

Bachelorarbeit

Automatische Detektierung von Bienentänzen

von Florian Herm

Institut für Informatik, Freie Universität Berlin

Betreuer: Prof. Dr. Raúl Rojas

06.08.2013

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Thematischer Einstieg	2
1.1.	Relevanz der Bienenforschung.....	2
1.2.	Grundlegendes zur Forschung	4
1.3.	Das Projekt	6
1.4.	Aufbau der Arbeit.....	9
2.	Technik.....	9
2.1.	Hardware	9
2.2.	Software	12
3.	Programm.....	13
3.1.	Funktionsweise in <i>MATLAB</i>	13
3.2.	<i>tanzfunktion</i> mit <i>k-Means</i>	19
3.3.	C++-Code und seine Unterschiede zum <i>MATLAB</i> -Code.....	21
4.	Testergebnisse	24
4.1.	Ergebnisse des <i>MATLAB</i> -Codes	25
4.2.	Ergebnisse des C++-Codes.....	26
5.	Fazit.....	26
	Quellen	29

1. Thematischer Einstieg

1.1. Relevanz der Bienenforschung

Dass Bienen¹ für die Natur und die Menschen wichtig sind, ist unumstritten. So soll angeblich schon Albert Einstein gesagt haben: „Wenn die Biene einmal von der Erde verschwindet, hat der Mensch nur noch vier Jahre zu leben. Keine Bienen mehr, keine Bestäubung mehr, keine Pflanzen mehr, keine Tiere mehr, keine Menschen mehr.“² Die Honigbiene ist die bekannteste Bienenart und auch eine der wenigen, die in großen Völkern zusammenarbeitet. Bienen sind in vielerlei Hinsicht nützlich für die Menschen, sie produzieren wohl-schmeckenden und gesundheitsfördernden Honig sowie andere Stoffe. Wir können ihren Wachs nutzen und selbst das Gift des Stachels kommt in der Pharmaindustrie zur Anwendung.³

Doch auch der wichtigste Nutzenfaktor rückt zum Glück seit einigen Jahren durch das erhöhte Bienensterben in das Interesse der Öffentlichkeit – Bienen bestäuben die Pflanzen. Ca. 80 % der Pflanzen sind auf Fremdbestäubung angewiesen und sind dabei extrem abhängig von den Honigbienen, die wiederum 80 % von ihnen die Fortpflanzung ermöglichen. Es gibt auch andere Tiere, die diese Aufgabe übernehmen, diese sind jedoch nicht annähernd so zahlreich und effektiv wie die Honigbiene.⁴ Was passiert, wenn es keine Bienen mehr gibt, lässt sich am Beispiel von China sehen: Dort wurden die Bienen in den 80er Jahren, wahrscheinlich durch den exzessiven Gebrauch von Pestiziden, in einigen Gegenden ausgerottet. Dadurch müssen die Obstbäume und andere Pflanzen nun von den Menschen bestäubt werden. Dies ist eine ineffektive, zeitaufwendige und dadurch teure Aufgabe.⁵ Nicht umsonst wird die Honigbiene in Deutschland als dritt wichtigstes Nutztier eingestuft.⁶

¹ Ich werde in Folgenden der Einfachheit halber im Wechsel von Biene und Honigbiene sprechen, werde mich dabei aber, sofern es Unterschiede zu anderen Honigbienenarten gibt, auf die westliche Honigbiene beziehen, die auch, zumindest in Deutschland, mit Abstand am meisten verbreitet ist.

² Zit. nach Lisa Oberschelp: *Bienensterben – das Verschwinden der fleißigen Helfer*, Umweltschutzstiftung RESET, 2012. URL: <http://reset.org/knowledge/bienensterben-das-verschwinden-der-fleissigen-helfer> [Stand 15.07.2013]

³ Vgl. Webseite des Imkervereins Berlin-Tempelhof. URL: <http://www.imkerverein-tempelhof.de/html/bedeutung.html> [Stand 15.07.2013]

⁴ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *westliche Honigbiene*. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Westliche_Honigbiene [Stand 21.07.2013]

⁵ Vgl. Andreas Unger: *Das kollektive Königreich*, Greenpeace magazin 4.11. URL: <http://www.greenpeace-magazin.de/magazin/archiv/4-11/bestaebung/> [Stand 16.07.2013]

⁶ Vgl. Sybille Möckl: *Antibiotikum soll Bienen retten*, Die Welt, 16.04.09. URL: http://www.welt.de/welt_print/article3563617/Antibiotikum-soll-Bienen-retten.html [Stand 15.07.2013]

In den letzten Jahren sind hohe Bienensterberaten nicht nur in den USA beobachtet worden, wo im Winter 2006/2007 sogar ca. 80 % der Bienenvölker verstorben sind.⁷ Dort sind die Bienen durch die Verwendung „mobiler Bienenstöcke“ besonders belastet. Ungefähr die Hälfte aller Bienenvölker wird nämlich durch das Land und damit zu den jeweils zu unterschiedlichen Zeiten blühenden Plantagen gefahren. Dadurch sind sie nicht nur starkem, langanhaltendem Stress ausgesetzt, sondern können sich auch Krankheiten etc. aus vielen Staaten einfangen.⁸ Die Plantageninhaber bezahlen seit einigen Jahren mehr als das Doppelte als zuvor für die gemieteten Bienen.⁹

In Deutschland sind vor allem die Varroamilben verantwortlich für die erhöhte Gefährdung der Honigbiene. Diese dringen in die Brutzellen der Bienen ein, bevor diese verschlossen werden und legen ihre Eier ab, so dass die Milbenlarven von den heranwachsenden Bienenlarven zehren können.¹⁰ Doch nicht nur dieses Vorgehen macht dem Honigbienenvolk zu schaffen, denn zudem wird der Flügeldeformationsvirus, der zum geringen Teil auch ohne die Milben vorkommt, von den Varroamilben übertragen. Die Folgen der Viren und Milben sind sowohl verkrüppelte Flügel, als auch ein verkürztes Leben. Es kommt vor, dass so ein ganzes Bienenvolk innerhalb weniger Tage zerstört wird.¹¹

Eine oft angewandte Lösung für diese Probleme sind Chemikalien, was jedoch wiederum zu einem neuen Problem führt: Die starken, widerstandsfähigen Milben überleben und pflanzen sich fort.

Auch die moderne Agrarwirtschaft ist einer der Hauptfeinde der Bienen geworden – durch den massiven Einsatz hoch-giftiger Pflanzenschutzmittel. Ein Beispiel war der Einsatz von Clothianidin der Firmer Bayer im Jahr 2008: *„Clothianidin schädigt auch die Brut und zerstört das Gedächtnis und den Orientierungssinn der Bienen. Sie können die Temperatur im Stock nicht mehr regulieren, zittern und sterben. Bayer schob den Saatgutherstellern die Verantwortung zu, zahlte dann für die 11.500 vernichteten Völker zwei Millionen Euro*

⁷ Vgl. Lisa Oberschelp: *Bienensterben – das Verschwinden der fleißigen Helfer*, Umweltschutzstiftung RESET, 2012. URL: <http://reset.org/knowledge/bienensterben-das-verschwinden-der-fleissigen-helfer> [Stand 15.07.2013]

⁸ Vgl. Andreas Unger: *Das kollektive Königreich*, Greenpeace magazin 4.11. URL: <http://www.greenpeace-magazin.de/magazin/archiv/4-11/bestaebung/> [Stand 16.07.2013]

⁹ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *Colony Collapse Disorder*. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Colony_Collapse_Disorder [Stand 16.07.2013]

¹⁰ Vgl. Lisa Oberschelp: *Bienensterben – das Verschwinden der fleißigen Helfer*, Umweltschutzstiftung RESET, 2012. URL: <http://reset.org/knowledge/bienensterben-das-verschwinden-der-fleissigen-helfer> [Stand 15.07.2013]

¹¹ Vgl. *Varroa-Milbe trägt Virus massenhaft in Bienenvölker*, Die Welt, 08.06.12. URL: <http://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article106442805/Varroa-Milbe-traegt-Virus-massenhaft-in-Bienenvoelker.html> [Stand 16.07.2013]

*Entschädigung. Für den Konzern kein Problem: Im Jahr zuvor hatte Bayer allein mit diesem Gift 237 Millionen Euro Umsatz gemacht.*¹²

In solchen Fällen soll eigentlich die Bienenschutzverordnung helfen, die die Schädlichkeit von Pflanzenschutzmitteln für Bienen reguliert. Kritikpunkt ist jedoch, dass der Einsatz einiger für Bienen erwiesenermaßen schädlicher Stoffe immer noch erlaubt ist.¹³

Fakt ist: Auch wenn die Menschheit zwar nicht zugrunde gehen würde, wie in Einsteins vermeintlichem Zitat, so würde sie doch auf jeden Fall stark unter dem Verlust der Bienenbestäubung leiden. Die bisherigen Lösungen gegen die Belastungsfaktoren bringen ihrerseits Probleme mit sich. Nicht nur aus diesem Grund ist es wichtig, noch mehr über diese interessanten und komplexen Insekten herauszufinden, um sie besser zu verstehen und ihnen besser bei der Arbeit und ihrer Arterhaltung helfen zu können.

1.2. Grundlegendes zur Forschung

Es gibt zurzeit zahlreiche Forschungsprojekte rund um die Welt, die sich mit Bienen beschäftigen.

Beispielsweise wurde in den Vereinigten Staaten 2009 an der Harvard University ein Projekt gestartet, in dem ein Flugroboter nach Vorbild der Biene entwickelt werden soll. Die zur Verfügung gestellten Mittel betragen zehn Millionen Dollar und es sollte ein Roboter mit einer Flügelspannweite von fünf Zentimetern erschaffen werden, der das Sensor-, Flug- und Schwarmverhalten echter Bienen nachahmt.^{14 15}

Ein anderes interessantes Beispiel ist der Einsatz von Bienen als „Sprengstoff-Bienen“, welche nahe London trainiert werden. Dort wird der feine Geruchssinn einzelner Bienen auf den Geruch von TNT und anderen Sprengstoffen sensibilisiert. Die in einer Vorrichtung angebrachten Bienen können durch das Herausstrecken der Zunge, welches bei Vorhandensein von Sprengstoff eintritt und per Videoaufnahme erkannt wird, die Grenzkontrolleure alarmieren. Bei einem zukünftigen Einsatz würde die Arbeit mit ihnen

¹² Zit. nach Andreas Unger: *Das kollektive Königreich*, Greenpeace magazin 4.11. URL: <http://www.greenpeace-magazin.de/magazin/archiv/4-11/bestaeubung/> [Stand 16.07.2013]

¹³ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *Bienenschutzverordnung*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bienenschutzverordnung> [Stand 17.07.2013]

¹⁴ Vgl. *Harvard beginnt Entwicklung von Roboter-Biene*, Trends der Zukunft, 14. August 2009. URL: <http://www.trendsderzukunft.de/harvard-beginnt-entwicklung-von-roboter-bienen/2009/08/14/> [Stand 21.07.2013]

¹⁵ Der aktuelle Stand der Entwicklung ist aus folgendem Video ersichtlich: <http://video.golem.de/wissenschaft/10697/minidrohne-robobee-harvard.html> [Stand 29.07.2013]

sogar effektiver sein¹⁶ als die mit Sprengstoffhunden, auch wenn Honigbienen nur eine kurze Lebenszeit (im Sommer wenige Wochen) haben.^{17 18}

In einem thematisch ähnlichen Projekt in Kroatien werden Bienen auf die Suche nach Landminen geschickt.¹⁹

Auch Tim Landgraf, der vor kurzem an der Freien Universität Berlin promovierte, widmet sich der Erforschung von Bienen. Er leitet schon seit fünf Jahren eine entsprechende Arbeitsgruppe, die sich mit Bientänzen beschäftigt.

Bereits in den 40er Jahren wurde von Karl von Frisch herausgefunden, dass die über Tänze miteinander kommunizierenden Honigbienen sich dabei über die Eigenschaften neuer Futterfunde informieren. Dabei wird den anderen Bienen eine Duftprobe der Pflanze geliefert. In einem Tanz in dem die Biene, welche die Quelle entdeckt hat, mit dem Hinterteil wackelt, wird dann die Entfernung, Richtung und Reichhaltigkeit der Nektarquelle codiert.²⁰

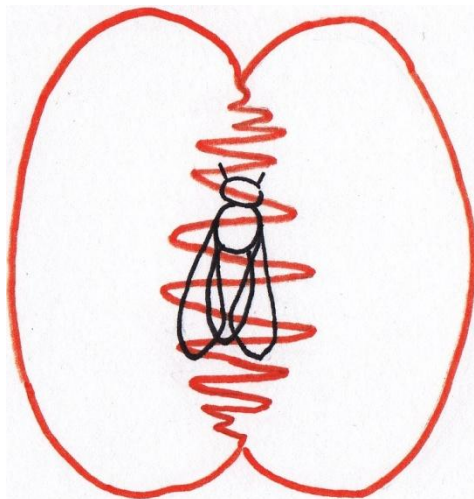


Abbildung 1: Bewegungsrouten eines Schwänzeltanzes

Beim Schwänzeltanz, der für weiter entfernte Futterquellen benutzt wird, wird in Form einer acht getanzt, dabei ist der Kreuzpunkt der beiden Halbkreise eine Gerade, auf der die Biene schwänzelt (daher der Begriff Schwänzeltanz). **Dieses Schwänzeln soll von dem von mir entwickelten Programm, das in einem späteren Abschnitt erläutert wird, erkannt werden.** Wenn die Laufrichtung der Biene auf der Geraden nach oben zeigt, ist die

¹⁶ Sie sind zuverlässiger und lernen schneller.

¹⁷ Vgl. Heinz Greuling: *Im Dienste Ihrer Majestät: Antiterror-Bienen*, SWR Fernsehen, Sendung vom 23.11.2006, 22:02 Uhr. URL: <http://www.swr.de/odyssol/-/id=1046894/nid=1046894/did=2257916/1sxdsg/index.html> [Stand 17.07.2013]

¹⁸ Vgl. Stuart Leithes: *Bomb-ble bees: Insects to sniff out explosives*, Video vom 07.05.2013. URL: <http://www.itv.com/news/anglia/update/2013-05-07/bomb-ble-bees-insects-to-sniff-out-explosives> [Stand 21.07.2013]

¹⁹ Vgl. *Sprengstoff-Bienen auf Minensuche*, Die Welt, 04.06.07. URL: <http://www.welt.de/wissenschaft/article919372/Sprengstoff-Bienen-auf-Minensuche.html> [Stand 16.07.2013]

²⁰ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *Tanzsprache*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schwänzeltanz> [Stand 21.07.2013]

Futterquelle in Richtung der Sonne, wenn sie auf dem aufrecht stehenden Bienenstock nach links schwänzelt, ist die Quelle 90 Grad links von der Sonne, dies ist auf alle Gradangaben übertragbar. Die Bienen orientieren sich also beim Fliegen unter anderem an der Sonne. Um nach dem Schwänzeln wieder zur Startposition zurückzugelangen, wird abwechselnd der linke oder der rechte Halbkreis benutzt. Mit der Geschwindigkeit, mit der die Biene sich auf dem Halbkreis bewegt, gibt sie an, wie viel Vorrat an der entsprechenden Stelle zu finden ist. Die Länge der Mittellinie, auf der geschwänzelt wird, steht im Verhältnis zur gefühlten Entfernung der Futterquelle.²¹ Sie orientiert sich dafür an Objekten in der Natur – also mithilfe ihrer optischen Wahrnehmung – je mehr Veränderung, desto länger ist ein Schwänzel-Durchlauf. Auch das magnetische Feld der Erde ist ihr bei der Orientierung behilflich.^{22 23}

1.3. Das Projekt

In den vergangenen Jahren wurde von der Arbeitsgruppe um Tim Landgraf ein Roboter zur Nachahmung des Bientanzes konstruiert, die „RoboBee“. Diese künstliche Biene, die an einer sie bewegendenden Stange befestigt ist, führte den Bienen im Stock einen Tanz vor. Das Ziel war, die Bienen zum Aufsuchen der angegebenen Futterquelle zu bringen. Dazu mussten die Bienen die Attrappe als eine von ihnen anerkennen.

In diesem Jahr gibt es ein neues Forschungsthema, mit dem sich die Gruppe *biorobotics lab* aus Biologen und Informatikern beschäftigt. Ziel ist es herauszufinden, welche Gruppen es in einem Honigbienenvolk gibt.

Es ist allgemein bekannt, dass die Bienenvölker in mehrere Aufgabenbereiche eingeteilt sind. Die wichtigste Biene ist die Königin. Um eine neue Königin zu bekommen, wird eine einzelne Larve nicht mit dem üblichen Larvenfutter gefüttert, sie erhält ausschließlich das *Gelée Royale*.²⁴ Dadurch erhält sie einen größeren Körper und ihre Lebensaufgabe wird das Legen von Eiern – bis zu 2000 Stück am Tag. Die Königin verhindert durch die Abgabe einer Substanz, dass die Arbeiterbienen ebenfalls Eier legen können.²⁵

Sie muss sich jedoch erst mit mehreren Drohnen (männliche Bienen) paaren. Dazu fliegt sie einmal in ihrem Leben zum Hochzeitsflug aus. Die Drohnen haben einzig und allein die

²¹ Vgl. *Bientanz*, SWR/WDR, 1.6.2009. URL: http://www.planet-wissen.de/wissen_interaktiv/bientanz.jsp [Stand 17.07.2013]

²² Vgl. Udo L. Figge: *Bientanz*, 02.07.2002. URL: <http://homepage.ruhr-uni-bochum.de/Udo.Figge/texte/bientanz.html> [Stand 21.07.2013]

²³ Vgl. *Die Psychologie der Honigbienen*. URL: <http://www.bee-info.de/biologie-biene/magnetischer-sinn.html> [Stand 21.07.2013]

²⁴ *Gelée Royale* ist ein Futtersaft, der von den Arbeiterinnen erzeugt wird.

²⁵ Vgl. Bienenwiki-Artikel zu *Königin*. URL: <http://www.bienenwiki.de/wiki/index.php?title=Königin> [Stand 21.07.2013]

Aufgabe, eine Königin zu begatten, und sind in einer viel kleineren Zahl als die Arbeiterinnen vorhanden. Zudem werden sie am Ende des Sommers aus dem Stock verjagt.²⁶

Die Aufgaben der Arbeiterinnen wechseln mit fortschreitendem Alter. Als Stockbiene verrichten sie zu Beginn Putzaufgaben, kümmern sich anschließend um die heranwachsenden Maden und Larven, um dann Wachs zu produzieren und dieses zu verarbeiten. Im Anschluss werden sie zu Wächterbienen. Sie bewachen die Eingänge zum Bienenstock und machen kurze Ausflüge, um schließlich als Sammlerinnen Pollen und Nektar zu sammeln und zum Stock zu bringen. Zudem gibt es die Untergruppe der Spurbienen, die damit beschäftigt ist, nach neuen Futterquellen zu suchen und diese den anderen Sammlerinnen beim Bientanz mitzuteilen.²⁷

Die Hypothese, welche in diesem Jahr von Tim Landgrafs Arbeitsgruppe bearbeitet wird, ist die, dass es innerhalb der Sammelbienen noch weitere Gruppen gibt, deren Mitglieder zum Beispiel gemeinsam an den gleichen Stellen auf der Wabe schlafen und sich immer die Tänze der Gruppenmitglieder anschauen, um so die gleichen Futterquellen anzufliegen.

Um zu überprüfen, ob es tatsächlich immer die gleichen Bienen sind, die zusammen tanzen, muss zum einen festgestellt werden, um welche Bienen es sich dabei handelt, und zum anderen muss über einen längeren Zeitraum beobachtet werden, welchen Tänzen sie folgen.

Die Herangehensweise ist folgende:

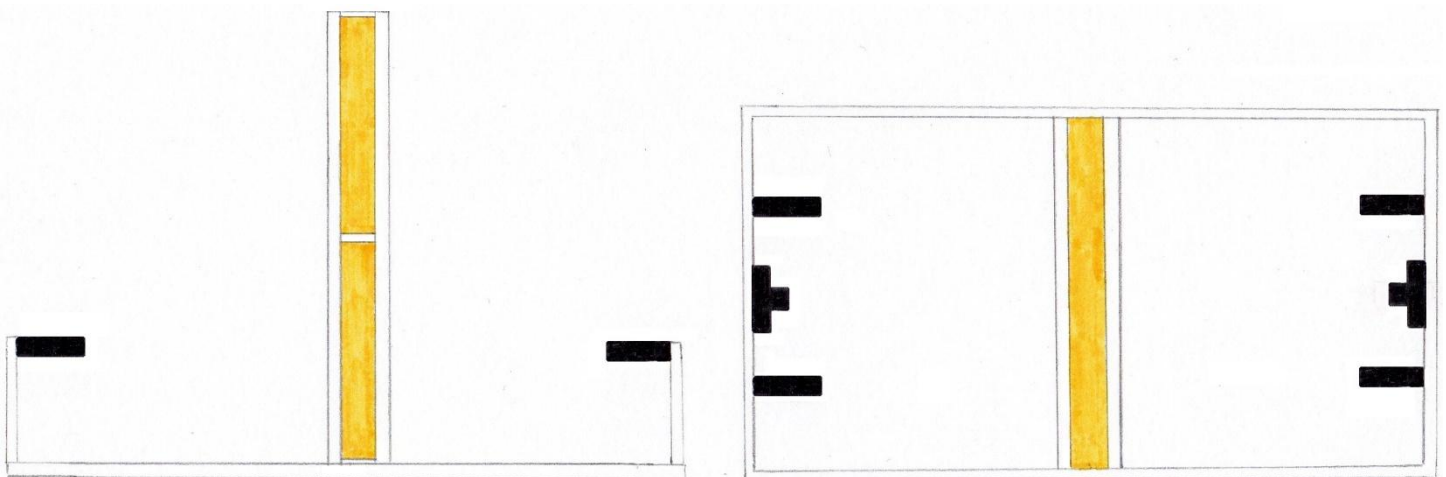


Abbildung 2: Seitenansicht- (links) und Draufsicht-Skizze (rechts) des Versuchsaufbaus

Der beobachtete Bienenstock besteht aus zwei Waben, die aufrecht stehen und übereinander angebracht sind. Auf beiden Seiten befindet sich eine Plexiglas-Scheibe, durch

²⁶ Vgl. Bienenwiki-Artikel zu *Drohn*. URL: <http://www.bienenwiki.de/wiki/index.php?title=Drohn> [Stand 21.07.2013]

²⁷ Vgl. Bienenwiki-Artikel zu *Arbeiterin*. URL: <http://www.bienenwiki.de/wiki/index.php?title=Arbeiterin> [Stand 21.07.2013]

die die Bienen auf den Waben beobachtet werden können. Nun wird jeweils eine Kamera für die Tanzerkennung auf jeder Seite der unteren Wabe platziert, da dort die Tänze stattfinden. An einer Ecke der unteren Wabe befindet sich ein Loch, durch das ein Schlauch nach außen führt. Dies ist der einzige Ausgang des Bienenstocks – weshalb die meisten Tänze in dieser Gegend stattfinden.

Um die Bienen unterscheiden zu können, werden diese mit einem Tag (engl. *Etikett*) markiert, das ihnen auf den Rücken zwischen Kopf und Flügeln geklebt wird. Hierbei handelt es sich um eine 4 × 4-Matrix mit schwarzen und weißen Quadraten, ähnlich einem QR-Code. Dieses Tag ist eindeutig und erlaubt es auch, die Ausrichtung der Biene festzustellen. Von den 16 Einzelfeldern werden vier für die Richtungsbestimmung benötigt. Damit bleiben noch 12 Felder mit je zwei möglichen Zuständen (schwarz oder weiß), woraus sich 2^{12} Möglichkeiten ergeben. Es existieren also 4096 verschiedene Tags. Ziel ist es, nahezu alle Bienen zu markieren.



Abbildung 3: Einzelne Biene mit Tag auf einer Wabe (Foto: Fernando Wario Vazquez)

Nun werden anhand der Videoaufnahmen die Zeit und der Punkt auf der Wabe ermittelt, an dem ein Tanz stattfindet – dies ist meine Aufgabe. Dazu sollte ein Skript in *MATLAB*²⁸

²⁸ Mathematik-Software, die ich im Abschnitt „Software“ erkläre

entwickelt werden, das verschiedene Bildbearbeitungsverfahren auf die einzelnen Frames²⁹ der Videoaufnahmen anwendet. Nachdem ein funktionstüchtiges, erfolgversprechendes Vorgehen zur Tanzerkennung gefunden wurde, soll diese Variante in der Programmiersprache C++ umgesetzt werden, um ein lauffähiges Programm zu erzeugen, das auch auf Grundlage von direkten Videoaufnahmen arbeiten kann.

Anhand der Angabe des Tanzpunktes und der Zeit kann im Anschluss mithilfe der Taglokalisierungen ermittelt werden, welche Biene getanzt hat und welche Bienen diesen Tanz beobachtet haben. Das sind die Bienen, die um die Tanzende versammelt sind und deren Ausrichtung in die Tanzrichtung zeigt. Über mehrere Tage hinweg kann dann beobachtet und anschließend berechnet werden, ob es signifikante Unterschiede in der Tänzer-Beobachter-Beziehung zweier Individuen gibt, oder ob diese in etwa gleichverteilt sind. Trifft letzteres zu, wäre die Hypothese, dass es weitere Untergruppen innerhalb der Sammlerbienen gibt, widerlegt.

1.4. Aufbau der Arbeit

Im Folgenden soll auf die Lösung dieser Aufgabe eingegangen werden. Dazu werde ich zunächst beschreiben, welche Hilfsmittel benötigt werden, um ein Programm zur Schwänzeltanz-Erkennung zu entwickeln. Im Anschluss wird dann die konzeptionelle Funktionsweise des fertiggestellten Computerprogramms erläutert werden. Dabei werden die Unterschiede der zwei Implementierungen aufgezeigt, die mit verschiedenen Programmiersprachen erfolgten. Eine Qualitätseinschätzung des erstellten Codes anhand von verschiedenen Merkmalen sowie ein kleiner Ausblick bilden den Schluss der Arbeit.

2. Technik

2.1. Hardware

Die Hardware, die für das Projekt benötigt wird, besteht aus einem Rechner für die Aufnahmen (bzw. für die direkte Berechnung der Tanzpositionen mithilfe des von mir eigens dafür entwickelten Programms) und einem weiteren Rechner, der die Daten auswertet. Die Identifizierung der tanzenden Biene erfolgt anhand der Zeit und der Position. Die sie umgebenden Bienen werden überprüft und diejenigen, deren Kopf in Richtung der Tanzenden zeigt, werden als Beobachterinnen erkannt. Nun erfolgt die Eintragung in die Statistik.

²⁹ Einzelbild eines Videos

Als Datenspeicherabstraktion ist eine Matrix denkbar, in der jeder Biene eine Zeile und eine Spalte zugeordnet wird (also eine Matrix der Größe 4096x4096). Dann werden nach jedem Tanz in der Zeile der tanzenden Biene die Werte der Zellen inkrementiert,³⁰ die sich in der Spalte **einer** der Beobachterinnen befindet.

Auf diese Weise entwickelt sich mit zunehmend gefundenen Tänzen eine immer aussagekräftigere Statistik. Wenn die Werte der Zellen ungefähr gleichverteilt sind, dann ist die Hypothese widerlegt. Denkbar wär jedoch auch der Fall, dass sich beispielsweise eine solche Matrix ergibt (hier zu Beispielszwecken stark vereinfacht):

	1	2	3	4	5	6	7
1	-	1	0	24	2	35	4
2	1	-	19	2	34	1	6
3	0	5	-	2	12	0	3
4	3	0	1	-	0	14	1
5	0	3	9	0	-	0	4
6	2	0	0	10	0	-	0
7	1	5	21	0	42	3	-

Aus derartigen Daten wäre sofort zu schließen, dass es tatsächlich eine Art von Gruppen unter den Arbeiterinnen gibt:

- Gruppe A, in der Biene 4 und 6 hauptsächlich den Tänzen von Spurbiene 1 folgen
- Gruppe B, die aus Biene 2, 3, 5 und 7 besteht weil die Werte in den Zellen, die ihr Interagieren dokumentieren, wesentlich größere sind, als die restlichen Zellen von Biene 2, 3, 5 und 7

Des Weiteren werden als Hardware natürlich auch Kameras benötigt. Es wurde bereits erwähnt, dass nur die untere Wabe von beiden Seiten gefilmt wird. Jedoch genügen hierbei zwei Kameras nicht, da sich für die beiden Aufgaben, die mithilfe der Videos gelöst werden sollen, völlig unterschiedliche Anforderungen ergeben: Für die Tanzberechnung wird eine sehr hochfrequente Aufnahme benötigt. Da die Bienen beim Schwänzeltanz ca. 26 Mal in der Sekunde die Richtung wechseln,³¹ wird eine Framerate (Bildfrequenz) von mehr als 50 Frames³² pro Sekunde (fps) benötigt. Zur Sicherheit benutzen wir nach Möglichkeit 60 fps. Eine hohe Auflösung ist jedoch nicht erforderlich und sollte auch bei einer derart hohen

³⁰ Um eins erhöht

³¹ Vgl. Karl von Frisch/ Rudolf Jander: Über den Schwänzeltanz der Bienen. In: *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, Volume 40/ 1957, S. 239-263. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00340570> [Stand 22.07.2013]

³² Vergleich: Ein Mensch kann ca. 24 Bilder in der Sekunde wahrnehmen.

Framerate vermieden werden, da es keine erschwinglichen Kameras gibt, die eine derart hohe Framerate und zudem noch eine hohe Auflösung haben. Außerdem würden die entstandenen Videos extrem viel Speicherplatz beanspruchen und die Berechnung würde wesentlich länger dauern, da die Einzelbilder größer wären. Für die Tanzerkennung ist eine VGA-Auflösung von 640 × 480 Pixeln ausreichend, da lediglich die Bewegungen erkannt werden müssen. Die Entscheidung ist schließlich auf die *PlayStation Eye* gefallen,³³ die 75 fps bei 640 × 480 Pixeln aufnehmen kann und gute Testberichte erhalten hat.

Andere Anforderungen bestehen bei der Tagerkennung – hier werden nur 4 fps benötigt, da die Bienen eine markante Positionsveränderung nicht schneller durchführen können. Jedoch ist eine hohe Auflösung erforderlich, da die Tags nur einen Durchmesser von 3 mm haben und bei der 4 × 4 Matrix ein schwarzes oder weißes Feld nur eine Größe von 0,5 × 0,5 mm hat. Die gefilmte Bienenwabe ist jedoch 350 × 210 mm groß. Dazu kommen diverse Fehlerkriterien, die die Erkennung erschweren, wie zum Beispiel schlechtes Licht oder eine geringe Schräglage der Biene, wodurch die Tags nicht immer im perfekten Winkel zur Kamera stehen. Nach Berechnungen und Tests wurde schließlich die Entscheidung gefällt, dass wir die *Flea3* von *Point Grey* für die Aufnahmen zur Tagerkennung einsetzen werden. Sie kann 12 Megapixel aufnehmen. Da diese Auflösung noch nicht ausreichend ist, werden zwei Kameras pro Wabenseite verwendet.

Zu Beginn meiner Arbeit waren weder Kameras noch die Bienen vorhanden, daher habe ich zum Entwickeln des Programms Aufnahmen von Tänzen aus den letzten Jahren verwendet.³⁴ Diese waren schwarzweiß und mit 100 fps sowie einer Auflösung von 640 × 480 Pixeln aufgenommen worden, zeigten jedoch nur einen kleinen Ausschnitt der Bienenwabe. Nach Berechnung der Ausschnittgröße, mithilfe der Bienengröße im Video und der realen Bienen- und Wabengröße, ergab sich, dass es sich dabei um ein Sechzehntel der gesamten Bienenwabe handelte. Um realistische Ergebnisse zu erhalten, änderte ich die Auflösung des Videos auf 160 × 112 Pixel. Nun waren die Bienen in Pixeln ausgedrückt so groß wie in den späteren Aufnahmen.

³³ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *PlayStation Eye*. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/PlayStation_Eye [Stand 18.07.2013]

³⁴ Diese wurden mir von Tim Landgraf zur Verfügung gestellt.

2.2. Software

Zusammen mit der Videoauflösung veränderte ich auch die Komprimierung mithilfe des *MEncoder264*.³⁵ Dadurch benötigten die Videos nur noch einen Bruchteil des Speicherplatzes.

Um nun das Video im *H.264*³⁶-Format in meine Programmierumgebung einbinden zu können, verwendete ich das Tool *FFmpeg*,³⁷ welches den Codec zur Decodierung von *H.264* für *MATLAB* bereitstellt.³⁸

MATLAB ist eine weit verbreitete Software,³⁹ die zum Lösen numerischer Aufgaben benutzt wird. *MATLAB* bietet viele nützliche Funktionen, und mithilfe von selbst erstellten Skripts oder Funktionen können komplexe Aufgaben leicht und ohne großen Aufwand gelöst werden.

„Durch die vereinfachte, mathematisch orientierte Syntax der *MATLAB*-Skriptsprache und die umfangreichen Funktionsbibliotheken für zum Beispiel Statistik, Signal- und Bildverarbeitung ist die Erstellung entsprechender Programme wesentlich einfacher möglich als z. B. unter C.“⁴⁰

Dies sollte ich beim späteren Übersetzen meines in *MATLAB* erstellten Codes auch bemerken. Ich hatte zuvor bereits mit C++ gearbeitet, *MATLAB* benutzte ich zum ersten Mal und dennoch war die Aufgabenstellung mit *MATLAB* viel einfacher umzusetzen.

Ein großer Vorteil des Programms ist, dass keine Typdefinition benötigt wird. Die statische Typisierung von C++ verursachte mir oft Probleme, lässt jedoch bestimmte Fehler schon zur Kompilierzeit erkennen. C++ rechnet dabei schneller und ist mächtiger. Außerdem kann man ein alleinstehendes, ausführbares Programme erzeugen, wobei jedoch Probleme mit den zugehörigen Bibliotheken auftreten können. Zudem sind die Speicherstrukturen und Funktionen komplexer und dadurch fehleranfälliger als in *MATLAB*.⁴¹

Visual Studio ist eine von *Microsoft* kommerziell vertriebene Entwicklungsumgebung für verschiedene Programmiersprachen – unter anderem auch für C++. Es gibt im Funktions-

³⁵ *MEncoder264* v1.0.1.9, developed by Mulder. Download-URL: <http://code.google.com/p/mulder/downloads/detail?name=MEncoder264.2006-09-17.Full.exe&can=4&q=> [Stand 12.05.2013]

³⁶ Ein Video-Komprimierungsstandard

³⁷ *FFmpeg* ist ein Projekt das mehrere Komponenten enthält. Ich benötigte hierbei die Codec-Sammlung *libavcodec* welche alle *FFmpeg*- Encoder und –Decoder enthält (unter anderem auch den H.264 Decoder).

³⁸ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *FFmpeg*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/FFmpeg> [Stand 20.07.2013]

³⁹ Auf der Suche nach einem Praktikumsplatz stieß ich in fast jeder zweiten für mich interessanten Ausschreibung auf *MATLAB* als Anforderung.

⁴⁰ Wikipedia-Artikel zu *MATLAB*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/MATLAB> [Stand 20.07.2013]

⁴¹ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *Statische Typisierung*. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Statische_Typisierung [Stand 20.07.2013]

umfang eingeschränkte „Express-Versionen“, die von der *Microsoft*-Website kostenlos heruntergeladen werden können. Ich verwendete *Visual C++ 2010 Express*,⁴² welches meinen Anforderungen weitgehend entsprach.

Die Benutzung der beiden Entwicklungsumgebungen sowie die dazugehörige Sprache lernte ich hauptsächlich durch Online-Tutorials (engl. *Anleitungen*), wie auch die Einbindung von *OpenCV* in *Visual Studio*.⁴³ *OpenCV* (CV steht für Computer Vision) ist eine umfangreiche Bibliothek für C und C++, die unter anderem Bildverarbeitungsalgorithmen bereitstellt.⁴⁴

Mithilfe von *OpenCV* war nun auch die direkte Verwendung der Kamera möglich. Das Tanzerkennungsprogramm kann also mit zwei Inputs (engl. Eingaben) umgehen:

- Aufnahme der Webcam
- Videos auf der Festplatte unter Angabe des Pfads

Zum Entwickeln des C++-Codes wurden dieses Mal Videos der gesamten Wabe verwendet. Diese Videos habe ich zuvor mithilfe von *Virtual Dub* aufgenommen. *Virtual Dub* bietet verschiedene Videobearbeitungsfunktionen.⁴⁵

Für mich wichtig war sowohl die Video-Capture- (engl. *Videoaufnahme*), als auch die Komprimierungsfunktion. Ich benutzte zum Aufnehmen auch die *PlayStation-Eye*-Software *CL-Eye Test*,⁴⁶ welche jedoch nicht so komfortabel und umfangreich wie *Virtual Dub* ist.

3. Programm

3.1. Funktionsweise in *MATLAB*

Zusammenfassung

Die Parameter, mit denen das Tanzerkennungsprogramm gesteuert wird, sind als Variablen gespeichert und somit veränderbar. Sie beeinflussen die Qualität der Tanzerkennung und sind im Folgenden kursiv gehalten. Ein Teil der benötigten Variablen wird jeweils in grauen Tabellen dargestellt.

⁴² *Microsoft Visual C++ 2010 Express*. Download-URL: <http://www.microsoft.com/visualstudio/deu/downloads#d-2010-express> [Stand 16.06.2013]

⁴³ Zum Beispiel die Videos folgender *YouTube*-Mitglieder:

- *kwoxer1*. URL: <http://www.youtube.com/playlist?list=PL878117039FABC3A3> [Stand 22.07.2013]

- *Kyle Hounslow*. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=cgo0UitHfp8> [Stand 22.07.2013]

⁴⁴ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *OpenCV*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/OpenCV>, Download-URL: <http://opencv.org/downloads.html> [Stand 22.07.2013]

⁴⁵ *VirtualDub* 1.9.11 – Copyright (C) 1998-2010 by Avery Lee. Download-URL: <http://sourceforge.net/projects/virtualdub/?source=dlp> [Stand 12.07.2013]

⁴⁶ *CL-Eye Test*, Version 9.01, Copyright © Microsoft Corp. Download-URL: <http://codelaboratories.com/products/eye/> [Stand 02.07.2013]

Um Tänze in einem Video zu lokalisieren, soll der am besten erkennbare Teil eines Schwänzel-Tanzes detektiert werden, nämlich das Schwänzeln. Es handelt sich hierbei um starke Bewegungen, die sich leicht mithilfe von Bildverarbeitungsoperationen erkennen lassen. Dazu wird folgende Herangehensweise angewandt:

Die Bewegungen, die von einem Frame zum nächsten Frame auftreten, werden so dezimiert, dass nur die stärksten Bewegungen übrig bleiben. Über einen Zeitabschnitt von ca. zehn Frames (*vonwiev*) werden alle diese starken Bewegungen gespeichert. Dann wird ermittelt, ob in diesen zehn Frames an einer Stelle im Video, die maximal so groß ist wie eine Biene (*beesize*), viele (*wiev*) starke Bewegungen vorhanden sind: An diesen Stellen finden wahrscheinlich Tänze statt.

Diese Herangehensweise soll nun näher erläutert werden. Zum besseren Verständnis dienen die Tabellen und Bilder am Ende eines Abschnitts.

Vorarbeit

Damit die einzelnen Frames eines Videos verwendet werden können, muss dieses zuerst unter Angabe des Datei-Pfads geladen werden. Wir erhalten eine Speicherstruktur, in der jedes Frame in einer Matrix gespeichert ist. Alle nachfolgenden Bilder sind ebenfalls in Matrizen gespeichert.

In einer Schleife wird über das gesamte Video iteriert,⁴⁷ es werden also alle Frames behandelt. Folgende Aktionen werden in jedem Schleifendurchlauf ausgeführt:⁴⁸

Das aktuelle und das darauffolgende Frame werden in Graustufenbilder umgewandelt.

Dann wird die Differenz dieser beiden Graustufenbilder gebildet. →⁴⁹ Das Ergebnis ist ein dunkles Bild mit hellen Gebieten, an den Stellen, an denen eine Bewegung stattgefunden hat. Je stärker die Bewegung war, desto höher ist der Betrag an der entsprechenden Stelle (Pixel) der Bild-Matrix.

Nun wird anhand eines Grenzwertes auf Grundlage dieses Graustufenbildes ein Binärbild⁵⁰ gebildet. Alle Pixel, die einen Wert kleiner oder gleich der Variablen *grenz* haben, werden schwarz und alle anderen, die einen Wert größer als *grenz* haben, werden weiß dargestellt. → Binärbild mit starken Bewegungen.

⁴⁷ Wiederholtes Ausführen, Wiederholen

⁴⁸ In diesem Abschnitt wird die Ausführung in einer Schleife durch Einrücken signalisiert.

⁴⁹ Im Folgenden werden diese Pfeile verwendet, um darzustellen, was das Ergebnis der Operation ist.

⁵⁰ Ein Bild in dem die Pixel nur den Wert 1 (weiß) oder 0 (schwarz) haben können.

Es wird eine Folge der digitalen Bildverarbeitungsoperationen Erosion⁵¹ und Dilatation⁵² auf das Binärbild ausgeführt. Dadurch werden einzelne Störpixel – schwarze und weiße – entfernt. → Es entsteht ein Binärbild mit großen, weißen Flächen. Durch die Veränderung der Ausführungsreihenfolge werden verschiedene Ergebnisbilder erhalten.

Alle dieser weißen Flächen könnten nun tanzende Bienen sein. Um als einzelne Objekte weiter mit ihnen arbeiten zu können, werden sie in Zusammenhangskomponenten (connected components) eingeteilt. → Jede, von den anderen abgegrenzte, weiße Fläche ist eine Komponente und hat bestimmte Eigenschaften wie Mittelpunkt, Breite und Höhe.

Variable	Erklärung	Bsp. Wert
<i>grenz</i>	Zur Bildung des Binärbildes: Gibt an ab wann eine Bewegung stark genug ist um ein Tanz sein zu können. Starke Bewegungen sind weiß im Binärbild.	14

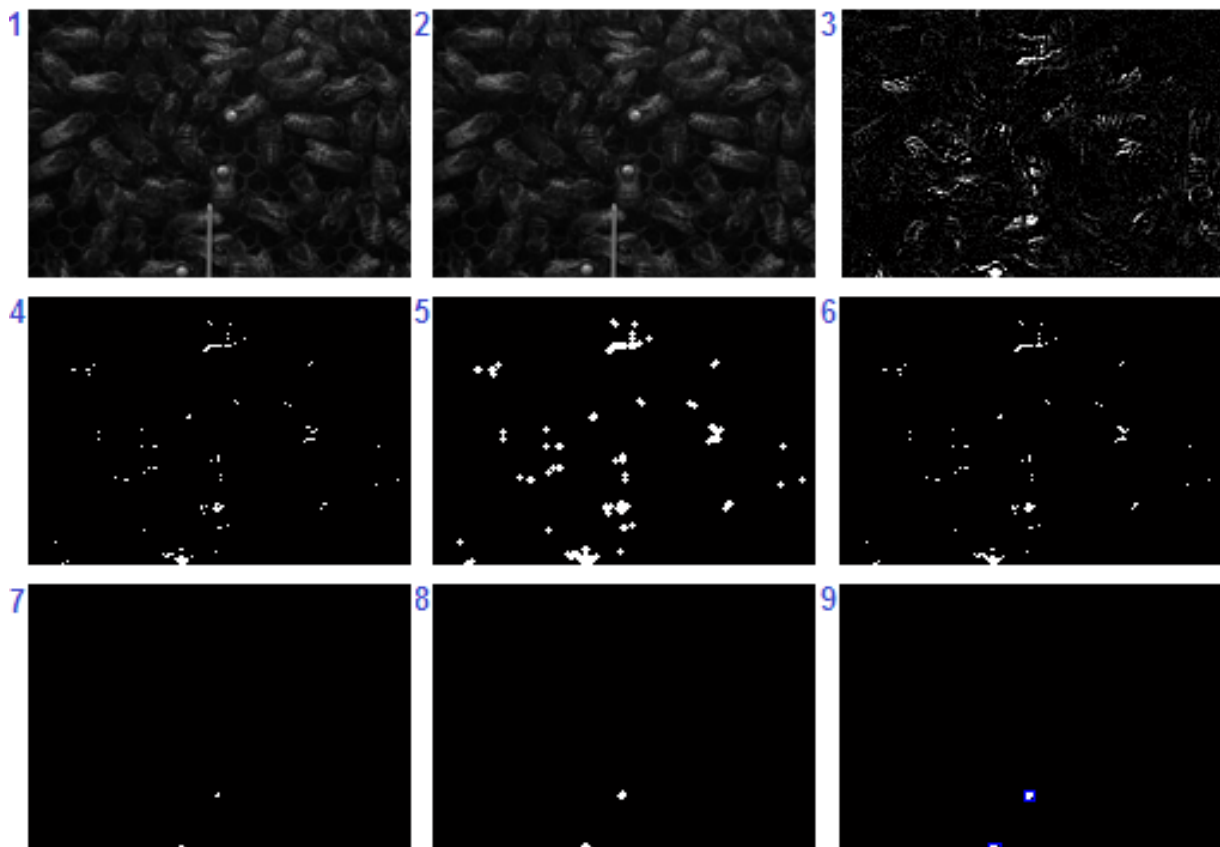


Abbildung 4: Ablaufbeispiel (1: Frame 2: darauf folgendes Frame 3: Differenz dieser Frames⁵³ 4: Binärbild(*grenz* = 16) 5: Binärbild nach Dilatation 6: Binärbild nach Dilatation und Erosion 7: Binärbild nach Dilatation und zwei Erosionen 8: Binärbild nach Dilatation und zwei Erosionen und erneuter Dilatation – Endergebnis)

⁵¹ Bei der Erosion wird jeder weiße Pixel, der mindestens ein schwarzes Nachbarpixel hat auch schwarz.

⁵² Die Dilatation ändert die Farbe von allen schwarzen Pixeln, die mindestens einen weißen Nachbarpixel haben in Weiß.

⁵³ Im abgebildeten Differenzbild wurde für diese Abbildung die Helligkeit mit 10 multipliziert, damit verschiedene Graustufen erkennbar sind.

Abschnitte einteilen

Da ein Tanz sich nicht über das gesamte Video erstreckt, sondern ein Schwänzel-Durchlauf meist nur einen Teil einer Sekunde dauert, wird das Video nun in Abschnitte eingeteilt. Innerhalb eines jeden Abschnitts wird dann nach einem Schwänzel-Lauf gesucht.

Dazu wird erneut über das Video iteriert, jedoch nun in *vonwiev* großen Abschnitten:

Um zu vermeiden, dass ein Tanz, der am Ende eines Abschnitts und am Anfang des darauffolgenden Abschnitts liegt, nicht erkannt wird, werden die Abschnitte ineinander übergehen. Sie überlagern bzw. überlappen einander. Dazu dient die Variable *ueberlapp* – wenn *ueberlapp* als Wert 1 hat, gibt es keine Überlappung. Wenn *ueberlapp* gleich 2 ist, dann liegt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Abschnitten noch ein weiterer Abschnitt und jedes Frame ist in zwei Abschnitten enthalten.

Variable	Erklärung	Bsp. Wert
<i>grenz</i>	Zur Bildung des Binärbildes: gibt an, ab wann eine Bewegung stark genug ist	14
<i>vonwiev</i>	Größe des Abschnitts in dem nach Tänzern gesucht wird	10
<i>ueberlapp</i>	Gibt an, in wie vielen Berechnungsabschnitten die Zusammenhangskomponenten jedes Frames behandelt werden	2

Folgende Beispiele illustrieren die Einteilung in Abschnitte:

ueberlapp = 1, *vonwiev* = 6⁵⁴:

Frame	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Abschnitt 1																		
Abschnitt 2																		
Abschnitt 3																		

ueberlapp = 2, *vonwiev* = 6⁵⁵:

	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Abschnitt 1																		
Abschnitt 2																		
Abschnitt 3																		
Abschnitt 4																		
Abschnitt 5																		
Abschnitt 6																		

ueberlapp = 3, *vonwiev* = 6⁵⁶:

	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Abschnitt 1																		
Abschnitt 2																		
Abschnitt 3																		
Abschnitt 4																		
Abschnitt 5																		
Abschnitt 6																		
Abschnitt 7																		
Abschnitt 8																		
Abschnitt 9																		

⁵⁴ Keine Überlappung: Jeder Abschnitt beginnt erst, nachdem der vorherige beendet ist.

⁵⁵ *ueberlapp* hat nun den Wert 2: Daher wird nach der Überprüfung eines Abschnitts, der nächste Abschnitt erst 3 (*vonwiev/ueberlapp*) Frames später überprüft wird.

⁵⁶ Da *ueberlapp*=3, wird jedes Frame zur Tanzberechnung in 3 Abschnitten benutzt. Jeder Abschnitt besteht dadurch zu 2/3 aus bereits zuvor in anderen Abschnitten verarbeiteten Frames und zu 1/3 aus neuen Frames.

Dies kann bis *ueberlapp* = 6 fortgeführt werden. Denn *ueberlapp* kann einen Wert zwischen 1 und *vonwiev* annehmen.

Abschnitt

In jedem der berechneten Abschnitte wird nun separat die *tanzfunktion* aufgerufen.

Die Mittelpunkte der gespeicherten Zusammenhangskomponenten der Frames des derzeitigen Abschnitts sind die Übergabe-Werte für die *tanzfunktion*. → Die Rückgabe der *tanzfunktion* sind die Mittelpunkte der gefundenen Tänze für diesen Abschnitt. Diese Mittelpunkte werden für alle Frames des Abschnittes als Tänze gespeichert, jedoch wird zuvor für jedes Frame überprüft, ob ein Teil dieser Tänze nicht bereits in einem vorherigen Abschnitt für dieses Frame gefunden wurde.⁵⁷

tanzfunktion

Der Input für die *tanzfunktion* sind also Punkte, nämlich die Mittelpunkte von starken Bewegungen auf *vonwiev* aufeinanderfolgenden Frames.

Der Gesamtmittelpunkt der Punkte wird berechnet und der von diesem Mittelpunkt entfernteste Punkt wird verworfen.⁵⁸ Dies wird so lange wiederholt, bis:

1. Weniger als *wiev* Punkte übrig sind → kein Tanz gefunden und die Tanzfunktion wird beendet (Ausgabe ist leer oder enthält die Mittelpunkte der zuvor gefundenen Tänze)
2. Die Punkte maximal *beesize* voneinander entfernt sind⁵⁹ → Tanz gefunden

Wenn ein Tanz gefunden wurde, dann kann nach dem nächsten gesucht werden. Dazu entferne ich die als zu einem Tanz gehörig identifizieren Punkte aus dem Input der Funktion und führe die Berechnung (des Gesamtmittelpunkts und der Abstände) erneut durch (alle zuvor verworfenen Punkte sind nun wieder in den Berechnungen inbegriffen).

⁵⁷ Wenn es in der Speicherstruktur für dieses Frame bereits einen Tanzmittelpunkt gibt, der zu einem der neuen Mittelpunkte weniger als *beesize* entfernt ist, dann handelt es sich vermutlich um den gleichen Tanz und dieser wird kein zweites Mal gespeichert.

⁵⁸ Wird nur verworfen, wenn nicht 1. oder 2. zutrifft.

⁵⁹ *wiev* Mittelpunkte in einem Bereich bedeutet nicht, dass diese Punkte aus *wiev* verschiedenen Frames stammen.

Variable	Erklärung	Bsp. Wert
<i>grenz</i>	Zur Bildung des Binärbildes: gibt an, ab wann eine Bewegung stark genug ist	14
<i>beesize</i>	Maximaler Abstand der zu einem Tanz gehörigen Zusammenhangskomponenten (starke Bewegungen) (Gibt an, wie groß der Bereich ist, in dem nach Tänzern gesucht wird)	18
<i>vonwiev</i>	Größe des Abschnitts in dem nach Tänzern gesucht wird	10
<i>wiev</i>	Um als Tanz erkannt zu werden, müssen sich <i>wiev</i> Zusammenhangskomponenten in <i>vonwiev</i> aufeinanderfolgenden Frames in einem maximalen Abstand von <i>beesize</i> befinden (WIEViele VONWIEVielen)	5
<i>ueberlapp</i>	Gibt an, in wie vielen Berechnungsabschnitten die Zusammenhangskomponenten jedes Frames behandelt werden	2

Die folgende Grafik illustriert einen solchen Durchgang:

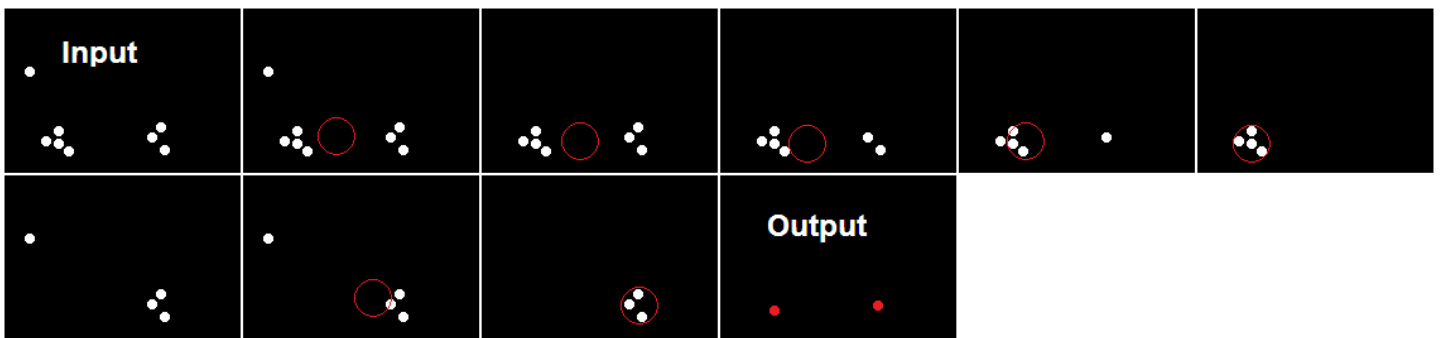


Abbildung 5: Input einer *tanzfunktion*, die Verarbeitungsschritte und das Ergebnis bzw. der Output (engl. *Ausgabe*)

Schließlich wird das Video mit den gefundenen Tanzstellen angezeigt. Um eine flüssige Videowiedergabe zu erhalten, erfolgt diese erst nach den Berechnungen.⁶⁰ In folgender Abbildung ist ein Beispiel zu sehen:

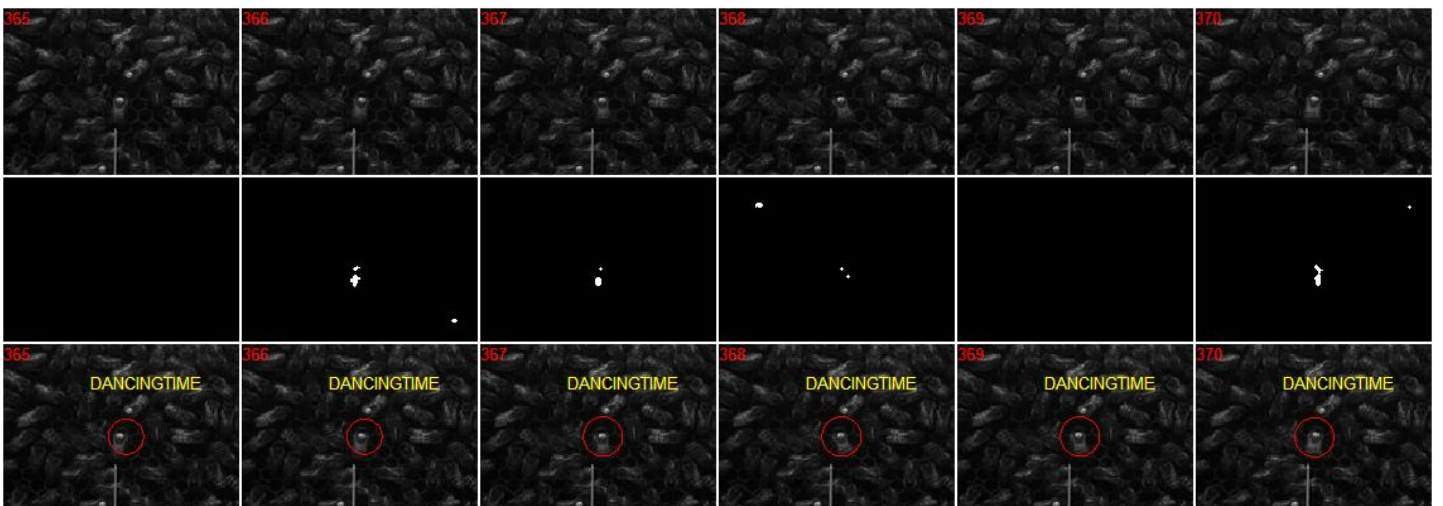


Abbildung 6: OBEN: Graustufenbild des aktuellen Frames; MITTE: Verarbeitungsschritte (Binärbild nach Dilatations- und Erosionsfolge); UNTEN: Ausgabe (Graustufenbild mit eingezeichnetem Tanz) (Variablenwerte: *vonwiev* = 6; *wiev* = 3; *beesize* = 18; *grenz* = 16; *ueberlapp* = 2)

Durch diese Vorgehensweise erhält man die Positionen der im Video tanzenden Bienen. Mithilfe der Framenummer kann ermittelt werden, zu welcher exakten Zeit diese Tänze

⁶⁰ Wenn das Video gleichzeitig mit der Berechnung abgespielt werden würde, dann würde es nur sehr langsam wiedergegeben werden, da zwischen jedem Bildwechsel erst die aktuelle Berechnung beendet werden müsste.

stattgefunden haben. Diese Informationen dienen im Anschluss dazu, mit der Tagerkennung die tanzende Biene und ihre Beobachter zu identifizieren.

3.2. *tanzfunktion mit k-Means*

k-Means

Das selbstkonzipierte Vorgehen der *tanzfunktion* war zu Beginn, als noch mit den kleinen Videos der Auflösung 160x112 Pixeln gearbeitet wurde, ausreichend. Als dieser Lösungsansatz jedoch auf die neu aufgenommenen, größeren Videos mit 640x480 Pixeln angewandt wurde, ergab sich, dass dieses Verfahren fehleranfällig ist und Probleme mit der Skalierbarkeit⁶¹ auftreten.

Ein ähnlicher Lösungsansatz könnte unter Zuhilfenahme von Clusteranalyseverfahren entwickelt werden.

Bei der Clusteranalyse werden Gruppen (Cluster) aus ähnlichen Objekten gebildet.⁶² In unserem Fall ist die vergleichbare Ähnlichkeit die Lage der Punkte in der Matrix. Punkte die nahe beieinander liegen sollen zu einem Cluster zusammengefasst werden. Diese Cluster können dann als Tanzpunkte identifiziert werden. Um als Tanz erkannt zu werden, müssen *wiev* Punkte in einem Cluster liegen und ihre Entfernung darf maximal *beesize* sein.

Ein bekanntes Clusteranalyseverfahren ist *k-Means*, welches auch als Funktion in *MATLAB* zur Verfügung steht. Das *k* in „*k-Means*“ steht für die Anzahl der Cluster und muss vor der Ausführung des Algorithmus festgelegt worden sein.

Folgende Schritte dienen dazu, die Punkte in Cluster zu gruppieren:

1. Es werden *k* Punkte zufällig im Raum⁶³ verteilt, dies sind die Clusterzentren.
2. Nun werden die zu gruppierenden Punkte⁶⁴ jeweils der Gruppe des ihnen am nächsten gelegenen Clusterzentrums zugewiesen.
3. Die Lage der Clusterzentren wird so angepasst, dass sie in der Mitte der Punkte ihrer Gruppe liegen.
4. Die Punkte werden erneut auf die Clusterzentren verteilt, wenn dann kein Punkt in eine andere Gruppe als zuvor eingeteilt wird, steht das Ergebnis fest.⁶⁵ Sonst werden die Schritte 3 und 4 wiederholt.

⁶¹ Durch größere Bilder (mehr Bewegung) verschlechtert sich das Ergebnis der *tanzfunktion* drastisch, außerdem ist die Ausführungszeit um ein vielfaches höher, da viel mehr Durchgänge benötigt werden.

⁶² Vgl. Wikipedia-Artikel zu *Clusteranalyse*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Clusteranalyse> [Stand 26.07.2013]

⁶³ In unserem Fall ist das der Raum zwischen den Punkten (0, 0) und (160, 112) bzw. (640, 480)

⁶⁴ In unserem Fall die Mittelpunkte der Zusammenhangskomponenten

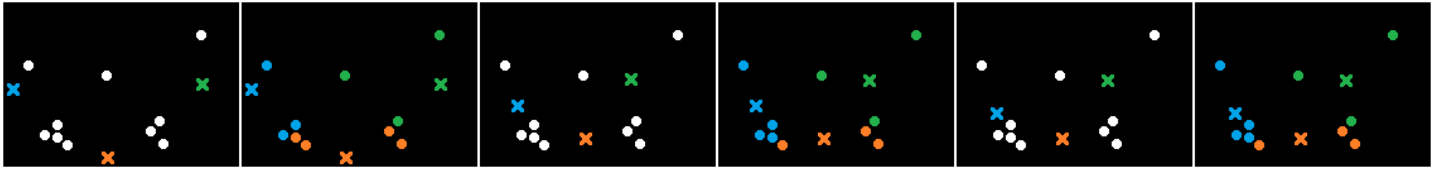


Abbildung 7: Clustering-Beispiel mit *k-Means*

tanzfunktionkmeans

Der Input der *tanzfunktionkmeans* sind, wie in der *tanzfunktion*, die Mittelpunkte der Zusammenhangskomponenten, und der Output sind die Mittelpunkte der gefundenen Tänze.

Die Größe von k wird zu Beginn auf ein Drittel der Anzahl von Zusammenhangskomponenten gesetzt.⁶⁶

Dann werden folgende Schritte so oft in einer Schleife ausgeführt, bis ein Tanz gefunden wurde oder $k = 0$ ist.⁶⁷

Die Cluster werden mit der *k-Means*-Funktion ermittelt. In einer Schleife wird jeder Cluster einzeln betrachtet:

1. Wenn die Anzahl der Punkte weniger als *wiev* ist, dann wird das Cluster verworfen.
2. Wenn die Punkte mehr als *beesize* voneinander entfernt sind, dann wird der entfernteste Punkt gelöscht und das Clusterzentrum neu berechnet. 1. und 2. werden wiederholt.

Wenn die Punkte nicht mehr als *beesize* entfernt sind, dann wurde ein Tanz gefunden und das Clusterzentrum wird als Punkt in den Output geschrieben.

Wenn unter den Clustern Tänze gefunden wurden, dann wird die *tanzfunktionkmeans* beendet. Sonst wird k verringert und erneut begonnen.

⁶⁵ Normalerweise wird *k-Means* beendet, wenn keine Änderungen mehr auftreten, wenn jedoch eine maximale Anzahl an Durchläufen erreicht wurde, wird der Algorithmus ebenfalls beendet.

⁶⁶ Damit die Gruppen nicht zu klein sind, um Tänze darin zu finden (mindestens *wiev* Punkte erforderlich), aber auch nicht so groß, dass zwei Tänze einem Cluster zugeordnet werden und im Endeffekt kein Tanz erkannt wird.

⁶⁷ Oft genügt ein Durchgang. Wenn $k=0$ wurde kein Tanz in *tanzfunktionkmeans* gefunden.

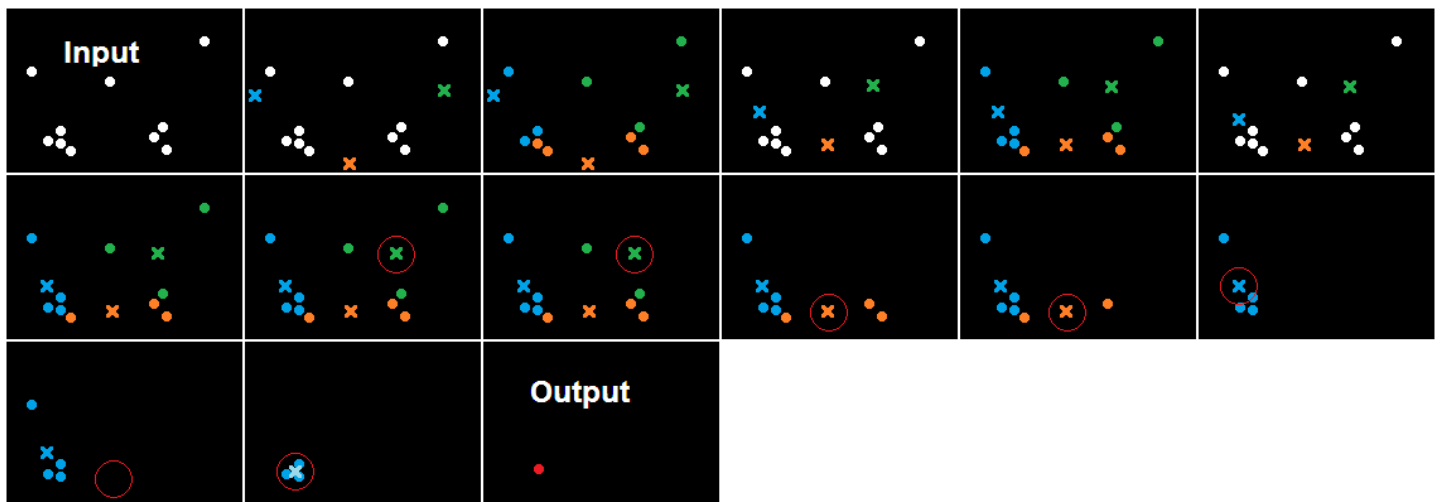


Abbildung 8: Beispielhafter Ablauf einer *tanzfunktionkmeans*

Die Startposition der Clusterzentren ist von zentraler Bedeutung für die Einteilung der Cluster. In der Forschung wird noch nach optimalen Lösungen für die Wahl der Startpositionen gesucht. Es gibt mehrere Varianten des *k-Means*-Algorithmus, die diese Wahl unterschiedlich treffen. Die ursprüngliche Variante ist die zufällige Wahl der Clusterzentren, die auch in *MATLAB* umgesetzt wurde. Bei unterschiedlichen Startzentren können deshalb verschiedene Cluster-Einteilungen stattfinden, und da die Tanzidentifizierung darauf aufbaut, können auch verschiedene Tänze gefunden werden. Dies ist in den beiden Beispielen oberhalb und unterhalb dieses Abschnitts erkennbar. Der Input ist gleich, das Ergebnis jedoch ein anderes.⁶⁸

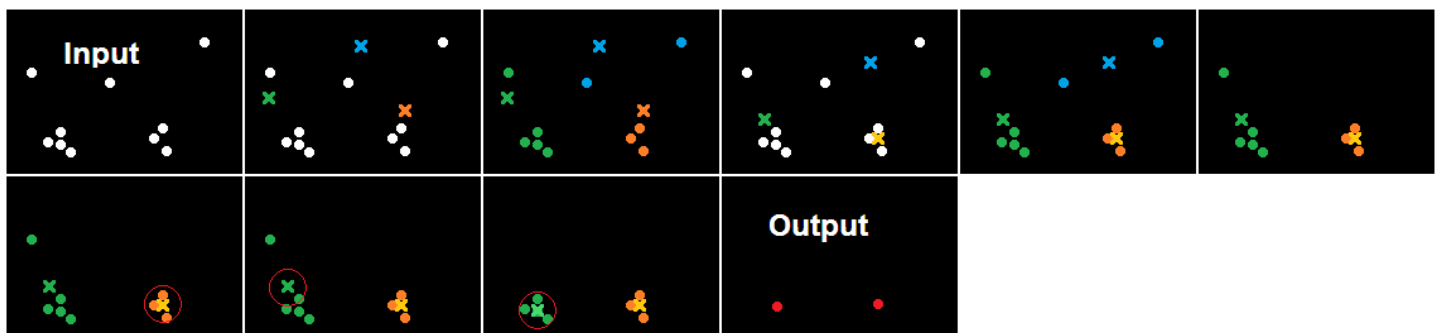


Abbildung 9: Zweiter beispielhafter Ablauf von *tanzfunktionkmeans* mit anderem Ergebnis

3.3. C++-Code und seine Unterschiede zum *MATLAB*-Code

Da die Vorgehensweise nun bereits an *MATLAB* erklärt wurde, das Endprodukt jedoch in C++ geschrieben wurde, werde ich im Folgenden auf die Unterschiede des C++-Codes zum *MATLAB*-Code eingehen. Hierbei wird die Erläuterung auf grundlegend verschiedene Herangehensweisen beschränkt und nicht auf einzelne Funktionen oder Anweisungen eingegangen.

⁶⁸ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *k-Means-Algorithmus*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/K-Means-Algorithmus> [Stand 26.07.2013]

Im Zentrum eines C++-Programms steht die Funktion *main()* (in diesem Kapitel *main*-Funktion), diese enthält oder ruft alle Anweisungen auf, die ausgeführt werden sollen.

Bevor die *main*-Funktion jedoch ausgeführt wird, müssen alle benötigten Bibliotheken eingebunden werden, um die Funktionen, die in ihnen definiert sind, verwenden zu können. In *MATLAB* sind hingegen schon viel mehr Funktionen von Anfang an verfügbar.

Im Laufe des Programms müssen alle Variablen und Speicherstrukturen deklariert werden, die benutzt werden. Dies geschieht für die meisten Variablen vor der *main*-Funktion und zwar global.⁶⁹ Dabei muss jeweils ein Datentyp⁷⁰ angegeben werden, damit vom System der benötigte Speicherplatz für sie reserviert werden kann.

Ebenfalls außerhalb der *main*-Funktion des von mir entwickelten C++-Programms findet man die Funktionsdefinitionen.⁷¹

Nun werden wir jedoch zuerst die konzeptionellen Unterschiede des C++-Programms im Vergleich zum *MATLAB*-Code betrachten. Ein grundsätzlicher Unterschied der beiden Programme ist in der Ein- und Ausgabe sowie in der grafischen Umgebung zu finden.

Während in *MATLAB* nur bereits aufgenommene Videos als Input dienen, kann in C++ nun auch eine Kamera zum direkten Einlesen der Frames benutzt werden. Dazu muss jedoch auch die Ausgabe geändert werden, da im *MATLAB*-Code zuerst die Berechnung und dann die Anzeige des Videos stattfindet. Im C++-Programm erfolgt die Anzeige fast live. Es wird nur eine geringe zeitliche Verschiebung von *vonwiev* Frames benötigt, um in den Tanzabschnitten nach Tänzen zu suchen. Dadurch können die erkannten Tänze, bei Ausgabe des Videos, angezeigt werden.

Mit Reglern (Trackbars), die neben dem Videooutput erscheinen, kann ein Teil der Variablen auch zur Laufzeit angepasst werden. Dies ist im *MATLAB*-Programm nicht möglich: Alles muss zu Beginn der Videoanalyse bekannt sein. Um diese Flexibilität des C++-Programms zu garantieren, wurden spezielle Sicherheitsmechanismen hinzugefügt, die verhindern, dass eine Variable zur falschen Zeit angepasst wird. Dabei wird festgehalten, welche Variable verändert werden soll. Die eigentliche Anpassung erfolgt jedoch erst zu einem Zeitpunkt, an dem diese Änderung keinen Schaden (wie zum Beispiel einen Programmabsturz) mehr verursachen kann.

⁶⁹ Global bedeutet, dass diese Variablen nicht nur in einem bestimmten Abschnitt, sondern für das gesamte Programm verwendbar sind. Wohingegen die in Funktionen definierten Variablen nur in dieser verfügbar sind.

⁷⁰ Unterschiedliche Datentypen stellen unterschiedliche Arten von Daten da. Zum Beispiel werden im Datentyp *int* ganze Zahlen gespeichert, wobei im Datentyp *float* auch Nachkommastellen gespeichert werden. Es ist nachvollziehbar, dass eine Zahl des Datentyps *float* dadurch mehr Speicherplatz benötigt.

⁷¹ Durch Definitionen von Funktionen kann ein Teil des Codes ausgelagert werden, sodass nicht alle Ausführungen im Hauptteil untergebracht sind. Dadurch wird der Code wesentlich übersichtlicher und mehrfach benötigte Anweisungsabfolgen können so eleganter aufgerufen werden und müssen nur ein Mal definiert werden.

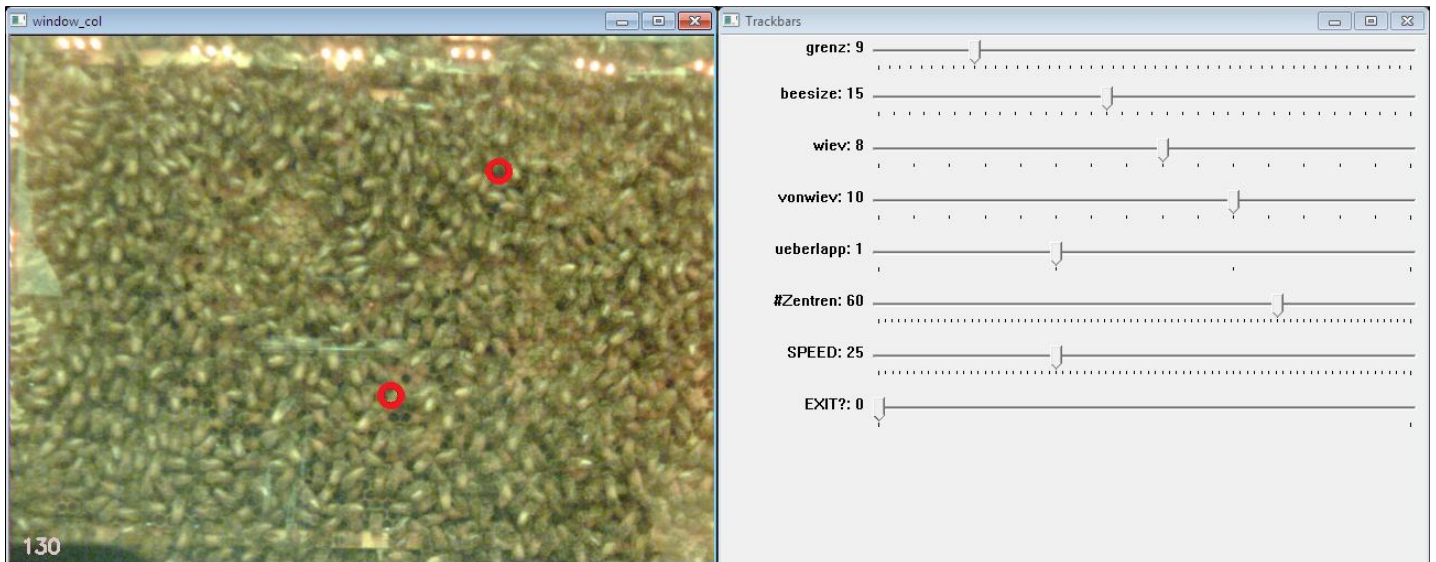


Abbildung 10: C++ Output-Video mit eingezeichneten Tänzen und Trackbars zum Einstellen der Variablen

Die änderbaren Variablen sind hauptsächlich schon aus dem *MATLAB*-Code bekannt (*grenz*, *beesize*, *wiev*, *vonwiev*, *ueberlapp*). Mit der Trackbar *#Zentren* wird der Wert von k für den *k*-Means-Algorithmus eingestellt. Mit *SPEED* verändert man lediglich die Wiedergabegeschwindigkeit. Wenn *EXIT* auf den Wert 1 gesetzt wird, endet die Ausführung.

Die *main*-Funktion hat einen ähnlichen Aufbau wie das *MATLAB* Programm:

Wieder wird in einer Schleife jedes Frame behandelt (entweder wird es von der Kamera eingelesen oder aus einem Video von der Festplatte).

Die erforderlichen Bildbearbeitungsoperationen werden ausgeführt. Ein Großteil dieser Operationen ist in Funktionen zusammengefasst.

Nun wird überprüft, ob das aktuelle Frame das Ende eines Abschnitts bildet. Wenn dem so ist, wird die *tanzfunktion* mit den Mittelpunkten der Zusammenhangskomponenten der *vonwiev* letzten Frames gestartet, die der Funktion als Input übergeben werden. Diese Mittelpunkte wurden zuvor in einer Speicherstruktur, die *vonwiev* Elemente enthält, gespeichert. Der Ablauf der *tanzfunktion* in C++ ist der gleiche wie in der *tanzfunktionkmeans* in *MATLAB*.

Am Ende eines Schleifendurchlaufs erfolgt die Anzeige des *vonwiev* früheren Frames mit Markierung der berechneten Tänze.

Beendet wird die Schleife entweder mit Hilfe der *EXIT*-Trackbar oder wenn das Ende des auf der Festplatte gespeicherten Videos erreicht wurde.

Am Ende der Ausführung müssen die deklarierten Variablen bzw. der für sie reservierte Speicherplatz wieder freigegeben werden.

4. Testergebnisse

Die Tanzerkennung ist eine Klassifizierung – es geht um die Frage: Gibt es einen Tanz an einer bestimmten Stelle zu einer bestimmten Zeit oder gibt es keinen Tanz? Mithilfe der Variablen, die durch die Trackbars verändert werden können, kann die Qualität der Tanzerkennung eingestellt werden. Zur Beurteilung dieser Qualität der Klassifizierung habe ich mich für die Einteilung der Testergebnisse in die folgenden vier Möglichkeiten entschieden:

- Richtig positiv (true positive)
- Falsch negativ (false negative)
- Falsch positiv (false positive)
- Richtig negativ (true negative)

Diese Begriffe beruhen auf der Grundlage, dass eine Klassifizierung in zwei mögliche Fälle getroffen wird (Tanz oder kein Tanz) und dass diese Klassifizierung entweder falsch oder richtig sein kann. **Die Klassifizierung bezieht sich immer auf einen konkreten Ort⁷² und eine konkrete Zeit.⁷³** Positiv ist die Einteilung, wenn das Programm glaubt, einen Tanz erkannt zu haben und negativ wenn kein Tanz erkannt wurde.

Richtig positiv bedeutet, dass ein Tanz vorhanden ist und dieser auch erkannt wurde.

Falsch negativ ist die Erkennung, wenn kein Tanz gefunden wurde, tatsächlich jedoch einer vorhanden ist.

Falsch positiv ist das Ergebnis, wenn in Wirklichkeit nicht getanzt wurde, das Programm jedoch glaubt, einen Tanz erkannt zu haben.

Richtig negativ bedeutet, dass kein Tanz vorhanden ist und auch tatsächlich keiner gefunden wurde.

Um eine derartige Einstufung vornehmen zu können, musste zunächst von Hand Frame für Frame definiert werden, wo sich ein Tanz befindet, damit das Programm im Anschluss die Qualität der Ergebnisse berechnen konnte. Diese sehr zeitaufwendige Aufgabe erfolgte von mir anhand eines 40-sekündigem, 160 × 112 Pixel großen Video (100 fps), in dem 29 Schwänzel-Abschnitte vorhanden sind sowie anhand von zwei 24 Sekunden langen und 640 × 480 Pixel großen Videos (60 fps), die zusammen 12 Schwänzel-Abschnitte enthalten.

Tests haben eine Richtig-Positiv-Rate von 84 % erreicht. Das bedeutet, dass fast alle Stellen, an denen getanzt wurde, gefunden wurden. Relativ dazu muss man jedoch die

⁷² Der Ort ist ein bestimmter Pixel. Ein Tanz gilt nicht nur am Mittelpunkt, sondern in einem Kreis mit dem Radius $beesize/2$ um diesen herum, da auch die Tanzsuche in einem Kreis mit dem Durchmesser von $beesize$ abläuft.

⁷³ Die Zeit ist ein bestimmtes Frame.

Fehler betrachten – die dazugehörige Falsch-Positiv-Rate beträgt 58 %. Um keine falschen Tänze in die Statistik aufzunehmen, sollten nicht gefundene Tänze akzeptiert werden: Wenn Tänze verpasst werden, lässt dies zwar die Statistik nicht so schnell wachsen, aber wenn falsche Tänze mit eingebracht werden, wird die Statistik verfälscht. Es ist also erstrebenswert die Variablen so einzustellen, dass man eine geringe Falsch-Positiv-Rate erhält.

Eine andere Berechnung ergab beispielsweise eine Falsch-Positiv-Rate von 4 % und eine Richtig-Positiv-Rate von 57 %. Immer zu beachten ist, dass es sich hierbei um einzelne Tanzframes handelt. Diese werden jedoch bei weitem nicht alle benötigt. Wenn beispielsweise 5 Frames eines 25 Frames langen Tanzes gefunden wurden, beträgt die Richtig-Positiv-Rate nur 20 %, der Tanz geht jedoch trotzdem in die Statistik ein, was im Endeffekt Ziel des Projekts und daher das wichtigste Erfolgskriterium ist.⁷⁴

Es folgen einige beispielhafte Testergebnisse, die jedoch nur eingeschränkt repräsentativ sind, da es sich bei den Testdaten nur um Videos geringer Länge handelt.

4.1. Ergebnisse des *MATLAB*-Codes

Es ergaben sich folgende Beispiel-Ergebnisse des unter „Funktionsweise in *MATLAB*“ beschriebenen, selbstkonzipierten Algorithmus (*tanzfunktion*), mit dem 40-sekündigen und 160 × 112 Pixel großen Video (100 fps): In einem Durchlauf⁷⁵ wurden 15 von 29 Tänzen erkannt, bei einer Falsch-Positiv-Rate von 3 % und einer Richtig-Positiv-Rate von 49 %. Da die Reihenfolge der morphologischen Operationen (Erosion und Dilatation) ebenfalls von großer Relevanz ist, sollen diese auch aufgeführt werden. Im ersten Beispiel war die Abfolge: Erosion, Erosion, Dilatation, Dilatation.

Die Klassifizierung des 160 × 112 Pixel großen Videos mit dem *k-Means*-Algorithmus (*tanzfunktionkmeans*) ergab ähnliche Werte. Unter anderem Folgende: 19 Tänze wurden gefunden, bei einer Falsch-Positiv-Rate von 9 % und einer Richtig-Positiv-Rate von 52 %.⁷⁶

Schließlich folgen die Ergebnisse, die sich nach der Anwendung des *k-Means*-Algorithmus (*tanzfunktionkmeans*) auf ein 640 × 480 Pixel großes Video (60 fps) ergaben: Diese sind aufgrund eines größeren Bildausschnitts erwartungsgemäß schlechter, da die Bewegungen von ca. 16 Mal mehr Bienen wie im kleinen Bildausschnitt interpretiert werden. In einer

⁷⁴ Vgl. Wikipedia-Artikel zu *Beurteilung eines Klassifikators*. URL:

http://de.wikipedia.org/wiki/Beurteilung_eines_Klassifikators [Stand 29.07.2013]

⁷⁵ Mit den Variablen: *grenz* = 5, *beesize* = 16, *wiev* = 12, *vonwiev* = 14, *ueberlapp* = 2

⁷⁶ Die Operationsreihenfolge war: Dilatation, Erosion, Erosion, Erosion, Dilatation, Dilatation und die Variablen bei diesem Durchgang waren: *k* = 6, *grenz* = 17, *beesize* = 16, *wiev* = 6, *vonwiev* = 8, *ueberlapp* = 3

Berechnung wurden zum Beispiel 575 Tanzmittelpunkte ermittelt, wobei nur an 133 Frames die Tänze erfolgreich erkannt wurden (diese beinhalteten vier der zehn vorhandenen Tanzabschnitte).

Eine Berechnung von aussagekräftigen Werten zur Beurteilung der Klassifikation war im zeitlichen Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht mehr möglich. Mit dieser Aufgabe, sowie mit der Optimierung des C++-Programms, um bessere Erkennungsergebnisse zu erhalten, werde ich mich jedoch in den Wochen nach der Abgabe meiner Bachelorarbeit beschäftigen.

4.2. Ergebnisse des C++-Codes

Für die Qualitätseinschätzung wurde es als hinreichend angesehen, den dafür benötigten Code allein in das *MATLAB*-Programm zu integrieren. Da sich die Funktionsweisen der beiden Programme, zumindest in den für die Tanz-Detektierung zuständigen Abschnitten, nicht unterscheiden, werden sich auch größtenteils gleiche Ergebnisse und somit gleiche Qualitätsmerkmale ergeben. Ein Unterschied könnte beispielsweise durch die zwei verschiedenen Implementierungen des *k-Means*-Algorithmus zustande kommen. Da es sich allerdings um den gleichen Algorithmus zur Clusteranalyse handelt, sollten auch hier keine relevanten Abweichungen auftreten. Daraus folgt nun, dass das C++-Programm mit den gleichen Variablen wie im *MATLAB*-Programm auch größtenteils gleiche, unzureichende Ergebnisse wie zuletzt beschrieben erreicht.

5. Fazit

In dieser Arbeit wurde die wichtige Rolle der Honigbienen für die Natur und den Menschen festgehalten. In aktuellen Forschungsprojekten kann und soll noch mehr über sie herausgefunden werden. Das für diese Arbeit relevante Forschungsgebiet ist die Sozialstruktur der Honigbienen. Im konkreten soll in dem beschriebenen Forschungsprojekt herausgefunden werden, ob die Sammelbienen in Untergruppen zusammenarbeiten und beispielsweise immer den Schwänzel-Tänzen ihrer Gruppenmitglieder folgen. Thema dieser Arbeit war die Detektierung eben dieser Tänze, um später, mithilfe einer Methode zur Identifizierung der Bienen, eine aussagekräftige Statistik über die Häufigkeit der Tanzpartner aufstellen zu können. Anhand dieser Statistik kann eine Schlussfolgerung zur Gruppenbildung der Sammlerbienen erfolgen. In dieser Bachelorarbeit wurde genauer auf die in einem Computerprogramm umgesetzte Methode zur Tanzidentifizierung eingegangen und zum Schluss die Erkennungsrate reflektiert. Aufgrund der ermittelten Werte kann die Aussage getroffen werden, dass eine relativ zuverlässige Tanzerkennung auf kleinen Arealen möglich ist. Diese Grundlage wird nun in den kommenden Wochen benutzt, um eine

brauchbare Tanzerkennung auch auf der gesamten Wabe zu erreichen. Wenn dies gelingt kann dann mithilfe dieses Programms ein konstruktiver Beitrag zur Bienenforschung geleistet werden.

Hiermit versichere ich, dass ich diese Bachelorarbeit in allen Teilen selbstständig verfasst
und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe.

Ich erkläre weiterhin, dass die vorliegende Arbeit noch nicht im Rahmen eines anderen
Prüfungsverfahrens eingereicht wurde.

Quellen

- Bienentanz*, SWR/WDR, 1.6.2009. URL: http://www.planet-wissen.de/wissen_interaktiv/bienentanz.jsp [Stand 17.07.2013]
- Udo L. Figge: *Bienentanz*, 02.07.2002. URL: <http://homepage.ruhr-uni-bochum.de/Udo.Figge/texte/bienentanz.html> [Stand 21.07.2013]
- Karl von Frisch/ Rudolf Jander: Über den Schwänzeltanz der Bienen. In: *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, Volume 40/ 1957, S. 239-263. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00340570> [Stand 22.07.2013]
- Heinz Greuling: *Im Dienste Ihrer Majestät: Antiterror-Bienen*, SWR Fernsehen, Sendung vom 23.11.2006, 22:02 Uhr. URL: <http://www.swr.de/odyosso/-/id=1046894/nid=1046894/did=2257916/1srxrdsg/index.html> [Stand 17.07.2013]
- Harvard beginnt Entwicklung von Roboter-Biene*, Trends der Zukunft, 14. August 2009. URL: <http://www.trendsderzukunft.de/harvard-beginnt-entwicklung-von-roboter-bienen/2009/08/14/> [Stand 21.07.2013]
- Website des Imkervereins Berlin-Tempelhof. URL: <http://www.imkerverein-tempelhof.de/html/bedeutung.html> [Stand 15.07.2013]
- Stuart Leithes: *Bomb-ble bees: Insects to sniff out explosives*, Video vom 07.05.2013. URL: <http://www.itv.com/news/anglia/update/2013-05-07/bomb-ble-bees-insects-to-sniff-out-explosives> [Stand 21.07.2013]
- Sybille Möckl: *Antibiotikum soll Bienen retten*, Die Welt, 16.04.09. URL: http://www.welt.de/welt_print/article3563617/Antibiotikum-soll-Bienen-retten.html [Stand 15.07.2013]
- Lisa Oberschelp: *Bienensterben – das Verschwinden der fleißigen Helfer*, Umweltschutzstiftung RESET, 2012. URL: <http://reset.org/knowledge/bienensterben-das-verschwinden-der-fleissigen-helfer> [Stand 15.07.2013]
- Die Psychologie der Honigbienen*. URL: <http://www.bee-info.de/biologie-biene/magnetischer-sinn.html> [Stand 21.07.2013]
- Sprengstoff-Bienen auf Minensuche*, Die Welt, 04.06.07. URL: <http://www.welt.de/wissenschaft/article919372/Sprengstoff-Bienen-auf-Minensuche.html> [Stand 16.07.2013]
- Andreas Unger: *Das kollektive Königreich*, Greenpeace magazin 4.11. URL: <http://www.greenpeace-magazin.de/magazin/archiv/4-11/bestaebung/> [Stand 16.07.2013]
- Varroa-Milbe trägt Virus massenhaft in Bienenvölker*, Die Welt, 08.06.12. URL: <http://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article106442805/Varroa-Milbe-traegt-Virus-massenhaft-in-Bienenvoelker.html> [Stand 16.07.2013]
- Bienenwiki-Artikel zu *Arbeiterin*. URL: <http://www.bienenwiki.de/wiki/index.php?title=Arbeiterin> [Stand 21.07.2013]
- Bienenwiki-Artikel zu *Drohn*. URL: <http://www.bienenwiki.de/wiki/index.php?title=Drohn> [Stand 21.07.2013]
- Bienenwiki-Artikel zu *Königin*. URL: <http://www.bienenwiki.de/wiki/index.php?title=Königin> [Stand 21.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *Beurteilung eines Klassifikators*. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Beurteilung_eines_Klassifikators [Stand 29.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *Bienenschutzverordnung*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bienenschutzverordnung> [Stand 17.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *Clusteranalyse*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Clusteranalyse> [Stand 26.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *Colony Collapse Disorder*. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Colony_Collapse_Disorder [Stand 16.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *FFmpeg*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/FFmpeg> [Stand 20.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *k-Means-Algorithmus*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/K-Means-Algorithmus> [Stand 26.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *MATLAB*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/MATLAB> [Stand 20.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *OpenCV*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/OpenCV>, Download-URL: <http://opencv.org/downloads.html> [Stand 22.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *PlayStation Eye*. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/PlayStation_Eye [Stand 18.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *Statische Typisierung*. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Statische_Typisierung [Stand 20.07.2013]
- Vgl. Wikipedia-Artikel zu *Tanzsprache*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schwänzeltanz> [Stand 21.07.2013]
- Wikipedia-Artikel zu *westliche Honigbiene*. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Westliche_Honigbiene [Stand 21.07.2013]