

## **Master-Thesis**

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M. Sc.)

Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes

im Studiengang Praktische Informatik  
der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

## **Schwarmroboter (vorläufiger Arbeitstitel)**

vorgelegt von

Sven Manier

betreut und begutachtet von

Prof. Dr. Markus Esch

Prof. Dr. Martina Lehser

Saarbrücken, 10. 05. 2018



# Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich erkläre hiermit weiterhin, dass die vorgelegte Arbeit zuvor weder von mir noch von einer anderen Person an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Darüber hinaus ist mir bekannt, dass die Unrichtigkeit dieser Erklärung eine Benotung der Arbeit mit der Note „nicht ausreichend“ zur Folge hat und einen Ausschluss von der Erbringung weiterer Prüfungsleistungen zur Folge haben kann.

*Saarbrücken, 10. 05. 2018*

---

Sven Manier



# Zusammenfassung

Lorem Ipsum



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Aufgabenstellung . . . . .	2
1.3	Aufbau der Thesis . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Begrifflichkeiten und Definitionen . . . . .	5
2.2	Selbstorganisation . . . . .	5
2.3	Schwarmverhalten . . . . .	6
2.3.1	Bewegung innerhalb des Schwarms . . . . .	7
2.3.2	Abgrenzung: Abgesprochene Bewegung . . . . .	7
2.3.3	Steuern eines Schwarms . . . . .	8
2.4	Phase Transitions . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Analyse</b>	<b>9</b>
3.1	Problembeschreibung . . . . .	9
3.2	Anforderungen an das System . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>15</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>17</b>





# 1 Einleitung

Diese Thesis wird im Rahmen eines Informatik-Studiengangs mit dem Abschluss eines Master of Science geschrieben. Worum es genau geht und welche Bedingungen ich voraussetze wird im folgenden Kapitel beschrieben.

## 1.1 Motivation

Schaut man in die Natur sieht man sehr häufig, dass sich Tiere in riesigen Gruppen organisieren die sich meist ohne zentralen Koordinator bewegen. Bei Fischeschwärmen handelt jedes Individuum vollkommen autonom und nur anhand dessen was es in seiner (unmittelbaren) Umgebung erkennen kann. Dennoch können komplexe Handlungen wie die Flucht vor einem Räuber oder die gemeinsame Wanderung zu einem neuen Futterort koordiniert werden. In manchen Herden dagegen besteht ein 'Schwarm' aus Untergruppen, welche zwar einen Anführer haben, der die Richtung für seine Gruppe angibt, diese Führer sich jedoch am Rest der Herde orientieren und somit ein Schwarmverhalten entsteht, bei dem die Akteure aus koordinierten Einzelgruppen und nicht aus einzelnen Tieren bestehen. Ebenso wird es bei Vögeln vorgefunden, welche durch ihre Koordination in einer energiesparenden Formation fliegen können. Solch ein Schwarmverhalten hat den großen Vorteil, dass jeder Akteur nur für seine eigene Bewegung verantwortlich ist. Der Denkaufwand verteilt sich auf alle Mitglieder und die, meist langsame, Kommunikation untereinander wird auf ein Minimum reduziert.

Man fing früh an dieses Verhalten zu studieren und es auf Roboter anzuwenden zu wollen. Schwärme von Robotern können in vielerlei Hinsicht eingesetzt werden, darunter Sensornetzwerke die dynamisch einen bestimmten Raum überwachen oder Arbeitsroboter die ohne weiteres Zutun bestimmte Tätigkeiten wie Transport übernehmen. Zentrale Systeme mit Koordinator können dafür allerdings schnell unzulänglich werden. Ein großer Nachteil ist schon dadurch gegeben, dass es diesen einen Koordinator geben muss. Fällt er wegen einem technischen Defekt aus, steht der Schwarm still. Baut man einen Backup-Koordinator hat man einen vielfach erhöhten Aufwand beim Design der Schwarm-Architektur, einen größeren Aufwand in der Kommunikation, da der Backup mit einbezogen werden muss, und letztlich auch einen höheren Preis, weil der rechenstarke Computer gleich mehrmals gebaut werden muss. Auch die Reichweite des zentralen Koordinators kann dem Schwarm schnell zum Verhängnis werden. Hat ein Schwarm beispielsweise die Aufgabe ein Gebiet zu erkunden um später eine Karte aus den Sensordaten zu erstellen, muss der Koordinator entweder stets in Reichweite aller Roboter sein um mit ihnen kommunizieren zu können oder er muss die Kommunikation durch teures Flooding im Kommunikationsnetz aufrecht erhalten. Bei der Koordination von Drohnen kann allein die Erreichbarkeit zu einem sehr realen Problem werden, da der Koordinator aufgrund seiner Rechenleistung ein vielfaches der Arbeiter wiegen wird. Dies führt zu beträchtlich steigenden Kosten für die Motoren und den Akku des Koordinators, beeinflusst aber auch sein Verhalten, da er deutlich träger ist als die anderen. Wer das Bild eines Fischeschwarms vor Augen hat, wird vermutlich auch direkt an die Anzahl der Mitglieder des Schwarms denken müssen. Zentrale Systeme sind nur schwer skalierbar und müssen von Anfang an für die jeweilige Größe konzipiert werden.

## 1 Einleitung

Schwarmverhalten zeichnet sich dadurch aus, dass die einzelnen Mitglieder des Schwarms ihre Bewegung selbst koordinieren. Dabei wird sich entweder nur nach der Bewegung der anderen gerichtet oder es werden sehr lokal Informationen ausgetauscht. Die Rechenleistung wird auf alle Mitglieder gleichmäßig aufgeteilt und jeder ist nur für sich selbst verantwortlich. Durch die lokale Kommunikation stellt die Größe oder Ausbreitung des Schwarms kein Hindernis dar, da ein Roboter nur Verbindung zu seinen nächsten Nachbarn braucht und auch auf teures Flooding verzichtet werden kann. Die Größenordnung des Schwarms spielt dabei auch eine untergeordnete Rolle, da ein Roboter aufgrund des lokalen Informationsaustauschs ohnehin nur wenige Kommunikationspartner hat. Ebenfalls ist solch ein Schwarm ausfallsicherer da eine ausgefallene Einheit (egal welche) letztlich nur sich selbst stoppt.

### 1.2 Aufgabenstellung

In dieser Thesis befasse ich mich mit der Thematik einen Roboterschwarm dafür nutzen zu können Transportaufträge zu bearbeiten. Ein Auftrag wird an beliebig viele Roboter eines Schwarms verteilt, woraufhin diese selbstständig eine Untergruppe bilden, die für die Ausführung des Auftrages zuständig ist. Da die zu transportierenden Objekte beliebiger Größe und Form sein können, gilt es unter Umständen eine Formation zu bilden und diese bis zum Ende des Auftrags einzuhalten. Dabei gilt es Kollisionen mit anderen Objekten zu vermeiden und selbstständig navigieren zu können. Eine eventuell benötigte Karte ist zunächst voreingestellt, wird im späteren Verlauf aber, von bereits im System der Roboter vorhandenen Funktionen, selbstständig erstellt werden.

Hauptgegenstand dieser Thesis ist die Erarbeitung des Konzepts und die Umsetzung der Koordination bzw. des Verhaltens der Roboter als Algorithmus, sodass dieser produktiv eingesetzt werden kann. Eine Implementierung findet prototypisch auf den Robotern selbst oder einer Simulation dieser statt und dient vor allem dazu, festzustellen ob die theoretischen Überlegungen auch in der Praxis angewendet werden können.

### Rahmenbedingungen

Ich gehe bei dieser Arbeit davon aus, dass der Roboterschwarm aus AGVs (Autonomous Guided Vehicles) besteht, welche aktuell an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes entwickelt werden. Diese Roboter bieten bereits eine Vielzahl an Technik und (Software-)Funktionen, welche alle uneingeschränkt genutzt werden können. Die AGVs und ihre Fähigkeiten werden in einem späteren Kapitel genauer vorgestellt.

ja?

Ebenfalls gehe ich davon aus, dass der Transportauftrag nicht erst verteilt werden muss. Beim Start des Systems wissen die jeweiligen Roboter bereits von ihrem Auftrag und müssen allenfalls noch ihre Gruppe selbstständig zusammenfinden.

### 1.3 Aufbau der Thesis

Zunächst werde ich im Kapitel Grundlagen und Hintergründe auf notwendige Grundlagen zum Thema Schwarmverhalten eingehen. Darunter verschiedene Definitionen, Abgrenzungen und Einstiege in für Schwarmverhalten wichtige Themen. Danach folgt eine Analyse der Aufgabenstellung im Detail. Es wird darauf eingegangen welche Probleme sich bei der Aufgabenstellung auftun und die es zu lösen gilt und welche Fähigkeiten bei den Robotern genau gefordert werden. Im darauf folgenden Kapitel wird bereits vorhandene Forschung zum Thema Schwarmverhalten untersucht. Diese Forschung wird

sich nicht ausschließlich um den Bereich der Roboter-Technik drehen, zumal es für das behandelte Thema noch keine ausreichende Literatur gibt. Die Forschung wird darauf geprüft, welche Themenbereiche meiner Thesis bereits abgedeckt werden und welche noch offen sind. Als nächstes folgen die Kapitel der Konzeption und der Implementierung. In diesen wird das Konzept für die Roboter zunächst theoretisch, dann praktisch entwickelt werden wird. Erkenntnisse aus der prototypischen Entwicklung werden wieder zurück in das Konzept fließen und es verbessern. Am Ende der Thesis findet eine Evaluation der erreichten Ziele statt und, sollten einige nicht erreicht worden sein, eine Erläuterung woran es gelegen hat. Außerdem wird es einen Überblick darüber geben, was mit mehr Zeit und Ressourcen noch hätte erreicht werden können, bzw. wo man Ansetzen könnte um die Entwicklung weiterzuführen.



## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden einige grundlegende Begriffe erklärt und voneinander abgegrenzt, welche für das Verständnis dieser Thesis wichtig sind und sonst für Verwirrung sorgen könnten.

### 2.1 Begrifflichkeiten und Definitionen

Im Verlauf der Thesis werden einige Begriffe immer wieder verwendet werden die eine feste Definition innerhalb dieser Thesis haben und nicht verwechselt oder missverstanden werden sollten. Solche Begriffe werden im folgenden Abschnitt definiert.

**Nachbarschaft** Die Nachbarschaft einer Einheit ist definiert durch einen Kreis mit fixem Radius um die Einheit herum. Andere Einheiten die sich, bezogen auf ihre Position, innerhalb dieses Kreises befinden sind Teil der Nachbarschaft dieser Einheit, Einheiten außerhalb nicht.

**Aufnahmeort** Der Aufnahmeort ist der Ort an dem die Roboter die zu transportierende Ware aufnehmen.

**Abgabeort** Der Abgabeort ist der Ort an dem die Roboter die zu transportierende Ware abgeben.

**Einheit** Wenn von der Einheit gesprochen wird, ist damit ein einzelnes Mitglied des Schwarms gemeint.

### 2.2 Selbstorganisation

Als Selbstorganisation bezeichnet man Prozesse, bei denen aus einer ungeordneten Menge mit Hilfe von lokaler Kommunikation ein global geordnetes System entsteht. Es entsteht oft durch zufälliges Verhalten, welches positives Feedback bekommt. In der Robotik versteht man unter Selbstorganisation Gruppen von Systemen die eigenständig, ohne zentralen Anführer arbeiten können.

#### Zentrale Systeme

Normale Systeme sind heterogen aufgebaut. Zentralisierte Systeme mit Robotern bestehen grundsätzlich aus einer zentralen Einheit, welche als das Rechenzentrum dient und mehreren Robotern die die Arbeiter darstellen. In der Praxis kommen schließlich noch viele weitere Systeme hinzu die unter Anderem der Ausfallsicherheit und Informationsaufzeichnung dienen. Die zentrale Einheit bekommt von den Arbeitern Informationen wie Sensorwerte zu gesendet, die zentrale Einheit berechnet daraufhin das weitere vorgehen und die Aktionen für die einzelnen Arbeiter und sendet sie diesen schließlich zu. Solche

zentralisierten Systeme sind wenig skalierbar und sehr kompliziert in der Implementierung, da die additionalen Systeme eingebunden werden müssen. Auch die Komplexität der Nachrichten innerhalb des Netzwerks nimmt zu, da letztlich nicht nur von/zur zentralen Einheit kommuniziert werden muss, sondern auch die Kommunikation zu Backup, Datenbanken und anderen Hilffsystemen integriert und ausgeführt werden muss.

### Selbstorganisierte Systeme

Systeme mit Selbstorganisation sind homogen aufgebaut. Jede Einheit ist für sich selbst verantwortlich und muss, gegeben der Abwesenheit der zentralen Steuereinheit, gezwungenermaßen selbst entscheiden was sie zu tun hat. Durch den homogenen Aufbau und die fehlenden Hilffsysteme gibt es keinen Grund für unterschiedliche Programme/Algorithmen welche aufeinander abgestimmt werden müssen, sondern man braucht nur ein einziges Programm, welches auf jedem Roboter gleichermaßen eingespielt wird und sich nur durch den darunterliegenden Hardware-Layer und einer einzigartigen Identifizierung von den andere unterscheidet. Entscheidungen werden entweder für sich selbst oder in Gruppen mithilfe verteilter Algorithmen getroffen. Innerhalb von Abstimmungen oder kleinerer Tätigkeiten kann es zur Bildung von Hierarchien und der Erstellung von Anführern kommen, diese Konstrukte sind aber meist wieder verworfen, sobald die entsprechende Abstimmung oder auszuführende Tätigkeit erledigt wurde. Dadurch dass jede Einheit für sich selbst rechnet und keine permanente Kommunikation zu einer zentralen Stelle notwendig ist, lassen sich homogene Gruppen besser skalieren, wenn auch die Algorithmen für die Kommunikation insgesamt aufwendiger sind.

## 2.3 Schwarmverhalten

Bei Schwarmverhalten geht es darum, dass sich eine Gruppe von (meist homogenen) Einheiten ohne zentrale Kontrolle gemeinsam organisiert und eine geordnete Bewegung entsteht.

**Die 4 Regeln** Schwarmverhalten lässt sich grob auf 4 Regeln zurückführen:

1. Zusammenhang: Versuche deinen Nachbarn nahe zu sein
2. Ausrichtung: Passe deine Bewegungsrichtung deinen Nachbarn an
3. Abschottung: Vermeide Kollisionen mit deinen Nachbarn
4. Flucht: Fliehe vor Dingen, die eine potentielle Gefahr darstellen
5. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00354-007-0009-5>

Die Grundprinzipien von Schwarmverhalten lassen sich ohne jegliche Kommunikation umsetzen. Sie lassen sich durch reine Beobachtung der Nachbarschaft und entsprechender Reaktion auf das Verhalten der Nachbarn durchsetzen. Verfügen die Einheiten nicht über die notwendige Sensorik um die Nachbarschaft beobachten zu können, lässt sich dies aber durch entsprechende Kommunikation der eignen Werte ausgleichen.

Kommunikation innerhalb eines Schwarm findet, wenn überhaupt, nur mit der Nachbarschaft statt. Experimente mit Drohnen innerhalb eines Vogelschwarms zeigten, dass die Reichweite der Kommunikation recht gering ist und der Informationsfluss mit der Entfernung überproportional abnimmt. Das bedeutet, Informationen werden nie vollständig

weitergeben, was dazu führt dass der Fluss letztlich zum Erliegen kommt und eine Information somit nur lokal verfügbar ist. <https://academic.oup.com/beheco/article/22/6/1304/220324>

Wer sich die 4 Regeln anschaut wird auch bemerken, dass es keine Regel gibt die einen Roboter normal dazu veranlassen würde still zu stehen. Ein Stillstand im Schwarm ist daher immer auf besondere Bedingungen (zum Beispiel fehlender Platz für Bewegung) oder Fehler im System zurückzuführen. Ein Schwarm der wartet, ist gut vergleichbar mit dem Rauschen bei älteren Fernsehern, bei dem überall zwar Bewegung zu erkennen ist, aber keine die in eine bestimmte Richtung führt. Der Schwarm steht also als Gesamteinheit still, die einzelnen Einheiten bewegen sich aber weiterhin kontinuierlich.

### 2.3.1 Bewegung innerhalb des Schwarms

Schwarmverhalten zeichnet sich dadurch aus, dass sich der Schwarm eher passiv bewegt. Beim Vicsek Modell (<http://sci-hub.tw/https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.75.1226>) zum Beispiel entsteht eine koordinierte Bewegung durch Wiederholung drei simpler Schritte:

1. Berechne die durchschnittliche Ausrichtung innerhalb deiner Nachbarschaft
2. Passe deine Ausrichtung der berechneten Ausrichtung an (+ Zufallsfaktor bestimmter Größe)
3. Bewege dich um x Einheiten nach vorne

Nach einigen Iterationen dieser drei Schritte stellt sich eine kollektive Bewegung ein und der gesamte Schwarm bewegt sich in die selbe Richtung.

#### 2.3.1.1 Auswirkungen von Rauschen

**Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.**

### 2.3.2 Abgrenzung: Abgesprochene Bewegung

In der kollektiven Bewegung mit zentraler Steuereinheit berechnet diese die Positionen der einzelnen Arbeiter und teilt ihnen mit wie sie sich in der nächsten Iteration auszurichten haben. Dadurch ist es leicht möglich eine Gruppe von Einheiten in eine gewollte Richtung zu lenken und die einzelnen Einheiten sowie die gesamte Gruppe dadurch zu steuern. Solch eine 'abgesprochene Bewegung' lässt sich auch dezentral realisieren. Die einzelnen Mitglieder des Schwarms können ihre Daten den anderen mitteilen und in gemeinsamen Absprachen abstimmen, wohin sich der Schwarm bewegen soll und sich dementsprechend ausrichten. Diese Absprachen erfordern viel Kommunikation und richten sich entgegen typischem Schwarmverhalten.

Im typischen Schwarmverhalten ist die Bewegung, vor allem die Ausrichtung der Bewegung, etwas dass sich, wie in Vicseks Modell, passiv durch Beobachtung der Nachbarschaft automatisch synchronisiert. Es gibt keinerlei Absprachen innerhalb des Schwarms wohin sich einzelne Einheiten bewegen sollen oder wohin es mit dem Schwarm im gesamten gehen soll. Entsprechend ist es schwer einen Schwarm in eine bestimmte Richtung zu steuern, da man den einzelnen Einheiten nicht einfach mitteilen kann wohin sie sich ausrichten sollen.

#### **QUELLEN**

### 2.3.3 Steuern eines Schwarms

<https://hal.elte.hu/flocking/browser/trunk/public/references/vasarhelyi/Tarcai2011.pdf?format=raw>

Möchte man einen Schwarm dazu bringen sich in eine bestimmte Richtung zu bewegen, darf man es ihm nicht kommunizieren, da es das Paradigma des Schwarmverhaltens brechen würde. Um dieses Ziel zu erreichen muss man ihn passiv beeinflussen und ihn dazu bringen seine Ausrichtung selbständig in die gewollte Richtung zu ändern.

#### Anführer innerhalb eines Schwarms

Eine populäre Möglichkeit einen Schwarm zu lenken ohne direkt mit ihm zu kommunizieren ist der Einsatz von Anführern ('Leader'). Diese Anführer wissen wo der Schwarm sich hinbewegen soll oder haben einen Auftrag und bewegen sich entsprechend diesem. Im Laufe der Iterationen richten sich die Einheiten immer am Durchschnitt der Nachbarschaft aus, wobei die Anführer eben dies nicht tun, sondern sich entsprechend der Aufträge ausrichten. Dadurch bildet ihre Ausrichtung eine Art Konstante innerhalb des Schwarm die sich nicht relativ zu den anderen verändert. Der Schwarm nimmt dadurch allmählich die Ausrichtung dieser Konstanten an und er bewegt sich in die Richtung die von dem Anführer (auch mehrere sind möglich) vorgegeben wird. Mit Hilfe der Technik dieser Anführer, lässt sich der Schwarm letztlich steuern ohne dass das Paradigma des Schwarmverhaltens gebrochen werden muss.

#### Stigmergie

<https://web.archive.org/web/20131104125931/http://www.eecs.harvard.edu/rad/courses/cs266/papers/alife94.pdf>

Eine besondere Form des passiven Nachrichtenaustauschs innerhalb eines Schwarm ist Stigmergie. Stigmergie beruht auf passiven Nachrichten die von Einheiten in der Umgebung platziert und von anderen Einheiten wahrgenommen werden. Ein Beispiel von Stigmergie findet man im Tierreich bei Termiten. Diese rollen ihre Schlamm-Kugeln zusammen, platzieren eine Pheromon-Spur oben drauf und lassen sie anschließend zunächst zufällig irgendwo in der Umgebung liegen. Termiten mögen die Pheromone von anderen Termiten sehr und sind gewillt ihre Kugeln auf denen von anderen zu platzieren, wenn diese sich nicht zu weit entfernt befinden. Je mehr Kugeln sich auf einem Haufen befinden, desto attraktiver ist dieser Haufen dafür die nächste Kugel darauf zu platzieren. Auf diese Weise bilden sich die bekannten Termiten-Hügel die wie Spitzen aus dem Boden ragen.

Diese Methode lässt sich auch auf Roboter übertragen. <https://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1> So gab es bereits erfolgreiche Experimente in denen ein Schwarm von Robotern durch Stigmergie dazu gebracht wurde einen Haufen von Frisbees zu sortieren. Dieses Verhalten ist von Ameisen als "brood sorting" bekannt und verzichtet bei der Arbeit vollkommen auf direkte Kommunikation. Die einzelnen Einheiten reagieren dabei nur auf das Umfeld, welches von anderen Einheiten stetig verändert wird und bilden so nach und nach die Frisbee-Haufen mit der entsprechenden Farbe, ohne sich untereinander abzusprechen zu müssen.

## 2.4 Phase Transitions



## 3 Analyse

Im folgenden Kapitel wird es eine Analyse der Aufgabenstellung geben, darunter die Analyse der Probleme die mit der Aufgabenstellung einher gehen und die Anforderungen des späteren Systems.

**Problembeschreibung, potentielle Lösungswege, Entscheidungen wieso welcher Weg gegangen wird, wieso die anderen nicht etc**

**Analyse des Themenbereichs bzw der bestehenden Probleme und Ermittlung der Anforderungen gemäß passender Methoden**

### 3.1 Problembeschreibung

Laut Aufgabenbeschreibung (Abschnitt 1.2) ist das Ziel dieser Thesis, mit Hilfe von Einheiten, die im Schwarm agieren, Transportaufträge zu verrichten. Als Einschränkung war gegeben, dass die Einheiten nicht erst den Auftrag verteilen müssen, sondern die entsprechenden Einheiten ihn bereits haben und die Verteilung des Auftrags, bzw. die Auswahl der geeignetsten Einheiten somit bereits abgeschlossen ist.

Die nachfolgenden Abschnitte bilden den Verlauf des typischen Transports ab und zeigen die verschiedenen Herausforderungen die es dabei zu bewältigen gibt und die Probleme die dabei auftreten können.

#### Allgemeine Probleme

In diesem Abschnitt sind die Probleme aufgelistet, die generell in jeder Phase des Transports auftreten können.

#### Erlaubtes Gelände

Generell ist immer darauf zu achten, dass es Gebiete gibt in denen der Schwarm sich bewegen darf und solche, zu denen er keinen Zutritt hat. Dabei geht es nicht unbedingt darum gefährliche Orte, und damit Beschädigung, zu vermeiden, sondern auch darum dass er nicht überall erwünscht ist. Lässt man den Schwarm Transportaufträge innerhalb eines offenen Geländes erfüllen, besteht die Möglichkeit dass er es auf der Suche nach dem kürzesten Weg kurzerhand verlässt und damit auch Eigentumsgrenzen. Andererseits kann es aber auch Orte geben die beispielsweise besonders sauber bleiben sollten und in denen die Einheiten mit ihren (eventuell) dreckigen Rädern nicht erwünscht ist. Idealerweise lassen sich solche Bereiche dynamisch in die Gebietskarte einzeichnen oder vor Ort markieren, sodass auch auf Gebiete geachtet werden kann die erst kürzlich zu einer Gefahrenzone wurden, wie Beispielsweise eine ausgelaufene Flüssigkeit.

#### **Gruppe finden**

Die neue Gruppe die für den Auftrag zuständig ist muss sich selbst finden. Die Vergabe des Auftrags schließt nicht mit ein den Einheiten Erklärungen mitzugeben wie sich zu arbeiten haben, sondern lediglich die Daten für den Auftrag, darunter wie die Ware aussieht, wo sich der Aufnahmeort befindet und wo der Abgabeort. Nachdem eine Einheit also festgestellt hat dass er einen neuen Auftrag besitzt, müssen die anderen Gruppenmitglieder innerhalb des Netzwerks gefunden werden um direkt und später Informationen untereinander auszutauschen.

#### **Standby im Schwarm**

Ohne Auftrag gehen die Einheiten ihrem typischen Schwarmverhalten nach. Praktisch heißt das, dass sie sich bewegen und dabei die 4 Regeln von Schwarmverhalten (Abschnitt 2.3) beachten. Die ständige Bewegung mag aus energietechnischer Sicht nicht die optimale Lösung darstellen, da ein Schwarm selbst aber nie still steht, bildet sie aus Sicht eines Schwarms letztlich die Standard-Lösung für 'warten'. Wie in Abschnitt 2.3.1.1 beschrieben, spielt das Rauschen bei der Bewegung eines Schwarm einen wichtigen Faktor. Ist der Schwarm im Standby, hat also keinen Auftrag, muss der Faktor des Rauschens so gewählt werden, dass die einzelnen Einheiten des Schwarm zwar noch in Bewegung bleiben, der Schwarm als großes ganzes aber keine Bewegung zu erkennen gibt und augenscheinlich auf der Stelle steht.

#### **Dichte des Schwarms**

Da sich der Schwarm auf einem Gelände, wahrscheinlich sogar innerhalb eines Gebäudes oder einer Fabrikhalle, befinden wird, muss auch darauf geachtet werden, dass der Schwarm während des Wartens kein Hindernis für andere Beschäftigte oder Fahrzeuge darstellt. Er sollte im Hintergrund verschwinden und kein aktiver Teil der Umgebung werden auf den im besonderen Maße geachtet werden muss. Der Schwarm sollte sich daher nirgendwo (partiell) örtlich zusammenballen, sondern, wenn man ihn sich als einen Festkörper vorstellt, seine Dichte so gering wie möglich werden lassen, indem er sich auf dem (ihm erlaubten) Gelände so gut es geht ausbreitet.

#### **Bildung der Untergruppe**

Es muss beachtet werden, dass die neue Untergruppe nach wie vor Teil des großen Schwarms ist und alle Regeln des großen Schwarms erbt, aber auch neue dazu bekommt. Die neuen Regeln sorgen dafür, dass der Auftrag ausgeführt werden kann, dürfen sich aber nicht mit den 4 Hauptregeln (siehe Abschnitt 2.3) stören.

#### **Zusammenfinden am Aufnahmeort**

Nachdem die Einheiten ihren Auftrag erhalten haben, gilt es sich am Aufnahmeort zusammenzufinden. Die Einheiten waren gerade noch in Standby ein Teil des Schwarms und müssen ab sofort eine Untergruppe innerhalb des Schwarms bilden die für den Auftrag zuständig ist.

Als Untergruppe müssen sie sich dann am Aufnahmeort zusammenfinden. Das Problem in dieser Situation ist, dass die Untergruppe nach wie vor als Schwarm agieren muss. In Abschnitt 2.3.2 wurde bereits erläutert, dass Schwarmverhalten nicht mit 'Abgesprochener Bewegung' verwechselt werden darf und Einheiten innerhalb eines Schwarms

sich nicht aktiv darüber absprechen, welche Einheit sich wohin bewegen soll. Das bedeutet, dass die Untergruppe sich ausschließlich durch passive Beeinflussung und die Informationen des gegebenen Auftrags gemeinsam am Aufnahmeort zusammenfinden muss. Natürlich darf dabei aber nicht davon ausgegangen werden, dass die Gruppe die den Auftrag erhält auch eine erkennbare Gruppe war und die Einheiten daraus örtlich nahe zusammen waren, sondern es muss davon ausgegangen werden dass die Einheiten zufällig ausgewählt werden können.

#### **Einnehmen einer Formation**

Damit die Ware sicher gelagert ist, muss die Untergruppe eine Formation einnehmen, die für den Transport der Ware geeignet ist. Beispiele für solche Formationen wären z.B. ein Viereck, wenn eine große viereckige Kiste transportiert werden muss oder eine Linie, sollte ein Stahlträger transportiert werden müssen. Wichtig für die Formation ist jedoch nicht nur die Form der Ware, sondern auch die Anzahl der Einheiten die für den Transport zugeteilt wurden. So macht es bei einer Kiste für vier Einheiten am meisten Sinn, wenn sich die Einheiten an den vier Ecken/Kanten verteilen. Eine fünfte Einheiten würde zunächst in der Mitte am meisten Sinn machen, wohingegen es bei sechs Einheiten wieder mehr Sinn machen würde, wenn der Einheiten aus der Mitte zu einer Ecke/Kante wandert die noch nicht belegt ist und der sechste dann gegenüber.

Das Einnehmen einer Formation ist für einen Schwarm eine besondere Herausforderung, weil Schwarmverhalten sich eben signifikant von abgesprochener Bewegung (siehe Abschnitt 2.3.2) unterscheidet. Ein schneller erster Gedanke wie Einheiten eine Formation einnehmen, wäre die Kontur der Ware zu zeichnen und die Einheiten an den signifikanten Stellen, möglichst symmetrisch, zu verteilen. Für solch eine Koordination braucht es aber letztlich auch einen Koordinator. Einen Koordinator zu wählen, wäre für die Untergruppe grundsätzlich kein Problem, ein einfacher Echo-Algorithmus wäre vollkommen ausreichend, jedoch gilt es abgesprochene Bewegung von Schwarmverhalten abzugrenzen. Es muss für dieses Problem also ein Algorithmus gefunden werden, mit dessen Hilfe sich ein Schwarm in eine bestimmte Formation bringen lässt, ohne dass es einen Koordinator gibt der den einzelnen Einheiten mitteilt wo sie sich hinbewegen müssen. Grundlage für diese Formation muss ein simpler Austausch von Informationen sein, darunter vor allem die Größe der Gruppe.

#### **Stillstand am Aufnahmeort**

Am Aufnahmeort angekommen, müssen die Einheiten still stehen bleiben. Der Grund dafür ist, dass es eine gewisse Zeit dauert bis ein Mitarbeiter oder eine andere Maschine die zu transportierende Ware auf die Einheiten verladen hat. In dieser Zeit darf die Untergruppe nicht in den typischen Standby des großen Schwarms verfallen, denn dabei würden sich die Einheiten leicht bewegen und das verladen schwierig machen. Statt dessen müssen sie eher in eine Art Starre verfallen bis ein bestimmtes Ereignis eintritt, welches ihnen signalisiert dass die Ware vollständig verladen wurde und sie ihren Weg antreten können.

#### **Gemeinsamer Transport zum Abgabeort**

Nachdem die Ware erfolgreich auf die Einheiten verladen wurde gilt es nun diese an ihren Abgabeort zu transportieren und den Transportauftrag dadurch zu beenden.

#### Halten der Formation

Wichtig beim Transport der Ware ist, dass die Formation möglichst genau beibehalten werden muss. Ein abdriften der Formation könnte schnell dazu führen, dass die zu transportierende Ware herunterfällt und beschädigt wird oder dabei andere Gegenstände, insbesondere die Einheiten selbst, beschädigt werden. Ebenso ist eine Beschädigung der Einheiten oder der Ware möglich, wenn die Ware rutschfest auf den Einheiten liegt oder gar festgeschraubt wurde. In diesem Fall könnte das verlassen der Formation dazu führen, dass die Einheiten versuchen in eine Richtung zu fahren, aber von der Befestigung daran gehindert werden. Die Ware oder die Einheiten könnten durch die Zugkräfte beschädigt werden, insbesondere könnten die Einheiten umfallen oder die Motoren die für den Antrieb zuständig sind überhitzen und die Einheit ausfallen lassen.

Wieder ist darauf zu achten, dass die Formation ohne Koordinator eingehalten werden muss, allein durch Regeln die der Untergruppe als Schwarm allgemein inne herrschen. Die gleichen Algorithmen die dazu führten dass die Untergruppe am Aufnahmeort ihre Formation einnahm müssen nun dazu verwendet werden um die Formation während des Transports zu halten.

#### Finden des Weges

**TODO**

#### Standby am Abgabeort

Am Abgabeort angekommen muss die Untergruppe wieder zum Stillstand kommen und solange in einer Art Starre verharren bis die Ware vollständig umgeladen wurde. Die Starre muss erneut anhalten bis ein bestimmtes Event eintritt.

Anschließend muss die Untergruppe wieder in den Schwarm eingegliedert werden. Das heißt, die neuen Regeln die für die Erfüllung des Auftrags notwendig waren fallen nun weg und es werden wieder die Regeln des großen Schwarms übernommen, wie zum Beispiel das Verteilen um anderen Arbeitern nicht im Weg zu stehen.

## 3.2 Anforderungen an das System

Nachdem im vorigen Abschnitt Herausforderungen anhand des generellen Verhaltens der Einheiten dargestellt wurden, wird nun auf die Anforderungen des Systems selbst eingegangen.

#### Unabhängigkeit

Die einzelnen Einheiten des Schwarms oder der Untergruppen die gerade einen Auftrag erledigen müssen vollständig unabhängig agieren und dürfen nicht aktiv von einer anderen Einheit geleitet werden. Dies betrifft auch eventuelle Anführer die innerhalb der Untergruppen gewählt werden. Diese mögen zwar eine Sonderrolle einnehmen, dürfen den anderen Einheiten der Untergruppe aber nur passiv beeinflussen und ihnen nicht explizit mitteilen wo sie sich hinzubewegen haben.

#### Ausfallsicherheit

Einer der besonderen Vorteile des Schwarms ist es, dass die Einheiten generell unabhängig agieren und nicht auf die Kommunikation mit anderen Einheiten angewiesen sind. Dar-

aus resultiert dass ausgefallene Einheiten kein generelles Problem für den Schwarm sind. Betrachtet man einen Schwarm im allgemeinen, so ist eine ausgefallene Einheit vergleichbar mit einem Stein der herumliegt; er kommuniziert nicht und er bewegt sich auch nicht mehr. Er spielt also im Schwarm keine große Rolle mehr und dieser kann ungehindert weiter agieren, nur eben mit einer Einheit weniger.

Im besonderen Fall des Auftrags sind die Einheiten allerdings im gewissen Maße abhängig voneinander. Gerade wenn es um die Bildung der Formation geht, spielt die Größe der Untergruppe eine wichtige Rolle, da sie mitunter bestimmt wo sich die einzelnen Einheiten aufzuhalten haben. Sollen 2 Einheiten eine Stange bewegen und eine fällt unterwegs aus, fällt die Ware aufgrund des fehlenden Gleichgewichts zu Boden. Es muss daher darauf geachtet werden, dass die Untergruppe in ständigem Kontakt untereinander steht um sicherzugehen dass alle Einheiten nach wie vor aktiv und einsatzbereit sind. Fällt plötzlich eine Einheit aus, muss darauf reagiert werden indem die Formation entsprechend angepasst wird oder der Auftrag abgebrochen und eine Fehlernachricht an ein zuständiges System gesendet wird.

### Örtlichkeit

Ein Schwarm zeichnet sich nicht nur dadurch aus, dass die Einheiten unabhängig voneinander sind, sondern auch dadurch, dass Nachrichten zur Kommunikation nicht den gesamten Schwarm belasten. Sendet eine Einheit eine Nachricht an seine Nachbarschaft (siehe Abschnitt 2.1) aus, so darf diese nicht den gesamten Schwarm durchqueren, sondern muss mit der Zeit 'kleiner' werden und letztlich verschwinden. Dies hat nicht nur den Grund näher am Vorbild der Natur zu sein **QUELLE** sondern ist auch deshalb notwendig, da die Nachrichten von mehreren hundert Einheiten sonst das Netzwerk lahmlegen würden und die Einheiten nur noch damit beschäftigt wären die Nachrichten zu verarbeiten und weiterzuleiten. Die Ressourcen für die eigentliche Aufgaben würden fehlen und der Schwarm würde still stehen.



## 4 Ergebnisse

Lorem Ipsum





# Abkürzungsverzeichnis



# Anhang



## Kolophon

Dieses Dokument wurde mit der L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Vorlage für Abschlussarbeiten an der htw saar im Bereich Informatik/Mechatronik-Sensortechnik erstellt (Version 1.0). Die Vorlage wurde von Yves Hary und André Miede entwickelt (mit freundlicher Unterstützung von Thomas Kretschmer, Helmut G. Folz und Martina Lehser). Daten: (F)10.95 – (B)426.79135pt – (H)688.5567pt