

Freie Universität Berlin
Fachbereich für Mathematik und Informatik
Biorobotics Lab

Automatisierte Identifizierung von Schwänzeltänzen in Videodateien

Bachelorarbeit

Sascha Wißmann
sascha.wissmann@fu-berlin.de

Gutachter: Prof. Dr. Tim Landgraf

Zweitgutachter: Prof. Dr. Raúl Rojas

9. März 2018

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass diese Arbeit von niemand anderem als meiner Person verfasst worden ist. Alle verwendeten Hilfsmittel wie Berichte, Bücher, Internetseiten oder ähnliches sind im Literaturverzeichnis angegeben. Zitate aus fremden Arbeiten sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Datum und Unterschrift

9. März 2018

Zusammenfassung

Findet eine Honigbiene eine ergiebige Futterquelle, so wird sie versuchen es den anderen Sammlerinnen mitzuteilen. Sie schafft dies durch den Schwänzeltanz, welcher Informationen enthält, wo sich diese Futterquelle befindet. Eine Methode, um die Schwänzeltänze der Bienen zu erkennen ist der Schwänzeltanz-Detektor (WDD), welcher in Echtzeit über eine Kamera gefundene Tänze protokolliert. Der WDD arbeitet dabei über eine Frequenzanalyse, da Bienen beim Tanz typischerweise ihren Hinterleib mit einer Frequenz von 13 Hz schwänzeln. Um diese Frequenzanalyse zu gewährleisten, muss die Kamera eine möglichst hohe Aufnahme rate aufweisen, was allerdings dazu führt, dass man bei der Bildqualität Abstriche machen muss. Darüber hinaus muss aus Performance-Gründen das Bild noch weiter herunterskaliert werden, womit die Identifikation von einzelnen Bienen kaum noch möglich ist. Dies kann man umgehen, wenn man zusätzlich noch weitere Kameras aufstellt, die eine sehr hohe Bildqualität besitzen und genau den gleichen Bereich zur gleichen Zeit aufnehmen. In einem Nachbearbeitungsschritt können dann die Positionen der Detektionen des WDD in das Bild der hochauflösenden Kameras übertragen werden. In den Bildmaterialien der hochauflösenden Kameras kann schließlich die Identifikation vorgenommen werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Der Schwänzeltanz	4
1.2	Beesbook	6
1.3	Motivation	7
2	Ausgangssituation	9
2.1	Der Schwänzeltanz-Detektor	9
2.2	Das Kamera-Setup	9
3	Implementierung	12
3.1	Methoden	12
3.2	Berechnung der Homographie	13
3.3	Tanzidentifikationstest	16
4	Evaluation	20
4.1	Ergebnisse	20
4.2	Genauigkeit der Homographie	22
4.3	Genauigkeit der Identifikation	23
5	Diskussion	24
5.1	Einschätzung der Ergebnisse	24
5.2	Ausblick	24

1 Einleitung

1.1 Der Schwänzeltanz

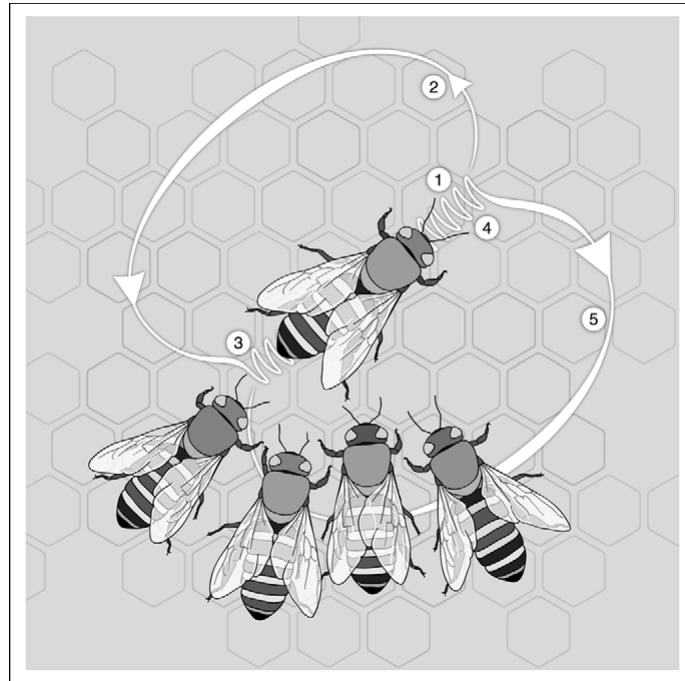


Abbildung 1: Veranschaulichung eines Schwänzeltanzes. Die Tänzerin beginnt den Tanz mit dem Schwänzellauf (1) und kehrt anschließend abwechselnd nach links (2) oder rechts (5) an ihre Ausgangsposition (3) zurück und beginnt den nächsten Durchlauf (4). Der Tanz wird üblicherweise von Nachläuferinnen und Nachtänzerinnen verfolgt [3]. Quelle der Grafik: [4]

Findet eine Pollensammlerin der Honigbienen (*Apis mellifera*) eine Futterquelle hoher Qualität, wird sie bei ihrer Rückkehr im Bienenstock versuchen, den anderen Sammlerinnen den Fundort der neuen Futterquelle mitzuteilen. Im Gegensatz zu den Nektarsammlerinnen, welche Rundtänze aufführen, die andere Sammlerinnen dazu anreizt, in allen Richtungen in der Nähe des Stocks auszuschwärmen und die Gegend abzustreifen [2, S. 1], wird die Pollensammlerin hingegen einen Schwänzeltanz aufführen. Charakteristisch für den Schwänzeltanz ist, dass die Tänzerin in einer schnellen rhythmischen Bewegung von etwa 13 Hz [5] wiederholt ihren Schwanz hin und her schaukelt.

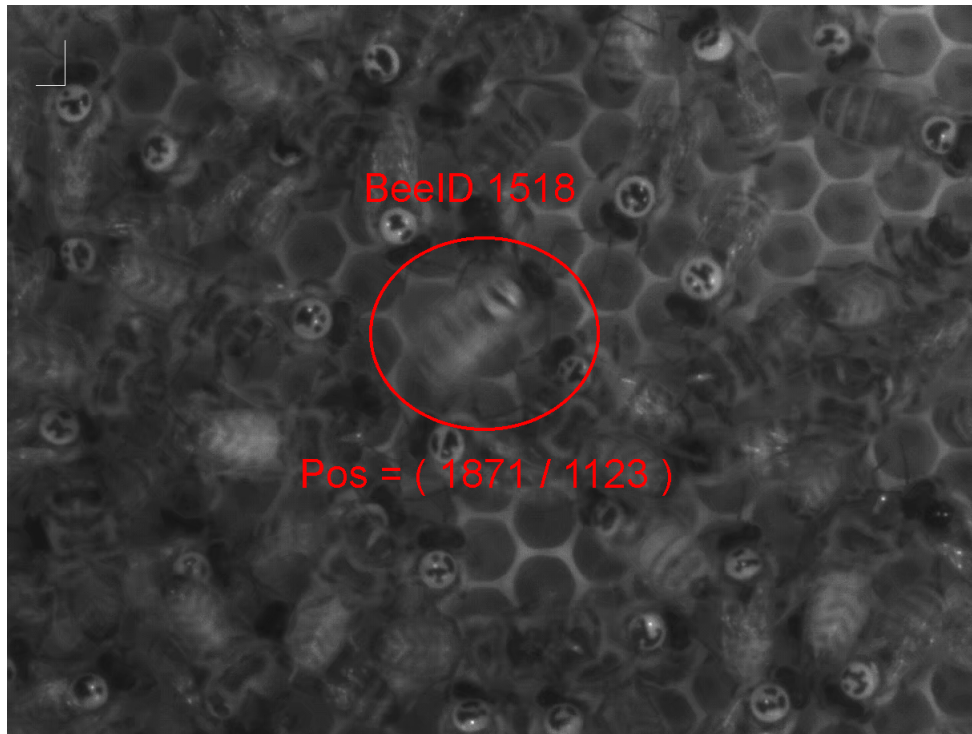


Abbildung 2: Gekennzeichnete Biene beim Schwänzeln während des Schwänzeltanzes. Rot umrandet ist eine verifizierte Tänzerin aus dem Videomaterial der Beesbook-Datenbank August,2016. Durch die hohe Frequenz der Bewegung des Hinterleibs erscheint die Biene unscharf auf dem Foto. Gut zu erkennen sind die Mittänzerinnen, die um die Tänzerin herum mit zugewandtem Kopf den Tanz mitverfolgen

Bei dieser Schwänzelsbewegung sendet die Tänzerin auch ein Geräusch in Höhe von 280 Hz aus, welches möglicherweise Informationen zum Abstand der Futterquelle anhand der Länge des Geräuschs wiedergibt [1, S. 126]. Es wird auch angenommen, dass der starke Geruch des Blütenstaubs der an den Pollensammlerinnen hängt, den anderen Bienen Aufschluss über die besuchte Blumensorte und deren Qualität wiedergibt [2, S. 2-3]. Der Schwänzeltanz selber, läuft dabei immer in zwei Phasen ab, dem Schwänzellauf und dem Rücklauf zur Startposition (siehe Abb. 1). Bei dem Rücklauf läuft die Biene immer in einer kreisförmigen Bewegung an den ungefähren Startpunkt ihres Schwänzellaufs zurück. Auffällig ist, dass sie dabei die Seite auf der sie zurück

läuft ständig hin und her wechselt, so dass sie den Pfad einer umgekippten Acht abzulaufen scheint [3]. Durch häufiges beobachten des Schwänzeltanzes konnte geschlussfolgert werden, dass die Laufrichtung des Schwänzellaufs keinesfalls zufällig ist, sondern vom Azimut der Sonne sowie von der Position der Futterquelle abhängt [3]. Die auf der Wabe nach oben führende Richtung scheint dabei der gegenwärtigen Richtung der Sonne zu entsprechen. Die Richtung der Futterquelle wird ständig mit der Richtung der Sonne in Relation gebracht und ändert sich über die Tageszeit mit dem Lauf der Sonne [3]. Die Länge des Schwänzellaufs hingegen scheint die Entfernung zur Futterquelle zu codieren [3].

Bienen in der direkten Nähe der Tänzerin wenden stets ihren Kopf in die Richtung der Tänzerin (siehe Abb. 2 und Abb. 1). Dabei halten sie zudem den Abstand, der ihren ausgeweiteten Antennen zur Tänzerin entspricht [1]. Unter den Beobachtern der Tänzerin gibt es auch Bienen, die eine andere Verhaltensweise als der Rest der Gruppe zeigen. Dabei handelt es sich um sogenannte Nachläuferinnen [1],[3]. Die Nachläuferin scheint der Tänzerin ständig zu folgen, behält ihren Körper aber immer orthogonal zu dieser [1, S. 127].

Es hat sich aber auch gezeigt, dass der Schwänzeltanz eher selten dazu führt, dass Nachtänzerinnen die neue Futterquelle auch aufsuchen [4]. Empirischen Daten zu Folge, reichen etwa fünf bis sechs Schwänzelläufe aus, um die Koordinaten der Futterquelle zu vermitteln [4], dennoch erreichen manche Bienen die über fünfzig Schwänzelläufe beobachtet hatten, die Futterquelle nicht [4]. Tatsächlich scheint die Übermittlungsrate eher niedrig zu sein, da es statistisch nur eine neue Rekrutin nach achtundfünfzig Schwänzelläufen an der Futterquelle auftaucht [4]. Es wird geschlussfolgert, dass der Tanz entweder ineffizient ist, oder dass die Zielgruppe für die Informationen klein ist [4].

1.2 Beesbook

Bei dem Beesbook-Projekt handelt es sich um eine Gruppe aus dem Biorobotics-Labor der FU Berlin unter Prof. Dr. Tim Landgraf, welche es sich zur Aufgabe gemacht hat, Sozialstrukturen innerhalb eines Bienenstocks sowie Beziehungen zwischen individuellen Bienen zu verstehen und aufzudecken. Der Idee für den Namen "Beesbook" rührt daher, dass es wie ein "Facebook" für Bienen sein soll. Zwischen den Jahren 2014 bis 2016, wurden im Sommer die Bienen eines Bienenstocks mit Tags markiert und von verschiedenen Kameras über den gesamten Zeitraum von etwa drei Monaten gefilmt. Dieses Videoma-

terial wird dann von verschiedenen Programmen ausgewertet, analysiert oder gefiltert. Unter anderem wird der Standort jeder Biene zu jedem Zeitpunkt, in der sie im Stock ist anhand ihres Tags genau festgehalten. Anhand dieser Daten kann dann eine Biene genau getrackt werden, dass heißt ihre Laufwege sind genau bekannt und man kann nun feststellen, mit welchen anderen Bienen diese im Kontakt stand. Auf diese Weise wird dann ein komplexes Netzwerk zwischen allen Bienen des Stocks aufgebaut, welche wiederum von weiteren Programmen und Verfahren untersucht und ausgewertet werden. All diese Daten werden zudem in eine Datenbank eingespeist und sind somit bei Bedarf gut abrufbar.

Eine weitere Aufgabe der Beesbook-Gruppe ist es, herauszufinden auf welche Art und Weise Bienen kommunizieren oder interagieren. Besonderes Augenmerk gilt hier der Tanzsprache, wie sie von von Frisch 1965 formuliert wurde [3]. Es wird versucht Schwänzeltänze über Neuronale Netzwerke oder über den Schwänzeltanz-Detektor ausfindig zu machen, um anschließend festzustellen, welche Bienen daran beteiligt waren und welche der Bienen davon anschließend an den Futterstellen neu auftauchten.

Darüber hinaus werden aber auch andere Interaktionen zwischen Bienen untersucht, wie in etwa die Trophallaxis.

1.3 Motivation

Um die Gegebenheiten in der Tierwelt datentechnisch festzuhalten, ist eine Möglichkeit, diese mit Kameras abzufilmen und die Auswertung der Daten später vorzunehmen. Oftmals erhält man durch diese Methode allerdings große Mengen Daten, die dann nur sehr aufwendig auszuwerten sind. Als Mensch versteht man solche Videodateien zwar intuitiv, aber man stößt ab einer gewissen Größe und Menge der Daten leicht an seine Grenzen, diese aufzuarbeiten. Ein Computersystem kann zwar große Mengen an Daten um ein Vielfaches schneller abarbeiten, allerdings sind Daten im Video-Format für Computer nicht so leicht handhabbar, da ein Computer natürlich nicht *versteht* was *er* sieht.

In unserem Fall haben wir bei Beesbook im Jahr 2016 für rund drei Monate lang ohne größere Unterbrechungen mit vier hochauflösten Kameras eine Bienenwabe beidseitig aufgenommen. Jeder diese Kameras erzeugte in etwa eine Datenmenge von einem Gigabyte innerhalb von fünf Minuten, woraus sich eine Gesamtdatenmenge nach den drei Monaten von etwa sechszwanzig Terabyte pro Kamera ergibt. Dazu kommen auch noch Daten aus

den beiden WDD-Kameras und den Protokollen des WDD. Angesichts dieser Datenmengen ist eine Auswertung über ein Computersystem sicher die bessere Herangehensweise.

Ein Anspruch an meiner Arbeit soll es sein, dass sämtliche Arbeitsschritte (siehe: Kapitel 3.1) zur Identifizierung der Schwänzeltänze automatisiert ablaufen. Das heißt, dass keine manuelle Arbeit außer des Programmstarts mehr notwendig ist. Die Detektionen aus dem Schwänzeltanz-Detektor sollen selbständig eingelesen, deren Koordinaten auf die Hive-Ebene übertragen, Anfragen an die Datenbank zur Umgebung der Detektionen angefordert, alle gefundenen Bienen identifiziert und schlussendlich von denen die Tänzerinnen gefunden werden. Aus diesem Ansatz ergeben sich aber auch gewisse Schwierigkeiten. An vielen Stellen des gesamten Programms könnten Fehler auftreten, die dann in die folgenden Arbeitsschritte verschleppt werden könnten, da keine manuelle Kontrolle mehr erfolgt. Es ist also im besonderem Maße sicherzustellen, dass sich an keiner Stelle Fehler einschleichen, denn diese könnten die Ergebnisse im schlimmsten Fall völlig verändern. Sollte das Programm hingegen fehlerfrei laufen, wäre es sicherlich ein nützliches Hilfsmittel Tänzerinnen in den hochaufgelösten Videodateien aufzuspüren.

2 Ausgangssituation

2.1 Der Schwänzeltanz-Detektor

Der Ausgangspunkt dieser Arbeit sind die Detektionen des Schwänzeltanz-Detektors (WDD) von Rau [6]. Der Zweck des WDD ist es, in Realzeit, dass heißt, während der Aufnahme der Videos, Schwänzeltänze der Bienen aufzuspüren und diese zu protokollieren. Die Detektionen des WDD bestehen dabei aus einer Zeitangabe und einer Ortsangabe innerhalb des Bildes. Der WDD arbeitet dabei mit einem Kamerasystem, welches eine Aufnahme-rate von 100 Bilder/s besitzt. Diese recht hohe Rate ist notwendig, da man versucht, die typisch Frequenz der Schwänzelsbewegung beim Tanzen der Bienen von 13 Hz [5] auszunutzen. Um diese Frequenz aufzuspüren benutzt der WDD einen Video-Frame-Buffer, welcher kontinuierlich die letzten 600 Bilder der Aufnahme abspeichert und ständig die neu erzeugten Bilder mit den ältesten des Buffers austauscht [6, S. 13]. Auf diese Weise besitzt der WDD eine Möglichkeit, die zeitlichen Zusammenhänge zwischen den Bildern zu bewerten, was unumgänglich ist, wenn man eine Frequenz aufspüren möchte. Innerhalb dieser Historie, wird dann über sogenannte Dot-Detectors im gesamten Bild nach Pixel-Clustern gesucht, die sich über die Zeitachse in einer Frequenz um 13 Hz herum hin und her bewegen [6, S. 16]. Ist diese Bewegung lang und deutlich genug, wird dies als Detektion festgehalten.

Die Auflösung der WDD-Kameras beträgt zwar 640×480 Pixel, diese kann aber nicht völlig ausgenutzt werden, da dabei für den Video-Frame-Buffer und den Dot-Detectors zu viel Berechnungsarbeit auftritt, um in Realzeit abzulaufen. Daher wurde das Bild auf 160×120 Pixel herunter skaliert [6, S. 11], um dies dennoch gewährleisten zu können. Diese Skalierung bringt allerdings einen beträchtlichen Genauigkeitsverlust mit sich, der später berücksichtigt werden muss.

2.2 Das Kamera-Setup

Kameras unterscheiden sich in einer Vielzahl an Kriterien zum Teil recht stark voneinander und welche Kamera sich am besten eignet, hängt je nach Zielstellung beim Abfilmen von Bienen oder anderen Tieren ab. Eine der wichtigsten Kriterien ist wohl die Auflösung des Bildes. Zielt man auf die Identifizierung von Individuen bei Bienen ab, muss die Auflösung entsprechend gut sein, um Details erkennen zu können. Bei Beesbook wurde sich für ein System

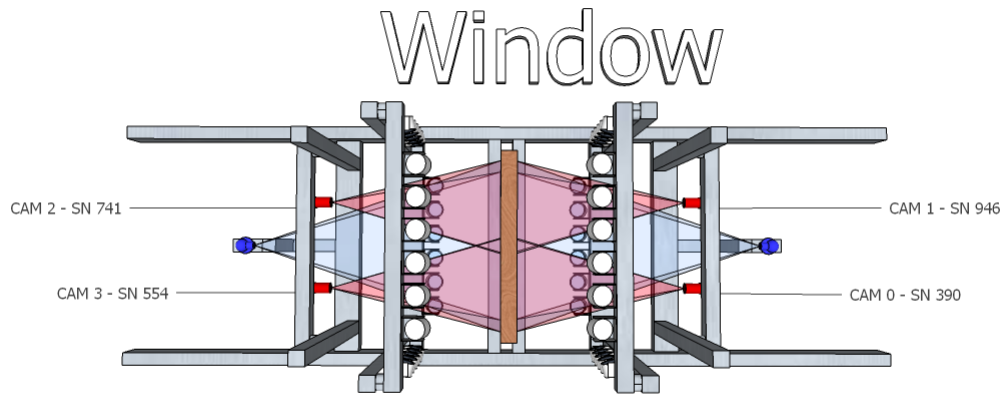


Abbildung 3: Schema des Aufbaus des Kamerasystems von oben. In der Mitte des Bildes befindet sich die Bienenwabe in braun. Die Wabe wird von der linken sowie von der rechten Seite von je zwei hochauflösenden Kameras (rot) und je einer hochfrequenten Kamera (blau) ohne Unterbrechung abgefilmt. Die kegelförmigen Bereiche deuten das Blickfeld der jeweiligen Kamera an. Gut zu erkennen ist, wie sich die hochauflösenden Kameras das Blickfeld auf die Bienenwabe aufteilen.

entschieden, wo vier Kameras mit einer Auflösung von 4000×3000 Pixeln sich den Bereich der abzufilmen ist, aufteilen (siehe: Abb.3). Eine einzelne Kamera, die den gesamten Bereich auf einer Seite der Wabe in einer entsprechend guten Auflösung aufnehmen kann, kostet in der Regel allerdings bereits mehrere tausend Euro.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Aufnahmezeit der Kamera. Von ihr hängt ab, wie flüssig ein Video ist. Die Aufnahmezeit der hochauflösenden Kameras bei Beesbook beträgt lediglich 3 Bilder/s. Dennoch beträgt ein Video-Clip von fünf Minuten bereits etwa einen Gigabyte an Datenvolumen. Wäre die Aufnahmezeit höher, würde der Speicherplatzbedarf ebenfalls linear mit ansteigen.

Da der Schwänzeltanz-Detektor (WDD) allerdings darauf angewiesen ist, die

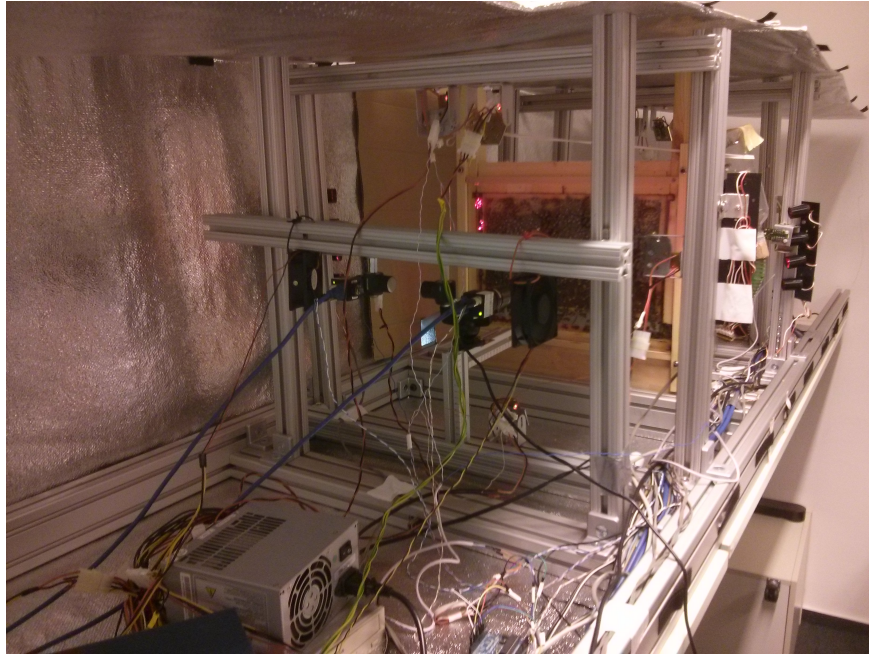


Abbildung 4: Aufbau des Kamerasystems von der linken Seite. Zu sehen ist, wie die Bienenwabe, die Kameras und die Beleuchtungen im Labor angebracht worden waren.

Schwänzelbewegung der Bienen an ihrer Frequenz von 13 Hz [5] zu erkennen, ist es unerlässlich, eine Kamera zu besitzen, die eine Aufnahmerate hat, die deutlich darüber hinaus geht. Rau schlägt vor, eine Kamera mit einer Aufnahmerate von mindestens 100 Hz zu verwenden [6, S. 11]. Entschieden wurde sich für leicht modifizierte PlayStation Eye Kameras. Diese bieten die benötigte Aufnahmerate bei einer Auflösung von 640×480 Pixel. Diese WDD-Kameras wurden zusammen mit den hochauflösten Kameras an einem Rahmen befestigt, in deren Mitte sich die Bienenwabe befand (siehe: Abb.4). Die Kameras wurden so justiert, dass alle Bereiche der Wabe auf beiden Seiten von beiden Kamerasystemen abgefilmt werden konnten. Die Bilder der Kameras einer Seite können also innerhalb einer Nachbearbeitung zu einem ganzen Bild zusammengesetzt werden (siehe: Abb.5).

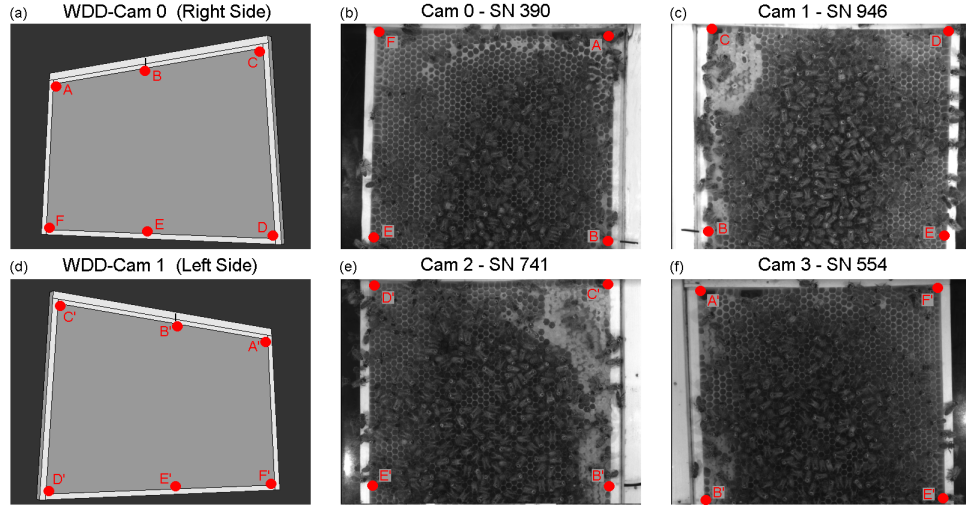


Abbildung 5: Blickfelder der Kameras. Die obere Reihe (a,b,c) zeigt die Blickfelder der Kameras auf der rechten Seite der Bienenwabe und die untere Reihe (d,e,f) die auf der linken Seite. Die Aufnahmen der WDD-Kameras (a,d) stehen leider nicht mehr zur Verfügung, daher hier nur schematisch dargestellt, wie der Blickwinkel und der Zoom in etwa aussah. Bei den roten Punkte A,B,C etc. handelt es sich lediglich um Referenzpunkte zur Übersicht. Die Bilder der Kamera 0 (b) und der Kamera 1 (c) lassen sich zu einem vollständigen Bild zusammensetzen, wenn man die Punkte B und E übereinander legt. Analog auf der anderen Seite (e,f). Die Punktpaare A und A' etc. zeigen auf die selbe Stelle auf der Wabe, allerdings von unterschiedlicher Seite.

3 Implementierung

3.1 Methoden

Ausgangspunkt meiner Methoden sind die Ergebnisse des Schwänzeltanz-Detektors (WDD). Der WDD erzeugt neben anderen Dateien die für diese Arbeit wichtigen CSV-Dateien, worin die Detektionen gespeichert sind. Bei einer Detektion handelt es sich um eine Pixel-Koordinate im Blickfeld der WDD-Kamera zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Im ersten Schritt wurden alle in etwa eine halbe Million erzeugten CSV-Dateien zusammengetragen und die relevanten Daten daraus gebündelt abgespeichert.

Im nächsten Schritt wurden alle Koordinaten der Detektionen in die Hive-Koordinaten umgeformt. Bei den Hive-Koordinaten handelt es sich um eine Koordinatensystem, bei denen alle Punkte genau in Bezug zu einer expliziten Stelle auf der Bienenwabe stehen. Die Umformung der Koordinaten erfolgte über eine Homographie. Für jede Detektion wurde die Homographie-Matrix neu berechnet, da sich das Blickfeld der WDD-Kameras prinzipiell zu jedem Zeitpunkt ändern könnte. Anschließend wurde die Position der Detektion in Form eines Vektors mit der Matrix verrechnet und aus dessen Ergebnis die Hive-Koordinate erstellt.

Eine weitere wichtige Voraussetzung um Schwänzeltänze überhaupt feststellen zu können, war die Erstellung eines Tests, der zu einer gegebenen Detektion entscheiden kann, ob es sich hierbei um einen Tanz handelt oder nicht. Um diesen Test entwickeln zu können, mussten zunächst zuvor verifizierte Tänze untersucht werden, um Unterschiede in den Daten zwischen Tänzerinnen und Nicht-Tänzerinnen nutzen zu können. Daher wurden die Bienen der näheren Umgebungen von Tänzerinnen untersucht und abgeglichen und daraus der Test entwickelt.

Mit Hilfe des Tests konnten nun die Umgebungen der Detektionen untersucht werden. Dabei wurde eine gewisse Fehlertoleranz der Position von 150 Pixel (etwa 1 cm) zugestanden, um etwaige Ungenauigkeiten durch die Runterskalierung der WDD-Kamera sowie der Homographie auszugleichen, sowie eine Toleranz des Zeitfensters von zwei Sekunden pro Zeitrichtung um den Detektionszeitpunkt herum. Von allen Bienen, die sich in diesem Toleranzbereich befanden, wurden Zwanzig-Sekunden-Trajektorien aus der Beesbook-Datenbank angefordert und mit dem Test untersucht. Die gefunden Tänzerinnen wurden letztlich alle protokolliert und ausgezählt.

3.2 Berechnung der Homographie

Ein Kernpunkt dieser Arbeit ist es, einen gegebenen Punkt auf der Bienenwabe im Kamerasystem des Schwänzeltanz-Detektors(WDD) auf das hochaufgelöste Kamerasystem zu übertragen. Dazu ist es notwendig, Referenzpunkte in beiden Systemen zu besitzen, die aufeinander abgebildet werden sollen.

Der WDD erzeugt in Echtzeit ein Protokoll darüber, zu welchem Zeitpunkt und an welchem Ort auf der Wabe ein Event in der typischen Frequenz eines Schwänzeltanzes von 13 Hz auftritt. Damit dieser Ort auf der Wabe unabhängig vom Blickfeld der WDD-Kamera ist, verzeichnet der WDD zusätzlich auch noch die Koordinaten der vier Eckpunkte der Wabe mit in

das Protokoll. Diese vier Punkte p_1, p_2, p_3 und p_4 werden als Ausgangspunkte für die Homographie benötigt.

Die vier Zielpunkte, auf die die vier Ausgangspunkte abbilden sollen, gehen aus den realen Maßen der Bienenwabe hervor. Die Wabe mit der bei Beesbook gearbeitet wurde, besitzt die Ausmaße $35.2 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. Daraus ergeben sich die vier Eckpunkte

$$\hat{p}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \hat{p}_2 = \begin{pmatrix} 35.2 \\ 0 \end{pmatrix}, \hat{p}_3 = \begin{pmatrix} 35.2 \\ 20 \end{pmatrix}, \hat{p}_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 20 \end{pmatrix}$$

Diese vier aufeinander abgebildeten Punkte kann man so in Verbindung bringen, dass jeder beliebige Punkt p derart aus dem Ausgangs-Koordinatensystem in das Ziel-Koordinatensystem überführt werden kann, so dass \hat{p} und p auf den selben Punkt zeigen. Es gilt also für einen Punkt $\hat{p} = \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{pmatrix}$ folgende

Beziehung zu einem Punkt $p = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \lambda \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

wobei

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

Um H zu bestimmen, muss folgende Identität aufgelöst werden:

$$A\vec{h} = \vec{0}$$

mit

$$\vec{h}^T = (h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{31} \ h_{32} \ h_{33})$$

$$A = \begin{bmatrix} -x_1 & -y_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_1\hat{x}_1 & y_1\hat{x}_1 & \hat{x}_1 \\ 0 & 0 & 0 & -x_1 & -y_1 & -1 & x_1\hat{y}_1 & y_1\hat{y}_1 & \hat{y}_1 \\ -x_2 & -y_2 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_2\hat{x}_2 & y_2\hat{x}_2 & \hat{x}_2 \\ 0 & 0 & 0 & -x_2 & -y_2 & -1 & x_2\hat{y}_2 & y_2\hat{y}_2 & \hat{y}_2 \\ -x_3 & -y_3 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_3\hat{x}_3 & y_3\hat{x}_3 & \hat{x}_3 \\ 0 & 0 & 0 & -x_3 & -y_3 & -1 & x_3\hat{y}_3 & y_3\hat{y}_3 & \hat{y}_3 \\ -x_4 & -y_4 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_4\hat{x}_4 & y_4\hat{x}_4 & \hat{x}_4 \\ 0 & 0 & 0 & -x_4 & -y_4 & -1 & x_4\hat{y}_4 & y_4\hat{y}_4 & \hat{y}_4 \end{bmatrix}$$

Da im folgendem Berechnungsschritt eine Inversion der Matrix A notwendig ist, müssen die Dimensionen von A von 8×9 auf 8×8 verringert werden. Dies gelingt indem ein Element von h auf konstant 1 gesetzt wird. Setzt man h_{33} auf 1, entfällt die letzte Spalte von A in folgender Weise.

$$A'\vec{h}' = \vec{b}$$

mit

$$A' = \begin{bmatrix} -x_1 & -y_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_1\hat{x}_1 & y_1\hat{x}_1 \\ 0 & 0 & 0 & -x_1 & -y_1 & -1 & x_1\hat{y}_1 & y_1\hat{y}_1 \\ -x_2 & -y_2 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_2\hat{x}_2 & y_2\hat{x}_2 \\ 0 & 0 & 0 & -x_2 & -y_2 & -1 & x_2\hat{y}_2 & y_2\hat{y}_2 \\ -x_3 & -y_3 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_3\hat{x}_3 & y_3\hat{x}_3 \\ 0 & 0 & 0 & -x_3 & -y_3 & -1 & x_3\hat{y}_3 & y_3\hat{y}_3 \\ -x_4 & -y_4 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_4\hat{x}_4 & y_4\hat{x}_4 \\ 0 & 0 & 0 & -x_4 & -y_4 & -1 & x_4\hat{y}_4 & y_4\hat{y}_4 \end{bmatrix}$$

$$\vec{h}'^T = (h_{11} \quad h_{12} \quad h_{13} \quad h_{21} \quad h_{22} \quad h_{23} \quad h_{31} \quad h_{32})$$

$$\vec{b}^T = (\hat{x}_1 \quad \hat{y}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \hat{y}_2 \quad \hat{x}_3 \quad \hat{y}_3 \quad \hat{x}_4 \quad \hat{y}_4)$$

Die übrigen Elemente von H kann man nun einfach berechnen:

$$\vec{h}' = A'^{-1}\vec{b}$$

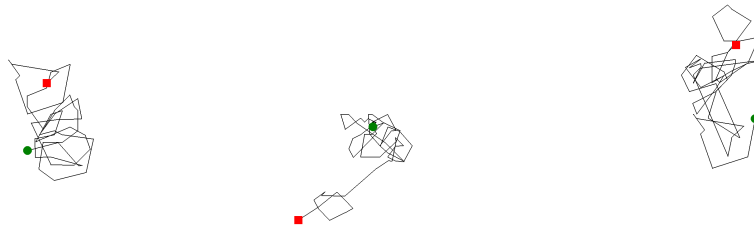
Quelle : [7]

3.3 Tanzidentifikationstest

Bei dem Tanzidentifikationstest handelt es sich um eine Entscheidung, ob eine Trajektorie einer Biene als Schwänzeltanz eingeschätzt wird, oder nicht. Der Test muss anhand bekannter Tänze validiert werden, um dessen Aussagekraft einschätzen zu können. Als mögliche Aussagen, sollen Zahlen zwischen 1.0 und -1.0 gelten, wobei positive Zahlen als Schwänzeltänze eingeschätzt und negative als Nicht-Schwänzeltänze eingeschätzt werden sollen. Der Betrag der Zahl soll die Stärke der Konfidenz angeben, dass heißt, Beträge gegen Eins werden mit hoher Sicherheit getroffen und Beträge gegen Null mit niedriger.

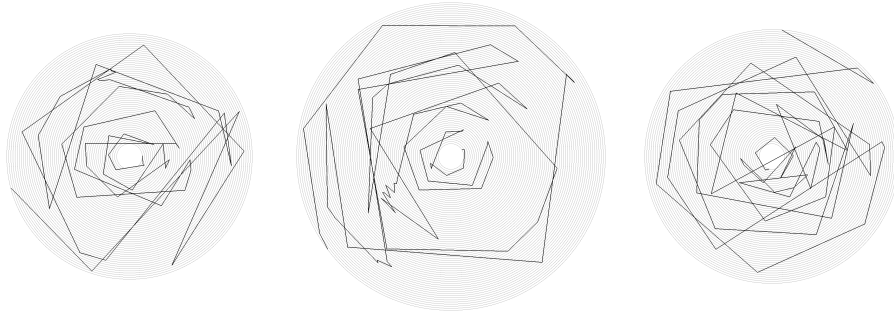
Bei der Entwicklung des Tests wurden im ersten Schritt die Laufwege und die Blickrichtungen von verifizierten Tänzerinnen mit dreiundzwanzig Sekunden langen Trajektorien untersucht. Das Augenmerk hierbei lag darauf, Zusammenhänge zwischen allen Tänzerinnen zu suchen, die bei den Nicht-Tänzerinnen nicht auftreten und umgekehrt. Gefunden wurden letztlich fünf Merkmale, die mit dem Tanzen korrelierten.

Das erste Merkmal ist die durchschnittliche Laufgeschwindigkeit. Beim Tanzen bewegt sich die Biene deutlich schneller als der Rest. Sie bewegt sich im Durchschnitt zwischen 70 und 110 Pixel pro Frame, was in etwa 1.8 cm s^{-1} entspricht, wohingegen die nicht tanzenden Bienen typischerweise um die 30 Pixel pro Frame bewegen, also in etwa 0.6 cm s^{-1} .



(a) Dance Score : 0.8125 (b) Dance Score : 0.135 (c) Dance Score : 0.965

Abbildung 6: Laufwege von verifizierten Tänzerinnen. Start: Grüner Kreis, Ende: Rotes Quadrat.



(a) Dance Score : 0.8125 (b) Dance Score : 0.135 (c) Dance Score : 0.965

Abbildung 7: Blickrichtung der Tänzerinnen. Der zeitliche Verlauf geht von Innen nach Außen pro Frame.

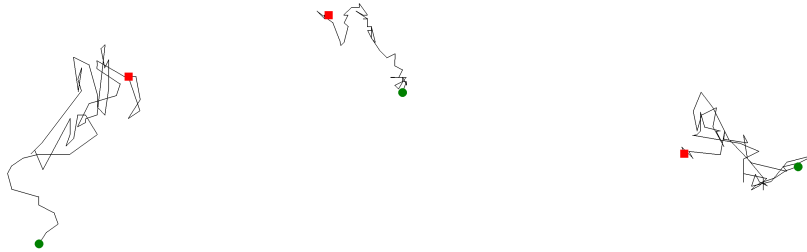
Das zweite Merkmal ist die durchschnittliche Änderung der Blickrichtung im Bogenmaß. Eine tanzende Biene ändert ihre Blickrichtung von einem Frame zum nächsten um etwa 1.1 Radianen, wohingegen andere Bienen ihre Orientierung in etwa nur um 0.3 Radianen pro Frame änderten.

Das dritte Merkmal ist das Vorhandensein von vollen Umdrehungen. Eine tanzende Biene kehrt beim Rücklauf kreisförmig an ihre Ausgangsposition zurück und wechselt zudem die Drehrichtung in alternierender Weise (siehe Abb. 1). Nicht-tanzende führen solche Bewegungen normalerweise nicht aus.

Das vierte Merkmal ist, dass sich eine tanzende Biene beim Schwänzellauf, der sich zwischen den Rückläufen befindet, immer in dieselbe Richtung blickt. Es wurde versucht festzustellen, ob nach einer größeren Blickrichtungsänderung wie sie bei den Rückläufen stattfindet, wieder in dieselbe Richtung wie zuvor geschaut wird. In der Praxis hat sich nach der Validierung gezeigt, dass Tänzerinnen hier manchmal mit einer niedrigen Punktzahl abschneiden. Nicht-Tänzerinnen bekommen aber keine hohe Punktzahl. Daher wird diesem Test nur Gewicht beigemessen, wenn die Punktzahl hoch war, bei niedriger Punktzahl wird keine Aussage getroffen.

Das fünfte Merkmal ist, dass sich eine tanzende Biene trotz großer Laufwege kaum von ihrem Platz wegbewegt. Dazu wurde eine Durchschnittspo-

sition berechnet und anschließend die durchschnittliche Entfernung zu dieser Position ermittelt. Hierbei hat sich gezeigt, dass eine Tänzerin in etwa zwischen 110 und 130 Pixel von ihrer Durchschnittsposition entfernt ist, also in etwa 0.8 cm. Andere Bienen haben hier sehr unterschiedliche Werte, da sie manche fast gar nicht und manche besonders weit laufen. Daher wird diesem Verfahren nur Bedeutung zugemessen, wenn sich der Wert deutlich von 120 unterscheidet, und zwar in negativer Weise. Wird ein Wert um die 120 erreicht, wird eine neutrale Aussage gemacht.



(a) Dance Score : -0.425 (b) Dance Score : -0.75 (c) Dance Score : -0.5725

Abbildung 8: Laufwege von nicht tanzenden Bienen. Start: Grüner Kreis, Ende: Rotes Quadrat.



(a) Dance Score : -0.425 (b) Dance Score : -0.75 (c) Dance Score : -0.5725

Abbildung 9: Blickrichtung der Nicht-Tänzerinnen. Ebenfalls ist hier der zeitliche Verlauf von Innen nach Außen pro Frame.

Letztlich werden die Aussagen anhand dieser Merkmale zusammengefasst und eine finale Aussage wird getroffen.

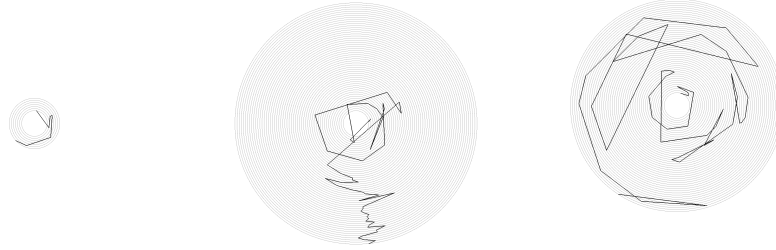
		verifizierte Tänze		
		positiv	negativ	gesamt
Test	positiv	richtig positiv 47	falsch positiv 9	56
	negativ	falsch negativ 11	richtig negativ 213	224
	gesamt	58	222	280

Tabelle 1: Validierung des Tanzidentifikationstests an zuvor bekannten Tänzen

Sensitivität 0.810

Spezifität 0.959

Bei den falsch positiv und falsch negativ getesteten Tänzen handelt es sich in den meisten Fällen um zu kurze Trajektorien. Erwartet sind etwa siebzig Frames, in manchen Fällen kommen aber lediglich zehn und weniger. Bei zu kurzen Trajektorien können kaum noch verlässliche Aussagen getroffen werden, da man zum Beispiel keine vollständigen Kreisbewegungen mehr erkennen kann. Zudem kann man kaum Aussagen über Durchschnittswerte machen, da sich zum Beispiel eine nicht-tanzende Biene natürlich durchaus über einen kurzen Zeitraum sehr flink bewegen kann und somit eine hohe Bewertung bei der Durchschnittsgeschwindigkeit erreichen kann. Möglicherweise führt das Schwänzeln der Bienen dazu, dass die Tag-Erkennung nicht mehr gegeben ist und dadurch die Trajektorien vermehrt abbrechen (siehe Abb. 2). Eine weitere typische Fehlerquelle scheint gegeben zu sein, wenn eine tanzende Biene nach der Hälfte der Zeit aufhört zu tanzen und sich fortan wie eine nicht-tanzende Biene verhält. In einem solchen Fall wird sie wahrscheinlich vom Test aussortiert.



- | | | |
|---|---|--|
| (a) Fälschlich als negativ eingeschätzt, da zu wenige Frames vorhanden sind. Dance Score : -0.225 | (b) Ein vorzeitiger Abbruch des Tanzes führte ebenfalls zu einem falschen negativen Ergebnis. Dance Score : -0.5275 | (c) Als positiv eingestufte Nicht-Tänzerin. Möglicherweise handelt es sich hierbei um eine Nachläuferin. Dance Score : 0.3 |
|---|---|--|

4 Evaluation

4.1 Ergebnisse

Die Berechnung der Resultate ist ausgesprochen zeitintensiv. Die hier vorgestellten Ergebnisse ergaben sich aus einem Zeitraum von vier Tagen Auswertung. Der Flaschenhals bei der Berechnung lag sicherlich an meiner Download-Geschwindigkeit, die den Fluss der Ergebnisse aus der Datenbank gedrosselt hatte.

Die Ergebnisse wurden nach Möglichkeit gleichverteilt angelegt, es kam aber hin und wieder zu Abbrüchen durch I/O-Fehlern und Serverabstürzen, wodurch es zum Teil immer wieder kleinere Rückschläge gab, die besonders viel Augenmerk gekostet hatten um diese Lücken wieder aufzufüllen.

Aufgeschlüsselt wurde nach Kamera, Datum und Tageszeit. Da die Kameras alle unterschiedliche Bereiche auf der Wabe aufgenommen haben, sollte man hier einen guten Einblick bekommen, auf welchen Teil die meisten Tänze stattfanden. Tatsächlich hatte Kamera 2 die meisten Tänze festgehalten, was wohl daran lag, dass der Eingang des Bienenstocks am nächsten war.

Anhand der Unterschiede bei der Tageszeit, scheint es beim Tanzen eine höhere Präferenz zum Nachmittag zu geben, allerdings wurden hier aus Zeitgründen noch nicht alle Uhrzeiten untersucht.

Kamera	Detektionen	Tänzerinnen	Keine Tänzerinnen	Überprüfungsdauer
Cam 0	3847	1	6856	94 440 s
Cam 1	3440	5	7193	94 440 s
Cam 2	10126	309	26533	94 440 s
Cam 3	6365	9	10812	94 440 s
Gesamt	23778	324	51404	377 760 s

Tabelle 2: Unterscheidung der Ergebnisse im Bezug zu den vier Kameras. Jede Kamera filmt jeweils einen anderen Bereich der Wabe. Cam 2 befindet sich am nächsten zum Eingang des Bienenstocks.

Datum	Detektionen	Tänzerinnen	Keine Tänzerinnen	Überprüfungsdauer
14.08.2016	3297	24	8715	75 600 s
15.08.2016	3912	23	9379	75 600 s
16.08.2016	8162	210	22748	75 360 s
17.08.2016	3277	56	8826	75 600 s
09.09.2016	5130	11	1736	75 600 s

Tabelle 3: Unterscheidung der Ergebnisse im Bezug auf das Datum.

Uhrzeit (CEST / UTC+2)	Detektionen	Tänzerinnen	Keine Tänzerinnen
10 Uhr bis 11 Uhr	4087	46	8589
11 Uhr bis 12 Uhr	3395	20	7438
12 Uhr bis 13 Uhr	5208	92	10837
13 Uhr bis 14 Uhr	5074	66	10610
14 Uhr bis 15 Uhr	4655	76	10759
15 Uhr bis 16 Uhr	1359	24	3171

Tabelle 4: Unterscheidung der Ergebnisse im Bezug auf die lokale Tageszeit im Sommer

Es scheint auch große Unterschiede zwischen den Tagen zu geben, allerdings konnte hier ebenfalls nur ein kleiner Teil ausgewertet werden. Besonders am sechzehnten August 2016 gab es sehr viel mehr Tänze bei relativ wenigen Detektionen pro Tanz als bei den anderen Tagen. Der neunte September ist auch sehr auffällig, da sehr viel weniger Bienen im Allgemeinen gefunden werden. In den Videos konnte man an diesem Tag auch einen deutlich kleineren Bestand an Bienen feststellen. Anhand der hier berücksichtigten Daten

konnte im Durchschnitt festgestellt werden, dass für jede Detektion des WDD rund 0.014 Tänzerinnen und rund 2.16 Nicht-Tänzerinnen gefunden werden konnten. Zeitlich betrachtet wurde in etwa eine Tänzerin alle 19 Minuten Videomaterial gefunden.

4.2 Genauigkeit der Homographie

Rein grafisch erzielt die Homographie eine ausgesprochen hohe Präzision. Pixel die im Ausgangs-Koordinatensystem nahezu direkt am Rand liegen, werden im Ziel-Koordinatensystem erwartungsgemäß ebenfalls genau direkt an den Rand abgebildet. Man kann mit der Homographie auch den Blickwinkel auf ganze Fotos verändern lassen und hat dabei immer noch ein scharfes Bild.

Nichtsdestotrotz geht immer ein Genauigkeitsverlust mit jeder Homographie einher, da es immer entweder zu einer Extrapolation von Pixelinformationen oder zu einer Verschmelzung dieser kommt. Würde man ein Bild ständig durch Homographien umformen, würden die meisten Informationen in jenem Bild langsam zerstört werden.

Die WDD-Detektionen sind bereits stark runterskaliert worden und besitzen daher von vornherein einen gewissen Präzisionsverlust. Diese Ungenauigkeit wird von der Homographie wiederum ein wenig verstärkt. Bei einer zweiten Homographie wird dieser Fehler noch weiter verstärkt. Daher muss in unserem System mit einer Toleranz gearbeitet werden, und die Frage ist natürlich wie hoch diese Fehlertoleranz denn gewählt werden sollte.

Dazu wurden zunächst mit einem besonders großem Toleranzbereich von 450 Pixeln (etwa 3 cm) alle Bienen um die berechnete Detektion herum untersucht. Das Zeitfenster wurde mit 0.4 Sekunden recht scharf gewählt, wodurch gewährleistet werden soll, dass sich die Bienen noch nicht sehr weit entfernen konnten. Von allen Bienen, die als Tänzerinnen identifiziert werden konnten, wurden die Distanzen zwischen der Detektionsposition und der Position der Tänzerin aufgenommen. Anhand von vierzig auf diese Weise gefundenen Tänzerinnen, konnte eine durchschnittliche Distanz von 128.35 (etwa 0.85 cm) Pixeln ermittelt werden. Einzelne Ausreißer besaßen eine Distanz von über 200 Pixel, vermutlich wurden diese Bienen erst am Rande des Zeitfensters eingefangen, wodurch deren Position zeitlich versetzt war. Es wurde fortan mit einem Toleranzbereich von 150 Pixeln gearbeitet, wodurch sich in der Regel zwischen ein bis sieben Bienen im Toleranzbereich befinden, im Schnitt etwa 2.16. Diese Zahlen konnten aber je nach Kamera,

Tag und Uhrzeit recht stark variieren.

4.3 Genauigkeit der Identifikation

Der Test zur Identifikation von Schwänzeltänzen besitzt eine Sensitivität von etwa 0.810 und eine Spezifität von 0.959, wobei diese Zahlen aus einer relativ kleinen Fallzahl hervorgehen. Die Fallzahl hängt in diesem Fall mit der Anzahl verifizierter Tänze zusammen, die wir soweit zusammengetragen hatten. Aus dem Unterschied zwischen Sensitivität und Spezifität leitet sich ab, dass der Test besser darin ist, Nicht-Tänze als solche zu erkennen, als Tänze als Tänze zuzuordnen. Meine Vermutung ist, dass es sich bei den falsch positiven Identifikationen größtenteils um Nachläuferinnen handelt, denn ich halte es für ziemlich unwahrscheinlich, dass eine Biene aus reinem Zufall die typischen Tanzmotive zeigt. Zudem gab es auch Detektionen, wo mehrere Tänzerinnen gleichzeitig gefunden wurden, was auch unwahrscheinlich ist, sondern es sich wohl eher um Nachläuferinnen handeln dürfte. Falls es sich um Nachläuferinnen handeln sollte, wäre das Auffinden dieser sicherlich auch nicht uninteressant für spätere Arbeiten. Die im Verhältnis zur Spezifität recht niedrige Sensitivität geht darauf zurück, dass die Trajektorien der Tänzerinnen durch das Verschwimmen der Tags während des Schwänzels manchmal unterbrochen werden, wodurch dann nur sehr wenige Frames zum Auswerten vorhanden bleiben, die wiederum nicht hinreichend genau ausgewertet werden können. Vollständige Trajektorien von Tänzen werden soweit ich anhand der richtig negativen feststellen konnte, schon mit hoher Wahrscheinlichkeit als Tänze erkannt.

5 Diskussion

5.1 Einschätzung der Ergebnisse

Aufgrund des recht hohen Aufwands bei der Berechnung meiner Ergebnisse, sind diese zum größten Teil noch unvollständig und geben nur einen Ausblick darauf, was zu erwarten ist. Die grundsätzliche Idee Tänze über den WDD zu finden, scheint recht gut aufzugehen, da hunderte Tänze gefunden wurden, wovon die meisten sicherlich tatsächlich Tänze sein werden.

Aus Interesse habe ich für einen Vergleich insgesamt 4000 rein zufällige Pseudo-Detektionen erstellt, um zu schauen ob man auf diese Weise auch rein zufällig Tänze finden würde. Dazu habe ich 2000 davon auf den 16.08.2016 zwischen 13 und 14 Uhr verteilt, also auf einen Tag, wo es besonders viele Tänze gab, insbesondere zu dieser Uhrzeit. Die anderen 2000 habe ich auf den 14.08.2016 zwischen 10 und 11 Uhr gelegt, also an einen Tag mit eher niedriger Aktivität. Die 2000 Punkte wurden in beiden Fällen exakt gleichmäßig auf die vier Kameras verteilt. Heraus kam, dass ich am Tag mit den vielen Tänzen aus Zufall zwölf Tänze entdecken konnte und an dem anderen Tag einen einzigen. Die gefundenen Nicht-Tänzer waren mit 3013 und 3290 in etwa gleich viele. Im Schnitt wurden also pro Pseudo-Detektion 0.00325 Tänzerinnen gefunden. Die echten Detektionen liegen in etwa in dem Bereich 0.014, sind also rund vier mal effizienter als Zufallsdaten.

Im Bildmaterial konnte ich bisher nur eine handvoll Verifizierungen vornehmen, da dies ebenfalls wieder stark von meiner Download-Rate abhing. Zudem fällt es mir persönlich eher schwierig die Tänze bei der gegebenen Bildrate zu verfolgen.

Insgesamt bin ich ziemlich zufrieden mit den Ergebnissen, die da sind, sie entsprechen auch dem was ich mir ungefähr erhofft hatte. Sie sind aber natürlich zu unvollständig, um an dieser Stelle allgemeine Aussagen treffen zu können.

5.2 Ausblick

Die nächsten Schritte, die auf diese Arbeit folgen sollten, wäre die Ergebnisse aufzufüllen, denn der Großteil der WDD-Daten wurde noch gar nicht berührt. Die Berechnung sollte auch um ein Vielfaches schneller von staten gehen, wenn man direkt auf die Daten der Beesbook-Datenbank zugreifen könnte, anstatt über das Internet auf diese zuzugreifen. Ich glaube es lassen sich noch interessante Aussagen über die verschiedenen Auffindera-

ten von Schwänzeltänzen treffen und es gibt auch so einige Auffälligkeiten. Zumindest sollten von nun an viele Tänze leicht auffindbar sein, die für zukünftige Arbeiten nützlich sein sollten. Beispielsweise für die Untersuchung von Nachläuferinnen muss ja zunächst einmal die Tänzerin gefunden werden, bevor damit begonnen werden kann.

Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] J. Božič und T. Valentinčič. “Attendants and followers of honey bee waggle dances”. In: *Journal of Apicultural Research* 30.3-4 (Jan. 1991), S. 125–131. ISSN: 0021-8839. DOI: 10.1080/00218839.1991.11101246. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00218839.1991.11101246> (besucht am 16.03.2017).
- [2] K. v Frisch und G. A. Rösch. “Neue Versuche über die Bedeutung von Duftorgan und Pollenduft für die Verständigung im Bienenvolk”. de. In: *Zeitschrift für vergleichende Physiologie* 4.1 (Jan. 1926). 00040, S. 1–21. ISSN: 0044-362x, 1432-1351. DOI: 10.1007/BF00341784. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00341784> (besucht am 20.06.2017).
- [3] Karl von Frisch. *Tanzsprache und Orientierung der Bienen*. Springer, 1965. ISBN: 978-3-642-94916-6. URL: <http://www.springer.com/us/book/9783642949173> (besucht am 19.12.2016).
- [4] Christoph Grüter und Walter M. Farina. “The honeybee waggle dance: can we follow the steps?” eng. In: *Trends in Ecology & Evolution* 24.5 (Mai 2009), S. 242–247. ISSN: 0169-5347. DOI: 10.1016/j.tree.2008.12.007.
- [5] Tim Landgraf u. a. “Analysis of the Waggle Dance Motion of Honeybees for the Design of a Biomimetic Honeybee Robot”. en. In: *PLOS ONE* 6.8 (Aug. 2011), e21354. ISSN: 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0021354. URL: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0021354> (besucht am 19.02.2018).
- [6] Alexander Rau. “Realtime Honey Bee Waggle Dance Decoding System”. FU Berlin, 2014.
- [7] Per Rosengren. *Calculating homography*. Mai 2007. URL: <http://www.csc.kth.se/~perrose/files/pose-init-model/node17.html> (besucht am 01.03.2018).