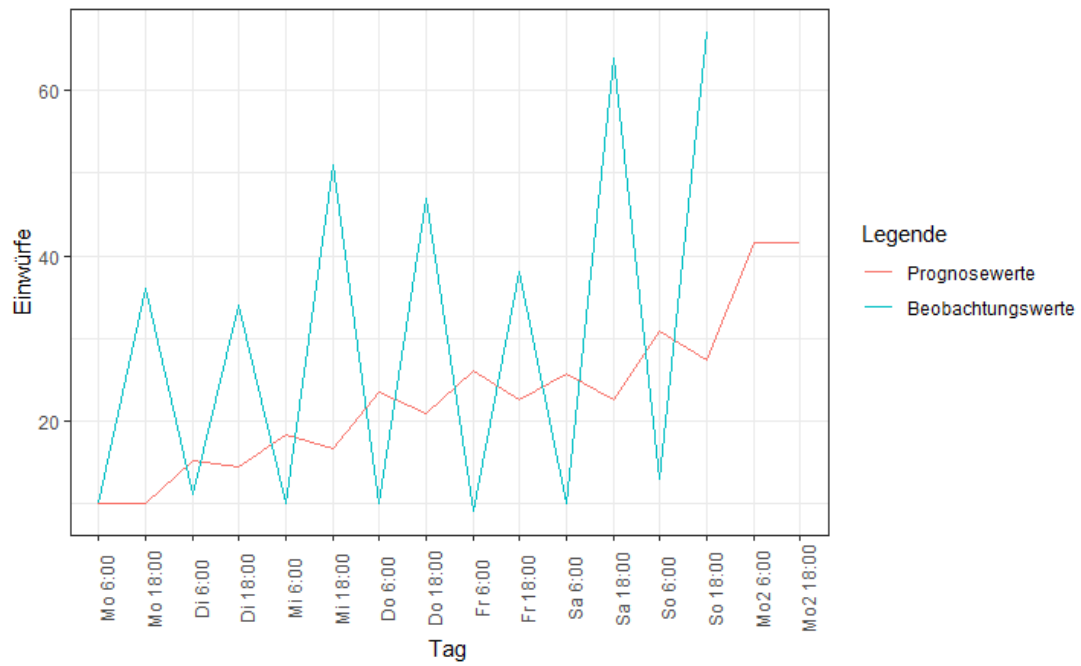


Abbildung 21: Prognose- und Beobachtungswerte eines mäßig frequentierten Mülleimers

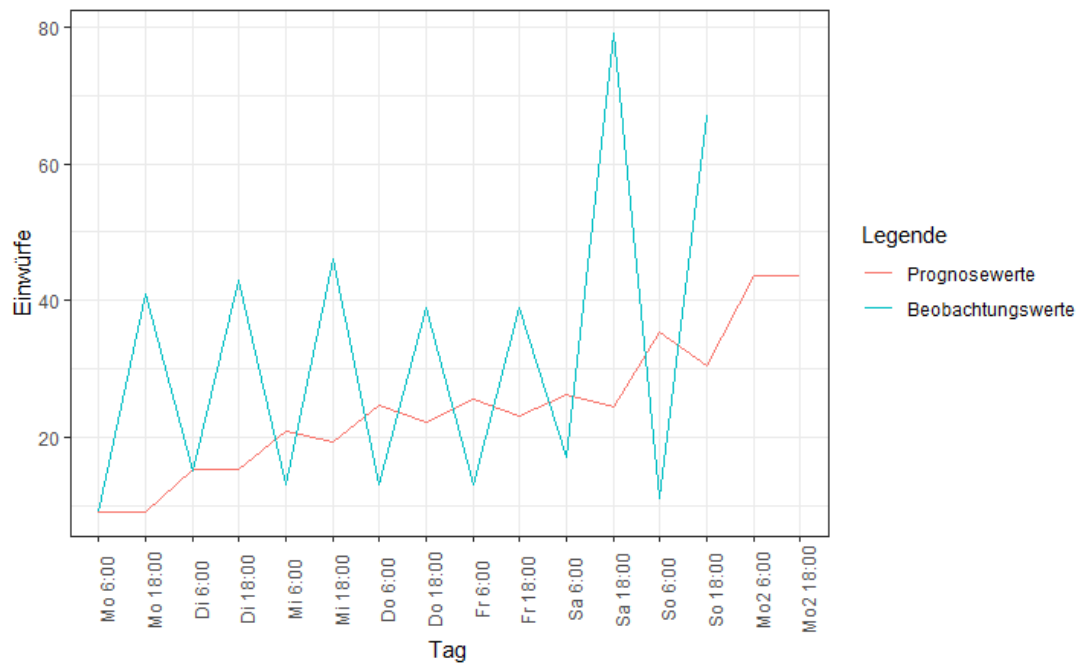


Abbildung 22: Prognose- und Beobachtungswerte eines stark frequentierten Mülleimers

8 Eidesstattliche Versicherung

Zerria, Yasin

Name, Vorname

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

**Einsatz von LoRaWAN und Algorithmen –
Konzeption einer Müllentleerungsstrategie im
Bereich Smart Waste
am Beispiel der 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, 30. September 2020

Ort, Datum, Unterschrift