

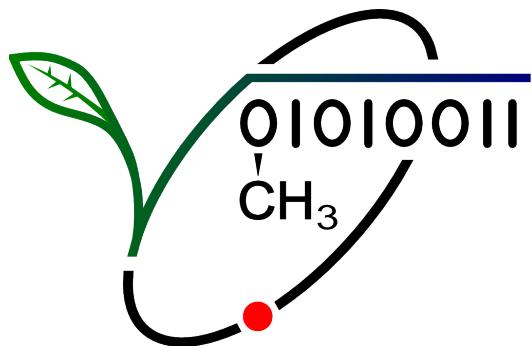
1

Spezialschulteil des Albert-Schweitzer-Gymnasiums Erfurt

2

Seminarfacharbeit Klasse 11/12

3



4

Entwicklung des VARRODETEKTORS 187

5

6

Fachbetreuer: Herr Süpke
Seminarfachbetreuer: Frau Nadler
Name: Albert H. Dehne
Daniel F. Germann
Richard Ueltzen
Datum: 17. Dezember 2021

7 Inhaltsverzeichnis

8 1 Einleitung	2
9 2 Die Honigbiene <i>Apis mellifera</i>	3
10 2.1 Beschreibung der Biene	3
11 2.2 Bedeutung der Biene	3
12 3 Die Milbe <i>Varroa destructor</i>	3
13 3.1 Geschichtlicher Überblick	3
14 3.2 Beschreibung des Parasiten	3
15 3.3 Verbreitung des Parasiten	4
16 3.4 Krankheitsverlauf durch Befall des Parasiten	5
17 3.5 Herkömmliche Bekämpfungsmethoden	5
18 4 Vorberachtungen und Experimente	6
19 4.1 Aufbaumöglichkeiten der Varroaerkennung	6
20 4.2 Experimente zur Optimierung der Fotoqualität	7
21 5 Entwicklung und Verbesserung verschiedener Prototypen	9
22 5.1 Angewandte Arbeitsmethoden	9
23 5.2 Technische Grundlagen	9
24 5.3 Bau und Verbesserung von Prototypen	10
25 6 Programmierung der Milbenerkennung	11
26 6.1 Architektur der Milbenerkennung	11
27 6.2 Erstellung eines Modells zur Bienenerkennung	11
28 6.3 Implementierung der Videoverfolgung von Bienen	12
29 6.4 Erstellung eines Modells zur Varroaerkennung	12
30 6.5 Optimierung der Laufzeit	12
31 7 Umsetzung der Milbenbekämpfung	14
32 7.1 Ideen zum Aufbau	14
33 7.2 Erste Tests mit Lasern	14
34 7.3 Darstellung der Ergebnisse auf einer Website	14
35 8 Fortsetzungsmöglichkeiten	15
36 9 Zusammenfassung	16
37 10 Anhang	17
38 10.1 Zu Kapitel 4	17
39 10.2 Zu Kapitel 6	17
40 11 Literatur- und Quellenverzeichnis	18
41 11.1 Gedruckte Literatur	18
42 11.2 Internetliteratur	18

43 1 Einleitung

44 Jährlich sterben etwa 15% der Bienenvölker in Deutschland an den Folgen von Varroamilbenbefall [1]. Viele weitere Bienenstöcke werden zusätzlich durch den Parasiten stark geschwächt.

45 Dies ist ein großes Problem: Nicht nur für Bienen, sondern auch für Natur und Mensch. Weltweit
46 sind 80% der Pflanzen auf die Bestäubung von Bienen angewiesen. Die enorme Bedeutung der
47 Bienen spiegelt sich auch im geschätzten Wirtschaftswert der Biene, etwa 265 Milliarden Euro
48 jährlich, wieder [2]. Aktuell gibt es verschiedene Wege die Varroamilbe zu bekämpfen. Jedoch sind
49 die meisten dieser Methoden ineffizient¹. Des Weiteren sind die ökologischen Schäden, welche
50 die Anwendung der gängigen Säurebehandlung hinter sich ziehen, nicht zu vernachlässigen. Sie
51 sollten mit dem Nutzen in jedem Falle abgewogen werden. Andere Bekämpfungsmethoden sind
52 unter anderem die Wärmebehandlung von ganzen Bienenstöcken. Diese hat jedoch nur einen
53 Wirkungsgrad von circa 60%.

54 Wir haben uns zum Ziel gesetzt, eine neue Behandlungsmethode zu entwickeln. Dabei ist uns
55 besonders wichtig, den ökologischen Schaden für die Bienen und die Umwelt so gering wie
56 möglich zu halten. Unser Ziel ist dabei, nur die betroffenen Bienen zu behandeln. Diese wollen
57 wir durch eine optische Erkennung der Varroamilben am Bienenstockeingang ermöglichen. An-
58 schließend sollen befallene Bienen erkannt und abgesondert werden. Nach diesem Prozess kann
59 die betroffenen Biene behandelt werden und wieder in den Bienenstock zurückgeführt werden.
60 Dieses Vorgehen ermöglicht darüberhinaus eine ganzjährige Behandlung eines Bienestocks und
61 hat im Gegensatz zu bisherigen Methoden das Potenzial, das Eindringen der Varroamilben in den Stock, präventiv zu verhindern. Dem gegenüber steht z.B. die Säurebehandlung,
62 welche nur durchgeführt werden kann, wenn die Bienen keinen Nektar sammeln. Unser Hauptziel
63 besteht darin, den erstmaligen Befall mit der Varroamilbe zu verhindern. Eine Kombination
64 von konventionellen Behandlungsmethoden und unserer neuen Methode könnte Bienenstöcke
65 vollständig von Milbenbefall befreien.

66 In unserer Arbeit fokussieren wir uns auf die optische Varroamilbenerkennung, um die Grundlage
67 zur Bekämpfung zu schaffen. Des Weiteren können durch die Erkennung des Schädlings For-
68 schungsdaten zum Verhalten von Bienen und Varroamilben kostenkünstig erhoben werden. Die
69 Bekämpfung der Varroamilben arbeiten wir konzeptionell aus und sammeln unsere technischen
70 Umsetzungsideen.

71 An dieser Stelle möchten wir ein Dankeschön für die Unterstützung an unseren Fachbetreuer
72 Johannes Süpke und unsere Seminarfachbetreuerin Dörte Nadler aussprechen. Des Weiteren
73 möchten wir uns in besonderer Weise für die tatkräftige Unterstützung unseres Außenbetreuers
74 Jan Rimbach bedanken, welcher uns stets mit fachkundiger Auskunft zur Seite stand und uns
75 mit der aktuellen Technik ausgestattet hat. Ein weiterer Dank geht an das Schülerforschungs-
76 zentrum, vertreten durch Frank Paulig.

77
78
79

¹starke Quelle

80 2 Die Honigbiene *Apis mellifera*

81 2.1 Beschreibung der Biene

82 2.2 Bedeutung der Biene

83 3 Die Milbe *Varroa destructor*

84 3.1 Geschichtlicher Überblick

85 Die Milbe *Varroa destructor* wurde im Jahr 1904 zum ersten Mal auf einer östlichen Honigbiene
86 – *Apis cerana*, auch *Apis indica* – entdeckt. Anschließend wurde sie im gleichen Jahr von Ou-
87 demans beschrieben und klassifiziert. Er benannte sie nach ihrem Entdecker Eward Jacobson.
88 Dadurch entstand der Name *Varroa jacobsoni*. Erst später wurde entdeckt, dass zwei sehr ähn-
89 liche Milben unter dem gleichen Namen beschrieben wurden. Anfang der Zweitausender wurde
90 endgültig eine Unterscheidung in die Milbe *Varroa jacobsoni* und die Milbe *Varroa destructor*
91 vorgenommen². Unsere gesamte Arbeit behandelt hierbei die Milbe *Varroa destructor*.
92 Die Milbe *Varroa destructor* war in zum Anfang des 20. Jahrhunderts auf des Ausbreitungsgebiet
93 der *Apis cerana* beschränkt, welches die gesamte östliche Hemisphäre bis zur Linie Ural/Afgha-
94 nistan beinhaltet. Dies erklärt auch ihre erste Entdeckung auf der indonesischen Insel Java. Für
95 einen langen Zeitraum gab es bis auf ein paar wenige Beschreibungen kaum Meldung über die
96 Milbe. Sie galt als recht harmloser Parasit der *Apis cerana*. Durch die zunehmende Industrialisie-
97 rung gegen Ende der 50er Jahre entstand eine Durchmischung der asiatischen Honigbiene *Apis*
98 *cerana* und der europäischen *Apis mellifera*. Die führte dazu, dass die Milbe *Varroa destructor*
99 von der östlichen und die westliche Honigbiene übergehen konnte. Die *Varroa destructor* und die
100 *Apis cerana* haben sich im Laufe der Zeit aufeinander eingestellt und ein gesundes Wir – Parasit
101 entwickelt, welche für beide das Überleben sicherten. Da diese Zeit beim plötzlichen Übergriff auf
102 die *Apis mellifera* fehlte, waren tausende Völker schwer geschädigt. Zu diesem Zeitpunkt Anfang
103 der 50er Jahre wurden unter anderem in der damaligen UdSSR umfangreiche Untersuchung über
104 die Erkrankungen der *Apis mellifera* Völker angestellt. Allerdings bliebe diese ohne Erfolg und
105 man identifizierte die Milbe *Varroa destructor* nicht als den Auslöser. Die Erkenntnis über den
106 Zusammenhang zwischen der Erkrankung von *Apis mellifera* Völkern und dem Befall mit *Varroa*
107 *destructor* erbrachte erst 1958 der chinesische Forscher Ian Tzin-He.³

108 3.2 Beschreibung des Parasiten

109 Nach aktuellem Stand sind vier Arten von Varroamilben bekannt. Neben der bereits erwähnten
110 *Varroa jacobsoni*, welche man lange Zeit für die Hauptursache des Bienensterbens ansah gibt
111 es noch *Varroa underwoodi* (Delfinado-Baker und Aggarwal 1987) und die *Varroa rinderi* (De
112 Guzman und Delfinado-Baker 1996). Erst im Jahr 2000 entdeckte man durch mitochondrialer
113 DNA-Analysen, dass es sich bei der *Varroa jacobsoni* um einen Komplex aus zwei Milbenspezies
114 handelt. Die neu Entdeckte Art *Varroa destructor* lässt sich wie folgt klassifizieren:⁴

115

	Stamm	Antropoda
	Klasse	Archnidae
	Ordnung	Arcari
116	Unterordnung	Mesostigmata
	Familie	Dermanyssidae
	Unterfamilie	Varroinae
	Gattung	Varroa

²<http://www.mellifera.ch/cms/index.php/news/varroa-jacobsoni-westliche-honigbiene> letzter Zugriff am 16.12.2021

³Eva Rademacher, Erika Geiseler: Die Varroatose der Biene, Gesichte, Diagnose, Therapie, 3. überarb. Auflage, Berlin, Schelzky und Jeep, 1986, Seite 8ff.

⁴https://edoc.ub.uni-muenchen.de/12025/1/Schneider_Verena.pdf letzter Zugriff am 16.12.2021

117 Der Körper der Varroa destructor ist in zwei Teile untergliedert. Die Idiosoma stellt den eigent-
118 lichen Körper mit den Beinen dar. Die Gnathosoma ist der Bereich der Mundwerkzeuge. Die
119 weibliche Milbe ist rotbraun und hat eine querovale Form. Sie ist ca. 1,1x1,6mm groß. Die Idio-
120 soma besitzt eine harte Kutikula. Diese bildet auf dem Rücken der Milbe einen Schild. Auf dem
121 Buch laufen häutige Chitinplatten zusammen. Die Kutikula ist stark mit Borsten besetzt. Diese
122 dienen der Milbe zum festen Halt im Fell der Biene. Auf der anderen Seite bieten sie auch eine
123 elastische Hülle, damit die Milbe in einer Bienenzelle nicht zwischen der Brut und der Zellwand
124 anheftet. Die Milbe hat 8 Beine, von denen sich vier auf der Unterseite befinden. Diese vier Bei-
125 ne haben ein besonders stark ausgebildetes Haftorgan. Die Gnathosoma ist beweglicher mit der
126 Idiosoma verbunden. Nach Smirnow schlagen bei der Nahrungsaufnahme die Mundwerkzeuge ein
127 Loch durch die Bienenhaut und kommen somit an die Hämolyphie, das Bienenblut. Dies saugen
128 die Milben durch ihre gut herausgebildete Muskulatur im Mundbereich heraus. Die männlichen
129 Milben sehen den weiblich nicht ähnlich. Sie sind fast weiß, rundlicher und ca. 0,8mm groß. Im
130 Gegensatz zu den Weibchen haben sie eine recht dünne Kutikula, welche auch kaum mit Borsten
131 besetzt ist. Ihre Mundwerkzeuge dienen eher als Hilfsorgane für die Begattung, weshalb ausge-
132 wachsene männliche Varroamilben nicht als Parasiten zählen, da sie nicht die Möglichkeit haben
133 die Hämolyphie aus den Bienen zu sogen. Die Varroamilben verfügen über ein Nervensystem,
134 welches eine gehirnähnliche Struktur aufweist ⁵.



Abbildung 1: Weibliche Varroa destructor

135 3.3 Verbreitung des Parasiten

136 In China wurde die Milbe Varroa destructor erstmals 1958 auf einer Apis mellifera festgestellt.
137 In den anschließenden Jahren folgten weitere Sichtungen in verschiedenen Ländern. So wurde
138 1964 offiziell eine Milbe in der damaligen UdSSR identifiziert. Dies geschah am gleichen Ort, wo
139 Jahre zuvor schon Untersuchungen aufgrund enormes Bienensterbens, welche durch die Milbe
140 ausgelöst wurden, untersucht worden waren. Anschließend breitete sich die Varroamilbe über
141 das heutige Russland von Osten und Richtung Westen schnell aus. Vorerst gab es keine größe-
142 ren Bedenken wegen des neuen Parasiten und frühe Kongresse zum Thema Varroamilben waren
143 schlecht bezahlt. Jedoch breitete sich die Milbe über rasanter Art und Weise aus und eroberte in Rekordzeit
144 Europa. Um den enormen Bienensterben entgegenzuwirken, gab es mehrere großangelegte Be-
145 kämpfungsaktionen. So wurden im Zeitraum von 1980-1983 in der damaligen ČSSR
146 30.000 Völker vernichtet. Der Befall wurde dadurch jedoch nicht gestoppt. Heute ist die Mil-
147 be Varroa destructor auf allen Kontinenten mit Ausnahme von Australien vorzufinden. In der

⁵va Rademacher, Erika Geiseler: Die Varroatose der Biene, Gesichte, Diagnose, Therapie, 3. überarb. Auflage, Berlin, Schelzky und Jeep, 1986, Seite 22ff.

¹⁴⁸ nebenstehenden Grafik können sie den genauen Ausbreitungsweg der Milbe nachvollziehen⁶.

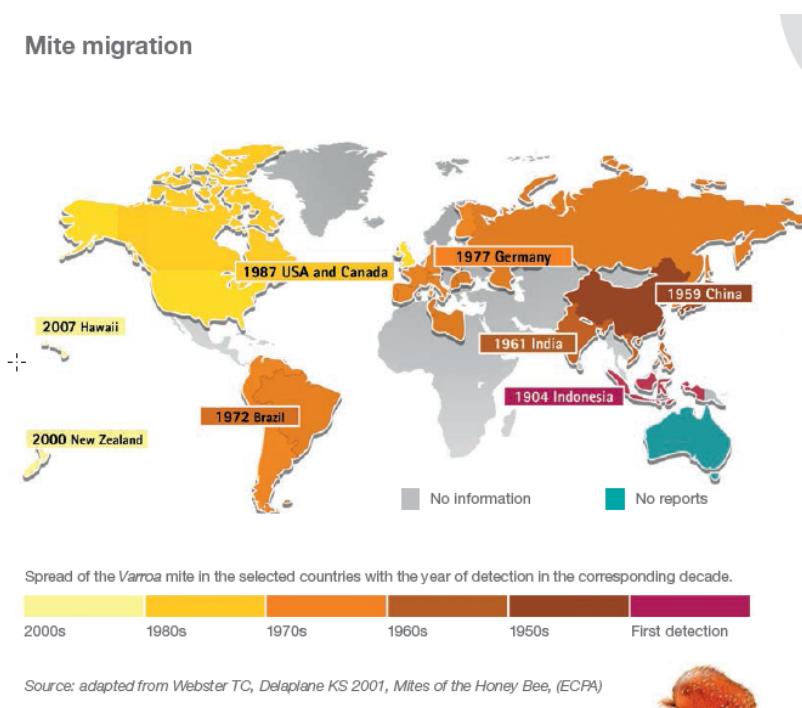


Abbildung 2: Ausbreitung der Milbe Varroa destructor

¹⁴⁹ 3.4 Krankheitsverlauf durch Befall des Parasiten

¹⁵⁰ 3.5 Herkömmliche Bekämpfungsmethoden

⁶Eva Rademacher, Erika Geiseler: Die Varroatose der Biene, Gesichte, Diagnose, Therapie, 3. überarb. Auflage, Berlin, Schelzky und Jeep, 1986, Seite 10ff.

151 4 Vorberichtigungen und Experimente

152 4.1 Aufbaumöglichkeiten der Varroaerkennung

153 Bevor wir mit dem Bau von Prototypen begannen, haben wir durch Brainstorming so viele
154 Ideen wie möglich gesammelt.

155 Ein erster Ansatz war, die Bienen mit Kameras zu filmen und somit die Milben optisch zu
156 erkennen. Durch Anpassung der äußeren Bedingungen, wie Lichtverhältnisse, wollten wir die
157 Erkennung so zuverlässig wie möglich gestalten.

158 Eine weitere Idee beruht auf einer möglichen Wärmedifferenz zwischen Bienen und Milben:
159 Wäre die Differenz der Körpertemperaturen nicht marginal, könnten wir beim Filmen mit
160 Wärmebildkameras vermutlich Milben als warme bzw. kalte Punkte auf den Bienen erkennen.
161 Diese Methode hätte allerdings beträchtliche Nachteile: Zum einen sind Infrarot-Kameras mit
162 der von uns benötigten Auflösung sehr teuer. Unsere Varroamilbenerkennung würde also auch
163 langfristig nicht preiswert sein und somit keine weitreichende Anwendung finden. Außerdem
164 sind Bienen wechselwarm^[3]. Die stark von der Außentemperatur abhängenden Schwankungen
165 der Körperkerntemperatur würden wahrscheinlich zu Ungenauigkeiten und ungeahnten Problem
166 bei der Milbenerkennung führen.

167 Auch andere Möglichkeiten, die wir in Betracht zogen, hatten große Nachteile oder waren mit
168 unseren Mitteln nicht umsetzbar. Also kamen wir zu dem Schluss, das Erkennen der Milben mit
169 Kameras durchzuführen.

170 Nach unserer ersten Abwägung von Ideen war der nächste Schritt, das Scannen der Bienen
171 konzeptionell zu planen. Alle unserer Überlegungen beruhten dabei auf einem von zwei grund-
172 sätzlichen Ansätzen: Entweder jede Biene wird durch Bewegung der Kamera bzw. Veränderung
173 des Zooms einzeln fokussiert und anschließend auf Varroen gescannt oder eine Kamera ist
174 statisch und überwacht gleichzeitig mehrere Bienen aus ihrem Sichtfeld. Eine konzeptionelle
175 Gegenüberstellungen der beiden Möglichkeiten ist in Abbildung ? (Anhang Seite ?) zu erkennen.
176 Bei der Entscheidung für eine Herangehensweise, mussten wir Klarheit und Auflösung der Bilder
177 gegen Kosten und Aufwand abwagen.

178 Der erste der beiden Ansätze hatte den großen Vorteil, dass die Auflösung der fotografierten
179 Biene höher wäre. Versuche von uns haben gezeigt, dass ein kleinerer Abstand der Kamera
180 zur Biene für die Bildqualität und somit auch für die Varroaerkennung, unabhängig von der
181 verbesserten Auflösung, förderlich ist. Allerdings brächte man für eine Durchführung dieser
182 Idee in jedem Fall mechanische Vorrichtungen. Die Skizze einer möglichen Umsetzung mit auf
183 linearen Achsen montierten Spiegeln ist im Anhang auf Seite ??? zu erkennen.

184 Neben den theoretischen Überlegungen führten wir außerdem Tests mit Servomotoren durch.
185 In einem einfachen, 3D-gedruckten Versuchsaufbau testeten wir wie schnell die Kamera auf
186 beliebige Stellen des Flugbretts geschwenkt werden kann (siehe Anhang S. ???). Die Versuche
187 ergaben, dass wir pro Sekunde etwa eine Biene untersuchen könnten. Natürlich ließe sich diese
188 Rate verbessern. Angesichts der Anforderung im Sommer bis zu als 20 Bienen pro Sekunde
189 erkennen zu können, häuften sich die Argumente trotz dessen gegen diese Idee. Bei Abschätzun-
190 gen der Kosten, Geschwindigkeitslimitierenden Faktoren, Lautstärke und Wartungsaufwand des
191 Systems entschieden wir uns schließlich ganz gegen diesen Ansatz.

192 Das zweite Konzept ist in der Umsetzung rein vom Versuchsaufbau um einiges leichter.
193 Trotzdem mussten wir vor der Umsetzung einige Optionen abwägen. Beispielsweise mussten
194 wir entscheiden, ob viele billige Kameras, die jeweils nur einen kleinen Bereich des Flugbretts
195 überwachen oder wenige Kameras mit einer sehr hohen Bildqualität und Auflösung bessere
196 Resultate erzielen werden. Wir kamen zu dem Ergebnis, dass das zweitere die bessere Option
197 ist. Unsere Überlegungen dazu sind im Anhang auf Seite ??? nachzuvollziehen.

198 Eine weitere, besonders schwierige Frage, die sich uns stellte, war, ob wir neben der Oberseite
199 auch die Unterseite der Bienen durch Kameras untersuchen sollten. Dazu wären mehr Kameras
200 nötig und das Flugbrett müsste aus einem durchsichtigem Material, zum Beispiel Plexiglas,
201 sein. Aufgrund des ungemein größeren Aufwands, der großen Veränderung des Einflugbereichs

202 von den Bienen und der Tatsache, dass Milben hauptsächlich auf dem Rücken der Bienen sitzen
203 haben wir uns gegen weitere Kameraperspektiven.

204

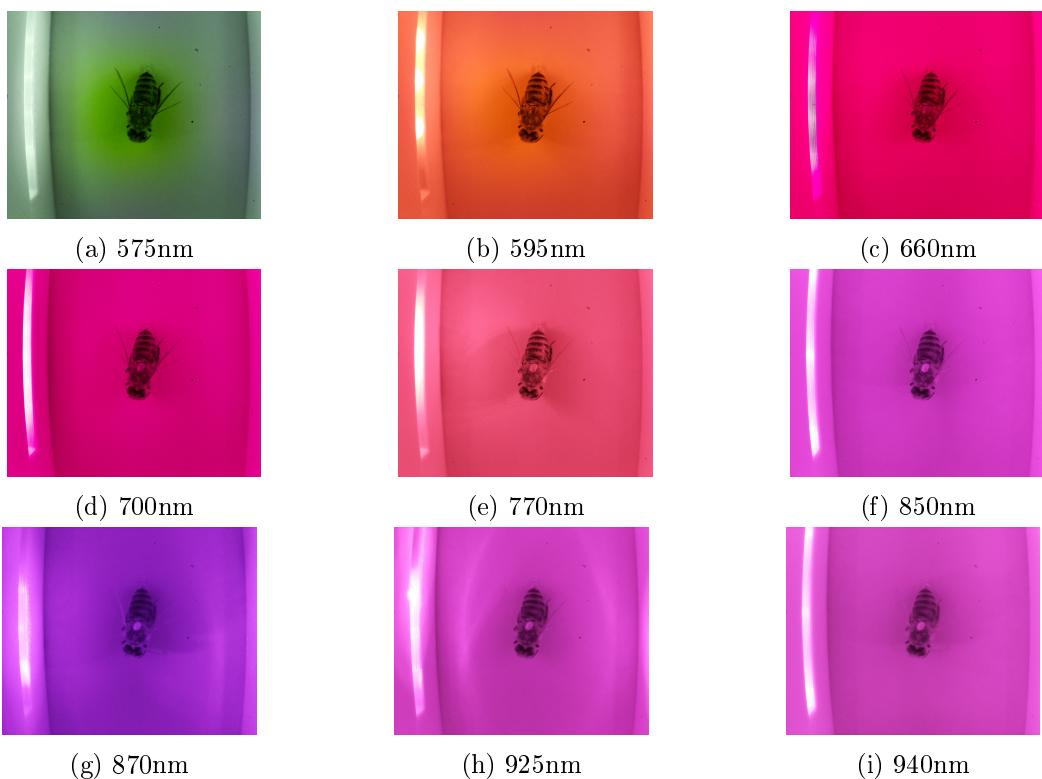
205 4.2 Experimente zur Optimierung der Fotoqualität

Um Varroamilben möglichst zuverlässig auf Bienen zu erkennen, muss der Kontrast zwischen Milbe und Biene so ausgeprägt wie möglich sein. Durch Durchführung systematischer Experimente haben wir die Rahmenbedingungen für ein solches Optimum so präzise wie möglich festgestellt.

Bei allen durchgeführten Versuchen fotografierten wir tote Bienen, auf deren Rücken oder Panzer eine Varroamilben saß. Dabei haben wir von außen kommendes Licht fast vollständig abgeschirmt, um zufällige Fehler durch Sonnenlicht oder andere Beleuchtungen zu vermeiden. Somit hatten wir die Möglichkeit alle Bedingungen eines Fotos nahezu konstant zu halten und nur einen Einfluss gezielt zu verändern.

215 Bei unseren Untersuchten beschränkten wir uns speziell auf die optimale Helligkeit und
216 Wellenlänge der Belichtung, sowie die beste Beschaffenheit und Farbe des Untergrunds.

217



218 Die Ergebnisse unserer Versuche bezüglich der optimalen Wellenlänge der Beleuchtung waren
219 eindeutig. Die Milben sind bei Licht mit einer besonders hohen Wellenlänge am besten zu er-
220 kennen (siehe Abbildung ???). Bei grünem, orangenem und hellrotem Licht ist der Parasit nur
221 umrissartig oder sogar gar nicht zu erkennen. Im starken Gegensatz dazu hebt sich die Milbe bei
222 dunkelrotem und infrarotem Licht stark als weißer Fleck auf der Biene ab.

223 Die Wellenlänge sollte also zwischen 900 nm und 950 nm liegen, was kurzwelligem Infrarotlicht
224 entspricht⁷. Höher darf die Wellenlänge der Beleuchtung nicht sein. Denn gängige Fotosensoren,
225 Objektive und Linsen sind für sichtbares Licht optimiert. Außerhalb eines Toleranzbereiches
226 bräuchten wir für scharfe Bilder spezielle, teure Optik.

Infrarotes Licht wird zudem von Bienen nicht gesehen. Bienen nehmen nämlich Licht nur bis zu

⁷<https://www.heizstrahler-direkt.de/blog/ir-heizstrahler-die-drei-verschiedenen-strahlungstypen/>

228 einer Wellenlänge von etwa 650nm wahr⁸. Im Anhang auf S. ??? ist das für Bienen sichtbare
229 Spektrum zu sehen. Eine Beleuchtung mit Infrarotem Licht können wir also benutzen, ohne die
230 Bienen einzuschränken.

231 Bei den Experimenten zum Untergrund ergab sich, dass Reflexionen und Streuungen des Lichts
232 den Kontrast zwischen Milbe und Biene verschlechtern. Der beste Untergrund sollte somit
233 schwarz sein und möglichst wenig reflektieren.

⁸<https://honeybeehq.com/how-do-bees-see-the-world-this-is-their-superpower/>

234 5 Entwicklung und Verbesserung verschiedener Prototypen

235 5.1 Angewandte Arbeitsmethoden

236 Die wohl wichtigste von uns angewandte Arbeitsmethode ist das Rapid-Prototyping. Diese Ar-
237beitsmethode ist ein Verfahren zum Annähern an angestrebte Ergebnisse mittels aufwandsarmer,
238 günstiger Testversionen⁹. Wir kamen durch den Bau unserer Prototypen und durch das ständige
239 Ausbessern von Fehlern unserem Ziel, einer immer funktionalen Milbenerkennung, immer näher.
240 Unwichtige Details und ablenkende, kleinere Probleme können bei diesem Prozess vorerst igno-
241 riert werden. Der Fokus auf die wesentlichen Herausforderung kann somit bei der Entwicklung
242 erhalten bleiben. Wir haben beispielsweise Witterungsbeständigkeit erst bei späteren Versionen
243 und Kostenoptimierung bisher gar nicht beachtet.

244 Prototyping ist bei unserem Projekt besonders nützlich, da bei der Arbeit mit Bienen viele
245 Fehlerquellen sehr schwer vorhersehbar sind. Einige Verhaltensweisen der Bienen, vor allem Re-
246 aktionen auf Änderungen ihrer Umgebung, sind sehr ungewöhnlich. Bei einem unserer frühen
247 Versionen hatten wir einen zu großen Kasten vor den Eingang des Bienenstocks gebaut. Dar-
248 aufhin haben die Bienen das Flugloch nicht mehr gefunden und haben sich stattdessen auf dem
249 Flugbrett-ähnlichen Dach unseres Prototypen gesammelt. Hätten wir unser Produkt ausschließ-
250 lich theoretisch durchgeplant und nicht frühzeitig getestet, wären Fehler, wie dieser erst sehr spät
251 aufgefallen.

252 Wir wussten zu Beginn unserer Arbeiten nicht, wie genau ein mögliches Endprodukt aussehen
253 könnte. Durch das Herstellen von Prototypen konnten wir auch alle unsere Lösungsansätze te-
254 sten. Wir konnten sehr viele vage Ideen schnell umsetzen und immer weiter konkretisieren.

255 Für diese Arbeitsweise war das Arbeiten mit den uns zur Verfügung stehenden 3D-Druckern sehr
256 unersetztbar. Die Kombination aus einem Drucker und Computer-gestütztem Design ermöglichte
257 sehr schnelle Umsetzung von Ideen. Wir nutzten das CAD-Programm „Autodesk Fusion 360“.
258 Dieses ist auch für umfangreichere Projekte geeignet und bietet vielseitige Werkzeuge, wie das Si-
259 mulieren physikalischer Eigenschaften schon vor dem Druck, was den Entwicklungsprozess stark
260 vereinfacht.

261 Schnelles Feedback bekamen wir auch, weil wir direkten Zugriff zu mehreren Bienenvölkern hat-
262 ten. Dadurch konnten wir auch dynamischer auf entstehender Probleme reagieren und schon früh
263 besonders schwer umzusetzende Ansätze identifizieren.

264 5.2 Technische Grundlagen

Bevor wir überhaupt die Möglichkeit hatten, Prototypen zu bauen und zu testen, mussten einige Grundgegeben sichergestellt werden.

Zum einen brauchten wir eine stabile Stromquelle für Langzeittests. Denn bei den uns zur Verfü-
gung stehenden Bienenkästen ist keine Zugang zum Stromnetz möglich. Eine zuverlässige Strom-
versorgung zu gewährleisten ist in unserem Fall eine große Herausforderung und war anfangs lange
Zeit eine Fehlerquelle von einigen Problemen. Denn die bereitzustellende Leistung ist Zeitweise,
immer wenn gerade eine Milbe erkannt wurde, sehr groß. Zu dem ständigen Stromverbrauch des
Einplatinencomputers, der Kameras und der Beleuchtung kommen bei der Entdeckung einer Var-
roamilbe die Last von zwei Servo-Motoren, einem Laser und einer Festplatte zum Aufzeichnen
der Daten. So können unseren Abschätzungen zufolge temporär bis zu 20W benötigt werden. Da
alle gängigen Einplatinencomputer mit einer Eingangsspannung von $U_{Ges} = 5V$ arbeiten, ist der
fließende Strom beträchtlich:

$$P = U_{Ges} \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{P}{U_{Ges}} \approx \frac{20W}{5V} = 4A$$

Bei so einer hohen Stromstärke geht selbst bei kleinem Innenwiderstand der Kabel und Steck-
verbindungen eine hohe Verlustleistung in Form von Wärme verloren. Schon bei einem Innen-
widerstand von lediglich $R_i = 0.1\Omega$ ist dieser Effekt bemerkbar. Unter der Annahme diesen

⁹<https://www.businessinsider.de/gruenderszene/lexikon/begriffe/prototyping/>

Widerstands des Kabels würde dort die Spannung U_i mit

$$R_i = \frac{U_i}{I} \iff U_i = R_i \cdot I \approx 0.1\Omega \cdot 4A = 0.4V$$

abfallen. Das bedeutet auch, dass ein zu niedrige Versorgungsspannung an den Komponenten unseres Aufbaus ankommt und unvorhersehbare Effekte auslöst. Das Jetson Nano, das schließlich von uns gewählte Baord zur Auswertung der Kamerabilder, drosselt beispielsweise die Rechenleistung oder schaltet bei zu niedrigen Eingangsspannungen das Board ganz ab.

Nachdem wir die Spannungsversorgung als Fehlerquelle identifiziert hatten, konnten wir durch Verbesserung aller Löt- und Steckverbindungen das beschriebene Problem beseitigen. Als Energiespeicher brauchten benutzen wir eine alte Autobatterie. Mit einer Spannung von 12V und einer Kapazität von etwa 50 Amperestunden sollte diese bei einem durchschnittlichem Verbrauch von höchstens 15W länger als 40 Stunden halten. Die Batterie wir durch eine 20W Solarzelle aufgeladen. Außerdem wird die 12 Volt Ausgangsspannung der Batterie durch einen Spannungswandler auf die für von Einplatinencomputer benötigten 5 Volt heruntergewandelt. Der gesamte Aufbau der Stromversorgung ist im Anhang auf Seite ??? zu erkennen.

Eine weitere Grundvoraussetzung für leichten und schnellen Zugriff auf den VARROAZERSTÖRER 3000 st es, eine WLAN-Verbindung im Garten herstellen. Besonders für den Entwicklungsprozess ist es wichtig, ohne physische Verbindung auf das Board zugreifen zu können. Auf diese Weise konnten wir per SSH-Verbindung auf den Einplatinencomputer zugreifen. SSH, kurz für „Secure Shell“, ist ein kryptographisches Protokoll durch das Entwickler Zugang zu Kommandozeilen von entfernten Servern oder Computern erhalten [4].

Wir konnten Programme starten, die Ergebnisse einsehen und sogar die Software ändern, während unser Prototyp an einem Bienenstock angebracht war. Dadurch konnten wir unseren Entwicklungsprozess weiter vereinfachen.

5.3 Bau und Verbesserung von Prototypen

287 6 Programmierung der Milbenerkennung

288 6.1 Architektur der Milbenerkennung

289 Die Eingabe für das Programm ist eine Video-Datei. Auf jedem Videoeinzelbild ermittelt das Pro-
290 gramm unter Verwendung eines durch uns trainierten neuronalen Netzes zur Bienenerkennung
291 für jede Biene im Bild eine so genannte *Bounding Box*, das kleinste Rechteck mit horizontalen
292 und vertikalen Seiten, welches die Biene enthält. Mit einem eigenen Algorithmus zur Videoüberfol-
293 gung der Bienen kann das Programm einen zeitlichen Zusammenhang zwischen den analysierten
294 Bildern herstellen. Das heißt, die Bewegung jeder Biene wird verfolgt, sodass das Programm
295 erkennt, dass eine Biene die sich zwischen zwei Bildern bewegt, das selbe Objekt bleibt. In al-
296 len ermittelten Bounding Boxes wird geprüft, ob sie Varroen enthalten. Falls dem so ist, wird
297 die entsprechende Biene als infiziert markiert. Die Biene behält diesen Status in allen weiteren
298 Videoeinzelbildern, was durch die Videoüberfolgung möglich ist. Das führt zu einer Minimierung
299 der Fehler erster Art bei der Milbenerkennung, denn es ist ausreichend, dass die Milbe in ei-
300 nem Einzelbild erkennbar ist, aber die Biene wird in vielen Bildern untersucht, während sie den
301 aufgenommenen Bereich durchquert.

302 6.2 Erstellung eines Modells zur Bienenerkennung

303 Für das Training des neuronalen Netzes zur Bienenerkennung haben wir eigene Trainingsda-
304 ten erstellt, da es keine öffentlichen Daten zu diesem Problem im Internet gibt, die unseren
305 Anforderungen entsprechen. Dafür haben wir durch ein selbst geschriebenes Python-Skript *ex-
306 tract_images.py* aus 40 Sekunden Videomaterial jedes zehnte Videoeinzelbild gespeichert. Mit
307 diesen 120 Bildern haben wir auf *roboflow.com* einen eigenen Datensatz kuratiert, indem wir in
308 jedem Bild manuell die Bounding Boxes aller Bienen eingezeichnet haben. Wegen unserer Me-
309 thoden des Versuchs und Irrtums und des Literaturstudiums konnten wir dafür eigene Regeln
310 definieren. Deshalb haben wir einen hochwertigen Datensatz erstellt, was eine notwendige Be-
311 dingung war, um die Zahl der Fehler bei der Bienenerkennung zu minimieren. Bounding Boxes
312 sollen

- 313 • so klein wie möglich sein,
- 314 • aber den gesamten Kopf, Rumpf und Hinterteil der Biene enthalten,
- 315 • aber nicht die Flügel und Beine der Biene enthalten,
- 316 • und verdeckte Körperteile der Biene enthalten, als wären sie sichtbar,
- 317 • und auch für Bienen am Bildrand gezeichnet werden.

318 Abbildung 4 wurde unter diesen Regeln annotiert, wobei einige Bounding Boxes, die beispielhaft
319 für den entsprechenden Stichpunkt sind, gefärbt sind.



Abbildung 4: Regelkonform annotiertes Bild

320 Nach der Annotierung aller Bilder haben wir außerdem zum Datensatz die horizontale
321 Spiegelung jeden Bildes hinzugefügt. Durch diese so genannte *Augmentation* konnten wir mit

322 geringem Aufwand die Größe des Datensatzes verdoppeln.
323 Wichtig ist für die Bienenerkennung eine Minimierung der Fehler auf fast null sowie eine sehr
324 geringe Laufzeit, denn in jedem Videoeinzelbild werden alle Pixel untersucht. Deswegen haben
325 wir als Modell zur Objekterkennung das neuronale Netz YOLOv4-tiny gewählt. Wir haben
326 uns für die YOLO-Implementierung in Darknet, einem Open-Source-Framework für neuronale
327 Netze, entschieden. Es handelt sich dabei um eine verkleinerte Variante des neuronalen Netzes
328 YOLOv4. Das ist ein neuronales Netz zur Objekterkennung, welches im Vergleich zu anderen
329 Modellen eine sehr hohe Leistungsfähigkeit, also geringe Fehlerzahl aufweist. Seine Besonderheit
330 besteht darin, dass es die Bounding Boxes und die entsprechenden *Scores*, das ist bei uns
331 die Wahrscheinlichkeit, dass in der Box eine Biene ist, in einem Schritt anstatt nacheinander
332 erstellt. Deswegen ist YOLOv4 ein *one-stage detector* und es erhält auch daher seinen Namen
333 „You Only Look Once - version 4“.
334 YOLOv4-tiny verfügt über nur 29 *convolutional layers* statt 53 und zwei *YOLO layers* statt
335 3 im YOLOv4 Netzwerk. Daher erreicht es eine extrem geringe Laufzeit bei Erhaltung der
336 Leistungsfähigkeit. Außerdem verringert das die Trainingszeit um den gleichen Faktor. Daher
337 war es uns möglich, das Modell auf Google-Colab, einem Cloud-Dienst, der für maximal zwölf
338 Stunden kostenlos leistungsstarke GPU zur Verfügung stellt, vollständig trainieren.
339

340 **6.3 Implementierung der Videoverfolgung von Bienen**

341 Für jede *Bounding Box* von Bienen auf einem Videoeinzelbild wird ein dazugehöriges *Bee*-Objekt,
342 das in *bee.py* definiert ist, erstellt. Dann wird nacheinander zu jedem *Bee*-Objekt b_0 das *Bee*-
343 Objekt b_1 aus dem letzten Videoeinzelbild ermittelt, sodass der Abstand d der Mittelpunkte von
344 b_0 und b_1 am kleinsten ist. Wenn d eine Grenze *bee_dist_thresh*, die in *settings.py* definiert ist
345 unterschreitet, dann nehmen wir an, dass b_0 die gleiche Biene wie b_1 ist. Deshalb erbt b_0 alle
346 Eigenschaften von b_1 durch den Aufruf von $b_0.track(b_1)$, insbesondere ob sie infiziert ist. Außer-
347 dem löschen wir b_1 aus der Liste der Bienen aus dem letzten Videoeinzelbild, um Verdopplungen
348 von Bienen zu verhindern. Wenn d groß ist, dann ist b_0 zu keiner Biene aus dem vorherigen Vi-
349 deoeinzelbild nah. Das heißt, b_0 ist neu in das Bild gekommen oder hat sich sehr schnell bewegt.
350 Der zweite Fall führt zu einem geringem Fehler, den wir nicht beheben, da die höhere Laufzeit,
351 die eine komplexere Videoverfolgung benötigen würde, nicht dem geringen Ausmaß des gelösten
352 Fehlers entspricht.

353 **6.4 Erstellung eines Modells zur Varroaerkennung**

354 **6.5 Optimierung der Laufzeit**

355 Die Laufzeitoptimierung ist bei uns von hoher Relevanz, da das Programm in Echtzeit laufen soll.
356 Technologisch befinden wir uns gerade in der Übergangsphase, sodass Echtzeit-Videoanalysen auf
357 kleinen Geräten schwer umsetzbar sind.
358 Wir haben alle rechenaufwändigen Operationen auf das Python-Modul für Computersicht *cv2*
359 (Computer Vision 2) ausgelagert. Diese behandelt Bilddateien als *numpy-arrays*. Da *numpy* in
360 C++ implementiert ist, wird das Programm durch diese Auslagerung 5 bis 100 mal schneller.
361 Für die optimale Ausnutzung dessen, haben wir an einen 14-stündigen *cv2*-Kurs auf [udemy.com](https://www.udemy.com)
362 teilgenommen^[5]. Um die Laufzeit weiter zu verringern, mussten wir zunächst messen, welche
363 Operationen für welchen Anteil der Laufzeit verursachen. Dafür haben wir eine eigene, nutzer-
364 freundliche *Timer*-Klasse in *Timer.py* implementiert und verwendet. Damit haben wir schritt-
365 weise mit unserer Methode Versuch und Irrtum die Laufzeit weiter verringern können.
366 Zu Anfang unserer Arbeit haben wir geplant, nur jedes n -te Videoeinzelbild auf Bienen zu un-
367tersuchen und nur jeden Frame auf Varroamilben zu testen. Aus unserem Literaturstudium ist
368 allerdings hervorgegangen, dass alle modernen Videoformate zur Datenkompression die Ände-
369 rungen zwischen aufeinanderfolgenden Videoeinzelbildern anstatt ganzer Bilder speichern. Für

370 unser Programm bedeutet das, dass man deutlich schneller das nächste Videoeinzelbild berechnen kann als zu einem Videoeinzelbild an einer bestimmten Stelle des Videos zu springen.
 371 Deshalb haben wir mit unserer *Timer*-Klasse einen eigenen Testaufbau erstellt, mit dem wir
 372 verschiedene Laufzeiten berechnen konnten.
 373 Wir haben ermittelt, wie sich die Laufzeit t_{iter} pro untersuchtem Videoeinzelbild und die Laufzeit
 374 t_{real} pro Videoeinzelbild des Videos, in Abhängigkeit von n ändern. Das haben wir für die Me-
 375 thode $M1$, bei der man sofort zum $n - 1$ -nächsten Videoeinzelbild springt und dann das nächste
 376 Videoeinzelbild einliest und analysiert und die Methode $M2$, bei der man mehrfach das nächste
 377 Videoeinzelbild aufruft und bei jedem n -ten Aufruf das Bild einliest und analysiert, getestet.
 378 Dafür haben wir auf dem gleichen Gerät folgende Werte ermittelt
 379

	Name	Wert	Definition
380	t_j	44,7ms	Zeit zum Springen zu einem Videoeinzelbild
	t_s	5,4ms	Zeit zum Springen zum nächsten Videoeinzelbild
	t_a	29,2ms	Zeit zum Einlesen und Analysieren des nächsten Videoeinzelbilds

381 Es gilt

n	$t_{iter,M1}(n)$	$t_{real,M1}(n)$	$t_{iter,M2}(n)$	$t_{real,M2}(n)$
1	$t_a + t_j$	$t_a + t_j$	t_a	t_a
2	$t_a + t_j$	$\frac{t_a + t_j}{2}$	$t_a + t_s$	$\frac{t_a + t_s}{2}$
3	$t_a + t_j$	$\frac{t_a + t_j}{3}$	$t_a + 2t_s$	$\frac{t_a + 2t_s}{3}$
:	:	:	:	:
x	$t_a + t_j$	$\frac{t_a + t_j}{x}$	$t_a + (x - 1)t_s$	$\frac{t_a + (x - 1)t_s}{x}$

383 Damit können wir Graphen für die Laufzeiten der Algorithmen erstellen.

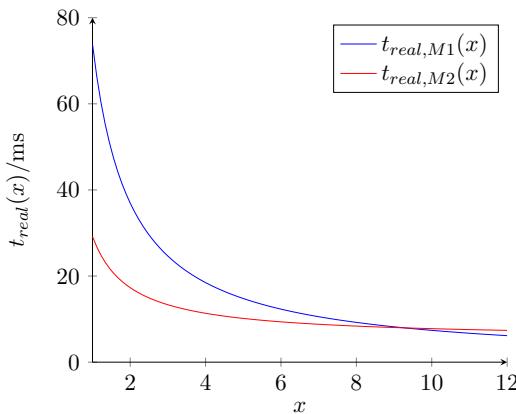


Abbildung 5: $M1 - M2$ -Vergleich

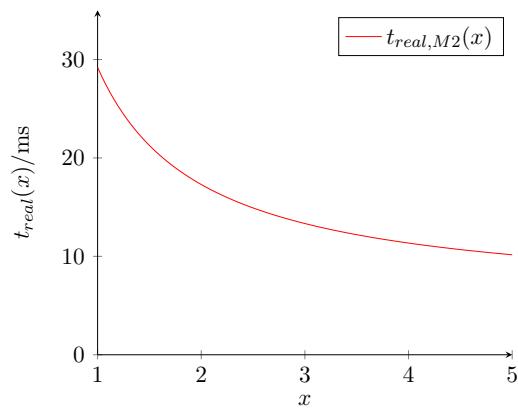


Abbildung 6: $M2$ -Bewertung

384 $n > 5$ würde allerdings zu einer zu geringen Auflösung führen, um die Erkennung
 385 aller Milben zu gewährleisten, haben wir uns dazu entschieden unsere Methode von $M1$ auf $M2$
 386 abzuändern, da diese auf dem Intervall $n \in [1, 5]$ zu einer deutlich geringeren Laufzeit führt.
 387 Der Graph zeigt auch, dass ab $n = 3$ eine weitere Erhöhung von n zu keiner starken Sen-
 388 kung der Laufzeit führt, weshalb wir ein n aus 1, 2, 3 empfehlen. Es kann vom Nutzer je nach
 389 Geschwindigkeits- sowie Leistungsanforderung angepasst werden.

³⁹⁰ **7 Umsetzung der Milbenbekämpfung**

³⁹¹ **7.1 Ideen zum Aufbau**

³⁹² **7.2 Erste Tests mit Lasern**

³⁹³ **7.3 Darstellung der Ergebnisse auf einer Website**

³⁹⁴ 8 Fortsetzungsmöglichkeiten

³⁹⁵ **9 Zusammenfassung**

396 10 Anhang

397 10.1 Zu Kapitel 4

Daniel Cermann

Abwägungen zu bewegbaren Kameras

Daniel Cermann
9. Oktober 2021

Inhaltsverzeichnis	
1 Überblick	1
2 Vor- und Nachteile	2
3 Geschwindigkeit	2
3.1 Drehen der Kamera	2
3.2 Zoom und Fokus	3
3.3 Software	3
3.4 Camera-Framerate	3
4 Finanzielles	4
5 Raspberry Pi vs. Jetson Nano	4
6 Ein Computer vs. Cluster	4
7 Bilder	5

1 Überblick

Idee:

- Kameras können doch beweglich sein, aber anstatt linearer Bewegung auf Schienen: Kameras sind seitlich oben und können gedreht werden
- Seien Bezeichnungen der beweglichen Kameras *SideCams* und die obere, zentrale Kamera heißt *MainCam*
- SideCams* ersetzen *MainCam* nicht, sondern ergänzen sie nur
- Aufgaben der *MainCam* bzw. des Programms dazu

1

3.2 Zoom und Fokus

Daniel Cermann

Lösungsansätze:

- Auswahl der zu scannenden Bienen durch Algorithmus so, dass der Weg der Kamera optimiert ist
- Geschwindigkeit der Stepper-Motoren laut Datenblättern bis zu $60^{\circ}/0.25s \Rightarrow$ sollte für uns reichen, weil Winkel von ganz links, nach ganz recht auf dem Flugbett ca. 60° beträgt. ABER: Was ist mit Bre- und Entschernung?

Geschätztes Maximum für gescannte Bienen pro Sekunde: 10 (mit Optimierung der Biennenauswahl)

3.2 Zoom und Fokus

Problem:

- Zoom kann konstant bleiben, aber Fokus muss dauerhaft angepasst werden
- Ist das Fokussystem von Raspberry-Kameras schnell genug?

Lösungsansätze:

- Geschwindigkeit sehr schwer abzuschätzen :)
- Wir müssen jegliche Autofokus-Algorithmen abhalten \Rightarrow Wir können Abstand der Kameras zu Biene berechnen, wenn wir die Position der Biene auf Flugbett wissen und dann den Fokus direkt Einstellen
- maximaler Unterchied der Strecke von Kamera zu Biene in unserem Prototyp: $14.6cm \Rightarrow$ für Zoom kein riesiger Unterschied
- zusätzlich wieder Optimierung der Reihenfolge, in der Bienen gescannt werden

Geschätztes Maximum für gescannte Bienen pro Sekunde: I don't know, aber mit Optimierung bestimmt bis zu 5+

3.3 Software

Die Laufzeit des Programms könnte kritisch werden. Im Notfall müssen wir mehrere Raspis oder Jetson Nano nehmen. Wir erübrigen das mit Rechenleistung :)

3.4 Camera-Framerate

übliche Rasp. Kameras können ihre 12MP nur bei 7 fps ausnutzen
 \Rightarrow kein Problem, selbst wenn, kann einfach die Auflösung etwas nach unten gestellt werden; ist für die Software bestimmt sowieso nötig

2

Daniel Cermann

• alle Bienen auf Bild erkennen und tracken

• jeder Biene Wahrscheinlichkeit für Varroamöde zuordnen (nur basierend auf Drauficht)

• entscheiden, welche Biene von *SideCams* näher untersucht werden

• Funktionen *SideCams*

- bei Bielen, wo *MainCam* unischer ist nachprüfen
- testen, ob Bienen an Seite der Biene sitzen (hoffentlich sind seitlich sitzende Milben auf Bildern der *MainCam* etwas kleinere weiße Flecken zu erkennen, was zu höherer Varroa-Wahrscheinlichkeit und demnach Nachprüfen durch *SideCams* führt)

2 Vor- und Nachteile

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> seitliche Sicht auf Biene näherer Zoom an Biene möglich \Rightarrow Bildqualität viel besser und wie Experimente gezeigt haben, Kontrast von Varros zu Biene besser 	<ul style="list-style-type: none"> Preis der zusätzlichen Kameras mehr Rechenleistung zu Bildauswertung und zum Kontrollieren der Kameras benötigt ext. lang ext. sehr langsam (siehe 3.)

\Rightarrow Wir sollten zusammen entscheiden, ob die bessere Bildqualität und die zusätzlichen Kamerawinkel wirklich so viel Aufwand wert sind.

3

3 Geschwindigkeit

Ideal wäre es, wenn wir durch die *SideCams* bis zu 10 Bienen je Sekunde scannen können. Die folgenden Abschnitte erläutern einige der limitierenden Faktoren ab.

3.1 Drehen der Kamera

Problem:

- Servo-Motoren sind evtl. zu langsam und sind nicht für ständige, schnelle Bew- und Entschleunigungen gedacht
- schnelles Abbremsen könnte zu verwackelten Bildern führen

4

4 Finanzielles

Wir haben zwei Möglichkeiten: ein fertiges Kit von Arducam zu bestellen oder wir bauen den Drehmechanismus für die Kamera selbst. Die zusätzlichen Kosten, nur für die *SideCams*, wären mindestens:

Artikel	Preis
2 x komplettes Kit; 13MP Kamera	2 x 100 \$

oder wir nutzen nur die kleinen 8MP Kameras mit Objektiv. Dabei müssten wir uns aber noch irgendetwas für den Fokus einkaufßen lassen.

Artikel	Preis
2 x Kit für Bewegung der Kameras; 8MP Kamera	2 x 25 \$

5 Raspberry Pi vs. Jetson Nano

Dazu muss ich mich noch besser befreien... Aber generell ist das Jetson Nano besser für Bildverarbeitung geeignet.

6 Ein Computer vs. Cluster

Grundlegende Idee: Das Einplatinenboard mit *MainCamera* ist 'Master' und sendet *SideCams* Anweisungen, welche Biene wann gescannt wird. Die Verbindungen könnten durch LAN-Kabel (bei mehr als zwei Boards mit Switch/HUB) oder durch einen Wireless Access Point passieren.
Mit mehreren Boards müssten wir uns auch keine Gedanken mehr um zusätzliche Kamerakabel-Anschlüsse (an jedes RaspBerry, Jetson Nano kann nur eine Kamera) machen.

5

Abbildung 7: Unsere Abwägungen zu bewegbaren Kameras

398 10.2 Zu Kapitel 6



Abbildung 8: Regelkonform annotiertes Bild

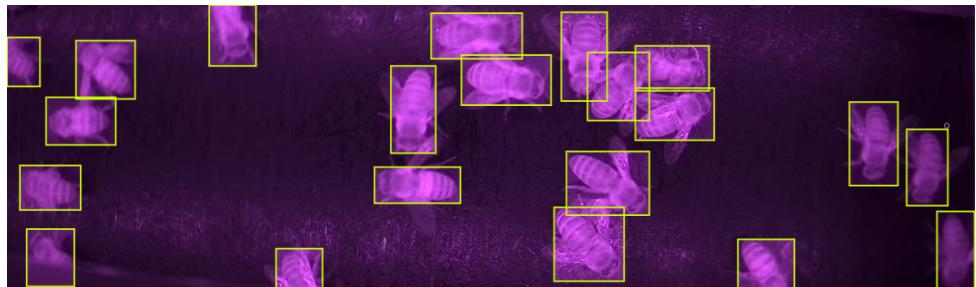


Abbildung 9: Regelkonform annotiertes Bild



Abbildung 10: Regelkonform annotiertes Bild

399 11 Literatur- und Quellenverzeichnis

400 Literatur

401 11.1 Gedruckte Literatur

402 11.2 Internetliteratur

- 403 [1] AUTOR UNBEKANNT; *Die Varroamilbe: Der gefährlichste Feind der Biene*
404 <https://www.br.de/wissen/bienen-varroamilbe-bienensterben-lithiumchlorid-100.html>
405 letzter Zugriff: 11.10.2021
- 406
- 407 [2] AUTOR UNBEKANNT; *Warum sind Bienen so wichtig?*
408 <https://www.bee-careful.com/de/initiative/warum-sind-bienen-so-wichtig/>
409 letzter Zugriff: 11.10.2021
- 410 [3] HARALD ESCH; *Über die Körpertemperaturen und den Wärmehaushalt von Apis mellifera*
411 <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00298066>
412 letzter Zugriff: 15.12.2021

⁴¹³ [4] TATU YLONEN; *SSH (Secure Shell) Home Page*

⁴¹⁴ <https://www.ssh.com/academy/ssh>

⁴¹⁵ letzter Zugriff: 17.12.2021

⁴¹⁶ [5] PORTILLA, JOSE; *Python for Computer Vision with OpenCV and Deep Learning*

⁴¹⁷ <https://www.udemy.com/course/python-for-computer-vision-with-opencv-and-deep-learning/>

⁴¹⁸ letzter Zugriff: 23.04.2021