

Schwarmverhalten und Schwarmintelligenz mit mobilen Robotern

Studienarbeit

(T3_3201 in der 5. und 6. Theoriephase)

des Studienganges Informationstechnik

an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg, Karlsruhe

Ersteller:	Katharina-Maria Heer, André Harbrecht
Datum:	13.02.2018
Abgabedatum:	14.05.2018
Abgabeort:	Dualen Hochschule Baden-Württemberg, Karlsruhe
Matrikelnummer:	
Kursbezeichnung DHBW:	TINF15B3
Betreuer:	Prof. Hans-Jörg Haubner
Gutachter der Studienakademie:	Prof. Dr. Jürgen Vollmer

Erklärung

(gemäß §5(3) der „Studien- und Prüfungsordnung DHBW Technik“ vom 29.09.2015)

Ich versichere hiermit, dass ich meine Studienarbeit mit dem Titel

Schwarmverhalten und Schwarmintelligenz mit mobilen Robotern

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Ort, Datum

Unterschrift Studierende/r

Ort, Datum

Unterschrift Studierende/r

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	2
Darstellungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Quellcodeverzeichnis	7
1. Einleitung	8
2. Schwarmverhalten	8
2.1 Schwarmverhalten in der Tierwelt	13
2.1.1 Ameisen.....	13
2.1.2 Bienen	15
2.1.3 Fische.....	15
2.2 Schwarmverhalten in der Technik	18
2.2.1 Ant Colony Optimisation	19
2.2.2 Particle Swarm Optimisation	19
2.2.3 Artificial Bee Colony.....	19
2.2.4 Firefly Algorithm.....	19
2.2.5 Monkey Search.....	19
2.2.6 Roach Infestation Optimisation	19
2.2.7 Jumping Frogs Optimasition	19
2.2.12 MARS Project	20
2.2.13 s-bots.....	20
3. Schwarmintelligenz	20
4. Lego Mindstorms	24
5. Grundfunktionen der Roboter.....	30
5.1 Ausweichen	33
5.1.1 mit einem Roboter.....	33
5.1.2 im Schwarm.....	33
5.2 Suchen	33
5.3 Folgen.....	33

6. Schwarmverhalten der Roboter.....	33
7. Schwarmintelligenz der Roboter	34
8. Reflexion.....	34
Literaturverzeichnis	35
Anhang	39
A1. Versuch von Dirk Helbing und dessen Ergebnisse.....	39
A2. Aufsetzen von LeJOS	41

Darstellungsverzeichnis

Abbildung 1: Kohäsion	9
Abbildung 2: Separation	9
Abbildung 3: Alignment	10
Abbildung 4: Wegfindung bei Ameisen (Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Ameisenalgorithmus)	13
Abbildung 5: Wegfindung bei Ameisen.....	14
Abbildung 6: Richtungswechsel des gesamten Schwarms	17
Abbildung 7: Lego NXT (Quelle: Schmidt,D./Berns,K., Programmierung mit Lego Mindstorms NXT:Robotersysteme, Entwurfsmethodik, Algorithmen, Springer Verlag,2010, S.42)	24
Abbildung 8: Servomotor des NXT (Quelle: https://sh-s7-live- s.legocdn.com/is/image/LEGO/45502?\$main\$	25
Abbildung 9: Tastsensor des NXT (Quelle: Schmidt,D. /Berns,K., Programmierung mit Lego Mindstorms NXT:Robotersysteme,Entwurfsmethodik,Algorithmen,Springer Verlag,2010, S.50)	26
Abbildung 10: Farbsensor des NXT (Quelle: http://cdn1.preisroboter.de/detail/6ee2f8557b18c986f5261afd397de763)	27
Abbildung 11: Geräuschsensor des NXT (Quelle: https://images-na.ssl-images- amazon.com/images/I/41TXaSTzUkL.jpg)	27
Abbildung 12: NXT grafische Entwicklungsumgebung	28
Abbildung 13: Priorisierte Behaviours	33

Tabellenverzeichnis

Es konnten keine Einträge für ein Abbildungsverzeichnis gefunden werden.

Quellcodeverzeichnis

Quellcode 1: takeControl	31
Quellcode 2: action.....	31
Quellcode 3: supress.....	31
Quellcode 4: Arbitrator	32

1. Einleitung

2. Schwarmverhalten

Ein Schwarm bezeichnet eine große Menge an Tieren, die der gleichen Tierart angehören. Viele Tiere, wie z.B. Bienen oder Ameisen können nur durch ihre gemeinsame Lebensweise im Schwarm überleben und so Aufgaben und Herausforderungen bewältigen, zu denen die Tiere einzeln nicht in der Lage wären.

Das Schwarmverhalten bedeutet, dass sich Tiere Zusammenschließen. Dieses Verhalten beruht allerdings nicht auf soziale Bedürfnisse des Individuums, sondern eher auf dessen Instinkt. Das Bilden eines Schwarms hilft den Individuen, sich vor größeren Fressfeinden zu schützen, da hier der Feind durch stetige Wachsamkeit schneller erkannt und durch die Größe des Schwarms eventuell abgeschreckt werden kann. Des Weiteren kann so, wie bei den Bienen, die Nahrungssuche und deren Beschaffung effizienter gestaltet und ausgeführt werden. Auch eine verbesserte Anpassung an die Umwelt wird durch die Bildung eines Schwarms erreicht.¹

Für den Außenstehenden wirkt ein Schwarm sehr ungeordnet und unübersichtlich, dabei gibt es drei Grundverhaltensregeln der Individuen damit sich der Scharm ein Einheit und nicht als Chaos fortbewegen kann:

- Kohäsion:

Ein Individuum bewegt sich immer in Richtung Zentrum des Schwarms, sprich zur durchschnittlichen Position. Diese Position wird jedoch nur von den in unmittelbarer Nähe befindlichen Nachbarn eines Individuums ermittelt.² So schwim-

¹ Vgl. Spektrum Akademischer Verlag (2001).

² Vgl. Sedlacek, Klaus-Dieter (2010), S.110.

men z.B. Heringe nicht einfach in die Schwarmmitte, sondern in die Mitte ihrer Nachbarn.

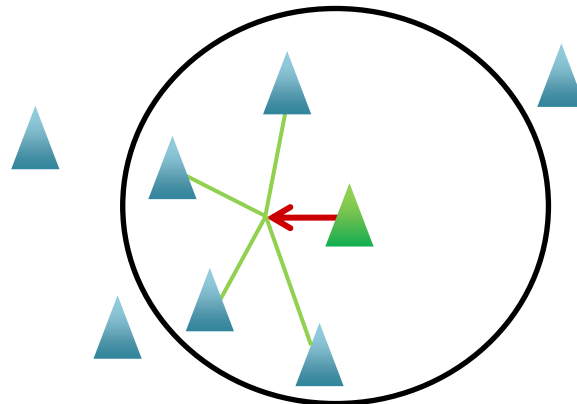


Abbildung 1: Kohäsion

- Separation:

Damit durch die Kohäsion Zusammenstöße der Individuen vermieden werden kann, besagt die Separation, dass die Individuen untereinander Abstand halten und gegebenenfalls die Bewegungsbahnen verändern, falls sich ein anderes Individuum in die eigene Bahn bewegt.³

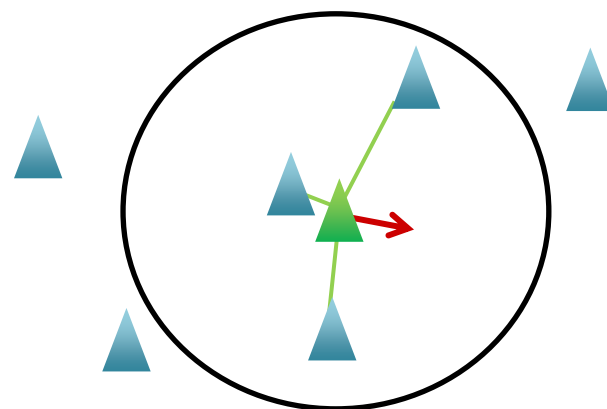


Abbildung 2: Separation

³ Sedlacek, Klaus-Dieter (2010), S.110.

- Alignment:

Damit sich der Schwarm nun Koordiniert fortbewegen kann, ist das Alignment nötig. Es beschreibt, dass sich das einzelne Individuum in dieselbe Richtung ausrichtet und bewegt wie dessen Nachbarn.⁴

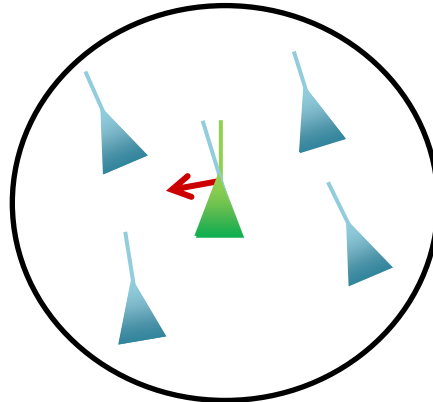


Abbildung 3: Alignment

Durch die Natur lassen sich vielerlei Lösungsmöglichkeiten für heutzutage noch offene Probleme ableiten. Dabei werden nicht nur die körperlichen Gegebenheiten oder Verhaltensweisen einzelner Individuen betrachtet, sondern auch das Zusammenspiel mit ihren Artgenossen. Dieses, nach außen hin intelligent aussehende, Verhalten der Tiere, wie beispielsweise Ameisen, wird beobachtet um Verhaltensmuster oder Regeln ableiten zu können, welche die Lösung für heutige Probleme darstellen könnte.

Das Verhalten der einzelnen Tiere basiert hierbei auf genetisch festgelegten, simplen Reizen. Ein Individuum empfängt einen Reiz und reagiert darauf, ohne weiter darüber nachzudenken. Es handelt demnach nach einfachen Regeln, welche erst in der Gruppe komplex wirken. Wissenschaftler versuchen diese einfachen Regeln der einzelnen Individuen mithilfe von Tests zu ergründen, zu formalisieren und als Modell abzubilden. Mithilfe der gesammelten Informationen können diese Regeln formuliert und anschlie-

⁴ Sedlacek, Klaus-Dieter (2010), S.111.

ßend in Simulationsmodelle übertragen werden, welche überprüfen, ob diese der Realität entsprechen oder nicht. Dies geschieht beispielsweise bei Ameisen, wie im Kapitel 2.1.1 *Ameisen* beschrieben. Ein Beispiel dafür, dass diese Methodik funktioniert ist das 1989 von Dorigo entwickelte Ant-Colony-System (siehe Kapitel 2.2.1 *Ant Colony System*).

Dieser Theorie nach sollte man meinen, dass mit Kenntnis der simplen Regeln, das Verhalten der einzelnen Individuen (hier Ameisen) vorhersehbar ist. Das ist allerdings nicht der Fall. Bei intensiverer Betrachtung fällt ein des Öfteren undefiniertes Verhalten auf. Zu Beweisen ist dies indem einzelne Individuen bestimmten Reizen ausgesetzt werden und deren Verhalten darauf beobachtet wird. Zum einem kommt es vor, dass das Individuum sich wie erwartet verhält und auf die Reize reagiert, zum anderen kann auch ein Verhalten beobachtet werden, das nicht dem ausgesetzten Reiz entspricht. Dieses zufällige Verhalten wird als randomisiertes Verhalten beschrieben. Eine Ameise, die auf der Suche nach neuen Futterquellen ist, kann somit nicht auf vorhandene Reize reagieren, da entweder keine vorhanden sind, weil die Futterquelle noch unentdeckt ist, oder die Futterquelle ansonsten schon bekannt wäre. Somit sucht die Ameise die Umgebung willkürlich ab, in der Hoffnung etwas zu finden. Wie die Ameise sich entscheidet ist folglich nicht sicher vorhersehbar, sondern lediglich zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, die bei auftretenden Reizen steigt. Wenn die einzelne Einheit auf mehrere Reize trifft, muss sie sich entscheiden, welchem sie nachgibt. Somit sind die Muster, die beobachtet werden können ein Zusammenspiel aus einfachen Regeln und zufälligen Entscheidungen, die von den einzelnen Einheiten getroffen werden. Hieraus lässt sich auch die Effizienz des Verhaltens ableiten, die auch in der Wissenschaft eingesetzt wird. Wenn die Ameise nicht auf die Reize des Schwarms reagieren würde, wäre sie auf sich alleine gestellt und müsste jedes Mal aufs Neue für sich eine Futterquelle suchen. Wenn sie andererseits immer auf die Reize reagieren würde, gäbe es keine Möglichkeit neue Futterquellen zu finden, die sogar besser sein könnten. Der Schwarm würde sich also nicht weiterentwickeln. Sowohl die Exploration als auch die Fokussierung

bestimmen den Erfolg zur Optimierung des Schwarmverhaltens. Die Entstehung der Reize lässt sich auf die Kommunikation zwischen den Einheiten zurückführen. Wenn Individuen also auf Reize reagieren, nutzen die das geteilte Wissen anderer Individuen. Man kann hierbei zwischen zwei Arten der Kommunikation unterscheiden. Die direkte oder die indirekte Kommunikation. Honigbienen geben ihr Wissen über gefundene Nahrungsquellen über den Schwänzeltanz weiter (siehe *Kapitel 2.1.2 Bienen*), während die von Ihren Artgenossen dabei beobachtet werden. Somit geben sie ihr Wissen direkt, selbst weiter. Bei der indirekten Kommunikation hingegen werden Reize hinterlassen, die zu einem späteren Zeitpunkt von anderen Individuen erkannt werden, wie bei Ameisen, die eine Pheromonspur hinterlassen (siehe *Kapitel 2.1.1 Ameisen*). Beide Kommunikationsarten haben hierbei Vor- und Nachteile. Während die Pheromonspur mit der Zeit schwächer wird und verschwindet, wird der Schwänzeltanz nur von unmittelbar Beteiligten wahrgenommen. Die meisten Schwarmarten benutzen somit eine Kombination von beiden Arten um deren Vorteile effizienter nutzen zu können. **André: Zu diesem Satz fände ich ein Beispiel gut, also welcher schwarm beide kommunikationsarten benutzt. Mir ist keiner bekannt :O**

Zusammengefasst lässt sich das intelligente Verhalten von Schwärmen auf simple Entscheidungen zurückführen, die meist ohne Überlegung durch Reaktionen auf die Umgebung geschehen. Dennoch weist dieses Verhalten eine sehr hohe Effizienz auf und könnte somit, wenn sie richtig genutzt, interpretiert und umgesetzt wird, die Lösung für viele Probleme sein.⁵ Einige dieser Lösungsansätze, welche vom Schwarmverhalten in der Tierwelt inspiriert wurden, werden in *Kapitel 2.2. Schwarmverhalten in der Technik* näher beschrieben.

⁵ Vgl. Bogon, Tjorben (2012), S. 35ff.

2.1 Schwarmverhalten in der Tierwelt

Schwarmverhalten findet sich in der Natur in zahlreichen Beispielen wie der Nahrungssuche von Ameisen oder dem Fluchtverhalten von Heringen wieder. Durch viele Individuen, die alle einfachen Regeln gehorchen wird ein komplexes Verhalten simuliert, welches in der Lage ist sich selbst zu organisieren und anzupassen.

2.1.1 Ameisen

Das Schwarmverhalten von Ameisen lässt sich mit einem einfachen Test veranschaulichen, in dem es zwei Wege zu einer Futterquelle gibt, wobei der eine deutlich kürzer ist. Es fällt auf, dass zu Beginn beide Wege gewählt werden, da noch nicht bekannt ist, welcher der kürzere ist. Wenn allerdings die ersten Ameisen zurückkommen, haben sie eine Pheromonspur gelegt, welche beim kürzeren Weg folglich intensiver ist als beim längerem. Somit reagieren die Ameisen auf diesen Reiz der intensiveren Pheromonspur, indem sie vermehrt den kürzeren Weg einschlagen.⁶

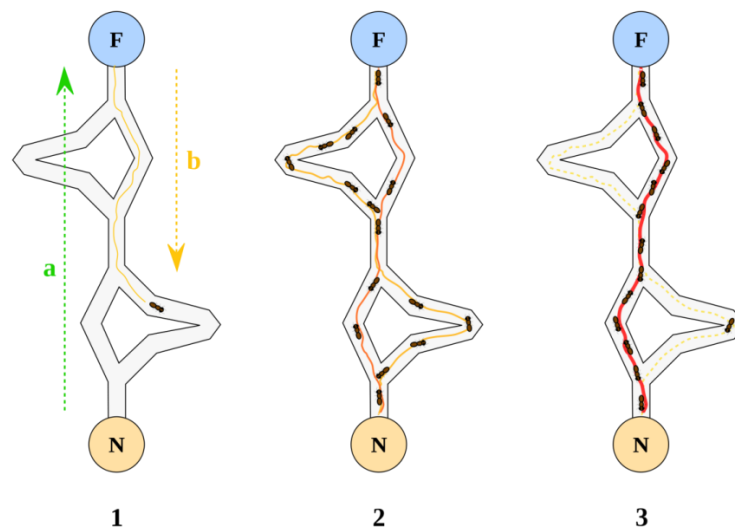


Abbildung 4: Wegfindung bei Ameisen (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ameisenalgorithmus>)

6 Wikipedia (andere quelle suchen)

In Abbildung 4 sieht man wie dies beispielsweise aussehen kann. Eine einzelne Ameise findet eine Futterquelle geht einen zufällig ausgewählten Weg zu ihrem Nest zurück, da es keinen Einfluss von Reizen gibt, denen sie folgen könnte. Währenddessen hinterlässt sie eine Pheromonspur. Das setzen der Pheromonspur verläuft dabei automatisch, ohne dass die Ameise es bewusst wahrnimmt. Andere Ameisen folgen dieser einen nun auf vier möglichen Pfaden und hinterlassen dabei alle eine Pheromonspur. Je mehr Ameisen einen der vier Wege einschlagen, desto intensiver wird die Spur und desto

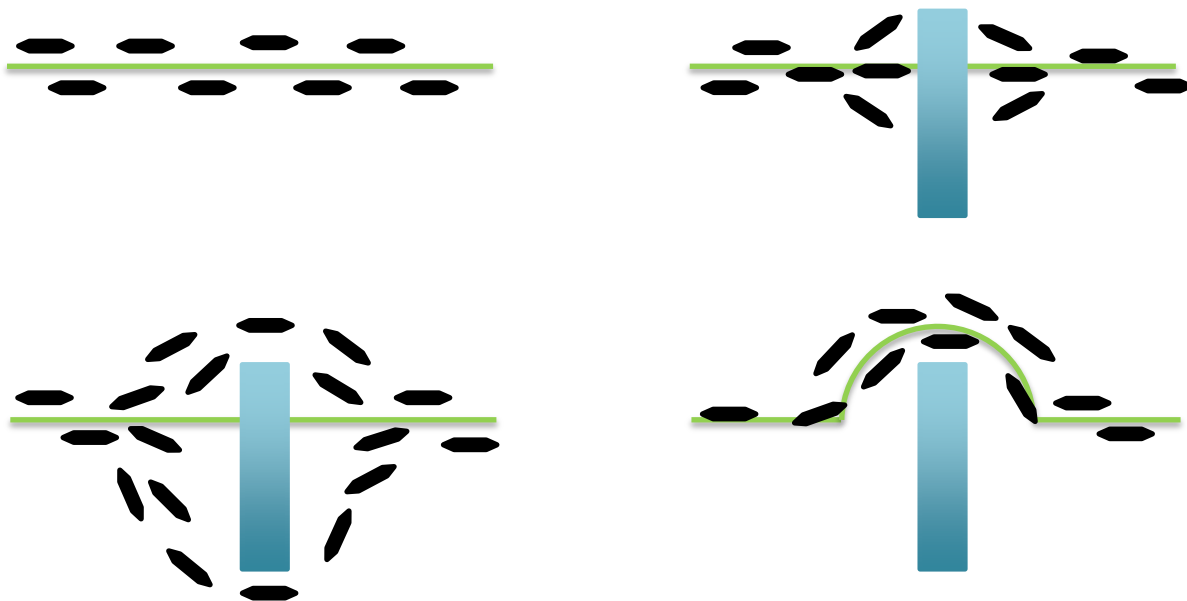


Abbildung 5: Wegfindung bei Ameisen

wahrscheinlicher wird es, dass andere Ameisen diesen Weg auch einschlagen. Da der kürzeste Weg nun am schnellsten zu überwinden ist, wird die Pheromonspur hier immer intensiver, sodass immer mehr Ameisen diesen Weg einschlagen, der sich als kürzester herausgestellt hat.⁷

⁷ wikipedia

In Abbildung 6 ist ein weiteres Beispiel dargestellt, wie Ameisen auf aufkommende Hindernisse reagieren. Die grüne Linie stellt die intensivste Pheromonspur dar, der die Ameisen wie im ersten Bild oben links folgen. Wenn ein plötzlich auftretendes Hindernis über der Spur auftritt versuchen die Ameisen dieses zu umgehen, indem sie zufällig bestimmte Wege einschlagen. Währenddessen hinterlassen die weiterhin eine Pheromonspur, die wieder beim kürzeren Weg intensiver wird, sodass nach einiger Zeit fast alle Ameisen diesen Weg einschlagen.

2.1.2 Bienen

2.1.3 Fische

Bei den Fischen findet man sehr häufig riesige Schwärme. Egal ob im Salz- oder Süßwasser, das Leben im Schwarm bietet den Fischen meist nur Vorteile. Auch sie stehen seit vielen Jahrzehnten im Mittelpunkt der Schwarmforschung. Es war sehr lange unklar, wie sich so ein Schwarm überhaupt fortbewegt, geschweige denn wer diesen leitet. Damit sich ein solch kompliziert wirkender Schwarm fortbewegen kann, braucht man nur die unter 2. *Schwarmverhalten* erklärten Verhaltensregeln: Kohäsion, Separation und Alignment. Hiermit sind die Grundbausteine für das Fortbewegen im Schwarm zwar sichergestellt, aber es stellt sich weiterhin die Frage, wer dem Schwarm die Richtung vorgibt. Hierzu wurde, laut einem Artikel in der Zeitschrift *Der Spiegel*, von Jens Krause, einem Verhaltenswissenschaftler, ein Großexperiment mit 200 Menschen in einer Kölner Halle gestartet. Die Regeln hierfür waren identisch mit den drei oben genannten. Sie durften nicht miteinander kommunizieren, mussten ständig in Bewegung bleiben und einen bestimmten Abstand zu den benachbarten Teilnehmern einhalten. Auch durften sie sich in der großen Halle frei bewegen. Zu sehen war hier, dass nach einiger Zeit die Teilnehmer in einem großen Kreis durch die Halle liefen. Es bildete sich auch ein Kreis im Kreis, der in entgegengesetzter Richtung lief.⁸ Dieses Verhalten wiesen auch

⁸ Vgl. Dambeck, H. (2007).

Barrakudas auf. So konnte der Forscher viele Ähnlichkeiten zwischen Mensch und Fisch erkennen. Ein Schwarm benötigt also zuallererst einige Individuen, um als Schwarm zu gelten. Wie diese sich fortbewegen ist durch die 3 Grundregeln festgelegt, die durch das eben genannte Experiment bestärkt worden sind. Der Schwarm bewegt sich also nicht als komplexes Konstrukt, sondern nach einfachen Regeln, die im Instinkt der Fische enthalten sind. Im nächsten Abschnitt des Experiments wurden 5 der 200 Menschen angewiesen in eine bestimmte Richtung zu gehen, um den Schwarm so zu beeinflussen. Dies funktionierte nicht, weswegen hierfür 10 Menschen auserwählt wurden. Erst dann gelang es, den Schwarm zu lenken.⁹ Somit sind dies mindestens 5% des menschlichen Schwarms, die den ganzen Schwarm lenken können. Doch warum 5% und funktioniert das auch bei Fischen? Ein weiterführender Versuch von Jens Krause zeigt, dass dieser Versuch auch auf einen Fischschwarm anwendbar ist. Da er den Fischen keine Anweisung geben kann, führte er das Experiment mithilfe von Roboterfischen durch, die vom Schwarm akzeptiert wurden und mithilfe von Magneten im Becken bewegt wurden. Es zeigt sich, dass dieser Wert einen gewissen Schwellenwert darstellt, ab diesem der Schwarm den Entscheidungen der 5% Folge leistet, ohne zu denken, es sei ein Irrtum eines einzelnen Individuums. Liegt die Anzahl der Individuen unter 5%, so folgt der Schwarm nicht.¹⁰ Dies bestätigt, dass tatsächlich mindestens 5% des Schwarms nötig sind, um diesen zu lenken. Diese 5% setzen sich instinktiverweise aus den Individuen im Schwarm zusammen, die zuerst auf die Reize ihrer Umwelt reagieren. Es müssen also nicht zwangsläufig die leistungsfähigsten und ausdauerndsten Individuen sein, die, laut einem Artikel des Wissenschaftsmagazin *Proceedings of the Royal Society*, an der Spitze des Schwarms zu finden sind. Dies hat den Vorteil, dass diese mehr fressen bekommen als der restliche Schwarm. Die leistungsschwächeren Individuen befinden eher weiter hinten, um sich hier im Strömungsschatten der davor

⁹ Vgl.Ebenda S.15.

¹⁰ Vgl.Stober,A. (2016).

schwimmenden Fische zu befinden und um somit weniger Energie verbrauchen zu müssen.¹¹ Betrachtet man den Schwarm als Gesamtbild, sieht so ein Richtungswechsel sehr koordiniert und synchronisiert aus. Dieser gleichzeitige Richtungswechsel basiert überraschenderweise ebenfalls auf den oben genannten 3 Grundregeln des Schwarmverhaltens. Sobald mindestens 5% der Tiere, z.B. aufgrund von einem Angriff eines Raubfisches, eine andere Richtung einschlagen als der Schwarm, folgen leicht verzögert deren Nachbarn und daraufhin wiederum deren Nachbarn usw. (vgl. Abbildung 6). Laut Krause ändert sich die Bewegung der Fische Impulsartig binnen weniger Millisekunden. Dies konnte er nur mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera filmen und danach auswerten.¹²

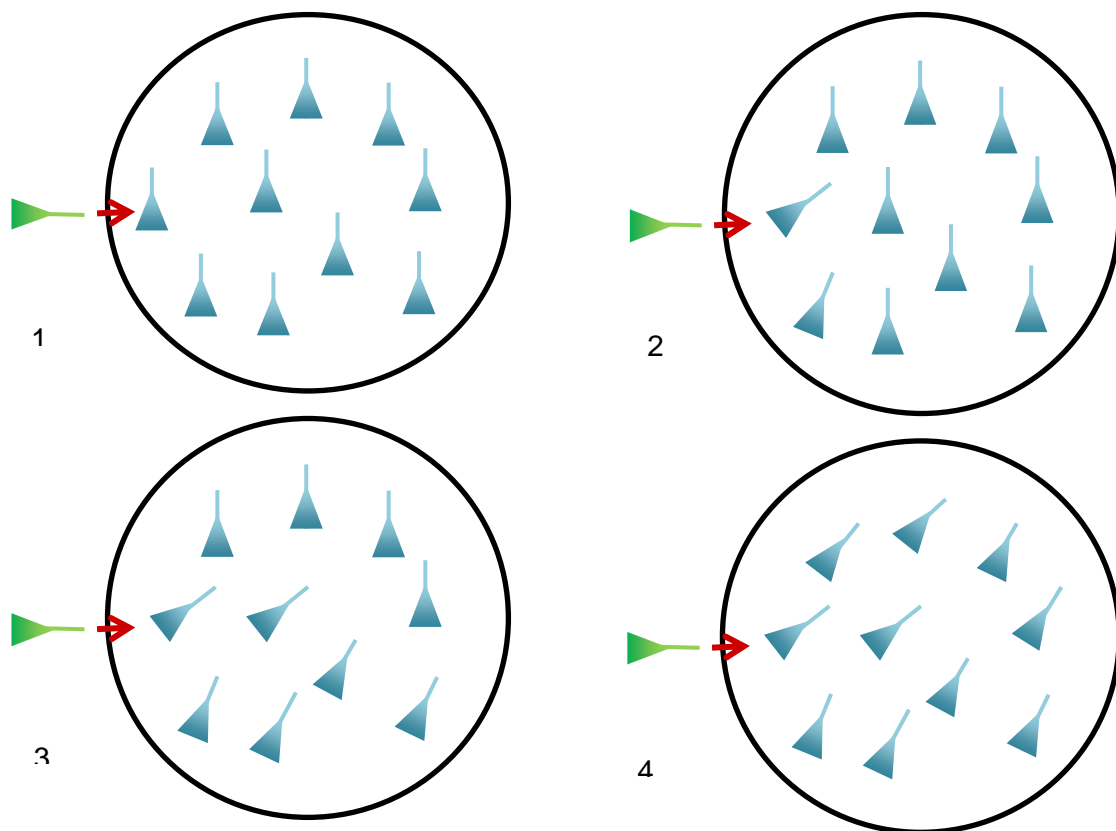


Abbildung 6: Richtungswechsel des gesamten Schwarms

¹¹ Vgl. S.Killen,S. / Marras, S. / F. Steffensen, J. / J.McKenzie, D (2011).

¹² Vgl. Axel Springer SE (2009).

In Abbildung 6 ist der Räuber (grüner Pfeil) der Grund, warum die Fische (blaue Pfeile) schlagartig ihre Richtung wechseln. Zu sehen ist in 4 Schritten, wie die Individuen Impulsartig die Richtung ändern. Dieser Vorgang ist ohne Hilfsmittel mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen, da die Tiere mithilfe ihres Instinkts und ihrem sehr empfindlichen Seitenlinienorgan sehr schnell reagieren können. Aus dieser Reihe von Experimenten kann man Schlussfolgern, dass hier, wie auch beim großen Ameisenstaat, eine hohe instinktive Art der Selbstorganisation vorliegt, der lediglich 3 Verhaltensregeln als Grundlage dienen. Es wurden ebenfalls viele Parallelen zu den Menschen aufgezeigt, wodurch man sagen kann, dass Menschen auch ein gewisses Maß an Schwarmverhalten besitzen. Als kleines Beispiel dient hier eine Szene in einem Flughafen. Viele steigen aus dem Flugzeug aus und folgen denjenigen, die zielgerichtet Richtung Ausgang laufen, ohne selbst aktiv nach einem Ausgang zu suchen. Ein weiteres Beispiel wäre auch, dass sich Menschen in einem Brandfall an einen Ausgang drängeln, obwohl es weitere Ausgänge gibt, die so gut wie frei sind. Es gibt noch viele weitere solcher Fälle, die bestätigen, dass Menschen ein ähnliches Schwarmverhalten wie Fische aufweisen.

Durch den Schwarm können Fische schneller Fressfeinde ausfindig machen und auf diese reagieren, da bekanntlich viele Individuen mehr sehen als ein einzelnes. Fischschwärme repräsentieren, genau wie die Ameisen und Bienen, dass mithilfe weniger Regeln ein komplex wirkender und agierender Superorganismus entsteht, der Probleme lösen kann, wozu ein einzelnes Individuum definitiv nicht in der Lage wäre. Laut der Definition für Schwarmverhalten und dessen drei Grundregeln, stellt, im Vergleich zu den Ameisen und den Bienen, der Fischschwarm somit das passendste Paradebeispiel eines Tierschwarms dar.

2.2 Schwarmverhalten in der Technik

In Kapitel 2.1 *Schwärme in der Tierwelt* wurden verschiedene Verhaltensmuster aus Beispielen in der Natur betrachtet und analysiert. Die Tierwelt hat es geschafft mithilfe einfacher Regeln ein scheinbar komplexes Verhalten zu simulieren, in welchen das ein-

zelne Individuum erst im Zusammenspiel mit seinen Artgenossen schlau erscheint. Einige Wissenschaftler haben es bereits geschafft dieses Phänomen aufzugreifen und in der Technik zu nutzen.

Das Kapitel umfasst somit nicht nur Beispiele von wirklichen Schwärmen in der Technik, wie in Kapitel 2.2.8 *MARS Project*, sondern auch solche, wie ein Schwarmverhalten aus der Natur in der Technik beispielsweise durch einen davon inspirierten, erstellen Algorithmus nutzbar gemacht werden konnte.

2.2.1 Ant Colony Optimisation

Hierbei wird das Problem der Wegfindung behandelt, in dem der kürzeste Weg von A nach B herausgefiltert wird. 1989 von Dorigo entwickelt

Bei der Ant Colony Optimization (dt.

2.2.2 Particle Swarm Optimisation

Vgl. Bogon, T. (2012), S. 39ff.

2.2.3 Artificial Bee Colony

2.2.4 Firefly Algorithm

2.2.5 Monkey Search

2.2.6 Roach Infestation Optimisation

2.2.7 Jumping Frogs Optimisation

2.2.8 Bacterial Foraging

2.2.9 Cat Swim Optimization

2.2.10 Artificial Immune System

2.2.11 Glowworm Swarm Optimization

2.2.12 MARS Project

2.2.13 s-bots

3. Schwarmintelligenz

Die Begriffe Schwarmverhalten und Schwarmintelligenz werden in der Literatur häufig als Synonym benutzt, da es sehr umstritten ist, ab wann genau man von Schwarmintelligenz spricht. Die Begriffe Schwarmintelligenz und Schwarmverhalten kann man jedoch sehr gut voneinander unterscheiden, da die Definitionen von Verhalten und Intelligenz ebenfalls eindeutig unterschiedlich sind.

Laut Duden bedeutet das Wort Verhalten, dass die Individuen des Schwarms „in bestimmter Weise auf jemanden, etwas in einer Situation o. Ä. reagieren“¹³. Dies bestätigt, dass, wie in Kapitel 2. *Schwarmverhalten* schon aufgeführt, das Schwarmverhalten das simple Verhalten der Individuen innerhalb eines Schwarms und deren Reaktion auf die Reize ihrer Umwelt bedeutet.

Die Schwarmintelligenz, oder auch kollektive Intelligenz genannt, entsteht erst, indem einzelne Entscheidungen bzw. Reaktionen eines Individuums das scheinbar intelligente Verhalten des ganzen Schwarms beeinflussen. Ein Phänomen, welches lange Zeit unerklärlich schien. Man spricht hier nicht etwa vom im Duden definierten Intelligenzbe-

¹³ Bibliographisches Institut GmbH (2018a).

griff, nämlich die „Fähigkeit [...], abstrakt und vernünftig zu denken und daraus zweckvolles Handeln abzuleiten“¹⁴, sondern vielmehr von einer sehr hohen Form der Selbstorganisation und der Kommunikation. Am Beispiel eines, in Kapitel 2.1.1 *Ameisen* genannten, Ameisenstaats lässt sich der Begriff Schwarmintelligenz sehr deutlich veranschaulichen. Betrachtet man eine einzelne Ameise, wird klar, dass das Individuum über keine höhere Intelligenz verfügen muss. Durch die hohe Selbstorganisation des Ameisenstaats und die Reaktion auf Umwelteinflüsse sowie die Kommunikation der Individuen untereinander, entsteht erst die vermeintliche und augenscheinliche Schwarmintelligenz, da das Verhalten des Schwarms sinnvoll und intelligent erscheint. Der Begriff Intelligenz fällt hierbei im Zusammenhang mit einem Gruppengedächtnis, welches dafür sorgt, dass verschiedene Probleme nicht individuell, sondern im Schwarmverbund gelöst werden.¹⁵ Schwarmintelligenz setzt also ein vernünftiges und eigenverantwortliches Denken und Handeln eines Individuums voraus. Dies ist bei einem Tierschwarm nicht gegeben, außer dieser hätte eine zentrale Einheit, welche Informationen auswerten und den Schwarm dementsprechend steuern würde.

Ein passendes Beispiel für den Begriff Schwarmintelligenz lieferte Francis Galton schon im Jahr 1907. Auf einer westenglischen Nutztiermesse ließ er 787 Personen das Gewicht eines Ochsen schätzen. Hierzu mussten die Befragten, darunter auch einige Experten wie Metzger und Farmer, unabhängig voneinander das Gewicht schätzen. Der Mensch an sich ist in der Lage, eigenverantwortlich und logisch zu denken, danach zu handeln und dadurch Probleme zu lösen. Hierdurch ist für dieses Beispiel die Definition der Intelligenz zutreffend. Das Gewicht des Ochsen lag bei 1.207 Pfund (ca. 547kg). Der Median aller Schätzungen der Teilnehmer lag erstaunlicherweise bei 1.198 Pfund (ca. 543kg). Dies bedeutet eine Abweichung von lediglich 0,8 Prozent. Hiermit war der

¹⁴ Bibliographisches Institut GmbH (2018b).

¹⁵ Vgl. Pitscher, L. (2008) S. 3 ff.

Median exakter als jede Einzelschätzung.¹⁶ Francis Galton bewies somit, dass eine Gruppe von Menschen unter bestimmten Bedingungen, wie z.B. ein solcher Schätzwettbewerb und ohne Kommunikation untereinander, intelligenter sein kann, als die darin befindliche intelligenteste Person. Selbiges Experiment wurde im Jahr 2008 von Mathematiker der Bremer Universität durchgeführt. Allerdings mussten die 150.000 Befragten hier die Anzahl verkaufter Lose einer Tombola schätzen. Es wurden insgesamt 10.788 Lose verkauft. Der Median der Schätzungen lag hier bei 9.834 Losen. Auch hier war der Median genauer als jede Expertenschätzung, was den Versuch von Francis Galton bestärkt.¹⁷ Verblüffend ist ein Artikel der wissenschaftlichen Fachzeitschrift *Proceedings of the National Academy of Sciences* aus dem Jahr 2011, in dem über die Durchführung eines Versuchs von Dirk Helbing berichtet wird. Dieser Versuch war ein ähnlicher Versuch, wie der von Francis Galton. Hier wurden 144 Studenten befragt. Diese mussten ebenfalls Werte schätzen, wie z.B. die Anzahl der Morde in der Schweiz im Jahr 2006. Bei diesem Versuch kam auch selbiges Ergebnis wie bei den Versuchen von Galton und den Mathematikern der Bremer Universität zum Vorschein. Wurden die Schätzungen unabhängig voneinander abgegeben, war der Median sehr nah an dem richtigen Wert. Erfuhren die Befragten die Schätzwerte vorheriger Studienteilnehmer, verschwanden zwar die einzelnen Extremwerte, der Median aber entfernte sich deutlich vom richtigen Ergebnis.¹⁸ Für detaillierte Grafiken zu diesem Versuch vgl. Anhang A1.

Durch diesen Versuch lässt sich sehr gut die Wichtigkeit der Rahmenbedingungen eines solchen Versuchs sowie den sozialen Einfluss der Individuen im Schwarm feststellen. Während in den bisher, von Galton und den Mathematikern der Bremer Universität, durchgeführten Versuchen unabhängig voneinander geschätzt wurde, durften im zwei-

¹⁶ Vgl. Galton, F. (1907) S.450 f.

¹⁷ Vgl. Riccò, J. (2008).

¹⁸ Vgl. Lorenz, J. / Rauhut, H. (2011).

ten Teil des Versuchs von Helbing die Teilnehmer vorherige Schätzwerte für die eigene Schätzung nutzen. Zu sehen ist ein sozialer Einfluss der Teilnehmer, da diese sich eher an den Ergebnissen anderer orientierten, als an der eigenen Vermutung. In diesem Zusammenhang wird oft der Begriff „Schwarmdummheit“ genannt. Dieser wird von vielen als Gegenkonzept für die Schwarmintelligenz benutzt. Wie der Versuch von Helbing zeigt, herrscht ein schmaler Grat zwischen Schwarmintelligenz und Schwarmdummheit. Dieser schmale Grat stellt den sozialen Einfluss, den die einzelnen Individuen aufeinander haben, dar. Vergleicht man den sozialen Einfluss von Menschen und Tieren im Schwarm, kann man sehr leicht zu dem Ergebnis kommen, dass die Tiere auch bei gewisser Unsicherheit ihren Instinkten weiterhin folgen bzw. ihr Verhaltensmuster nicht verlassen, während die Mehrheit der Menschen sich hier sozial stärker beeinflussen lässt und nicht mehr nach dem eigenen Interesse handelt. Und zwar von den Individuen die ihre Meinung durchsetzen und von dieser überzeugt sind oder gut manipulieren können. Der Mensch kann zwar seinen eigenen Verstand benutzen, neigt aber in einer großen Gruppe oder bei Unsicherheit dazu, sich an anderen zu orientieren. Hier steckt das Schwarmverhalten im Menschen und gleichzeitig auch die Schwarmdummheit.

Schaltet man die soziale Beeinflussung durch Rahmenbedingungen, wie z.B. unabhängige Schätzungen oder zu frühe Kommunikation aus, kann der Mensch die Schwarmintelligenz effizient für sich nutzen, ohne dadurch negativ beeinflusst zu werden. Da beim Mensch der soziale Einfluss am größten ist, besteht besonders für ihn die Gefahr der Schwarmdummheit, da er sich schnell an der Mehrheit orientiert.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass man die Begriffe Intelligenz und Verhalten an sich klar abgrenzen kann, diese aber in Bezug auf einen Tierschwarm ineinander überfließen bzw. aufeinander aufbauen. Denn ohne ein instinktives Verhalten der einzelnen Schwarmtiere, können diese nicht auf die Reize ihrer Umwelt reagieren und dadurch auch keine Probleme im Verbund lösen, was den Schwarm für uns Menschen erst intelligent wirken lässt. Der Mensch ist in der Lage Schwarmintelligenz effizient nutzen zu können, er ist dadurch aber auch anfälliger, Schwarmdumm zu werden, da er

durch soziale Beeinflussung in sein Schwarmverhalten bzw. Herdenverhalten fällt und sich an anderen orientiert anstatt an seinen Ideen und Interessen festzuhalten.

4. Lego Mindstorms

Lego Mindstorms ist eine Produktreihe des Herstellers Lego. Sie stellt einen programmierbaren Microcontroller zur Verfügung. Dieser bildet das Kernstück des Roboters dar. An diesen werden die beiden Elektromotoren und verschiedene Sensoren angeschlossen (vgl. Abbildung 7). Deswegen lässt sich diese Produktreihe sehr gut für den Bereich der Robotik verwenden, da hiermit einfache Roboter und Systeme aufgebaut und programmiert werden können. In dieser Studienarbeit werden Roboter der Generation Lego Mindstorms NXT, die Vorgängergeneration der aktuellen EV3-Generation, verwendet. Die erstellten Programme werden entweder über Bluetooth oder über die USB 2-Schnittstelle in den Speicher des Microcontrollers geladen. Ist dieser mit dem PC verbunden, kann man den Ablauf vom PC aus starten oder, falls er nicht mit einem PC verbunden ist, auch über die Kontrolltasten auf dem Microcontroller selbst.

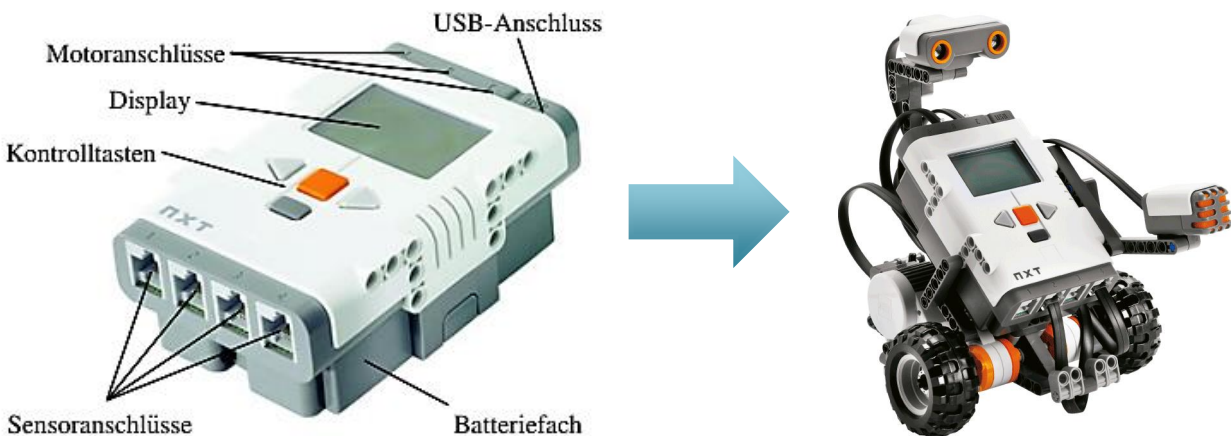


Abbildung 7: Lego NXT (Quelle: Schmidt,D./Berns,K., Programmierung mit Lego Mindstorms NXT:Robotersysteme, Entwurfsmethodik, Algorithmen, Springer Verlag,2010, S.42)

Im nachfolgenden wird auf die Sensorik und Aktorik des Lego Mindstorms NXT eingegangen und erklärt.

Die Aktorik ist eines der wichtigsten Bauelemente, da ohne die Elektromotoren das Individuum bewegungsunfähig wäre und man somit kein Schwarmverhalten nachbilden könnte. Der NXT verfügt über zwei Servomotoren, die auf der oberen Seite des Microcontrollers an diesen angeschlossen werden. Servomotoren sind Elektromotoren, bei denen man die Geschwindigkeit und die Winkel kontrollieren kann (vgl. Abbildung 8). Sobald diese verbunden sind, kann man sofort mit dem Programm auf diese zugreifen.

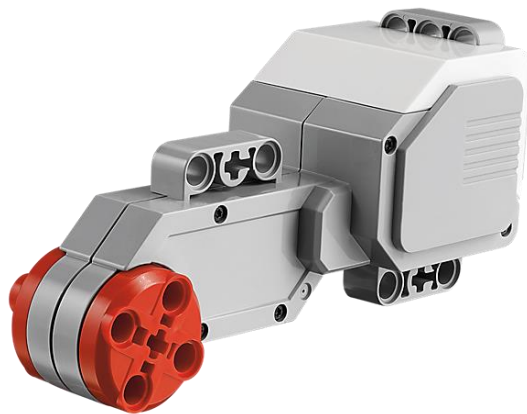


Abbildung 8: Servomotor des NXT (Quelle: [https://sh-s7-lives.legocdn.com/is/image/LEGO/45502?\\$main\\$](https://sh-s7-lives.legocdn.com/is/image/LEGO/45502?$main$))

Die Sensorik besteht aus mehreren Komponenten, wie einen Tastsensor, einem Ultraschallsensor, einem Farbsensor und einem Geräuschsensor.

Der Tastsensor ist ein einfacher Sensor, der auf Berührung reagiert, wenn z.B. der Roboter gegen ein Hindernis fährt. Aus Abbildung 9 kann man entnehmen, dass dieser nach einem Federprinzip funktioniert. Sobald die Feder, durch das fahren an das Hindernis, zusammengedrückt wird, wird der Stromkreis unterbrochen. Dieser Stromkreis wird vom Microcontroller überwacht und ermöglicht es, im Programm darauf zu reagieren. Für diese Studienarbeit ist dieser Sensor eher nicht geeignet, da Schwarmtiere sich nicht mithilfe von Berührung, sondern mithilfe ihrer Sicht orientieren.

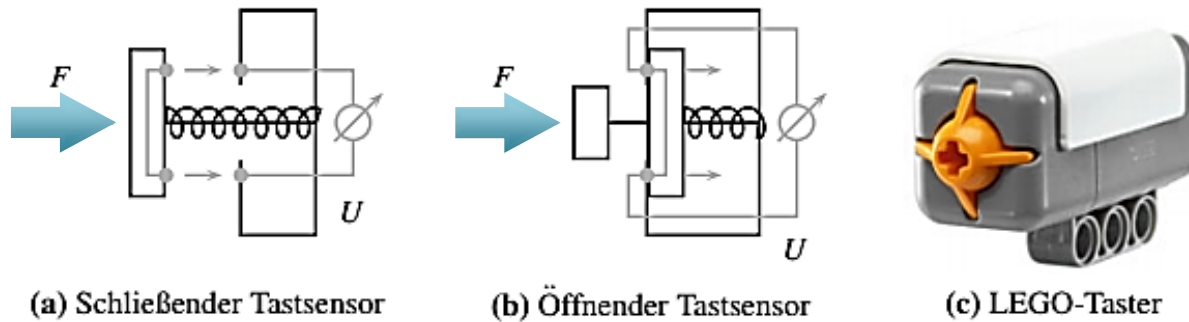


Abbildung 9: Tastsensor des NXT (Quelle: Schmidt,D. /Berns,K., Programmierung mit Lego Mindstorms NXT:Robotersysteme,Entwurfsmethodik,Algorithmen,Springer Verlag,2010, S.50)

Hier kommt der Ultraschallsensor zum Tragen (vgl. Abbildung 9). Mit diesem können Entfernungen mithilfe von Ultraschall berechnet werden. Hier werden Töne im hochfrequenten Bereich ausgesendet und die Zeit gemessen, wie lange es braucht, bis das Echo am Sensor antrifft. Dieser Sensor stellt in gewissen Maßen das Blickfeld eines Individuums dar. Im Programm kann man z.B. den Abstand bestimmen, den das Individuum zu Hindernissen halten soll. Ist dieser Abstand erreicht kann man entweder den Roboter stoppen oder darauf reagieren und eine andere Richtung einschlagen.

Der Farbsensor kann für verschiedene Versuche sehr hilfreich sein. Zum einen kann man den Räuber, der sich auf einen Schwarm zubewegt, mit einer anderen Farbe kennzeichnen, als die Schwarmtiere. Hierdurch kann der Roboter dann zwischen Schwarmmitglied und Fressfeind unterscheiden und entsprechend das Schwarmverhalten fortsetzen oder ein Ausweichprogramm durchführen. Zum anderen kann hier Futter gekennzeichnet werden, wonach der Schwarm aktiv auf der Suche ist. Der unter Abbildung 10 erkennbaren Farbsensor bestrahlt hierfür die entsprechende Oberfläche mit 3 LEDs, die alle drei eine unterschiedliche Farbe haben. Das zurückkommende Licht wird mithilfe einer Fotodiode gemessen und ausgewertet.¹⁹

¹⁹ Vgl. Schmidt,D. / Berns, K.(2010).



Abbildung 10: Farbsensor des NXT (Quelle: <http://cdn1.preisroboter.de/detail/6ee2f8557b18c986f5261afd397de763>)

Der letzte Sensor des NXT ist der Geräuschsensor (vgl. Abbildung 11). Ein Fallbeispiel für die Verwendung des Sensors könnte der oben genannte Schwarm sein, der Futter sucht und dieses mithilfe des Farbsensors erkennt. Damit der restliche Schwarm folgt, kann der Roboter, der das Futter gefunden hat, ein bestimmtes Geräusch machen, worauf die anderen Roboter reagieren und ebenfalls zur Futterquelle stoßen. Der Geräuschsensor empfängt die Schallwellen der Umgebungsgeräusche und wandelt diese je nachdem wie laut der Ton ist und wie stark die Schallwellen auftreffen, in starke oder schwache Signale um.



Abbildung 11: Geräuschsensor des NXT (Quelle: <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/41TXaSTzUkL.jpg>)

Programmiert werden kann der NXT über zwei verschiedene Arten. Die erste Variante ist die mitgelieferte NXT-G Entwicklungsumgebung von Lego Mindstorms. Diese Entwicklungsumgebung ist eine grafische Entwicklungsumgebung, sprich, es werden sogenannte Blöcke per Drag-and-Drop an den gekennzeichneten Startpunkt gezogen (vgl. Abbildung 12). Es lassen sich hier sehr einfach parallele und sequentielle Programme erstellen. Die Blöcke besitzen unterschiedliche Funktionen. Während einer die Motoren steuern kann, ist wiederum ein anderer für den Farbsensor zuständig. Klickt man die Blöcke an, kann man diese mit individuellen Werten konfigurieren, wie z.B. die Dauer, wie lange der Motor drehen soll.

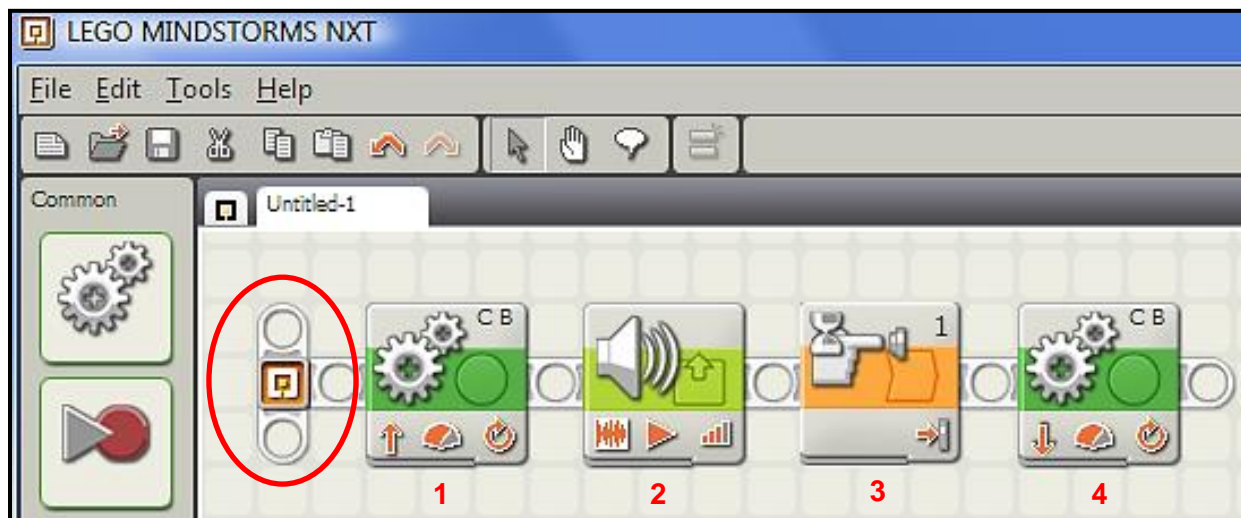


Abbildung 12: NXT- G: grafische Entwicklungsumgebung

Der rote Kreis in Abbildung 12 stellt den Startpunkt der Programmabarbeitung dar. Baustein Nr.1 lässt die Motoren eine eingestellte Dauer laufen. C und B stehen jeweils für den Port, an denen die Motoren mit dem Microcontroller verbunden sind. Block Nr.2 ermöglicht es, einen Ton oder eine individuell hochgeladene Sounddatei abspielen zu lassen. Block Nr.3 hält das Programm an und prüft, ob der Drucksensor gedrückt wird. Erst wenn dieser aktiviert wird, läuft das Programm weiter und der Roboter fährt anhand von Block Nr.4 nun weiter.

Die zweite Variante, den NXT zu programmieren, erfolgt mithilfe der Programmiersprache Java. Java bietet sich hier sehr gut an, da diese Programmiersprache objektorientiert ist. Es lassen sich also Objekte erzeugen. Doch nicht nur die Objektorientiertheit von Java ist hier ein Vorteil. Ein weiterer Vorteil bietet Java, da man hier viel mehr Möglichkeiten hat, als mit NXT-G. Zum einen kann man die Vererbung sehr leicht auf Objekte anwenden, zum anderen bietet Java eine Vielzahl an mathematischen Funktionen und Datentypen, die bei komplexeren Projekten, wie diesem hier, gefordert sind. Aus diesem Grund fiel die Wahl auf eine textuelle Programmiersprache. Doch um Java auf einem NXT nutzen zu können benötigt man LeJOS.

Beim Aufsetzen der Programmierumgebung, in diesem Fall Java Neon mit LeJOS, wird zuerst der Microcontroller, mit einer von LeJOS bereitgestellten Firmware, neu aufgesetzt. Der Controller wird also mit einer neuen Firmware ausgestattet die eine JVM (Java Virtual Machine) enthält. Mithilfe dieser werden Java Programme in einer eigenen virtuellen Maschine ausgeführt, wodurch man Java Programme auf den NXT laden und ausführen kann. Mit der Firmware kommen auch neue Java Klassen, die dazu gehörenden Linker und eine API (Application Programming Interface), damit der Benutzer Befehle für den NXT abrufen, seine Programme samt Klassen auf den NXT laden und dort benutzen kann. Nun muss nur noch die Programmierumgebung konfiguriert werden. Es müssen hier die Pfade zur API und der SDK (Software Development Kit) angegeben werden, damit die Umgebung auf den NXT zugreifen kann.²⁰ Eine genaue Anleitung, wie das Aufsetzen des NXT und der dazugehörige Programmierumgebung funktioniert, können Sie aus dem Anhang *A2.Aufsetzen von LeJOS* entnehmen.

²⁰ Vgl.o.V.(o.J.a)

5. Grundfunktionen der Roboter

Zur Implementierung der einzelnen Funktionsweisen des Roboters gab es verschiedene mögliche Ansätze. Ganz zu Beginn war es am einfachsten grundlegende Methoden die das Vorwärtsfahren direkt über if-Abfragen zu implementieren (siehe Abbildung 6).

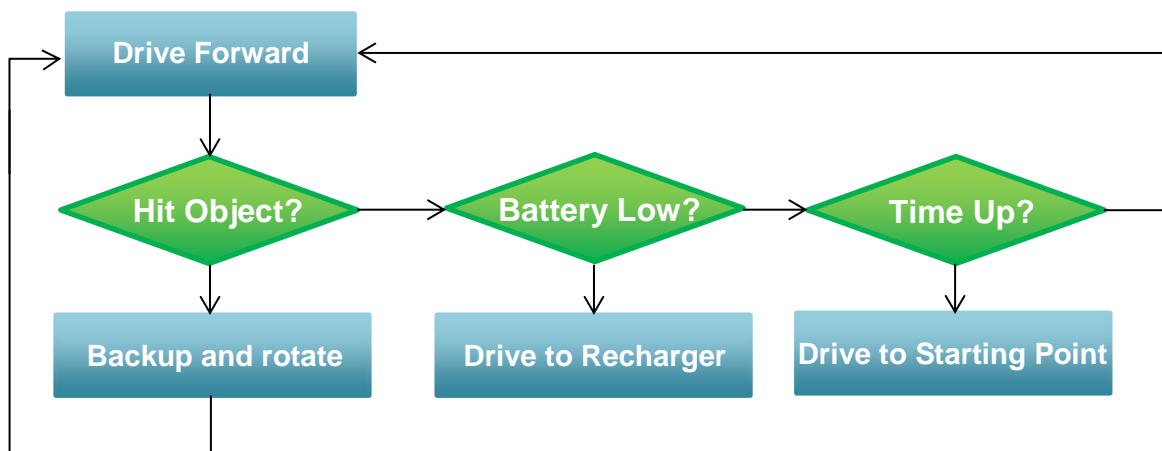


Abbildung 7: Verkettung von If-Abfragen

Dies ist zu Beginn sehr einfach, da keine weiteren Überlegungen über das endgültige Codedesign nötig sind, da einfach eins nach dem anderen programmiert werden kann. Allerdings würde diese Methode den Code sehr schnell sehr unübersichtlich und schwer änderbar machen, da viele Sachen ineinander verkettet sind und nicht einzeln für sich existieren. Es würde ein sogenannter „Spaghetti Code“ entwickelt werden.

Im Gegensatz dazu gibt es das sogenannte Behavior Control Model. Dies erfordert mehr Planung um den zu entwickelnden Programmcode zu Beginn, sorgt aber für einen übersichtlichen und leicht änderbaren Code. Es werden einzelne Behaviors (Verhaltensmuster) implementiert, die getrennt koexistieren. Es kann also jederzeit ein weiteres Behavior implementiert oder ein anderes entfernt werden, ohne dass der gesamte Programmcode wie im vorigen Beispiel mühsam angepasst werden muss.

Über Lejos lässt sich dies mit der Behavior API umsetzen. Über das Behavior Interface lassen sich die einzelnen Verhaltensmuster implementieren, wobei das Interface selbst sehr grundlegend ausgelegt ist. Sobald alle Behaviors implementiert sind, werden sie einem Arbitrator (dt. Vermittler) übergeben, der sich darum kümmert, welche davon aktiviert werden. Das Behavior Interface ist so ausgelegt, dass es für jedes Verhalten drei grundlegende Methoden gibt, die dieses bestimmten.

```
1. boolean takeControl()
```

Quellcode 1: takeControl

Bei der takeControl() Methode (siehe Quellcode1) wird ein boolean Wert zurückgegeben, der mitteilt, wann ein bestimmtes Verhalten aktiviert werden soll. Wenn somit beispielsweise ein Berührungssensor darauf hinweist, dass der Roboter gegen ein Hindernis gefahren ist, sollte diese Methode „wahr“ zurückgeben und somit das dazugehörige Verhalten anstoßen.

```
1. void action()
```

Quellcode 2: action

Diese Methode definiert das Verhalten des Roboters, nachdem mithilfe von takeControl() herausgefunden wurde, dass auf etwas reagiert werden muss. Wenn wie im vorigen Beispiel der Roboter gegen ein Hindernis gefahren ist und die Methode action() dadurch aufgerufen wurde, kann hier beispielsweise definiert werden, dass der Roboter sich von dem Hindernis wegbewegen soll.

```
1. void suppress()
```

Quellcode 3: suppress

Der Code in der suppress() Methode stoppt die action() Methode. Er kann auch dazu verwendet werden Informationen zu updaten bevor das Behavior vollständig beendet wird.

Mithilfe dieser drei Methoden lassen sich die Verhaltensweisen leicht implementieren. Wenn ein Roboter also drei unabhängige Behaviors haben soll, dann müssen drei Klassen implementiert werden, wobei jede das Behavior Interface implementiert. Wenn die Klassen fertig geschrieben sind müssen die einzelnen Behaviors an den Arbitrator gegeben werden.

```
1. public Arbitrator(Behavior [] behaviors)
```

Quellcode 4: Arbitrator

Mithilfe dieser Methode in Quellcode 4 wird ein Arbitrator erzeugt, der regelt wann die einzelnen Behaviors aktiviert werden. Dazu wird der Methode ein Array mit allen gewünschten Behaviors übergeben. Wichtig zu wissen ist hierbei, die Priorität der Behaviors von ihrer Array Nummer abhängt. Je höher diese ist, desto höher ist die Priorität des Behaviors.

```
1. public void start()
```

Quellcode 5: start Arbitrator

Mithilfe von start() wird der Arbitrator gestartet und beginnt damit zu entscheiden welche Verhaltensweisen der Roboter anwendet. Dabei werden die takeControl() Methoden aller Behaviors aufgerufen, beginnend mit der höchsten Arraynummer. Er arbeitet sich somit durch die ganzen Behaviors, bis eine der Funktionen „wahr“ zurückgibt und somit die jeweilige action() Methode dazu aufgerufen wird. Wenn zwei Behaviors beide unter takeControl() „wahr“ zurückgeben, wird nur die aufgerufen, welche höher priorisiert ist (siehe Abbildung 6).²¹

²¹ Vgl. o.V. (o.J.b), S. 55ff.

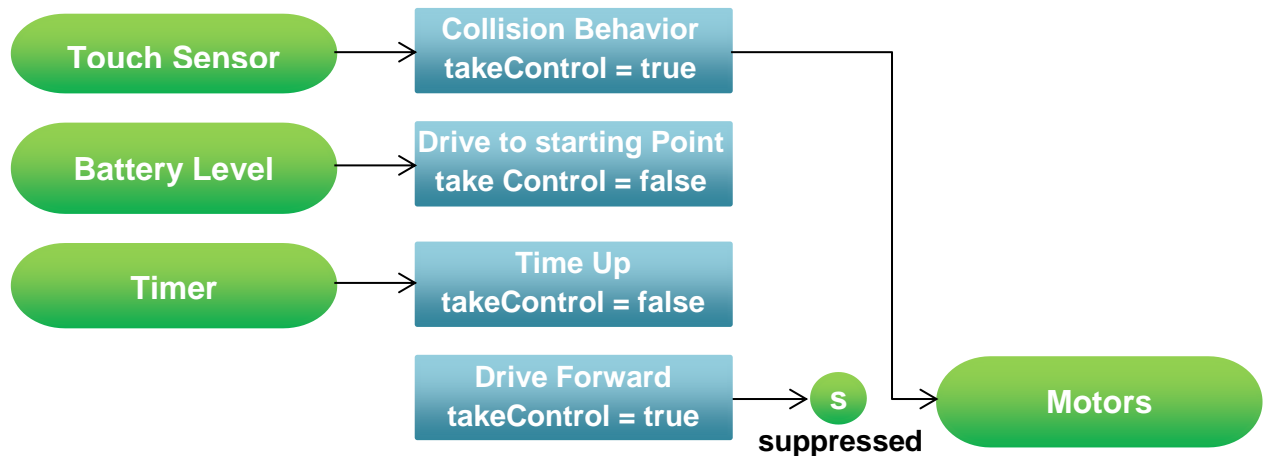


Abbildung 13: Priorisierte Behaviours

5.1 Ausweichen

➔ Zentraler PC, Kommunikation untereinander ?!

5.1.1 mit einem Roboter

5.1.2 im Schwarm

5.2 Suchen

5.3 Folgen

6. Schwarmverhalten der Roboter

(Grundfunktionen kombiniert im Schwarm anhand von verschiedenen Szenarien (Wolfsrudel -> mehrere Jäger, Bienenschwarm suchen, Fischschwarm (bewegtes Hindernis) -> ein Jäger

7. Schwarmintelligenz der Roboter

8. Reflexion

Möglichkeiten, Zukunftsaussichten

Literaturverzeichnis

Pintscher, Lydia (2008)	Schwarmintelligenz, Seminar Organic Computing, Universität Karlsruhe, 2008, unter: http://www.lydiapintscher.de/uni/schwarmintelligenzodp.pdf , rev. 05.12.2017.
Bogon, Tjorben (2012)	Agentenbasierte Schwarmintelligenz, Dissertation Universität Trier, Springer Vieweg, 2012.
Himani/ Girdhar, A. (o. J.)	Swarm Intelligence and Flocking Behavior, unter: http://research.ijcaonline.org/icaet2015/number10/icaet4146.pdf , rev. 02.02.2018.
	https://books.google.de/books?id=CrkFO1I72_UC&printsec=frontcover&dq=swarm+intelligence&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjM98rSeDYAh-VFxKYKHfdyDYQQ6AEIQjAD#v=onepage&q=swarm%20intelligence&f=false
Berns, Karsten/ Schmidt, Daniel (2010)	Programmierung mit LEGO MINDSTORMS NXT, Springer, 2010.
	https://www.macs.hw.ac.uk/~dwcorne/Teaching/SlchapterforHandbook_NC.pdf
	http://faculty.washington.edu/paymana/swarm/krink_01.pdf
	http://www.giannidicaro.com/uploads/6/6/0/3/66030893/lectures-si-intro.pdf
o.V. (o.J.)	Behavior programming, unter: http://www.lejos.org/nxt/nxj/tutorial/Behaviors/BehaviorProgramming.htm , rev. 05.02.2018.

o.V. (o.J.)	Behavior-based Programming, unter: http://pirate.shu.edu/~wachsmut/Teaching/CSAS-Robotics/Lectures/10-BehaviorBasedProgrammingJava.doc , rev. 05.02.2018.
o.V. (o.J.b)	The leJOS NXJ Tutorial, unter: http://www.ctestlabs.org/robotteams/leJOSNXJTutorial.pdf , rev. 06.02.2018.
Spektrum Akademischer Verlag (2001)	Schwarmverhalten, unter: http://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/schwarmverhalten/10520 , rev. 06.02.2018
Sedlacek, Klaus-Dieter (2010)	Emergenz: Strukturen der Selbstorganisation in Natur und Technik, Book On Demand GmbH, 1.Auflage, Norderstedt, 2010
Bibliographisches Institut GmbH (2018b)	Intelligenz, unter: https://www.duden.de/rechtschreibung/Intelligenz , rev. 07.02.2018
Blum, Daniel (2003)	Ant Colony Optimization (ACO), Universität Dortmund, 2003, unter: http://ls11-www.cs.tu-dortmund.de/lehre/SoSe03/PG431/Ausarbeitungen/ACO.pdf , rev, 08.02.2018
Lümkemann, Jan (2003)	Ant Colony Optimization: Ausarbeitung zum Vortrag im Seminar „Intelligente Algorithmen“, Universität Bielefeld, 2003, unter: https://www.techfak.uni-bielefeld.de/ags/wbski/lehre/digiSA/WS0304/IntAlg/Ausarbeitungen/AntColony.pdf , rev. 08.02.2018.
Bibliographisches Institut GmbH (2018a)	Verhalten, unter: https://www.duden.de/rechtschreibung/verhalten_handeln_sein_reagieren#Beutung1a , rev. 07.02.2018

Galton,F. (1907)	Vox Populi, Nature No.75,unter: http://galton.org/cgi-bin/searchImages/galton/search/essays/pages/galton-1907-vox-populi_1.htm , 1907, S.450 f.
Riccó, J. (2008)	Weisheit der Bremer siegt über Experten, unter: http://scienceblogs.de/neurons/2008/08/27/weisheit-der-bremer-siegt-uber-experten/ , rev. 09.02.2018
Lorenz, J. /Rauhut, H.(2011)	How social influence can undermine the wisdom of crowd effect, in: Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, unter: http://www.pnas.org/content/pnas/early/2011/05/10/1008636108.full.pdf , rev. 10.02.2018
Dambeck,H. (2007)	Schwarm-Experiment: Menschen sind auch nur Fische, unter: http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/schwarm-experiment-menschen-sind-auch-nur-fische-a-471179.html , rev. 11.02.2018
Stober,A. (2016)	Schwarmintelligenz: von den Fischen lernen, unter: https://www.planet-wissen.de/technik/verkehr/logistik_waren_unterwegs/pwieschwarmintelligenzvon-den-fischen-lernen100.html , rev. 11.02.2018
S.Killen,S. / Marras, S. / F. Steffensen, J. / J.McKenzie, D (2011).	Aerobic capacity influences the spatial position of individuals within fish schools, in: Proceedings of the royal Society, 2011, unter: http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/royprsb/early/2011/06/07/rspb.2011.1006.full.pdf , rev. 11.02.2018
Axel Springer SE (2009)	Menschen verhalten sich in Gruppen wie Fische, unter: https://www.welt.de/wissenschaft/article5057937/Menschen-verhalten-sich-in-Gruppen-wie-Fische.html , rev. 11.02.2018

Schmidt,D. / Berns, K.(2010)	Programmierung mit Lego Mindstorms NXT: Robotersysteme, Entwurfsmethodik, Algorithmen, Springer Verlag,2010, S.54)
o.V. (o.J.a)	Introduction: What is LeJOS NXJ, unter: http://www.lejos.org/nxt/nxj/tutorial/Preliminaries/Intro.htm , rev. 12.02.2018

Guter Artikel für Schwarmverhalten in der Technik bzw. für die Zukunft: Bauroboter im Schwarm

<https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/robotik/roboter-bauen-im-schwarm-vorbild-terminen/>

Anhang

A1. Versuch von Dirk Helbing und dessen Ergebnisse

Table 1. The wisdom of crowd effect exists with respect to the geometric mean but not with respect to the arithmetic mean

Question	True value	Wisdom-of-crowd aggregation		
		Arithmetic mean	Geometric mean	Median
1. Population density of Switzerland	184	2,644 (+1,337.2%)	132 (-28.1%)	130 (-29.3%)
2. Border length, Switzerland/Italy	734	1,959 (+166.9%)	338 (-54%)	300 (-59.1%)
3. New immigrants to Zurich	10,067	26,773 (+165.9%)	8,178 (-18.8%)	10,000 (-0.7%)
4. Murders, 2006, Switzerland	198	838 (+323.2%)	174 (-11.9%)	170 (-14.1%)
5. Rapes, 2006, Switzerland	639	1,017 (+59.1%)	285 (-55.4%)	250 (-60.9%)
6. Assaults, 2006, Switzerland	9,272	135,051 (+1,356.5%)	6,039 (-34.9%)	4,000 (-56.9%)

The aggregate measures arithmetic mean, geometric mean, and median are computed on the set of all first estimates regardless of the information condition. Values in parentheses are deviations from the true value as percentages.

Die obige Tabelle zeigt alle im Versuch gestellten Fragen sowie deren Schätzungen im arithmetischen Mittel, geometrischen Mittel und im Median.

	(1)	(2)
	groups' wisdom-of-crowd indicator	individuals' increase in confidence
intercept	3.92*** (15.1)	-0.049 (-0.97)
aggregated information	-1.39** (-3.29)	0.20** (3.08)
full information	-0.98* (-2.21)	0.28*** (4.14)
<i>N</i>	288	864

t statistics in parentheses (robust std. errors), * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Die obige Grafik zeigt die Auswirkungen der sozialen Beeinflussung des Experimentes. Hier wurde die Frage gestellt, wie viele Morde in der Schweiz im Jahr 2006 registriert wurden. Des Weiteren wird hier der berechnete Indikator in Bezug auf die Weisheit der

Masse (Werte rot markiert) sowie die Sicherheit der Teilnehmer in ihren Schätzungen (Werte blau markiert) veranschaulicht. Sie unterteilt sich im Groben in 3 Zeilen. Die erste Zeile enthält die Daten der Teilnehmer, die vor ihrer Schätzung keine Informationen als Grundlage hatten. Die zweite Zeile enthält Daten der Gruppe von Teilnehmern, die gesammelte Informationen als Grundlage für ihre Schätzung nutzen konnten. Letzte Gruppe hatte alle Informationen der beiden vorherigen Gruppendurchläufe. Vergleicht man die Zeile „intercept“ mit den beiden anderen Spalten, kann man den Effekt des sozialen Einflusses sehr genau erkennen. Ein Indikator in Bezug auf die Weisheit (rot) der Masse mit dem Wert 0 deutet darauf hin, dass die Wahrheit bzw. der richtige Wert außerhalb der Schätzwerte liegt. Je höher der Indikator für die Sicherheit der Teilnehmer in ihren Schätzungen (blau) ist, desto selbstsicherer sind die Teilnehmer. Die berechneten Indikatoren zeigen sehr genau, dass die Weisheit der Masse sinkt, wenn diese Informationen in ihre Schätzungen einbeziehen dürfen, sprich sozial beeinflusst werden. Je mehr die Teilnehmer beeinflusst werden, desto selbstsicherer sind sie in der Annahme, dass ihre Schätzung zutrifft. Dies zeigt auch, dass der Mensch der Meinung ist: Was die meisten Denken bzw. Schätzen, kann also gar nicht so falsch sein. Außerdem wird klar: Die Vielfalt der Schätzungen führt zu einem besseren Ergebnis.

Dieser Versuch zeigt, dass vermeintliche Schwarmintelligenz in Schwarmdummheit umschlagen kann, wenn soziale Beeinflussung und / oder Unsicherheit der Teilnehmer stattfindet bzw. diese betrifft. Die Teilnehmer fallen dadurch in ein Schwarmverhalten bzw. ein Herdenverhalten, wodurch sie sich an anderen orientieren und das Ergebnis der Teilnehmer im Schwarmverbund wesentlich schlechter wird.

A2. Aufsetzen von LeJOS