

Hochschule München

Fakultät für Elektrotechnik und  
Informationstechnik

Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik

# Industrie 4.0 - Pathfinding auf einer SPS

Bachelorarbeit von Niels Garibaldi

Bearbeitungsbeginn: xx.xx.2016

Abgabetermin: xx.xx.2016

lfd. Nr.: xxxxx

Hochschule München

Fakultät für Elektrotechnik und  
Informationstechnik

Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik

# **Industrie 4.0 - Pathfinding auf einer SPS**

---

## **Industry 4.0 - Pathfinding on a PLC**

**Bachelorarbeit von Niels Garibaldi**

**betreut von Prof. Dr. K. Ressel**

**Bearbeitungsbeginn:** xx.xx.2016

**Abgabetermin:** xx.xx.2016

**lfd. Nr.:** xxxxx

## Erklärung des Bearbeiters

1. Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig verfasst und noch nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt habe.

Sämtliche benutzte Quellen und Hilfsmittel sind angegeben, wörtliche und sinngemäße Zitate sind als solche gekennzeichnet.

2. Ich erkläre mein Einverständnis, dass die von mir erstellte Bachelorarbeit in die Bibliothek der Hochschule München eingestellt wird. Ich wurde darauf hingewiesen, dass die Hochschule in keiner Weise für die missbräuchliche Verwendung von Inhalten durch Dritte infolge der Lektüre der Arbeit haftet. Insbesondere ist mir bewusst, dass ich für die Anmeldung von Patenten, Warenzeichen oder Geschmacksmustern selbst verantwortlich bin und daraus resultierende Ansprüche selbst verfolgen muss.

München, den xx.xx.2016,

---

Niels Garibaldi

## **Zusammenfassung**

Zusammenfassungstext hier einfügen

## **Abstract**

Insert abstract text here

# Inhaltsverzeichnis

Erklärung des Bearbeiters . . . . .	I
Zusammenfassung/Abstract . . . . .	II
Inhaltsverzeichnis . . . . .	III
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	V
<b>1 Einführung in das Thema Industrie 4.0</b>	<b>1</b>
<b>2 Definition der Anforderungen</b>	<b>2</b>
2.1 Allgemeine Aufgabenstellung . . . . .	2
2.2 Aufteilung der Themenbereiche . . . . .	2
2.2.1 Fahrerloses Transportsystem . . . . .	3
2.2.2 Dynamische Wegfindung . . . . .	3
2.3 Erwartete Ziele für die Wegfindung . . . . .	4
<b>3 Theoretische Grundlagen Wegfindung</b>	<b>5</b>
3.1 Modellierung der Anlagentopologie . . . . .	5
3.2 Dijkstra-Algorithmus . . . . .	6
3.2.1 Grundprinzip . . . . .	6
3.2.2 Darstellung der Funktionsweise . . . . .	7
3.2.3 Berechnungsaufwand . . . . .	7
3.3 A*-Algorithmus . . . . .	7
3.3.1 Grundprinzip . . . . .	8
3.3.2 Abschätzungsfunktion $f(n)$ . . . . .	8
3.3.3 Vergleich verschiedener Heuristiken . . . . .	8
3.3.4 Darstellung der Funktionsweise . . . . .	9
3.3.5 Berechnungsaufwand . . . . .	9
3.4 Alternative D* / D*-Lite . . . . .	9
<b>4 Technische Implementierung der Algorithmen</b>	<b>10</b>
4.1 Kurze Einführung in die Programmiersprache und Programmier- umgebung . . . . .	10
4.1.1 Siemens TIA-Portal . . . . .	10
4.1.2 SCL . . . . .	10
4.1.3 Arbeitsweise einer SPS . . . . .	10
4.2 Beschreibung der Anlagentopologie . . . . .	10
4.3 Implementierung des Dijkstra-Algorithmus . . . . .	10
4.4 Implementierung des A*-Algorithmus . . . . .	10
4.5 Einhaltung der Echtzeitbedingung . . . . .	10
4.5.1 Ausführung bei Systemstart . . . . .	10

4.5.2	Zyklische Ausführung . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Besonderheiten der Dynamischen Wegfindung</b>	<b>11</b>
5.1	Kommunikation . . . . .	11
5.1.1	Interne Kommunikation . . . . .	11
5.1.2	Externe Kommunikation . . . . .	11
5.2	Algorithmische Kollisionsvermeidung . . . . .	11
5.2.1	Problem des Zeitlichen Indeterminismus . . . . .	11
5.2.2	Verhinderung von Deadlock-Situationen . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>12</b>
6.1	Aktueller Stand der Anlage . . . . .	12
6.2	Komplikationen bei der Implementierung . . . . .	12
6.3	Ausblick über zukünftige Erweiterungen . . . . .	12
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>i</b>
	Literaturverzeichnis . . . . .	ii

## **Abkürzungsverzeichnis**

**CPPS** Cyber-physisches Produktionssystem

**CT** Corporate Technologies

**FTF** Fahrerloses Transportfahrzeug

**FTS** Fahrerloses Transportsystem

**IoT** Internet of Things

## Einführung in das Thema Industrie 4.0

Der Begriff „Industrie 4.0“ ist seit seiner Popularisierung durch die Bundeskanzlerin auf der Hannovermesse 2013 vor allem in den Bereichen Produktion und Fertigung in aller Munde. Da er jedoch je nach Branche unterschiedliche Bedeutungen haben kann, möchte ich als Einführung zunächst einmal erläutern, was Industrie 4.0 im Kontext der Automatisierungstechnik bedeutet. Der Begriff beschreibt die vierte industrielle Revolution und die damit einhergehende Verflechtung von informationstechnisch erhobenen Daten in den Produktionsablauf. Ein interessanter Aspekt ist hier beispielsweise der Bereich der prädiktiven Wartung, bei dem Anhand der Auswertung empirischer Daten mögliche Anlagenausfälle frühzeitig erkannt und behoben werden können. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit ist vor allem auch ein sogenanntes Cyber-physisches Produktionssystem (CPPS) von Bedeutung. Diese bestehen aus der Verbindung von einzelnen, dezentralen Objekten wie beispielsweise Produktionsanlagen oder Logistikkomponenten, welche mit eingebetteten Systemen ausgestattet und zudem kommunikationsfähig gemacht werden. Durch eingebaute Sensoren und Aktoren kann die Umwelt erfasst und beeinflusst werden. Mittels der Kommunikationskomponenten können Daten aus der Produktion über ein Netzwerk oder das Internet ausgetauscht, beziehungsweise von entsprechenden Diensten ausgewertet, verarbeitet oder gespeichert werden [1]. Sind mehrere Cyber-physische Produktionssysteme an einem Produktionsprozess beteiligt, unabhängig von ihrem Standort, so spricht man auch von einer Smart Factory. Abschließend ist noch zu erwähnen, dass der Begriff „Industrie 4.0“ vor allem im deutschsprachigen Raum verwendet wird. Im internationalen Kontext werden viele der zentralen Punkte von Industrie 4.0 durch das Konzept des Internet of Things (IoT) abgedeckt.



# Definition der Anforderungen

## 2.1 Allgemeine Aufgabenstellung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf und der Realisierung eines CPPS im Modellmaßstab. Die resultierende Anlage soll unter anderem dazu dienen verschiedene Aspekte von Industrie 4.0 vorzuführen und zu veranschaulichen. Kernpunkte, die dargestellt werden sollen, sind vor allem die Dezentralisierung und Skalierbarkeit der Anlage. Den Rahmen für die Bearbeitung dieser Aufgabe bildet die Fachberatung für Automatisierungstechnik der Siemens AG in München. Um die erwähnten Konzepte demonstrieren zu können, soll die Anlage gemäß ihrer realen Vorbilder bestehen aus Bearbeitungsstationen, an welchen der Bearbeitungsprozess simuliert werden kann, und Werkstückträgern, welche Werkstücke durch die Modellanlage zu den Maschinenplätzen transportieren können. Hauptaufgabe des Modells ist es zu zeigen, wie ein Werkstück seine Fertigung selbst organisiert. Zu Beginn des Fertigungsprozesses wird dem Werkstück ein Fertigungsplan übergeben, anhand welchem es sich durch die Anlage bewegt. Im vorliegenden Fall stellen die Werkstückträger gleichzeitig das Werkstück dar, dass die Produktionsanlage durchfährt. Ebenso werden die Bearbeitungsstationen nur symbolisch dargestellt durch entsprechende Markierungen in der Anlagentopologie. Anhand verschiedener Use-cases und Szenarien soll es nach Fertigstellung der Anlage möglich sein, verschiedene Aspekte von Industrie 4.0 anschaulich darzustellen, zum Beispiel zu Vorführzwecken bei Kunden.

## 2.2 Aufteilung der Themenbereiche

Wie soeben beschrieben konzentriert sich die Aufgabe vor allem auf die Entwicklung und Implementierung der Werkstückträgerfahrzeuge. Da dies jedoch

noch immer ein recht allgemein gefasstes Themengebiet ist und der zur Realisierung notwendige Aufwand nur schwer abzuschätzen ist, wurde in Rücksprache mit dem Betreuer entschieden, die Hauptaufgabe in zwei Teilaufgaben zu unterteilen. Diese beiden Themenblöcke sind „Autonomes Fahren in industriellen Transportsystemen“ und „Dynamische Wegfindung in einer flexiblen Produktionsanlage“[2]. Die Dokumentation der Implementierung der dynamischen Wegfindung ist Hauptbestandteil der vorliegenden Arbeit. Den Teil des autonomen Fahrens mittels eines Fahrerloses Transportsystem (FTS) wird von Herrn Andreas Meier bearbeitet und wird deshalb nur kurz umrissen.

### 2.2.1 Fahrerloses Transportsystem

Hauptaufgabe der Werkstückträger, die jeweils durch ein Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF) realisiert werden sollen, ist es, einen Weg anhand einer vorgegebenen Route ab zu fahren und somit die Werkstücke zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten zur nächsten Station oder Maschine zu transportieren. Herausforderungen hierbei sind die Spurführung und die Navigation innerhalb der Anlagentopologie, da die einzelnen FTF nicht wie sonst üblich schienengebunden sind, sondern sich frei durch die Anlage bewegen können. Da es sich zudem mehrere Fahrzeuge gleichzeitig in der Anlage befinden können, muss durch geeignete Sensorik eine bevorstehende Kollision erkannt und verhindert werden.

### 2.2.2 Dynamische Wegfindung

Für die Wegfindung ist es wichtig, dass das Werkstück die Ablaufreihenfolge der benötigten Arbeitsschritte kennt. Diese sollen in einer Art Rezept festgehalten werden und als Grundlage für die Berechnung der Teilrouten zu den Bearbeitungsstationen dienen. Für die Bestimmung der Routen wird zudem eine geeignete Beschreibung der Anlagentopologie benötigt. Innerhalb der Anlage können mehrere Bearbeitungsstationen die gleiche Funktionalität liefern. In diesem Fall soll die Wegfindung eine geeignete Station auswählen können. Diese sollte universell gehalten sein, damit sie auch von dem FTS genutzt werden kann. Die Wegfindung soll so realisiert sein, dass sie auch auf einer der leistungsschwächeren Steuerungen der Siemens S7-1200er Reihe lauffähig ist, falls dies nicht realisierbar ist, sollen so wenig Komponenten wie möglich auf ein PC-System ausgelagert werden.

Bei der Berechnung von Routen sollen zudem folgende dynamische Ereignisse berücksichtigt werden:

- Persistente Blockaden und länger andauernde nicht permanente Änderungen der Standard-Anlagentopologie.

- Dynamische Blockaden von Teilstrecken durch andere Fahrzeuge zur Kollisionsvermeidung.

## 2.3 Erwartete Ziele für die Wegfindung

Da bei der Planung des Arbeitsauftrags noch nicht absehbar war, wie zeitaufwendig die Realisierung der Aufgabe sein würde, wurde die Funktionalität der Wegfindungskomponente der Anlage in mehrere Stufen unterteilt:

**Grundstufe:** Es können detaillierte Teilrouten generiert werden auf der Basis von Anfangs- und Endpunkten.

**Stufe 1:** Es können komplette Routen bestehend aus Teilrouten anhand eines einzigen Fertigungsplans generiert werden, es existiert pro Funktionalität nur eine Bearbeitungsstation. Mehrere FTF erhalten die gleiche Route und reihen sich hintereinander ein.

**Stufe 2:** Es wird werden komplette Routen anhand eines einzigen Fertigungsplans generiert, pro Funktionalität existieren mehrere Bearbeitungsstationen. Die FTF können unterschiedliche Wege nehmen und sich gegenseitig überholen.

**Stufe 3:** Analog zu Stufe 2, es können jedoch im laufenden Betrieb Störungen in der Form von persistenten Blockaden auftreten, die bei der Wegfindung berücksichtigt werden.

**Stufe 4:** Analog zu Stufe 3, verschiedene Fahrzeuge können unterschiedliche Fertigungspläne und somit andere Routen verfolgen.

Als zusätzliches Ziel wurde die Visualisierung der geplanten und bereits zurückgelegten Fahrstrecken der verschiedenen FTF definiert, zur besseren Darstellung der einzelnen Aspekte der definierten Stufen. Die Anlage wird zudem in Kooperation mit der Siemens Entwicklungsabteilung Corporate Technologies (CT) entwickelt wird, welche parallel die gleiche Anlage als Simulation testet und die ermittelten Ergebnisse mit dem Resultat der physikalischen Anlage vergleicht.

# Theoretische Grundlagen

## Wegfindung

### 3.1 Modellierung der Anlagentopologie

Zur Berechnung eines Weges innerhalb der Anlage wird zuallererst die Topologie der besagten Anlage benötigt. Für die Funktionsweise der FTF wurde definiert, dass sich alle Fahrzeuge mittels optischer Merkmale auf einer definierten Teilstrecke bewegen. Zudem soll es den Fahrzeugen nur an festgelegten Entscheidungspunkten möglich sein, ihren Fahrzustand zu ändern und eine andere Teilstrecke. Dies bedeutet, dass alle Fahrzeuge, sobald sie sich für eine Teilstrecke entschieden haben, dieser bis zum nächsten Entscheidungspunkt folgen. Auf Basis einer solchen logischen Unterteilung der Anlage in Entscheidungspunkte und Teilstrecken als Verbindungen zwischen zwei solcher Punkte, liegt es nahe als Datenstruktur für die Modellierung der Anlagentopologie einen Graphen zu verwenden. Die Entscheidungspunkte entsprechen hierbei den Knoten und die korrespondierenden Teilwegstrecken stellen die Kanten des Graphen dar. Da sich die FTF möglichst frei durch die Produktion bewegen sollen, wird als Grundform der Anlage ein ungerichteter Graph zur Abbildung der Topologie verwendet, jedoch soll es für die spätere Wegberechnung unerheblich sein, ob es sich um einen gerichteten oder ungerichteten Graphen handelt.

**insert graphic about graphs here**

Da der Graph die Abbildung einer realen Anlage kann zudem ausgeschlossen werden, dass die Gewichtung der Kanten negativ ist, da dies je nach Art der Gewichtung nur wenig Nutzen bringen würde. Es existieren beispielsweise keine negativen Streckenabstände oder Fahrzeiten, die eine spezielle Betrachtung erforderlich machen und somit die Wahl der Wegfindungsalgorithmen einschränken würden.

## 3.2 Dijkstra-Algorithmus

Der erste von insgesamt zwei für die Wegfindung verwendeten Algorithmen ist der nach seinem Erfinder benannte Dijkstra-Algorithmus, der den kürzesten Pfad zwischen einem Startknoten und einem Endknoten (oder allen anderen Knoten) eines Graphen ermittelt. Er kann verwendet werden für beliebige positiv gewichtete, gerichtete oder ungerichtete Graphen. Da in 3.1 negative Kantengewichtungen ausgeschlossen wurden, lässt sich der Algorithmus ohne Abwandlung auf den Graphen der Anlagentopologie anwenden.

### 3.2.1 Grundprinzip

Das Grundprinzip des Dijkstra-Algorithmus ist Unterteilung aller Graphenknoten in drei Untergruppen[3]:

- Gruppe A:** Die Menge aller Knoten, zu dem bereits ein kürzester Pfad bekannt ist.
- Gruppe B:** Die Menge aller Knoten, die mit mindestens einem Knoten aus Gruppe A verbunden sind, jedoch selbst nicht zu A gehören.
- Gruppe C:** Die Menge der restlichen Knoten, die nicht in den Gruppen A oder B enthalten sind.

Zusätzlich zu den Knoten können auch die Kanten drei unterschiedlichen Teilgruppen zugeordnet werden[3]:

- Gruppe I:** Die Menge aller Kanten, die in einem kürzesten Pfad zu einem der Knoten aus Gruppe A vorkommen.
- Gruppe II:** Die Menge aller Kanten, aus denen die nächste Kante für Gruppe I ausgewählt wird, wenn der korrespondierende Knoten aus B zur Gruppe A hinzugefügt wird. Es existiert immer genau eine Kante für jeden Knoten aus Gruppe B.
- Gruppe III:** Die restlichen Kanten.

Der Algorithmus funktioniert nun wie folgt. Zu Beginn befinden sich alle Knoten und Kanten respektive in den Gruppen C oder III. Als erstes wird nun der Startknoten S zu A hinzugefügt, da ein kürzester Pfad vom Startknoten zu sich selbst mit dem Wert 0 bekannt ist. Ab nun werden folgende Schritte solange wiederholt, bis das Ziel erreicht wurde:

1. Man betrachte alle Kanten  $z$  die den soeben zu A hinzugefügten Knoten mit einem Knoten  $K$  aus B oder C verbinden.
  - Gehört  $K$  zur Gruppe B, so wird untersucht ob  $z$  zu einem kürzeren Pfad zu  $K$  führt als der bisherige kürzeste Pfad mit einer Kante aus II zu diesem Knoten. Ist dies der Fall, so ersetzt  $z$  die korrespondierende Kante aus II. Die Kante die durch  $z$  wird wieder zur Gruppe III hinzugefügt.
  - Gehört  $K$  zur Gruppe C, so wird  $K$  zu B und  $z$  zu II hinzugefügt.
2. Es existiert immer nur jeweils ein Weg vom Startknoten zu einem beliebigen Knoten von B unter Verwendung der Kanten aus I und II. Nun wird derjenige Knoten aus B zur Gruppe A hinzugefügt, dessen Weg der kürzeste ist. Analog wird die zugehörige Kante der Gruppe I zugeordnet.

### 3.2.2 Darstellung der Funktionsweise

Die **insert graphic here** zeigt die Funktionsweise des Algorithmus an einem einfachen Beispielgraphen mit vier Knoten.

### 3.2.3 Berechnungsaufwand

Der Berechnungsaufwand des Dijkstra-Algorithmus beträgt in Landau-Notation vereinfacht  $\mathcal{O}(|\mathcal{V}|^2)$  beziehungsweise  $\mathcal{O}(|\mathcal{V}| \log |\mathcal{V}| + |\mathcal{E}|)$  bei der Implementierung mittels Fibonacci-Heaps[4] wobei  $\mathcal{V}$  gleich der Anzahl der Knoten und  $\mathcal{E}$  gleich der Anzahl der Kanten des Graphen ist. diese Vereinfachung gilt jedoch nur, wenn die Anzahl der Kanten in der gleichen Größenordnung liegt wie die Anzahl der Knoten.

## 3.3 A\*-Algorithmus

Der zweite verwendete Algorithmus für die Wegfindung ist der sogenannte A\*-Algorithmus. Dieser ist eine Weiterentwicklung des in 3.2.1 vorgestellten Dijkstra-Algorithmus. Der grundlegende Unterschied ist jedoch, dass bei A\* eine Bewertung der Betrachtungsreihenfolge von Knoten bei der Berechnung verwendet werden. Dies bedeutet, dass diejenigen Knoten und Kanten zuerst expandiert werden sollen, bei denen die Wahrscheinlichkeit höher ist, dass sie Teil des kürzesten Pfades zum Zielknoten sind. Im Vergleich dazu wurde beim Dijkstra-Algorithmus immer genau der Knoten als nächstes expandiert, der den kürzesten Abstand zu den bereits expandierten Knoten hatte **Insert graphic dijkstra vs A\***.

Um eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Knotens bezüglich seiner Zugehörigkeit zu dem kürzesten Pfad vom Start zum Zielknoten treffen zu können, werden somit zusätzliche Informationen über die Beziehung zwischen einzelnen Knoten und dem Zielknoten benötigt. Diese Bewertung von Knoten wird auch als Heuristik bezeichnet. Mittels dieser Bewertung kann nun bereits vor Erreichen des Zielknotens eine Aussage über die Länge der Route gemacht werden.

### 3.3.1 Grundprinzip

Die Funktionsweise des A\*-Algorithmus kann somit wie folgt als Erweiterung des Dijkstra-Algorithmus beschrieben werden[5]:

- Seien  $s$ ,  $n$  und  $z$  beliebige Knoten des Graphen  $G$ , wobei  $s$  der Startknoten und  $z$  der Zielknoten für die Ermittlung des kürzesten Weges von  $s$  zu  $z$  sind.
  - Sei  $f(n)$  eine Funktion zur Abschätzung der Pfadlänge vom Knoten  $n$  zum Knoten  $z$ .
1. Man markiere  $s$  als „offen“ und berechne  $f(s)$ .
  2. Man wähle denjenigen offenen Knoten  $n$  aus, der den kleinsten Wert für  $f(n)$  besitzt.
  3. Falls  $n = z$ , wird  $n$  als „geschlossen“ markiert und beende den Algorithmus.
  4. Andernfalls markiere man  $n$  als „geschlossen“ und füge alle von  $n$  erreichbaren Knoten  $n'$  zur Liste der offenen Knoten hinzu, die noch nicht als geschlossen markiert wurden und berechne  $f(n')$ . Man springe zurück zu Schritt 2.

Man sieht das somit bei dem A\*-Algorithmus diejenigen Knoten bevorzugt betrachtet werden, die durch die Abschätzungsfunktion als „wahrscheinlicher zum Ziel führend“ bewertet wurden. Somit ist es nur sinnvoll diesen Bewertungsvorgang näher zu betrachten.

### 3.3.2 Abschätzungsfunktion $f(n)$

### 3.3.3 Vergleich verschiedener Heuristiken

### **3.3.4 Darstellung der Funktionsweise**

### **3.3.5 Berechnungsaufwand**

## **3.4 Alternative D\* / D\*-Lite**

[7] [8]



## **Technische Implementierung der Algorithmen**

### **4.1 Kurze Einführung in die Programmiersprache und Programmierumgebung**

#### **4.1.1 Siemens TIA-Portal**

#### **4.1.2 SCL**

#### **4.1.3 Arbeitsweise einer SPS**

### **4.2 Beschreibung der Anlagentopologie**

### **4.3 Implementierung des Dijkstra-Algorithmus**

### **4.4 Implementierung des A\*-Algorithmus**

### **4.5 Einhaltung der Echtzeitbedingung**

[9]

#### **4.5.1 Ausführung bei Systemstart**

#### **4.5.2 Zyklische Ausführung**

## **Besonderheiten der Dynamischen Wegfindung**

### **5.1 Kommunikation**

#### **5.1.1 Interne Kommunikation**

#### **5.1.2 Externe Kommunikation**

### **5.2 Algorithmische Kollisionsvermeidung**

[10]

[11]rausnehmen falls originaltext nicht beschaffbar ist bis dahin

#### **5.2.1 Problem des Zeitlichen Indeterminismus**

[12]

#### **5.2.2 Verhinderung von Deadlock-Situationen**

# 6

## Fazit

**6.1 Aktueller Stand der Anlage**

**6.2 Komplikationen bei der Implementierung**

**6.3 Ausblick über zukünftige Erweiterungen**

7

**Anhang**

# Literaturverzeichnis

- [1] T. Bauerhansl, M. ten Hompel, and B. Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer Vieweg, 2014.
- [2] B. Pottler, "Industrie 4.0 - modell zusammen mit ct." Präsentation Siemens AG, Oct. 2015. Version 3.
- [3] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269–270, 1959.
- [4] M. L. Fredman and R. E. Tarjan, "Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms," in *Proc. 25th Annual Symp. Foundations of Computer Science*, pp. 338–346, Oct. 1984.
- [5] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, "A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths," *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, vol. 4, pp. 100–107, July 1968.
- [6] A. Patel, "Amit's thoughts on pathfinding." <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming/Heuristics.html>, 2016. Abgerufen am 05.08.2016.
- [7] A. Stentz, "Optimal and efficient path planning for partially-known environments," *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Mai 1994.
- [8] S. Koenig and M. Likhachev, "Fast replanning for navigation in unknown terrain," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, pp. 354–363, June 2005.
- [9] B. Cherkassky, A. V. Goldberg, and T. Radzik, "Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation," *Mathematical Programming*, vol. 73, pp. 129–174, May 1993.
- [10] D. Silver, "Cooperative pathfinding," *Association for the Advancement of Artificial Intelligence*, 2005.
- [11] A. Zelinsky, "A mobile robot exploration algorithm," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, pp. 707–717, Dec. 1992.

- [12] M. Erdmann and T. Lozano-Perez, "On multiple moving objects," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 1419–1424, Apr. 1986.