

# **Sensorsystem zur Erfassung und Einschätzung von Einflüssen auf die Gesundheit, Bestäubungsleistung und Vitalität von Bienenvölkern**

**Abschlussbericht**

**Entwicklungsprojekt gefördert unter dem Az: 31643 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

**Projektbeginn: 01.10.2015  
Projektlaufzeit: 48 Monate**

**von**

**Dipl.-Ing. Ralf Rosenquist**

**Dezember 2019**

**Bezugsmöglichkeit:**

GERO Meßsysteme GmbH

Christoph-Ding-Str. 16

38112 Braunschweig

Deutschland

## Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung.....	6
2 Einleitung.....	7
3 Testaufbau Laborsystem.....	9
3.1 Die optische Sensoreinheit.....	9
3.2 Die kapazitive Sensoreinheit.....	11
3.2.1 Ringförmige Elektroden.....	12
3.2.2 Plattenförmige Elektroden.....	12
3.2.3 Auswertungselektronik der kapazitiven Sensorik.....	13
3.3 PC Anbindung und Steuerung.....	14
3.3.1 Ergebnisse optisches Verfahren.....	14
3.3.2 Ergebnisse kapazitives Verfahren.....	17
3.3.3 Vergleich der optischen und der kapazitiven Sensoreinheit.....	18
4 Geräte für die Feldversuche.....	20
4.1 Mechanik.....	20
4.2 Optische und kapazitive Sensoreinheit für den Feldeinsatz.....	22
4.2.1 Optische Sensoreinheit.....	22
4.2.2 Kapazitive Sensoreinheit.....	23
4.3 Steuerungsrechner.....	25
4.3.1 Betriebssystem und Firmware.....	26
4.3.2 PC-Software DLBA5-i.....	28
4.3.3 Rohdatenerfassung zur Verbesserung des Auswertungsalgorithmus.....	30
4.4 PC-Auswertungssoftware.....	30
5 Feldversuche.....	33
5.1 Versuchsreihe 1: Vergleich der optischen und kapazitiven Sensoreinheit.....	33
5.2 Versuchsreihe 2: Messbereichsnachführung.....	34
5.3 Versuchsreihe 3: Versuche mit verbesserten kapazitiven Sensoreinheiten.....	34
5.4 Versuchsreihe 4: Versuche mit erhöhter Abtastrate.....	36
5.5 Versuchsreihe 5: Aufzeichnung erster Aktivitätskurven.....	37
5.6 Versuchsreihe 6: Versuche mit unterschiedlichen Durchlassbreiten.....	38
5.7 Versuchsreihe 7: Arbeiten im Rahmen der Projektverlängerung.....	39
5.7.1 PC Simulation.....	39
5.8 Ergebnis der Feldversuche.....	40
5.9 Wetterbedingte Beeinträchtigungen der Versuche.....	41

5.10 Funktionsbeschreibung des Auswertungsalgorithmus.....	42
5.11 Verifikation mit Videoaufzeichnungen.....	45
6 Ergebnisse.....	47
6.1 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung.....	49
6.2 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	49
7 Fazit.....	50
8 Anhänge.....	52
8.1 Zeichnungen.....	52
8.2 Bilder Feldversuche.....	57

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Idealisierter Signalverlauf optische Sensoren – Ausflug.....	9
Abbildung 2: Idealisierter Signalverlauf optische Sensoren - Einflug.....	10
Abbildung 3: Idealisierter Signalverlauf kapazitiver Sensor.....	11
Abbildung 4: Ringelektroden.....	12
Abbildung 5: Optische Sensoreinheit nach 2-wöchiger Einsatzdauer A.....	16
Abbildung 6: Optische Sensoreinheit nach 2-wöchiger Einsatzdauer B.....	16
Abbildung 7: Idealisierter Signalverlauf mit 3 kapazitiven Messzellen.....	17
Abbildung 8: 3D Darstellung des montierten Systems.....	20
Abbildung 9: Schublade mit Sensoreinheit.....	21
Abbildung 10: Blockschaltbild der optischen Sensoreinheit.....	23
Abbildung 11: Kapazitive Sensoreinheit mit 3 bzw. 7 Sensoren.....	24
Abbildung 12: Blockschaltbild der kapazitiven Sensoreinheit.....	25
Abbildung 13: Bediensoftware DLBA5-i.....	29
Abbildung 14: Auswertungssoftware BeeConvert 1.7.9.....	32
Abbildung 15: Auswertungssoftware BeeConvert 1.9.5.....	32
Abbildung 16: Rohdaten kapazitive Sensoren.....	35
Abbildung 17: Aktivitätskurve.....	38
Abbildung 18: Gesamtansicht im montierten Zustand.....	53
Abbildung 19: Aufbau Schubfach.....	54
Abbildung 20: Aufbau Schublade.....	55
Abbildung 21: Details zu Schublade mit Sensorik.....	56
Abbildung 22: Gerät im Feldversuch.....	57
Abbildung 23: Flugloch mit Sensoreinheit.....	57
Abbildung 24: Videodokumentation parallel zur Messung.....	58
Abbildung 25: Auswertung Videoaufzeichnung 1. Minute.....	59
Abbildung 26: Auswertung Videoaufzeichnung 2. Minute.....	60
Abbildung 27: Auswertung Videoaufzeichnung 3. Minute.....	61

# 1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes sollte ein Sensorsystem zur präzisen Erfassung der Flugbienen in einem Bienenstock entwickelt werden. Dazu musste neben der elektronischen Messeinrichtung auch eine Software entwickelt werden, die die gewonnenen Messdaten analysiert, die Bewegungsrichtung und auch Größe der Bienen erkennt und die jeweilige Anzahl dokumentiert. Die gesamte Messeinrichtung sollte in einem witterungsbeständigen Gehäuse untergebracht werden, um damit bei Freilandversuchen die Praxistauglichkeit und Belastbarkeit der Messwerte nachzuweisen. Diese Versuche wurden von unserem Kooperationspartner durchgeführt:

Institut für Bienenschutz - Julius Kühn-Institut (JKI)  
Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen in Braunschweig  
Ansprechpartner: Dr. Jens Pistorius

Ein langer, krankheitsbedingter Ausfall eines wichtigen Mitarbeiters und die zeitweise sehr ungünstigen Wetterbedingungen konnten durch zwei Laufzeitverlängerungen kompensiert werden.

Es ist gelungen eine Messeinrichtung zu erstellen, die auch den mechanischen Anforderungen im Feldeinsatz gerecht wird. Von den beiden getesteten Messprinzipien hat sich die optische Erfassung mittels Lichtschranken als nicht praxistauglich herausgestellt. Die Erfassung der Bienen mittels kapazitiver Sensoren hat die ursprünglichen Erwartungen übertroffen.

Die mechanischen Komponenten, sowie die Hardware der Messtechnik, der entwickelten Systeme haben bereits einen weitgehend ausgereiften Status. Die Software für die automatische Erkennung und Registrierung der Bienen konnte ausreichend getestet und optimiert werden. Dadurch weichen die messtechnischen Ergebnisse nur noch wenig von mittels Videoaufzeichnung und manueller Auszählung gewonnen Werten ab.

Bei den durchgeführten Freilandversuchen haben sich Verbesserungsmöglichkeiten betreffend der mechanischen Handhabbarkeit und der Bediensoftware ergeben. Diese sollten bei der Weiterentwicklung der Geräte zu einem serienreifen Produkt berücksichtigt werden.

## 2 Einleitung

Für die Erfassung der Bienenbrut und der Nahrungsvorräte im Volk sind Populationsschätzungen möglich und relativ gut etabliert. Sie sind aber mit einer Störung der Völker verbunden und nicht ausreichend genau. Ziel ist eine Erfassung aller ein- und ausfliegenden Bienen, sowie eine Differenzierung in Arbeiterinnen und Drohnen. Erstmals sollen damit verschiedenartige Einflüsse auf Honigbienenvölker qualitativ und quantitativ, präzise und über längere Zeiträume erfasst werden.

Bis heute gibt es keine verlässliche Möglichkeit zur präzisen Erfassung der Flugbienen. Die bisherigen Methoden sind sehr aufwändig, unpräzise oder nur unter besonderen Versuchsbedingungen einsetzbar.

Im Rahmen des Projektes war die Zielsetzung, eine zuverlässige und einfach zu handhabende Zähleinrichtung für Bienenstöcke zu erstellen. Die elektronische Erfassung sollte dabei durch eine Kombination aus optischen Sensoren zur Ermittlung der Bewegungsrichtung und kapazitiven Sensoren zur Bestimmung der Größe erfolgen.

Folgende Vorgehensweise war geplant:

1. Für die Entwicklung der Lichtschranken und des kapazitiven Messsystems sollen zunächst Prototypen mit individuellen Messeinheiten aufgebaut werden.
2. Um eine geschlechtliche Differenzierung zu ermöglichen, müssen hochauflösende kapazitiven Messzellen entwickelt, hergestellt und kalibriert werden.
3. Im nächsten Schritt soll ein Praxistest an den Fluglöchern für erste Zählungen und Differenzierung der ein- und ausfliegenden Bienen erfolgen.
4. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse soll dann ein Komplettsystem mit ca. 20 Messkanälen für alle das Flugloch passierenden Bienen erstellt werden.
5. Eine Anpassung der Messtechnik an die Behausung eines Bienenvolks (Beute) ist zwingend notwendig. Alle erforderlichen Gerätschaften sollen darin zum Schutz vor Diebstahl und Vandalismus unauffällig eingebaut sein.
6. Fortlaufend über die gesamte Projektlaufzeit werden die Geräte unter praktischen Bedingungen geprüft. Für die Tests werden durch das JKI sowohl Halbfreiland- als auch Freilandversuche durchgeführt. Dabei werden kleine Kunstschwärme, wie sie

in der Nachzucht üblich sind, sowie die in der Honiggewinnung üblichen Wirtschaftsvölker eingesetzt.

7. Es ist zu erwarten, dass während der Alltagspraxis weitere Verbesserungen, z.B. gegen die Verschmutzung der Geräte durch die Bienen selbst, erforderlich sind. Die angedachte Konstruktion soll deshalb fortlaufend angepasst werden.
8. Zur Optimierung für den Dauereinsatz ist der Betrieb der Geräte auch über die Wintermonate des ersten Projektjahres geplant. Im Winter des 2. Projektjahres soll die Dauertauglichkeit etabliert sein.
9. Versuchsbegleitend soll eine geeignete Methode zur Bearbeitung und Beurteilung der sehr großen Datenmenge entwickelt werden. Bei einem Wirtschaftsvolk können, je nach Tracht, ca. 10-20.000 Bienen bis zu 20 mal pro Tag ausfliegen. Die Anzahl der zu erwartenden Datensätze ist bei Flugaktivität entsprechend hoch.



### 3 Testaufbau Laborsystem

Die ersten Testreihen im Labor wurden mit einer Sensoreinheit bestehend aus optischer und kapazitiver Erfassung durchgeführt. Dazu wurden einzelne und Paare von Bienen mit bis zu 4 optischen und einem kapazitiven Sensor beobachtet. Die Bienen bewegten sich dabei in einem sehr dünnwandigen und optisch durchlässigen Rohr. Der Durchmesser des Rohres, wie auch die Form des Querschnittes, wurde variiert.

#### 3.1 Die optische Sensoreinheit

Die optische Sensoreinheit besteht aus mehreren hintereinanderliegenden Infrarotlichtschranken. Wenn eine Biene diese durchläuft, zeigen die Lichtschranken in Abfolge eine Änderung ihres Status an. Die Reihenfolge der Wechsel ist dabei abhängig von der Bewegungsrichtung.

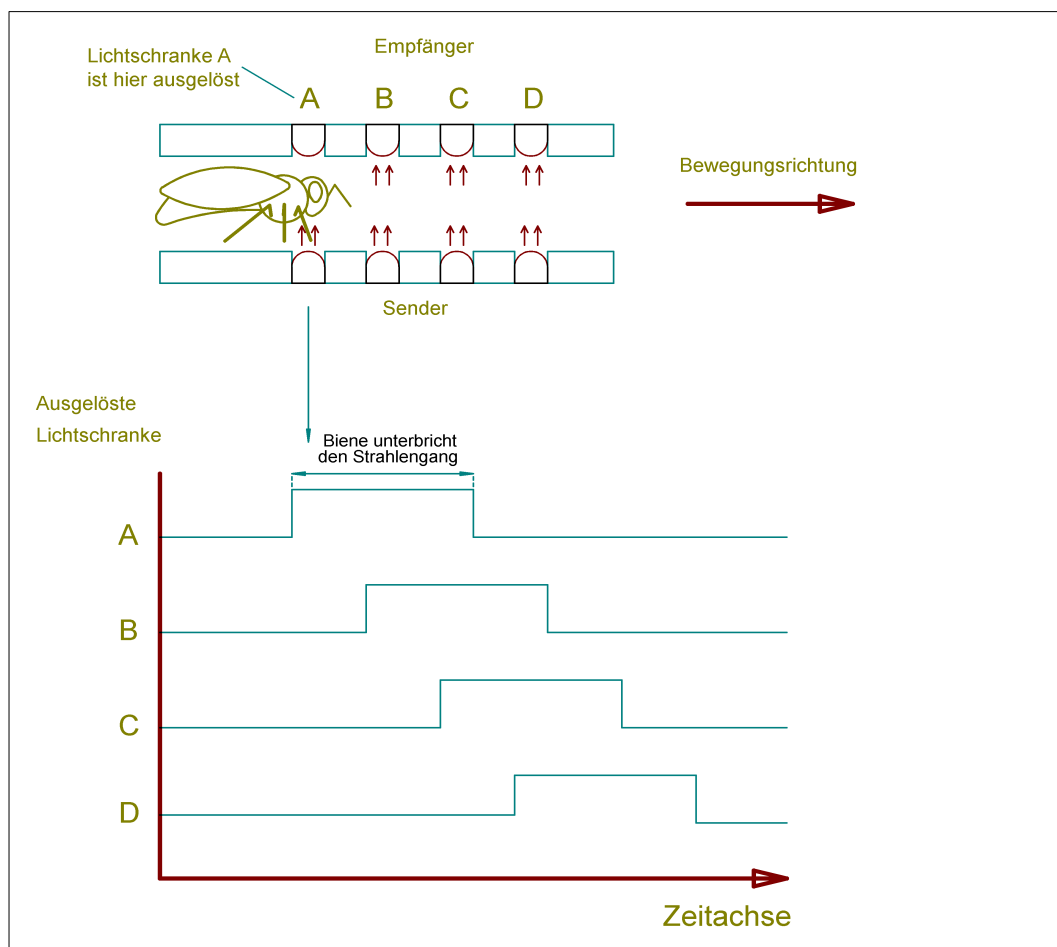


Abbildung 1: Idealisierter Signalverlauf optische Sensoren – Ausflug

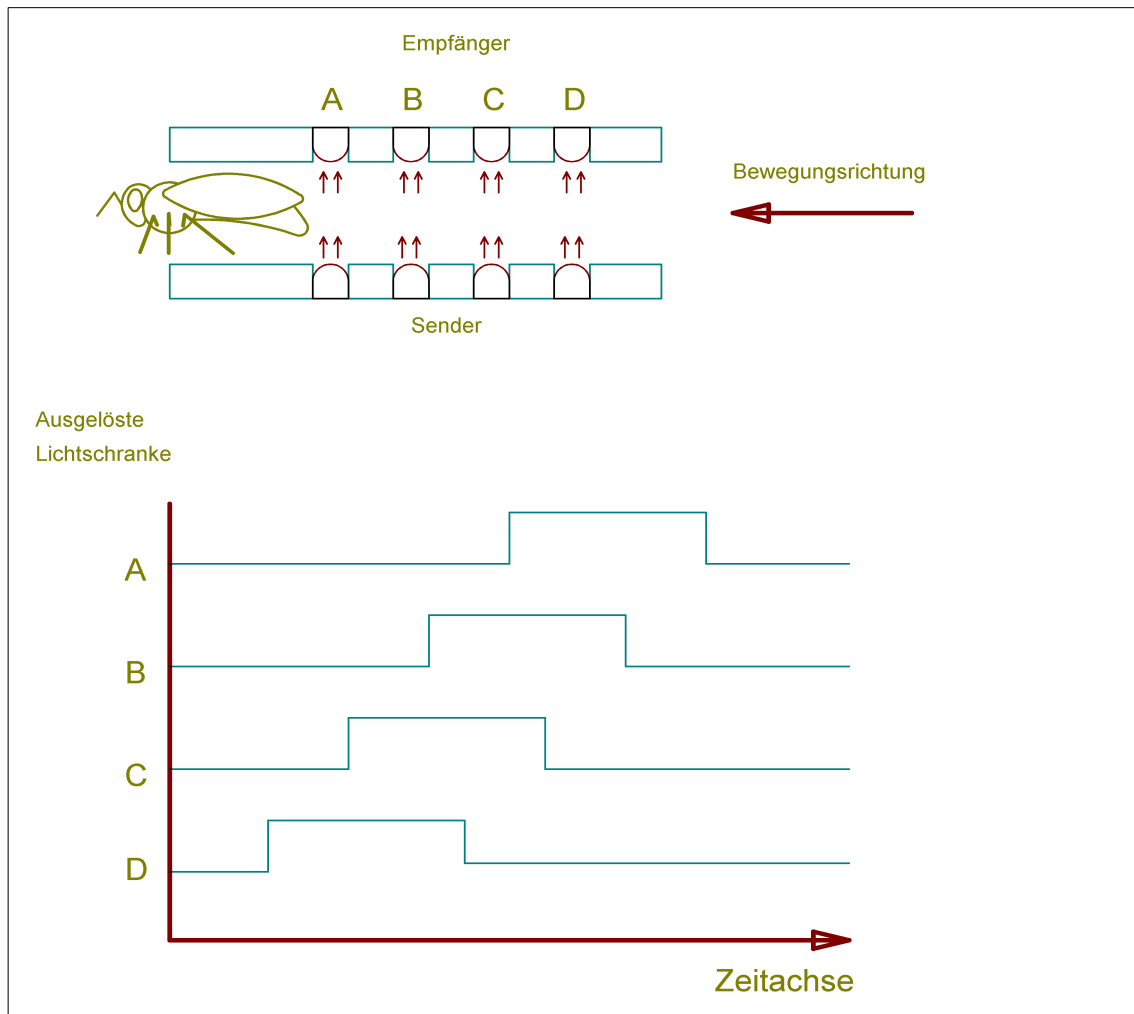


Abbildung 2: Idealisierter Signalverlauf optische Sensoren - Einflug

Beim Betrieb der zahlreichen Infrarotsender musste das Problem des begrenzten Energievorrates der Batterie berücksichtigt werden. Der Stromverbrauch konnte durch die Auswahl von Empfängern mit besonders hoher Reaktionsgeschwindigkeit und einer schnellen Taktung der Sender reduziert werden. Jede einzelne Lichtschranke wird nur für 1 Mikrosekunde eingeschaltet, um den jeweiligen Status abzufragen.

Durch eine sequentielle Ansteuerung der Sender und damit synchronisierter Abfrage der Empfänger konnte die gegenseitige Beeinflussung der Lichtschranken vollständig ausgeschlossen werden. Durch die Verwendung von Sendern und Empfängern, die jeweils über eigene Linsen zur effektiven Bündelung verfügen, konnte auf weitere optische Komponenten, abgesehen von einem transparenten Schutz vor Verschmutzung, verzichtet werden.

### 3.2 Die kapazitive Sensoreinheit

Grundlage für die kapazitive Erfassung ist die starke Veränderung der Kapazität eines Kondensators, wenn ein als Dielektrikum wirkender Stoff zwischen die Platten gebracht wird. Weil Wasser eine sehr hohe Dielektrizitätskonstante aufweist, haben Wasser enthaltende organische Körper, die zwischen die Platten eines Kondensators gebracht werden, eine zum Wassergehalt annähernd proportionale Vergrößerung der messbaren Kapazitätswerte zur Folge.

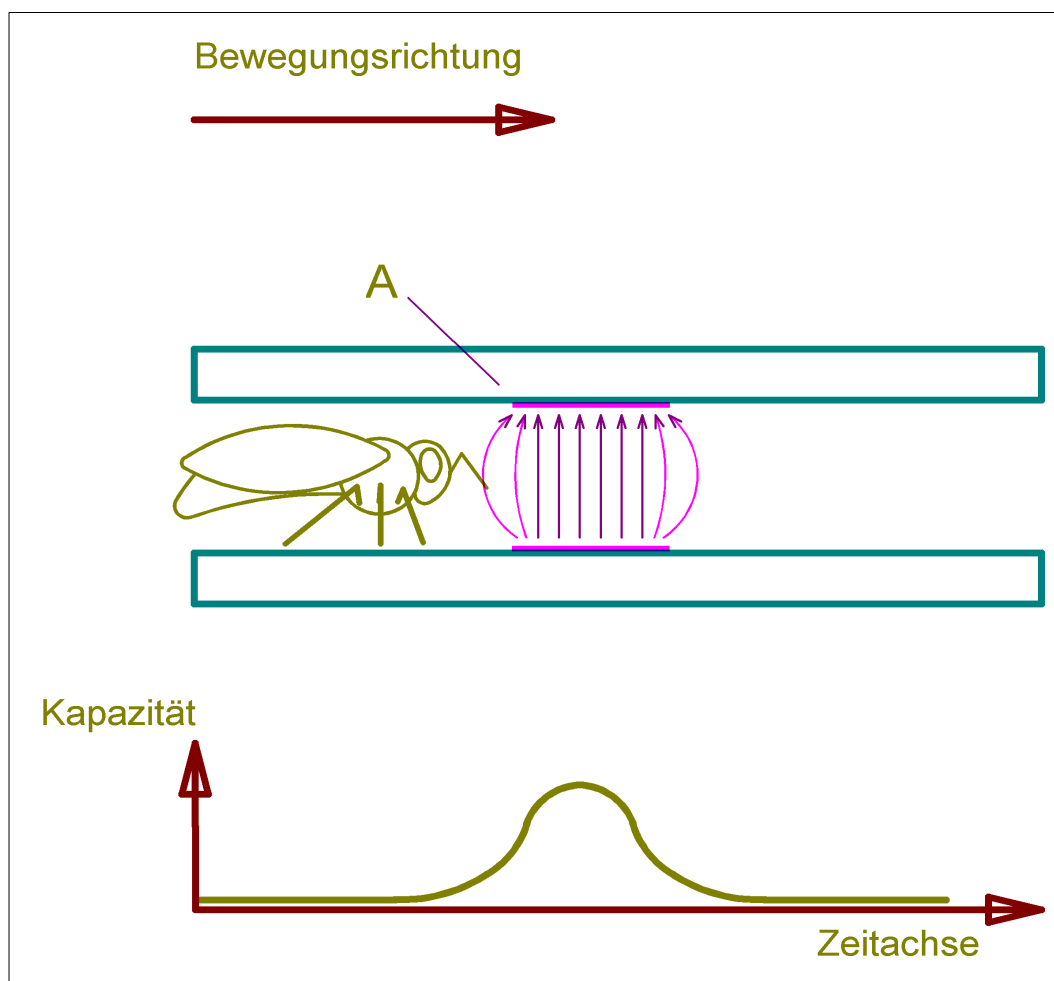


Abbildung 3: Idealisierter Signalverlauf kapazitiver Sensor

Um die Bienen mittels eines kapazitiven Sensors zu erfassen, müssen die "Platten" eines Kondensators, zwischen denen sich die Bienen hindurch bewegen, in geeigneter Weise aufgebaut werden. Die dabei auftretenden Änderungen sind absolut gesehen und auch relativ zur Grundkapazität sehr klein.

### 3.2.1 Ringförmige Elektroden

In ersten Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass sowohl ringförmige wie auch plattenförmige Kondensatoren eine gut messbare Veränderung der Kapazität bei Annäherung einer Biene zeigten. Weil sich mit einer ringförmigen Anordnung theoretisch ein größeres Messsignal erzielen lässt, wurde diese Anordnung zuerst getestet. Es wurden dafür Elektroden angefertigt, die von Ihrem Aussehen an einen Tennisschläger erinnert. Der ringförmige Teil wurde komplett durchbohrt, um die Bienen in einem dünnwandigen Rohr hindurchleiten zu können. Zwei dieser Ringe bilden zusammen die Platten eines Kondensators. Der stielartige Teil dient als elektrischer Anschluss und zur Befestigung.

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, wurden die ringförmigen Elektroden als Fertigungsnutzen aus Leiterplattenmaterial hergestellt. Durch die maschinelle Anfertigung konnten in einem Arbeitsgang mehrere Elektroden unterschiedlicher Durchmesser mit geringer Toleranz, besser  $\pm 0,1\text{mm}$ , hergestellt werden. Der beim Durchschreiten einer Biene registrierte Messeffekt war so groß, dass grundsätzlich von einer Anwendbarkeit ausgegangen werden konnte.

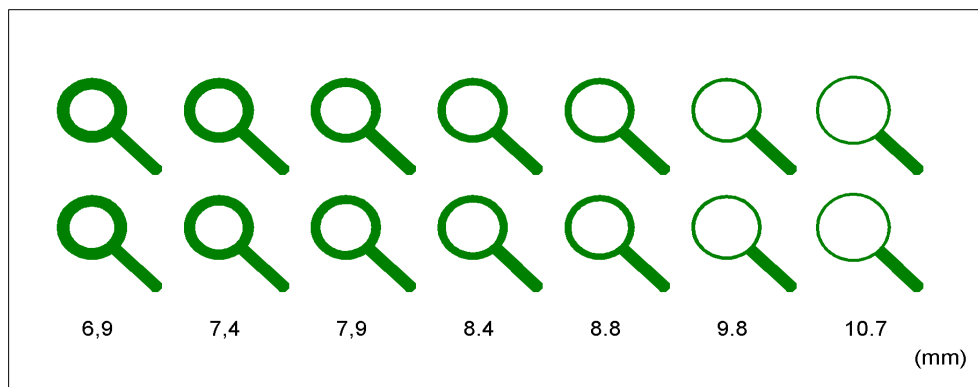


Abbildung 4: Ringelektroden

### 3.2.2 Plattenförmige Elektroden

Bei den Laborversuchen bestätigte sich die Erwartung, dass der Messeffekt der plattenförmigen Ausführung geringer als bei der ringförmigen Anordnung ist. Dieser Nachteil konnte jedoch kompensiert werden, indem man statt einer Platte mehrere kleinere Platten verwendete. Die dichte Anordnung der 3 kleineren Platten ermöglichte den Test verschiedener Auswertungsalgorithmen, z.B. einer Mittelwertbildung mit einer höheren Wichtung der mittleren Platten. Die Schwankungen der Messwerte der plattenförmigen Anordnung lie-

ßen sich dadurch soweit verringern, dass sie qualitativ der ringförmigen Anordnung entsprachen.

Obwohl mit der ringförmigen Gestaltung eine etwas höhere Signalstärke erzielt werden konnte, fiel die Entscheidung zugunsten einer Anordnung mit gegenüberliegenden Platten, ähnlich der Anordnung der optischen Sensoren. Der Grund dafür ist die einfachere Reproduzierbarkeit der benötigten Zahl von Einzelkondensatoren mit der identischen Qualität und engtolerierten Abmessungen. Hierfür wurden die Kondensatorplatten direkt auf dem Leiterplattenmaterial aus der Kupferbeschichtung geformt. Das erstellte Leiterplattenlayout enthielt dabei für jeden Eingang zuerst nur einen, dann 3 und in der letzten Version 7 Plattenkondensatoren, die von den Bienen beim Verlassen und bei der Rückkehr nacheinander passiert werden.

### **3.2.3 Auswertungselektronik der kapazitiven Sensorik**

Kernstück der kapazitiven Sensorik ist neben den Kondensatoren selbst, ein besonders hoch auflösender, integrierter Wandler. Dieser wandelt die zu messenden Kapazitäten in einen Digitalwert um. Dabei wird die Dauer des Ladevorgangs des zu messenden Kondensators durch eine hochpräzise Zeitmessung bestimmt. Vielfältige Konfigurationsmöglichkeiten ermöglichen eine universelle Einsetzbarkeit des gewählten Bausteins. Für die kapazitive Erfassung der Bienen musste der Baustein, unter anderem hinsichtlich Pin-Konfiguration, Messdauer, Referenzkapazität und Datenprotokoll, auf die Anwendung angepasst werden.

Die niedrigen Grundkapazitäten und der kleine Messeffekt erfordern extrem kleine Leitungslängen zwischen den zu messenden Kondensatoren und den Anschlüssen des Wandlerbausteins. Der Einsatz eines diskreten Multiplexers, wie er bei Anwendungen mit vielen Messeingängen sonst üblich ist, kam deshalb nicht in Frage. Stattdessen wurde eine Anordnung gewählt, bei der die Wandler direkt zwischen den Ein-/Ausgängen platziert wurde. Die durchschnittlichen Leitungslängen zu den Kondensatoren betragen dadurch nur ca. 4 mm.

Alle Wandlerbausteine sind an einem SPI Bus angeschlossen, über den die Initialisierung durchgeführt, die Konfigurationsdaten geschrieben und die Messdaten ausgelesen werden. Die Selektierung des jeweils anzusprechenden Bausteins erfolgt über einen Adress-

decoder. Dieser bildet aus einer parallel anliegenden 5 Bit Binäradresse und dem Chipselect Signal des SPI Busses ein individuelles Chipselect Signal für jeden Wandlerbaustein. Für die Anbindung der kompletten kapazitiven Sensoreinheit ergibt sich, inklusive der redundant ausgeführten Versorgungsspannungsanschlüsse, sowie Testanschlüssen, ein Bedarf von 14 Leitungen, die über einen Wannenstecker und eine Flachbandleitung zur Steuereinheit geführt werden.

### **3.3 PC Anbindung und Steuerung**

Zum Zeitpunkt der Laborversuche befand sich die später in den Feldversuchen eingesetzte Steuerungseinheit noch in der Entwicklung. Deshalb wurde ersatzweise ein PC mit einem Interface genutzt, das genau wie die Steuerungseinheit über einen SPI Bus und weitere digitale Ein- und Ausgänge verfügte. Die Inbetriebnahme der Sensoreinheiten und die Anpassung des Protokolls auf dem SPI Bus gelang damit viel schneller als es bei einer direkten Implementierung auf dem späterem Zielsystem zu erwarten gewesen wäre. Neben dem zeitlichen Vorteil dieser PC-basierenden Zwischenlösung, waren die Flexibilität, die nahezu unbegrenzte Speicherkapazität und Rechenleistung, sowie die Möglichkeit die Rohdaten online graphisch darstellen zu können wesentliche Vorteile.

#### **3.3.1 Ergebnisse optisches Verfahren**

Bereits am Markt befindliche Geräte, die nach diesem Prinzip arbeiten, zeigen eine geringe Zuverlässigkeit und hohe Abweichungen. In Versuchen konnten dafür verschiedene Ursachen gefunden werden.

1. Wenn ein System mit 2 Lichtschranken arbeitet, dann reicht es bereits aus, wenn nur eine dieser beiden verschmutzt ist. Selbst wenn die zweite noch arbeitet und theoretisch eine Zählung der Bienen noch möglich wäre, fehlt dann die Richtungsinformation. Weil man ohne diese nicht mehr unterscheiden kann, ob eine Biene als ausfliegend oder ankommend gezählt werden muss, fällt der betroffene Ein-/Ausgang völlig aus.
2. Eine Verschmutzung, die zum einem Ausfall führt, muss erkannt und beseitigt werden. Andernfalls wird das Gerät weiter betrieben oder erneut eingesetzt, ohne dass der Fehler behoben wird.
3. Wenn sich zwei Bienen in einem Ein-/ Ausgang entgegen kommen und leicht zeitversetzt jeweils die Lichtschranke auslösen, die sie zuerst erreichen, dann ist es

möglich, genau die Abfolge an Signalen auszulösen, die einer gültigen Zählung entsprechen würde.

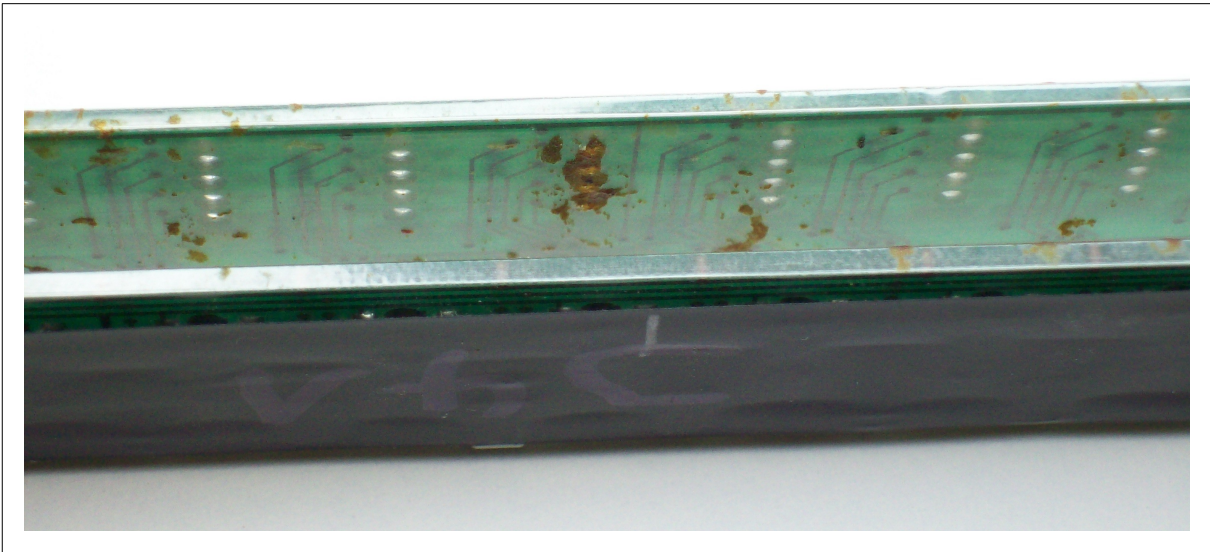
Um die beschriebenen Fehlfunktionen zu vermeiden, wurden die optische Sensorik durch drei wesentliche Maßnahmen erweitert.

1. Die Anzahl der Infrarotlichtschranken wurde zunächst auf 3 pro Ein-/Ausgang erweitert. Damit war es möglich zweifach die Entscheidung bezüglich der Bewegungsrichtung auszuwerten. Liefern die mittlere und die äußere Lichtschranke die Signale, die einer rückkehrenden Biene entspricht, während gleichzeitig die mittlere und die innere Lichtschranke eine gegenteilige Information lieferte, dann musste davon ausgegangen werden, dass zwei in Gegenrichtung laufende Bienen die Lichtschranken ausgelöst haben.
2. Um das Problem der unerkannten Verschmutzung zu beheben, wurden alle Ein-/Ausgänge mit einer zusätzlichen LED ausgestattet, die vom Nutzer durch das Flugloch erkennbar ist. Wenn eine Infrarotlichtschranke ständig einen unterbrochenen Lichtstrahl anzeigt, dann muss man von einer Verschmutzung oder einem Fremdkörper im Strahlengang ausgehen. Die Software wurde dahingehend erweitert, dass nach einer Zeit von 10 Minuten Dauerbetätigung, ein Fehler für den entsprechenden Ein-/Ausgang gespeichert wird.

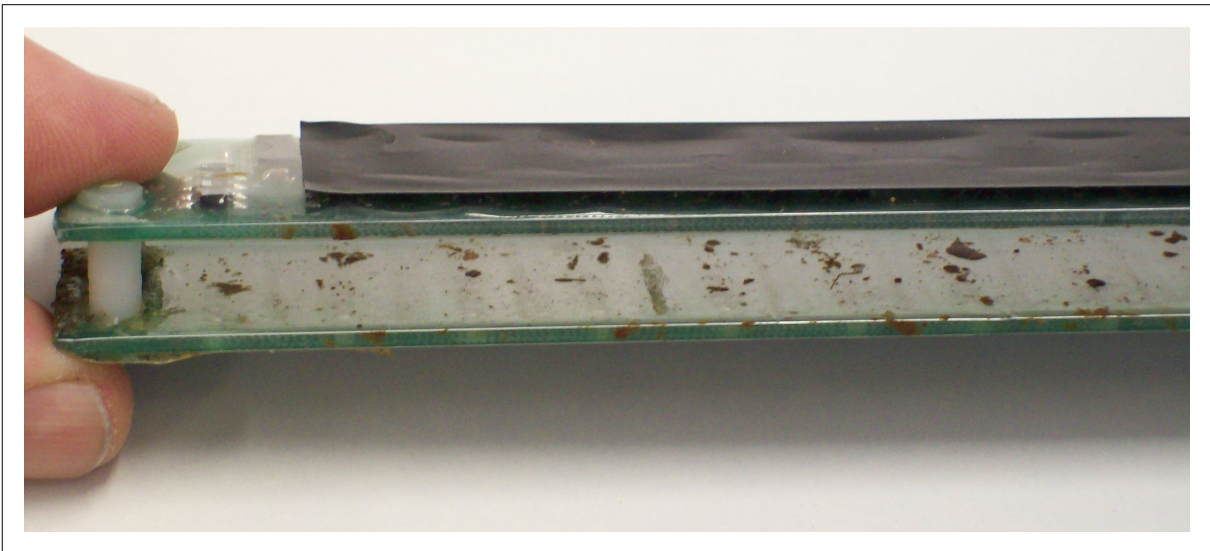
Bei einer Überprüfung kann der Nutzer durch einen Schalter eine Fehleranzeige aktivieren. Die Leuchtdioden in den fehlerhaften Ein-/Ausgängen werden bei einer erkannten ständigen Auslösung angeschaltet und zeigen den Fehler an, bis dieser beseitigt ist.

Weil die optische Erfassung aber erst nach erfolgter Reinigung wieder funktionieren kann, werden Bienen, die den betroffenen Ein-/Ausgang durchschreiten, zwischenzeitlich nicht erfasst.

3. Um trotz der häufig auftretenden Verschmutzungen einen weitgehend lückenlosen Betrieb zu ermöglichen, wurde jeder Ein-/Ausgang mit einer vierten Infrarotlichtschranke ausgestattet. In Verbindung mit einer erheblich erweiterten Software ist es damit, im Falle einer Verschmutzung von einer oder zwei Lichtschranken, möglich weiterzuarbeiten, weil die Software dann nur noch die verbliebenen Lichtschranken auswertet. Bei nur noch zwei verbleibenden Lichtschranken ist die Erkennung von 2 gleichzeitig passierenden Bienen nicht mehr möglich.



*Abbildung 5: Optische Sensoreinheit nach 2-wöchiger Einsatzdauer A*



*Abbildung 6: Optische Sensoreinheit nach 2-wöchiger Einsatzdauer B*

Das Bild zeigt die Senderseite der optischen Sensoreinheit nach 2-wöchiger Einsatzdauer. Zu erkennen sind die nebeneinander angeordneten Reihen bestehend aus jeweils 4 Infrarotsendern je Ein-/Ausgang und die auf der Schutzfolie von den Bienen hinterlassenen Verschmutzungen.



### 3.3.2 Ergebnisse kapazitives Verfahren

Für die Erkennung der Bewegungsrichtung mittels des kapazitiven Verfahrens stehen aufgrund des analogen Messsignals wesentlich mehr Möglichkeiten zur Verfügung die gewünschte Information herauszufiltern.

Anschaulich beschrieben liefert eine Biene, die sich mit konstanter Geschwindigkeit durch eine der kapazitiven Messzellen bewegt, eine Kurve, die ihrer Körperform entspricht. Wenn man nun an zwei aufeinander folgenden kapazitiven Messzellen einen sehr ähnlichen Signalverlauf registriert, dann resultiert der Zeitunterschied zwischen den beiden Kurven aus der Bewegungsgeschwindigkeit. Die Schwierigkeit besteht darin, die Ähnlichkeit der zwei Kurven durch eine mathematische Berechnung zu erkennen. Besonders schwierig wird diese Aufgabenstellung, wenn die Biene ihre Bewegungsgeschwindigkeit zwischen den kapazitiven Messzellen ändert.

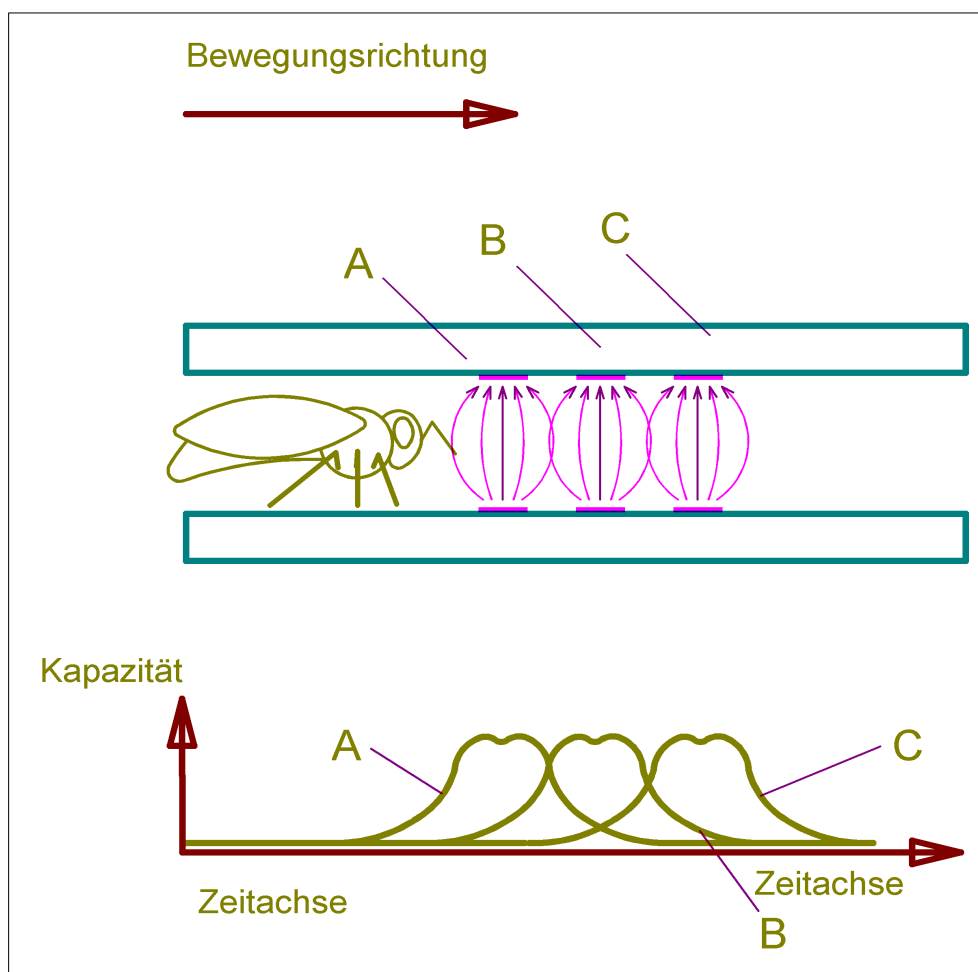


Abbildung 7: Idealisierter Signalverlauf mit 3 kapazitiven Messzellen

Bei einer geringen Geschwindigkeit ist die Kontur der Biene im Zeitdiagramm lang gestreckt, während das Diagramm bei schnellen Bienen einen gestauchten Verlauf zeigt. Besondere Schwierigkeiten ergeben sich, wenn die Biene pausiert oder die Bewegungsrichtung ändert.

Eine wesentliche Problem bestand darin, das rein anschaulich deutlich aus den Messkurven ablesbare Bewegungsverhalten der Bienen in einen mathematischen Algorithmus umzusetzen, der aus der unüberschaubaren Menge von Einzelmesswerten nur noch Anzahl und Bewegungsrichtung liefert.

Dafür wurde im Laborversuch das Verhalten der Bienen

- beim Passieren,
- bei Begegnungen,
- beim Verweilen,
- und bei Richtungswechseln

zunächst mit Einzelbienen und dann mit mehreren Bienen untersucht.

Die möglichen Kombinationen des Verhaltens mehrerer Bienen führte zu ca. 200 Datensätzen in denen einerseits das Verhalten visuell beobachtet, dokumentiert und andererseits die Rohwerte der Messdaten lückenlos aufgezeichnet wurden.

Die Datensätze wurden anschließend geprüft, indem die aufgezeichneten Rohwerte mit dem jeweils zu testenden Verfahren ausgewertet wurden. Bei korrekter Funktion des zu testenden Auswertungsalgorithmus muss dieser für jeden einzelnen Datensatz zu dem selben Ergebnis kommen, wie es visuell beobachtet wurde.

Sukzessiv konnten die Auswertungsalgorithmen optimiert werden, bis sich zwei Verfahren herauskristallisierten. Eines dieser Verfahren lieferte so herausragend gute Ergebnisse, dass für dieses Verfahren ein entsprechendes Programm für den Onlineeinsatz in Feldversuchen erstellt wurde.

### **3.3.3 Vergleich der optischen und der kapazitiven Sensoreinheit**

Die optische Sensorik zeigt eine prinzipielle Schwäche. Die Infrarotlichtschranken liefern für den diskreten Zeitpunkt der Abfrage nur eine Ja/Nein Information. Ein unterbrochener Lichtstrahl wird zuverlässig erkannt. Ein nur teilweise, z.B durch einen Flügel abgeschwächter Strahl, oder ein teilweise durch eine Biene verdeckter Empfänger oder Sender lassen sich nicht differenzieren. Die Übergangskennlinie von einem durchgehenden zu ei-

dem unterbrochenem Lichtstrahl ist steil. Die anschließende Erfassung mit einer festliegenden Schwelle, ab der eine Unterbrechung angezeigt wird, verstärkt dieses Verhalten. Die Möglichkeiten sehr kurzzeitige Wechsel durch eine Filterung zu eliminieren, ist durch die begrenzte Zahl diskreter Abfragezeitpunkte beschränkt. Gerade im Vergleich zu dem kapazitiven Messverfahren zeigte sich, dass durch die Einteilung und Weiterverarbeitung in nur zwei Zuständen Ja/Nein Informationsgehalt verloren geht, bzw. die Möglichkeiten einer Filterung sehr stark eingeschränkt werden.

Bei der optischen Erfassung der Bienen muss man davon ausgehen, dass jede einzelne Abtastung ein belastbares Ergebnis für die weitere Auswertung liefert. Ein fehlender Wert wäre durchaus akzeptabel. Wenn aber der Lichtstrahl genau in einem der Abtastzeitpunkte über eine Reflexion oder über die Stelle zwischen Brustkorb und Hinterleib der Biene einen Weg vom Sender zum Empfänger findet, dann führt das häufig zu einer Änderung der Signalabfolge und damit zu einer gegenteiligen Richtungsinformation. Wenn diese Fehlinformation als solche nicht erkannt wird, ist eine fehlerhafte Zählung die Folge.

Dieses systematisch bedingte Problem ließe sich wahrscheinlich nur durch ein analog ausgewertetes Empfängersignal und eine wirkungsvolle Filterung vermeiden.

Weil der Aufwand einer entsprechenden Umrüstung erheblich wäre und das kapazitive Verfahren bereits mit einer analogen Signalauswertung ausgestattet ist, wurde darauf verzichtet.

Außerdem ist zu erwarten, dass eine analoge Auswertung der optischen Sensoren eine noch höhere Sensibilität gegenüber Verschmutzungen zur Folge hätte.

## 4 Geräte für die Feldversuche

### 4.1 Mechanik

Für den Feldeinsatz wurde ein Gehäuse konzipiert, das in erster Linie den folgenden Anforderungen gerecht werden musste:

- Kompatibilität zu bisher eingesetzten Bienenstöcken
- wetterfester aber schadstofffreier Aufbau
- einfache Montage- und Demontagemöglichkeit für die Sensoreinheit, Batterien und die Steuereinheit.
- ausreichende Belüftungsmöglichkeit
- Schutz gegen Mäuse

Um die Kosten für Sonderanfertigungen einzusparen, sollte der Entwurf außerdem mit einem Varroagitter und zugehörigem Schubfach ausgestattet sein, in das die Schubladen eines existierenden Modells passen. Es ist gelungen einen Aufbau zu entwerfen, der der Kombination dieser Anforderungen entspricht.



Abbildung 8: 3D Darstellung des montierten Systems

Für die Entwicklung des Gehäuses wurde ein 3D CAD-Programm eingesetzt, mit dem nicht nur die Einzelkomponenten, sondern die gesamte Konstruktion im zusammengebauten Zustand dargestellt werden kann. Weiterhin war bereits vor der Erstellung des ersten Musters die Simulation der Montage und Funktionalität der beweglichen Teile möglich. Dadurch war es mit nur wenigen Optimierungsschritten möglich, das aktuelle Gehäuse zu entwerfen.

Der mechanische Aufbau besteht aus einem zweiteiligem Gehäuse, das in einem schubladenartigen Modul die elektrischen Komponenten, sowie die Stromversorgung enthält, während das Schubfach als Unterbau für den Bienenstock dient.

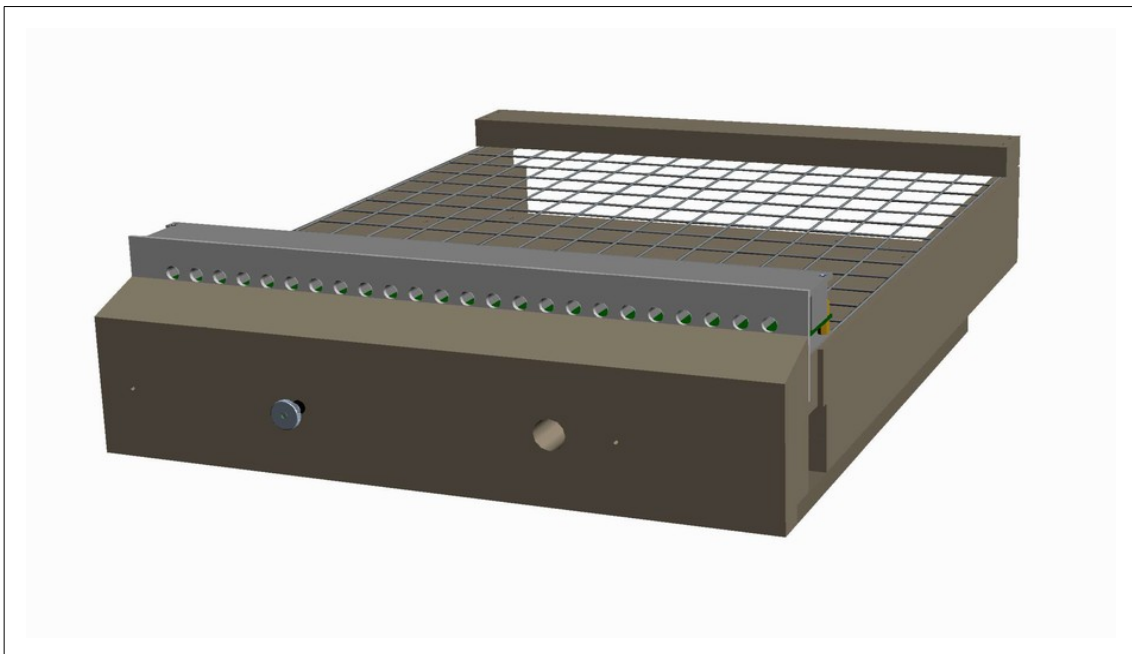


Abbildung 9: Schublade mit Sensoreinheit

- Es ist es mit sehr geringem Aufwand möglich, die Messtechnik für Modifikationen zu demontieren oder innerhalb nur einer Minute die komplette Messelektronik auszutauschen
- Die aus wasserfest verleimten Holz aufgebaute Konstruktion bietet genügend Platz für die Unterbringung aller Komponenten.
- Die Außenabmessungen entsprechen denen eines gewöhnlichen Beutenbodens.
- Durch die Verwendung von handelsüblicher Beutenfarbe wurde die Witterungsbeständigkeit erhöht und die Messeinrichtung optisch unauffällig angepasst.

Während die ursprüngliche Konstruktion für eine größere Sensoreinheit aus optischen und kapazitiven Sensoren Platz bot, ist das aktuelle Gehäuse für rein kapazitive Sensoren optimiert.

## 4.2 Optische und kapazitive Sensoreinheit für den Feldeinsatz

Um die große Anzahl von Einzelkomponenten so kompakt wie möglich aufzubauen, wurde für die entwickelte Elektronik ein Leiterplattenlayout in Feinleitertechnik erstellt und ausschließlich SMD Komponenten der kleinsten erhältlichen Gehäusebauformen verwendet (QFN). Die Anfertigung der Leiterplatten erfolgte bei einem externen Leiterplattenhersteller. Für die kleine Zahl der anzufertigenden Systeme wurden die Leiterplatten zunächst im Siebdruck mit Zinn beschichtet und von eigenen Mitarbeitern manuell bestückt. Wegen des geringen Kontaktabstandes von nur 0,2 mm wurden die Arbeiten unter einem Mikroskop durchgeführt. Das Löten der bestückten Leiterplatten erfolgt anschließend bei einem Dienstleistungsbetrieb im Dampfphasenverfahren.

Alle die Herstellungstechnologie betreffenden Beschreibungen wurden auch bei den weiteren Baugruppen angewendet.

### 4.2.1 Optische Sensoreinheit

Die optische Sensorik für die Feldversuche besteht aus 20 Ein-/Ausgängen, die an 4 hintereinanderliegenden Stellen jeweils mehrfach in der Sekunde abgefragt werden können. Sie ersetzen das herkömmliche Flugloch. Jede einzelne der 80 Lichtschranken wird dabei nur für 1 Mikrosekunde eingeschaltet, so dass sich eine Verringerung des durchschnittlichen Gesamtverbrauchs auf unter 5 mA ergibt.

Um den Abstand der Sensoren zu den Bienen zu verringern wurden dabei die 20 kleinen Kunststoffrohre durch ein einzelnes, größeres Kunststofffrästeil ersetzt. Die gefräste Durchgangsbreite war dabei zunächst 8 mm und wurde während der Versuchsreihen variiert. Weil die Bienen bereits nach 3 Tagen Einsatzdauer den Kunststoff deutlich sichtbar angenagt hatten, wurden weitere Materialien getestet bis ein geeignetes gefunden wurde.

Die optische Sensoreinheit ist mechanisch eigenständig, und elektrisch ebenfalls über einen SPI-Bus an die Steuereinheit angebunden. Alle Infrarotsender, sowie die Ansteuer-elektronik, sind auf einer Leiterplatte aufgebaut, während eine zweite Leiterplatte die Infrarotempfänger sowie die Elektronik zur Abfrage enthält.

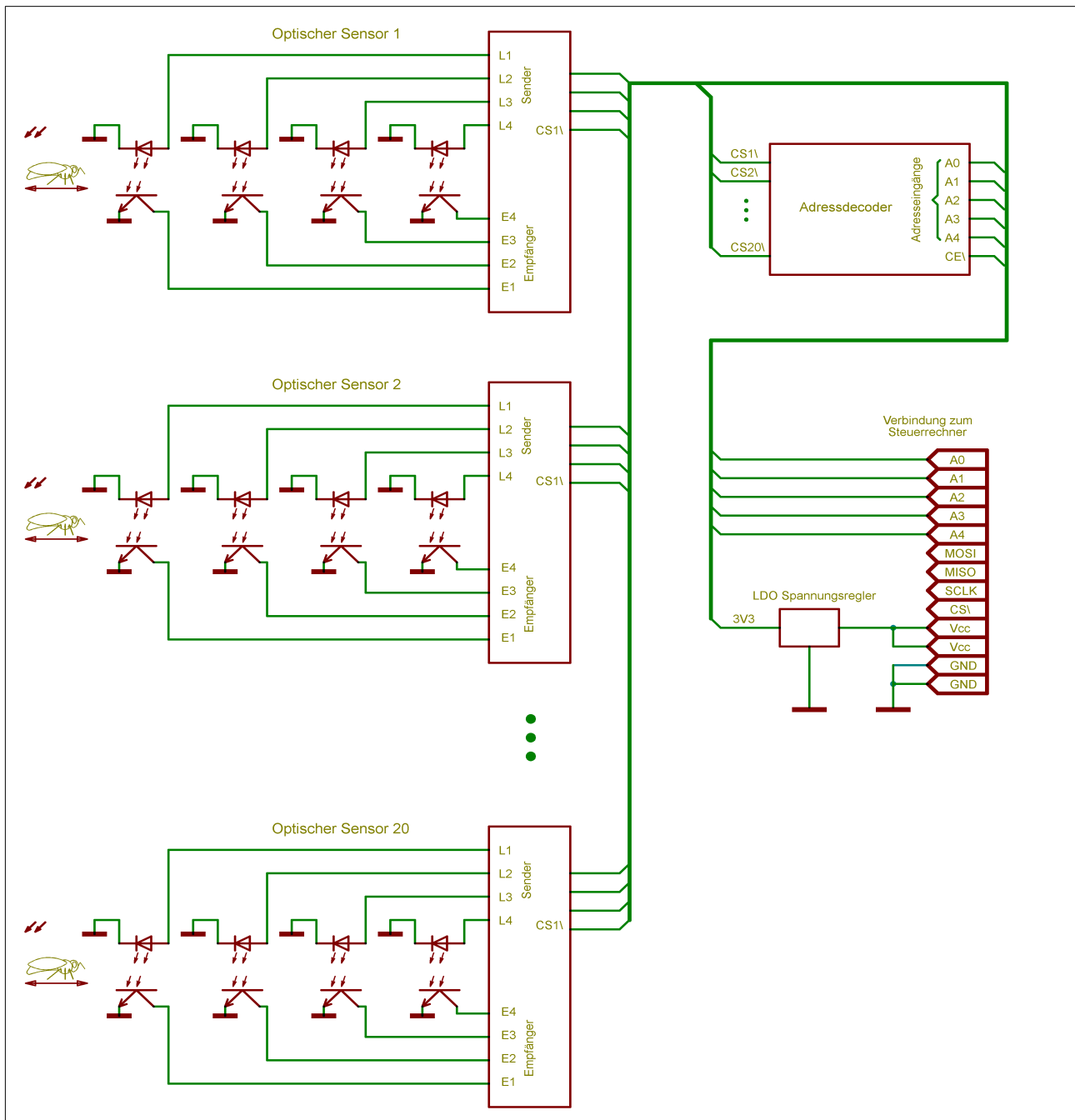


Abbildung 10: Blockschaltbild der optischen Sensoreinheit

#### 4.2.2 Kapazitive Sensoreinheit

Die kapazitive Sensoreinheit entspricht von der Anordnung der Ein-/Ausgänge der optischen Einheit. Ebenso verfügt sie über ein SPI Interface mit einer kompatiblen Anschlussbelegung. Im Gegensatz zur optischen Sensoreinheit ist die gesamte kapazitive Elektronik

auf nur einer Leiterplatte aufgebaut, die sich unter den Ein-/Ausgängen befindet. Auch die bis zu 7 Elektroden der kapazitiven Sensoren sind auf dieser Leiterplatte angeordnet. Weil zu jedem der Kondensatoren jedoch zwei gegenüberliegende Elektroden gehören, aber alle dieser zweiten Elektroden elektrisch miteinander verbunden sind, konnte eine Metallschiene über den Ein-/Ausgängen als gemeinsame zweite Elektrode für alle Kondensatoren verwendet werden. Dies stellt eine wesentliche Vereinfachung gegenüber der optischen Sensorik dar. Allerdings lässt sich der Vorteil nur bei den plattenförmigen Elektroden nutzen. Bei einer ringförmigen Anordnung ist auch für die miteinander verbundenen Elektroden jeweils eine eigene Ringelektrode erforderlich.

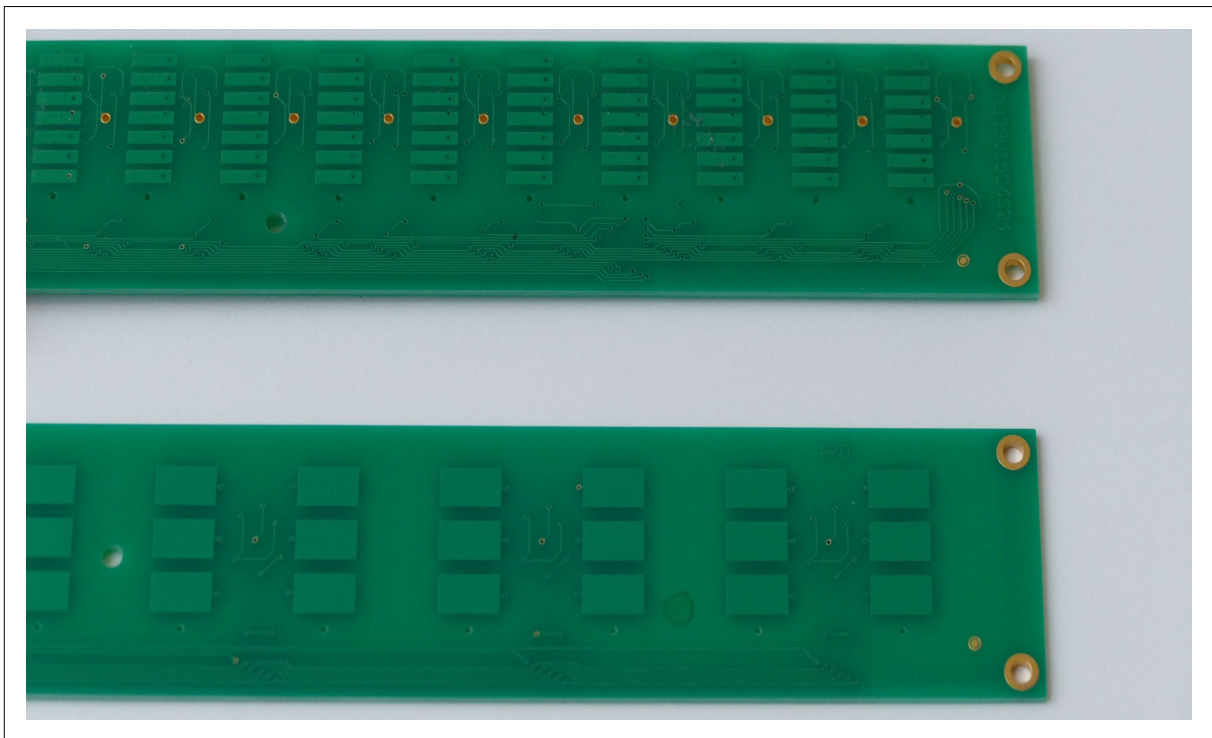


Abbildung 11: Kapazitive Sensoreinheit mit 3 bzw. 7 Sensoren



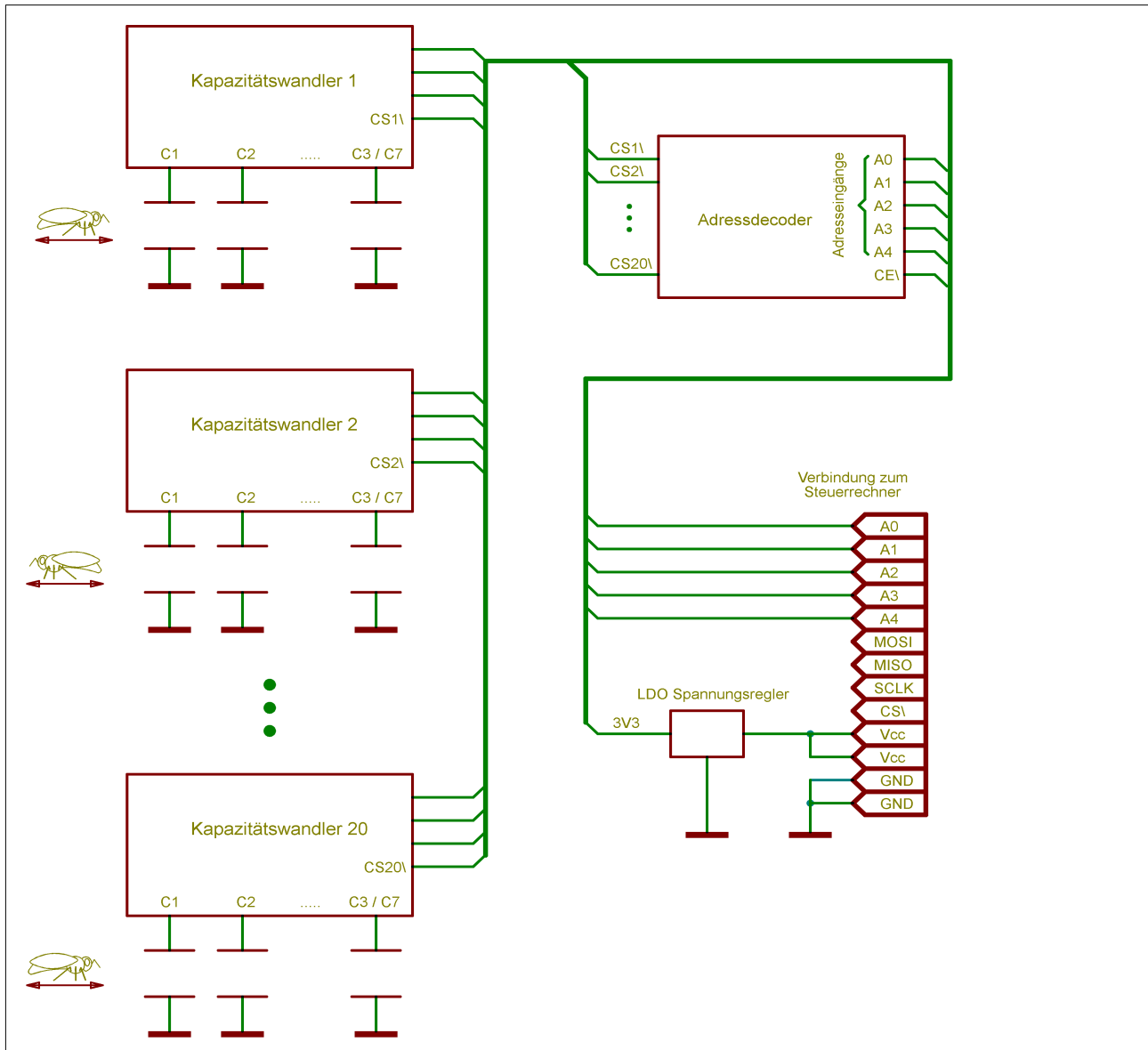


Abbildung 12: Blockschaltbild der kapazitiven Sensoreinheit

### 4.3 Steuerungsrechner

Im Gehäuse für die Messeinrichtung wurde ein kompakter Steuerungsrechner integriert. Er organisiert die Abfolge der Messungen, kann die Rohwerte auswerten und speichern oder auch eine Fernübertragung vornehmen.

Der Steuerungsrechner musste so leistungsfähig sein, dass er die Rohdaten analysieren und stark komprimieren kann. Es kam deshalb nur der Einsatz eines 32-Bit Prozessors mit

einem großen Programm- und Arbeitsspeicher in Frage. Der extrem stromsparende, 32-Bit Mikroprozessor EFM32GG ermöglicht bei der zu Verfügung stehenden Batteriegröße eine Einsatzdauer von einem Jahr. Für die Anbindung der optischen und kapazitiven Sensoren ist außerdem ein schnelles SPI-Interface erforderlich, das zusätzlich eine Datenspeicherung auf SD-Karte ermöglicht.

Folgende Übertragungswege für die Messdaten wurden implementiert:

- Die SD-Karte, die zu Debuggingzwecken getauscht werden kann.
- Die Datenübertragung zu einem Bedienrechner per serieller Schnittstelle bzw. über Bluetooth
- Die Datenfernübertragung an eine Leitstelle per GSM/UMTS ist vorbereitet und kann jederzeit aktiviert werden

Zur Komplettierung des Systems waren u.a. folgende Peripheriefunktionen erforderlich:

- Timer, Zähler und Echtzeituhr zur exakten Ablaufsteuerung
- die Regelung und Steuerung der Betriebsspannung für die einzelnen Baugruppen
- Pegelwandler zur Anpassung der Signalpegel der Sensoren und DFÜ-Modem-Schnittstelle und für die externe Kommunikation

Alle beschriebenen Baugruppen, sowie die mechanische Befestigung und elektrische Kontaktierung von SIM- und Speicherkarten, sind auf der Baugruppe des Steuerungsrechners realisiert.

Um ein System zu erhalten, das den Anforderungen hinsichtlich geringem Energieverbrauch gerecht werden konnte, wurde eigens ein Schaltungs- und Leiterplattendesign entworfen, das ausschließlich Komponenten mit besonders geringem Energieverbrauch enthält. Das Layout der Leiterplatte wurde zugunsten einer kompakten Bauform als 4-Lagen Multilayer entworfen und hergestellt.

#### **4.3.1 Betriebssystem und Firmware**

Der eingesetzte Mikroprozessor erlaubte trotz hoher Rechenleistung bei geringem Stromverbrauch noch nicht den Einsatz eines Standardbetriebssystems wie z.B. Linux. Zum Einsatz kam deshalb ein Echtzeitbetriebssystem, das speziell für Embedded Hardware angepasst wurde. Es ermöglicht die parallele Bearbeitung von mehreren Aufgaben, in denen u.a. die Steuerung der angeschlossenen Sensorik, die Erfassung der Betriebsparameter

und die Speicherung der Messdaten in Threads durchgeführt wurde. Das Betriebssystem wurde in der Programmiersprache „C“ erstellt.

Die Betriebssoftware selbst wurde in der Programmiersprache „C++“ geschrieben. Es wurde nur die Funktionalität einer reduzierten Embedded-Version genutzt, die aber für die Realisierung der Aufgabenstellung mehr als ausreichend war.

Die Firmware des Prozessors wird üblicherweise per Programmiergerät über eine JTAG/SWD Schnittstelle direkt in den Flash-Speicher des Prozessors übertragen. Dieses Verfahren ist sehr schnell und sicher, aber leider nur für die Entwicklungszeit im Labor geeignet. Bei den Feldversuchen stellte sich heraus, dass die Firmware doch mehrfach ergänzt bzw. getauscht werden musste. So wurde noch ein zusätzlicher Bootloader entwickelt und installiert. Diese Software ermöglicht per Bedienung über einen Notebook die Übertragung einer neuen Firmware in die Messeinrichtung. Eine zusätzliche Erweiterung erlaubt außerdem, dieses Update per Datenfernübertragung mittels GSM/UMTS Modem zu installieren.

Die Aufgaben der Firmware waren u.a. :

- Steuerung der angeschlossenen Sensorik, d.h. es müssen kontinuierlich alle LED-Lichtschranken und alle kapazitiven Messeingänge überwacht werden.
- Während der Entwicklungszeit Speicherung der aufgenommenen Rohwerte
- Auswertung der Rohwerte mit Erkennung von ein- und ausfliegenden Bienen
- Speicherung der Gesamtanzahl der ein- und ausfliegenden Bienen
- Überwachung des Systemstatus, z.B. Batteriezustand, Speicherkapazität
- Anfragen eines evtl. angeschlossenen Bedienrechners verwalten und bearbeiten, d.h. es musste gewährleistet sein, dass der Messbetrieb durch rechenintensive Bedienvorgänge, z.B. das Auslesen von Zwischenergebnissen, nicht beeinträchtigt wird.

Bei der Implementierung der Auswertung der Rohwerte stellte sich heraus, dass die kurzzeitige Zwischenspeicherung der Rohwerte auf SD-Karte mit anschließendem Lesen zur Auswertung zu langsam für eine Online-Auswertung war. Die Datenmenge aller Sensoren war zu groß, um sie bei der später auf 10 Hz gesteigerten Abtastrate auf diese Art verarbeiten zu können.

Der in den Laborversuchen entwickelte mathematische Auswertungsalgorithmus wurde so angepasst, dass ein schneller Cachespeicher im Arbeitsspeicher des Prozessors eingesetzt werden konnte. Die Prozessorlast während des Messbetriebes reduzierte sich dadurch auf unter 50 %.

Die zuerst angedachte Speicherung aller Rohwerte zur späteren Auswertung auf einem PC wurde zunächst verworfen, nachdem sich herausgestellt hatte, dass die Onlineanalyse der Daten einen so großen Anteil der Rechenleistung des Prozessors beanspruchte, dass mit der verbleibenden Rechenkapazität eine ausreichende Komprimierung der großen Datenmenge mit anschließender Speicherung auf SD-Karte nicht mehr möglich war. Darüberhinaus entsprach die Größenordnung des Datenaufkommens fast den Übertragungsraten, die per USB Kabel oder per Mobilfunk erreicht werden können. Die Aufzeichnung von Rohdaten parallel zur Onlineanalyse wurde deshalb auf einzelne Ein-/Ausgänge beschränkt.

#### **4.3.2 PC-Software DLBA5-i**

Um die Messungen zu starten, Messwerte anzuzeigen und auszulesen, sowie Parameter einzustellen, wurde eine Software DLBA5-i erstellt, die eine Bedienung mittels PC ermöglicht.

Folgende Anforderungen wurden an die Bediensoftware gestellt:

- Betriebssystem MS-Windows ab Version 7
- Optimierung für einen Notebook mit Einschränkungen in der Bildschirmgröße
- Anschluss an die Messeinrichtung per Kabel (USB, seriell) oder Bluetooth
- Vorbereitung auf Bedienung per Fernwartung über Mobilfunk
- Konfiguration der Messeinrichtung mit Sicherung der jeweiligen Einstellung zur Archivierung bzw. Kontrolle
- Anzeige der aktuell erfassten Messwerte, Speicherauslastung, Batteriezustand
- Auslesen und Speicherung der aufgenommenen Messwerte in einer komprimierten Datei, die später mit einer Software auf einem PC numerisch und grafisch ausgewertet werden kann

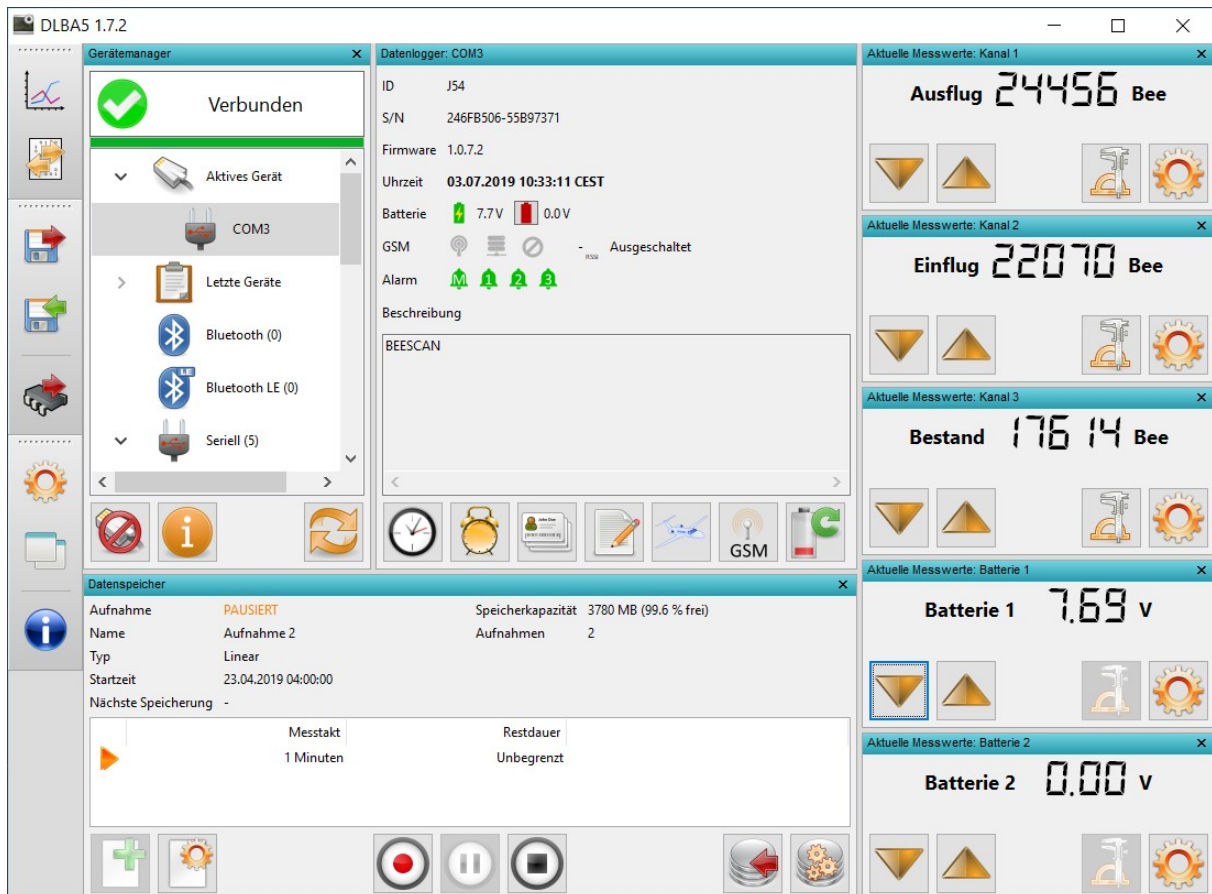


Abbildung 13: Bediensoftware DLBA5-i

Die Bediensoftware DLBA5-i wurde mit der Programmiersprache „C++“ erstellt.

Die Auslesung der hochaufgelösten Rohdaten zu Entwicklungszwecken stellte eine besondere Herausforderung dar. Das Datenvolumen war so groß, dass die Batteriekapazität der eingesetzten Notebooks und der Messeinrichtung nicht ausreichten, um einen Messzeitraum von z.B. einem Monat auszulesen. Es traten Übertragungszeiten von mehreren Stunden auf, die für die folgenden Feldversuche nicht tragbar waren. Um die Übertragungszeiten auf akzeptable Werte zu reduzieren wurden folgende Erweiterungen in der Bediensoftware implementiert:

- Einstellmöglichkeit zur Beschränkung der Auslesung auf einzelne Messkanäle und kleinere Zeiträume
- Erhöhung der Baudrate der Bedienschnittstelle auf 921600 Baud

Diese Erweiterungen ermöglichten Auslesungen in akzeptablen Zeiten, z.B. konnte ein dreistündiger Messzeitraum in weniger als 30 Minuten ausgelesen werden.

Während des Messbetriebes treten aktuell 800 Messwerte pro Sekunde auf. Durch die Online Auswertung reduziert sich dieses Datenaufkommen auf unter 1 %. Die Speicherung und Verarbeitung dieser resultierenden Ein-/Ausflugdaten stellten deshalb keine Probleme dar. Die resultierenden Messdaten wurden in einem komprimierten Format auf dem Bedienerrechner abgelegt und konnten zu späteren Zeitpunkten beliebig ausgewertet werden.

### **4.3.3 Rohdatenerfassung zur Verbesserung des Auswertungsalgorithmus**

Die aufgezeichneten Ergebnisse der Onlineanalyse wurden mit Auszählungen von Videodaten verglichen. Den größtenteils guten Übereinstimmungen standen zeitweise Differenzen entgegen, die ohne weitere Daten nicht erklärbar waren. So wurde nach Wegen gesucht doch eine Speicherung aller Rohdaten zu ermöglichen. Dieses wurde dadurch ermöglicht, dass die Onlineanalyse deaktiviert wurde. Dadurch wurden Rechenkapazitäten frei und alle Rohdaten konnten auf SD-Karte gespeichert werden. Temporär wurde eine Wechselbarkeit der SD-Karten nachgerüstet, da eine Datenübertragung der sehr großen Datenmengen nur per Tausch des Speichers möglich war.

Ab Mitte des Jahres 2019 traten leider die Nachteile der zusätzlichen Zugangsmöglichkeit zur Elektronik zu Tage, d.h. es traten Feuchtigkeitsschäden auf. Bei allen eingesetzten Systemen wurde die Möglichkeit des Speicherwechsels wieder zurückgebaut und die ursprünglich vorhandene Dichtigkeit wieder hergestellt. Die Speicherung des Rohdaten wurde wieder abgeschaltet und die Onlineanalyse zusammen mit dem neuesten Auswertungsalgorithmus wieder aktiviert.

## **4.4 PC-Auswertungssoftware**

Der Ansatz, eine Standardsoftware zur Auswertung zu verwenden, wurde nach ersten Versuchen verworfen. Die Anforderungen waren zu speziell und das zu verarbeitende Datenvolumen zu groß. Da das Entwicklerteam über entsprechende Erfahrungen verfügte wurde die entsprechende Software im Laufe der Entwicklung mit der Programmiersprache „C++“ erstellt. Ein weiterer Vorteil lag in der Flexibilität, die Software an Anforderungen anzupassen, die bei Projektbeginn noch nicht absehbar waren.

Folgende Anforderungen wurden an die Auswertungssoftware gestellt:

- Einsetzbar auf PCs mit dem Betriebssystem MS-Windows ab Version 7
- Messwerte liegen als Datei vor und können zu beliebigen Zeiten offline ausgewertet werden
- Verarbeitung von Messwerten in flexiblen Zeitrastern bis in den Millisekundenbereich
- Auswertungen über Zeitlücken durch unterbrochene Messungen und nicht äquidistante Messwerte z.B. durch eine Einstellungsänderung
- Grafische Darstellung des gesamten täglichen Aus- und Einfluges der Bienen
- Numerische Ausgabemöglichkeit aller ausgelesenen Messdaten in konfigurierbaren Formaten
- Farbige Ausgabe der Auswertung auf Bildschirm und Drucker

Um nur ein einzelnes Programm bzw. Programmpaket zu installieren, wurde beschlossen die Auswertungsfunktionalität im Bedienprogramm DLBI zu integrieren. Es wurden 2 neue Menüpunkte geschaffen, die eine grafische und eine numerische Auswertung starten.

Bei der Erstellung der Software stellte sich heraus, dass eine wesentliche Erweiterung notwendig war. Ursprünglich war vorgesehen, nur den gesamten Aus-/Einflug pro Bienenstock in einem Zeitraster zu erfassen und zu speichern. Da es zur Entwicklung und Verifizierung der Messwerte notwendig wurde, jeden einzelnen Abtastvorgang zu erfassen und abzuspeichern, stieg das Datenvolumen erheblich an. Statt von z.B. einem Messwert je Minute musste inklusive der Nummer des Ein-/Ausganges und der Zeitinformation nun ein Aufkommen von mindestens 20.000 Byte pro Sekunde ausgewertet werden.

Es wurde eine automatische Umschaltung zwischen der Entwicklungseinstellung mit Darstellung von hochaufgelösten Daten und der normalen Auswertung über längere Zeiträume eingerichtet. Die Darstellung der hochaufgelösten Daten über kurze Zeitabschnitte wurde während der gesamten Entwicklungszeit intensiv genutzt. So konnte die Beobachtung der Bienen manuell detailliert ausgewertet werden und mit den Ergebnissen des automatischen, mathematischen Algorithmus anschaulich verglichen werden.

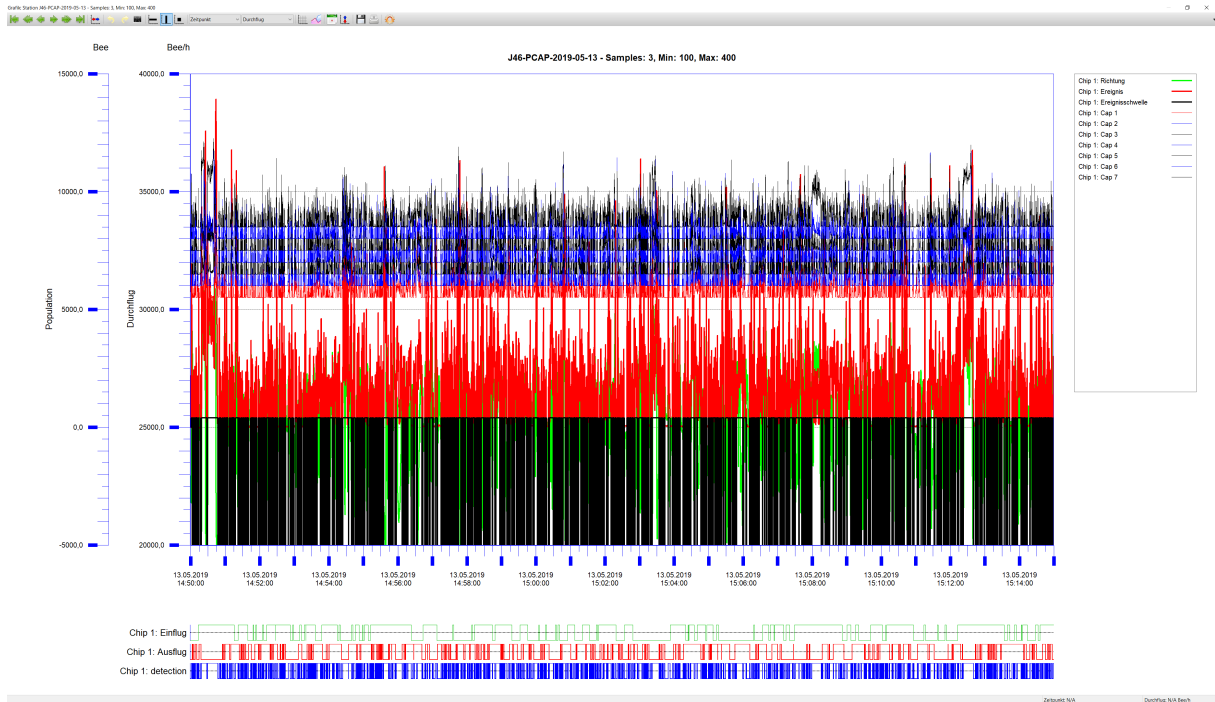


Abbildung 14: Auswertungssoftware BeeConvert 1.7.9

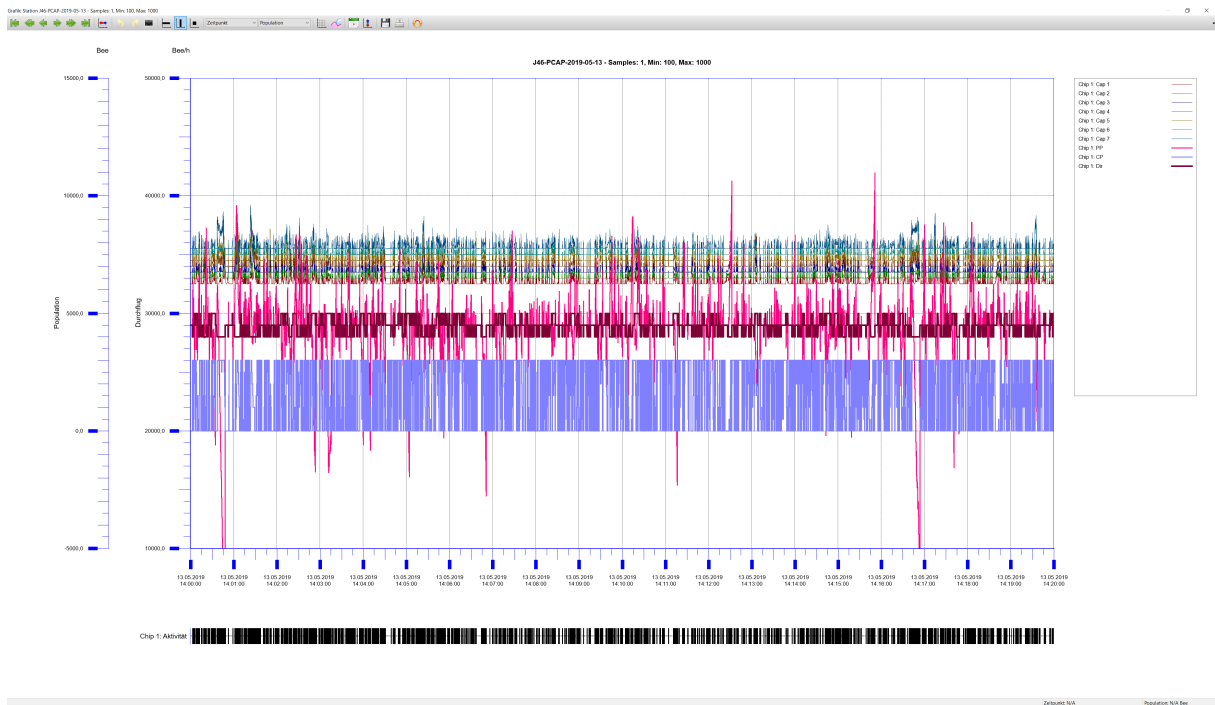


Abbildung 15: Auswertungssoftware BeeConvert 1.9.5



## 5 Feldversuche

Für die Feldversuche wurden zunächst 4 komplette Systeme mit optischen und kapazitiven Sensoren erstellt und zusammen mit den Aufzeichnungseinheiten in Gehäuse eingebaut.

Auf dem Gelände der JKI Braunschweig wurden anschließend Bienenstöcke mit den Messseinrichtungen ausgestattet.

### 5.1 Versuchsreihe 1: Vergleich der optischen und kapazitiven Sensoreinheit

Bei den Freilandversuchen zeigte sich, dass die Infrarotlichtschranken bei direkter Sonneneinstrahlung auf das Flugloch versagten. Die Auslesung der detailliert aufgezeichneten Rohdaten zeigte, dass der Verzicht auf zusätzliche Filter, bzw. der durch starke Fremdstrahlung verschobene Arbeitspunkt die Ursache sein musste. Immer wenn die Sonne im flachen Winkel auf die unten angeordneten Empfänger des Flugloch strahlte, waren die empfindlichen Infrarotempfänger einer so großen Grundhelligkeit ausgesetzt, dass Ihre Funktion beeinträchtigt wurde. Weil eine Änderung der Beschaltung, die allen Lichtverhältnissen gerecht werden konnte, oder gar eine dynamische Anpassung an die jeweiligen Lichtverhältnisse zu aufwändig gewesen wäre, wurde nach einer anderen Lösung gesucht. Die letztendlich gefundene Lösung zeigt den beschriebenen Effekt nicht und war überraschend einfach. Durch ein Tauschen der Positionen von Sendeleuchtdioden und Infrarotempfängern und der Wahl eines geringfügig dickeren Leiterplattenmaterials, waren die Empfänger weitestgehend vor Sonneneinstrahlung geschützt und funktionierten auch bei ungünstigen Lichtverhältnissen. Zusätzlich wurde die Einheit mit den optischen Sensoren hinter der Einheit mit den kapazitiven Sensoren platziert und war damit durch die weiter im Gehäuse liegende Position besser vor Fremdlicht geschützt.

Die Empfindlichkeit des optischen Verfahrens gegenüber Verschmutzung, selbst wenn es sich nur um dünne Schmutzfilme handelte, stellen die Zuverlässigkeit in Frage, selbst wenn eine regelmäßige und sorgfältige Wartung in kurzen Zeitabständen erfolgt.

Die kapazitiven Sensoren zeigten eine unerwartet hohe Auflösung und sind gegenüber den zu erwartenden Verschmutzungen deutlich unempfindlicher.

Es zeigte sich auch im Feldversuch, dass eine Biene sich nicht erst zwischen den Platten befinden muss, sondern sie wird bereits bei der Annäherung mit einem kontinuierlich an-

steigenden Signal erfasst. Die höchsten Messwerte ergeben sich dann, wenn sie sich direkt in den Feldern der Messkondensatoren befindet.

Nach einer Versuchsdauer von 15 Stunden zeigte die kapazitive Sensoreinheit jedoch einen Ausfall der Erfassung an einer zunehmenden Zahl von Ein-/Ausgängen. Die Auswertung der Rohwerte ergab, dass die Messung an den betreffenden Ein-/Ausgängen noch funktionierte. Aber wegen des feuchten Wetters hatte sich die gemessene Grundkapazität soweit erhöht, dass die Kapazitätzunahme bereits außerhalb des ausgewerteten Messbereichs lag.

## **5.2 Versuchsreihe 2: Messbereichsnachführung**

In den vorhergehenden Versuchen kam eine Software zum Einsatz, die einen festliegenden Messbereich der Eingangssignale verarbeitete. Die Festlegung des Bereichs erfolgte aufgrund einer Kalibrierung des Systems bei der Inbetriebnahme.

Für die nächsten Versuche wurde die Analysefunktion dahingehend erweitert, dass für jeden Ein-/Ausgang ein langfristiger Kapazitätsgrundwert ermittelt wurde. Eine durch Umgebungsfeuchtigkeit erhöhte Grundkapazität wurde durch eine Differenzbildung zwischen Rohwert und Kapazitätsgrundwert kompensiert. Statt der einmaligen Kalibrierung und Festlegung des zu erfassenden Messbereichs konnte der Bereich damit kontinuierlich nachgeführt werden und der durch die Bienen verursachte Messeffekt lag damit immer im ausgewerteten Messbereich.

In der Versuchsreihe 2 traten mit dieser Änderung keine Ausfälle auf.

## **5.3 Versuchsreihe 3: Versuche mit verbesserten kapazitiven Sensoreinheiten**

Aufgrund der vielversprechenden Messwerte wurde die Anzahl der Kondensatoren an jedem Eingang auf 3 erhöht. Diese 3 in Reihe angeordneten Kondensatoren liefern neben einem Messwert, der im Wesentlichen die Größe der Biene repräsentiert, zusätzlich eine Information über deren Bewegungsrichtung, ohne den Nachteil der hohen Anfälligkeit für Verschmutzungen. Weil die zusätzliche optische Erfassung gegenüber einem System mit mehreren derart hochauflösenden kapazitiven Sensoren keinerlei Vorteile aufweisen kann, wurde die Sensoreinheit nochmals überarbeitet und auf die optischen Sensoren zugunsten von 4 weiteren kapazitiven Sensoren verzichtet. Ziel war dabei, die Messstrecke

so zu verlängern, dass auch zwei gleichzeitig in einem Eingang befindliche Bienen mit den nun 7 Sensoren einzeln erkannt und korrekt erfasst werden können. Mit dieser Erweiterung zeigten die Rohwerte den angestrebten Effekt. Die automatische Erkennung wurde anschließend auch für die Verarbeitung der zusätzlichen Informationen angepasst.

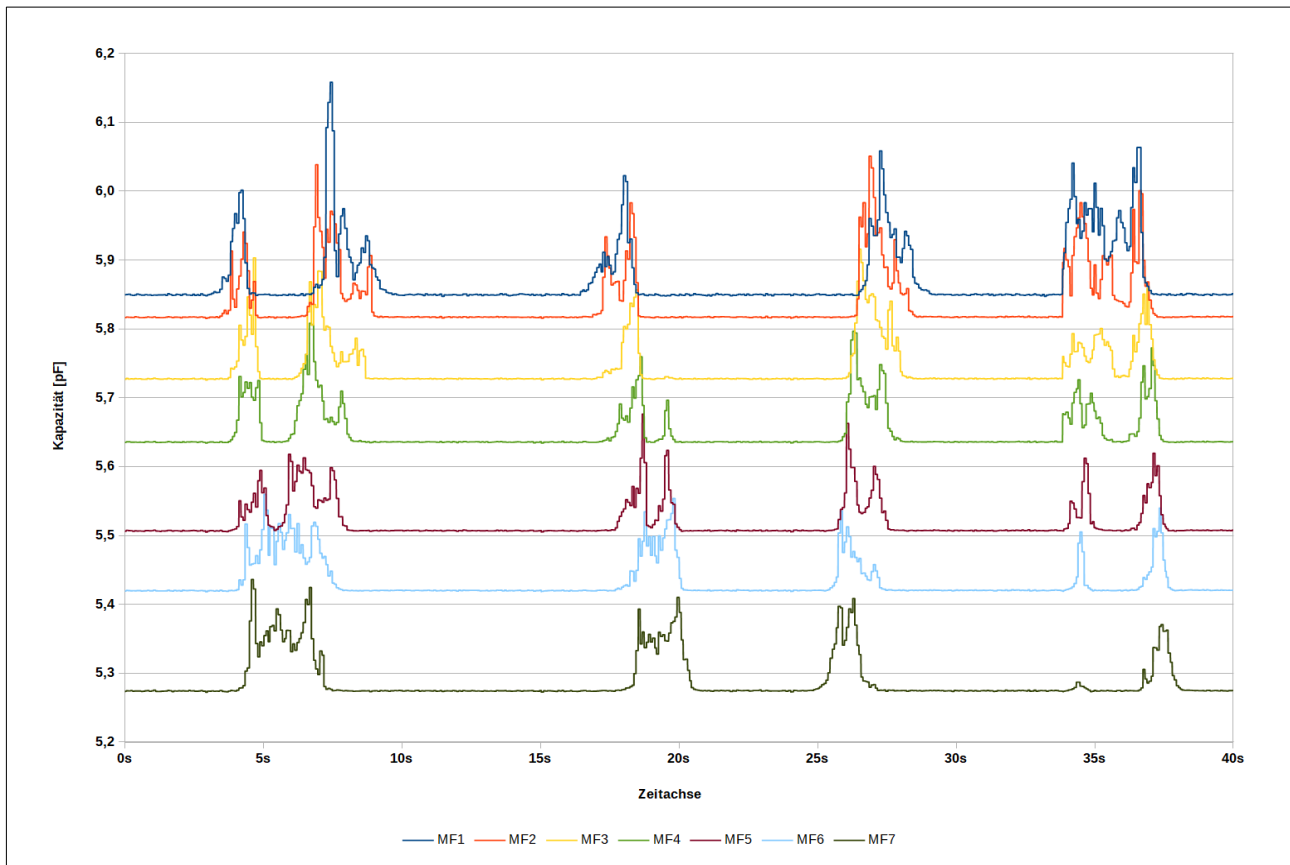


Abbildung 16: Rohdaten kapazitive Sensoren

Die Rohdaten zeigen die gemessenen Kapazitätsänderung an 7 kapazitiven Messfeldern eines Ein-/Ausganges. Die unterste Kurve entspricht dem ersten Messfeld, das die Bienen beim Einflug erreichen. Die oberste Kurve zeigt die Kapazitätsänderung des innersten Kondensators, also des Kondensators den die Bienen beim Verlassen des Bienenstocks zuerst erreichen. Sobald die Bienen den Ein-/Ausgang vollständig verlassen haben, gehen alle Kurven auf das Ruheniveau zurück.

Die Kurven zwischen der 25. und der 30. Sekunde zeigen eine einfliegende Biene. Man erkennt, dass zunächst der Wert des äußeren Messfeldes (unterste Kurve) ansteigt und dann in Abfolge auch alle weiter innen liegenden Messfelder einen Anstieg zeigen. Die

Breite und die Höhe der beiden oberen Kurven werden durch eine zweite Biene verursacht, die den Bienenstock verlassen möchte.

Die Kurven im Bereich der 15. und 20. Sekunde zeigen eine ausfliegende Biene. Auf dem äußerstem Messfeld stoppt sie, geht dann wieder ein Stück nach innen und verlässt dann doch den Bienenstock.

Der links außen dargestellte Effekt ergibt sich, wenn eine Biene aus dem Bienenstock kommend alle Messfelder nacheinander betritt, dann aber auf dem äußerem Messfeld die Richtung ändert und in den Bienenstock zurückkehrt. Die hohen Werte der beiden oberen Kurven werden durch eine zweite Biene verursacht, die nach außen möchte, aber wieder mit nach innen geschoben wurde.

Der Kurvenverlauf auf der rechten Seite des Diagrammes stellt eine Biene dar, die von innen kommend nur bis zum mittleren Messfeld schreitet und dann umkehrt. Der für kurze Zeit hohe Messwert der obersten Kurve zeigt, dass sie dann einige Zeit auf dem innersten Messfeld verweilte, bevor sie dann wieder die Richtung änderte und erneut alle Kondensatoren auf dem Weg nach außen überschritt. Dass der Messwert der unteren Kurve als letzter wieder auf Ruhenniveau geht zeigt, dass die Biene dann ausgeflogen ist

Manche Bienen haben zusätzlich lange Verweilzeiten, wodurch die Kurven entsprechend lange auf einem hohem Niveau verbleiben. Andere führen vielfache Richtungsänderungen aus, bevor sie die Ein-/Ausgänge wieder verlassen. Auch diese Verhaltensweisen muss die Analysefunktion korrekt erkennen und dokumentieren.

#### **5.4 Versuchsreihe 4: Versuche mit erhöhter Abtastrate**

Es zeigte sich schon bei den ersten Messungen, dass eine deutliche Abweichung zwischen der tatsächlich ein- und ausfliegenden Zahl von Bienen und den von der Zählinheit ermittelten Zahlen bestand. In der aktuellen Versuchsreihe wurden deshalb die detaillierten Rohdaten aller Ein- und Ausgänge gespeichert. Die Ursache für die Abweichungen wurde durch eine manuelle Analyse der Rohdaten und den daraus berechneten Werten gefunden.

Bei den Labortests wurden die Messwerte in einem Zeitraster von 4 Messungen pro Sekunde aufgenommen. Die Rohdaten des Feldversuchs zeigten jedoch, dass die Bienen die ca. 2 cm lange Messstrecke viel schneller passierten als die Bienen in den Laborversuchen. Dadurch war die Anzahl der Messwerte für die Passage einer Biene durch die Messstrecke so gering, dass keine belastbare Analyse erfolgen konnte.

Bienen, die sich durch die Ein-/Ausgänge bewegen, konnten nach der Optimierung der Abtastrate zuverlässig erfasst werden, solange sich nicht mehr als 2 Bienen gleichzeitig ohne Abstand hindurch bewegten.

## **5.5 Versuchsreihe 5: Aufzeichnung erster Aktivitätskurven**

Aufgrund der Ergebnisse der vorhergehenden Versuchsreihe wurde die Messfrequenz auf 10 Messungen pro Sekunde erhöht. Die anfallende Menge von Rohdaten nahm dadurch allerdings im selben Verhältnis zu. Eine Abspeicherung aller Rohdaten war dadurch nicht mehr realisierbar. Um die Nachvollziehbarkeit anhand von Rohdaten auch weiterhin zu ermöglichen, wurde die Software dahingehend geändert, dass die Abspeicherung von Rohdaten mit der hohen Frequenz für einzelne ausgewählte Ein-/Ausgänge erfolgte. Auch mit dieser Einschränkung standen noch vielfach mehr Datensätze zur manuellen Kontrolle an als benötigt wurden.

Bei den anschließend durchgeführten Messungen gaben die Kurvendarstellungen der Anzahl der ein- und ausfliegenden Bienen das Verhaltensmuster der Bienen sehr gut wieder. Tageszeitliche Schwankungen unter dem Einfluss unterschiedlicher Witterung konnten anhand der Aktivitätskurven eindeutig nachvollzogen werden. Die genaueren Beobachtungen zeigten jedoch, dass noch immer eine Messtoleranz von 8 % bestand.

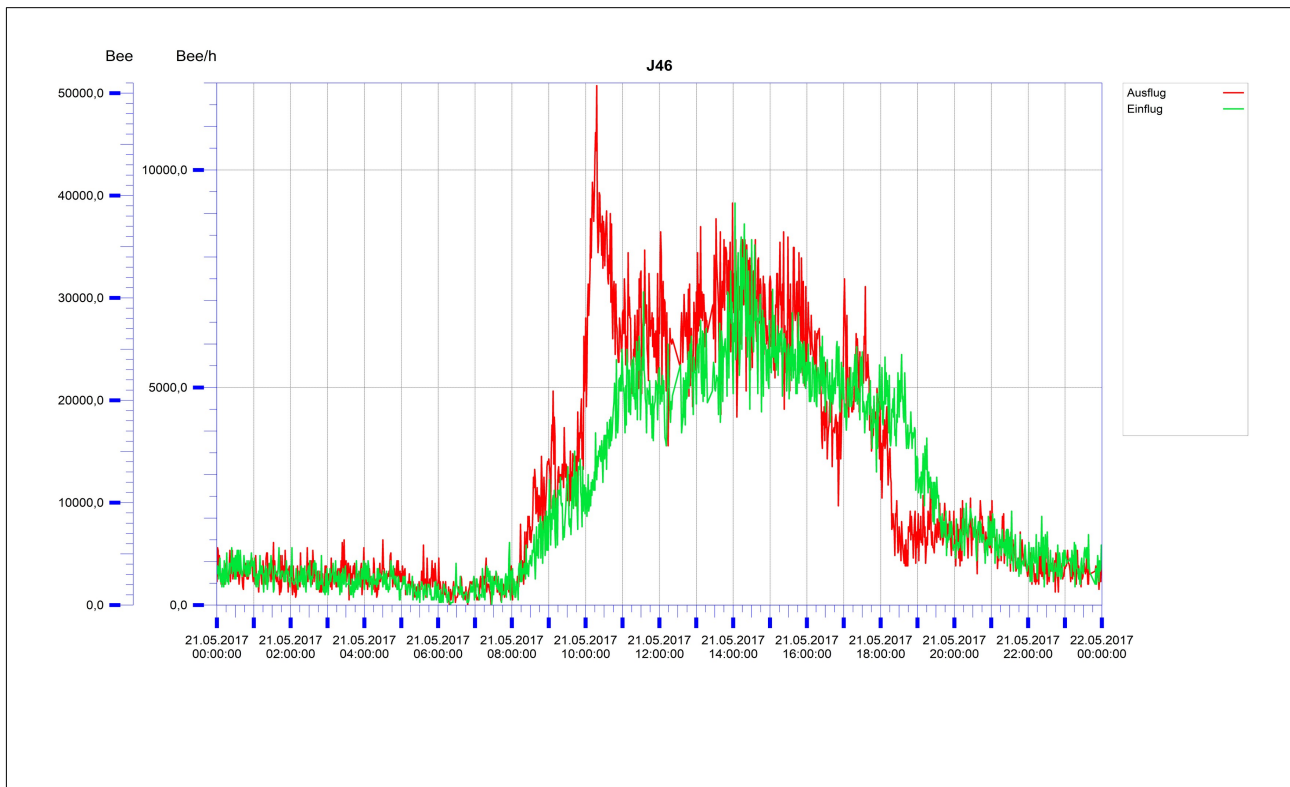


Abbildung 17: Aktivitätskurve

## 5.6 Versuchsreihe 6: Versuche mit unterschiedlichen Durchlassbreiten

Um auszuschließen, dass Bienen gleichzeitig aus unterschiedlichen Richtungen kommend die Eingänge passieren, wurden die Durchlässe in Stufen von 0,5 mm verringert und erneut Versuche durchgeführt.

Mit den verringerten Durchmessern konnte eine Verbesserung erzielt werden, jedoch führte es dazu, dass Drohnen die Ein- und Ausgänge nur noch schwer passieren konnten. Die Durchmesser wurden deshalb wieder vergrößert und es wurde versucht, die gelegentlich auftretenden Verhaltensweisen durch eine besondere Behandlung im Auswertungsalgorithmus korrekt zu erfassen.

## 5.7 Versuchsreihe 7: Arbeiten im Rahmen der Projektverlängerung

Durch die Projektverlängerung konnte der zur Verfügung stehende Datenbestand erheblich vergrößert werden. Um die Funktion des Auswertungsalgorithmus zu überprüfen und zu verbessern wurden 3 Methoden angewendet.

1. Vergleich der Resultate mit den über mehrere Minuten aufgezeichneten Videos, die manuell ausgezählt wurden  
Die manuell ausgezählten Videoaufzeichnungen lieferten belastbare Referenzdaten. Die Aufzeichnungen erfolgten tagsüber unter durchschnittlichen Wetterbedingungen mit unterschiedlich aktiven Bienen.
2. Räuberversuche  
Besondere Bedeutung kommt dabei den durchgeführten Räuberversuchen zu. Die Zahl der ein- und ausfliegenden Bienen ist dabei genau bekannt und lässt sich mit den automatisch ermittelten Daten vergleichen. Das Bewegungsmuster der Bienen unterscheidet sich bei Räuberversuchen aber erheblich von dem regulären Verhalten. Die Bienen durchschreiten die Sensordurchgänge entschlossener, lange Verweildauern in den Durchgängen sind eher die Ausnahme.
3. Langzeitbeobachtung über mehrere Wochen an regulären Bienenstöcken  
Langzeitversuche über mehrere Wochen, unter regulären Bedingungen, liefern keine präzisen Referenzzahlen. Dennoch sind sie für die Funktionsüberprüfung sehr wichtig gewesen. Die Ergebnisse zeigten z.B., dass sich einzelne Bienen in den Nachtstunden am Flugloch aufhalten. Dabei durchschreiten sie immer wieder die Sensoren oder führen auch nur eine Vor- und Zurückbewegung in den Durchgängen aus. Jede Überschreitung der Sensormitte löst einen Zählvorgang aus. Durch ihre besonders langsame Bewegungen ist es schwer die Bewegungsrichtung korrekt auszuwerten. Werden diese als Ausflug statt als Einflug gezählt, liefert die automatische Zählung in der Summe Verluste, die aber gar nicht stattgefunden haben.

### 5.7.1 PC Simulation

Die Videoaufzeichnungen der Bienenvölker wurden von Mitarbeitern des JKI detailliert analysiert und mit den Resultaten des kontinuierlich verbesserten Berechnungsalgorith-

mus verglichen. Der Berechnungsalgorithmus wurde dabei auf leistungsfähigen PCs simuliert und auf die aufgezeichneten Rohdaten angewendet.

Dadurch war es möglich eine Vielzahl von Verbesserungen des Berechnungsverfahrens zu überprüfen, ohne die Versuche mit den Bienen wiederholen zu müssen.

Die erforderliche Rechenleistung steigerte sich mit zunehmendem Datenbestand. Während der regulären Arbeitszeiten wurde die Resultate von Mitarbeitern ausgewertet, die Schwachstellen analysiert und der Schwerpunkt für die Parametrierung des nächsten Rechnerdurchlaufes festgelegt. Dabei wurden durch die PC-Simulation in der Regel nicht der gesamte Datenbestand neu ausgewertet, sondern nur Aufzeichnungen die eine besonders Auffälligkeit aufwiesen. Dennoch war für einen Simulationsdurchlauf die ganze Nacht bis zum Beginn des nächsten Arbeitstages erforderlich. Dieser enorme Zeitbedarf ist dadurch erklärlich, dass ein leistungsfähiger PC zwar eine mehr als 100-fach höhere Rechenleistung hat, aber die Prozessoren in den Geräten den gesamten Tag parallel zu ihren anderen Aufgaben daran arbeiten können, die Daten zu analysieren. Multipliziert man also die Anzahl der auszuwertenden Geräte mit der Versuchsdauer, dann sieht man, dass mit der die Rechenleistung eines PCs in einer Nacht nur ein begrenzter Datenbestand bearbeitet werden kann.

## 5.8 Ergebnis der Feldversuche

Die Feldversuche haben gezeigt, dass das Verhalten der Bienen im Bereich des Flugloches wesentlich komplexer ist, als zu Beginn des Projekts angenommen.

Auf keinen Fall darf man davon ausgehen, dass die Randbedingungen der Versuche konstant sind und somit reproduzierbare gleichartige Rohwerte für die Analyse zur Verfügung stehen.

Abhängig von Faktoren wie Tageszeit, Witterungsbedingungen, Jahreszeit und Nahrungsangebot verändert sich das Verhalten der Bienen beim Ein- und Ausflug grundlegend.

Bei den Versuchen in der zweiten Saisonhälfte bewegten sich die Bienen viel träger und unentschlossener durch die Messeinrichtung. Zudem verweilten sie nach der Passage direkt vor dem Flugloch und versperrten für nachfolgende Bienen den Ausgang. Das führte dazu, dass sich häufig mehrere Bienen über längere Zeit gleichzeitig über und nebeneinander in den Eingängen aufhielten und eine individuelle Zählung in solchen Fällen nicht mehr erfolgen konnte. Auch an den Rohwerten der kapazitiven Messungen war dieses Verhalten ablesbar. Gleichzeitige Videoaufzeichnungen bestätigten die Messwerte.



Es wurde nach geeigneten Möglichkeiten gesucht, die Ein-/Ausgänge so zu gestalten, dass dieses Verhalten die Erfassung nicht negativ beeinflusst oder die Datenanalyse dahingehend zu optimieren, dass sie auch diese weniger aussagekräftigen Rohwerte noch mit hoher Trefferquote korrekt verarbeitet.

## **5.9 Wetterbedingte Beeinträchtigungen der Versuche**

Die ungewöhnlich trockene Witterung während der Versuche Jahr 2018 führte zu der Fehleinschätzung, dass die Geräte ausreichend witterungsbeständig wären. Der Vergleich der Niederschlagswerte der Jahres 2019 mit denen des Jahres 2018 zeigt sehr deutlich, dass die Niederschlagsmenge in den Sommermonaten des Jahres 2019 die Mengen des Jahres 2018 um ein vielfaches übertrafen. Für die durchgeführten Versuche sind jedoch nicht die durchschnittliche Mengen ausschlaggebend, sondern besonders die Art der Regenergebnisse bezogen auf den Ort der durchgeführten Versuche. Während im Jahr 2019 generell kaum Niederschlag fiel und die langen heißen und trockenen Perioden nach einem Regen schnell zum Abtrocknen der Geräte führte, war die Situation im Sommer 2019 grundlegend anders. In den Sommermonaten traten mehrfach kurze, aber heftige, Niederschläge auf. Während des Versuchszeitraums gab es 2019 an 12 Tagen starken Niederschlag. Im selben Zeitraum des Vorjahres waren es nur 3 Tage und der höchste Tageswert lag nur bei der halben Menge.

Die starken Niederschläge waren mit einem markanten Temperaturabfall und starken Windböen verbunden. Bei Geräten bei denen die Niederschläge durch die vorherrschende Windrichtung direkt in Richtung des Flugloches auf die Bienenstöcke gedrückt wurden, drang Wasser durch alle Ritzen und das Flugloch selbst in die Geräte ein.

In mehreren Schritten wurde versucht die dadurch beeinträchtigten Messungen aufrechtzuerhalten. Jedoch wurde bei dem ersten Ereignis das Wasser bis an die elektronischen Baugruppen gedrückt und diese dadurch außer Funktion gesetzt. An sieben der sechzehn Geräte musste die Elektronik ganz oder zumindest teilweise ausgetauscht werden. Wenn der Schaden erkannt wurde, bevor Korrosionsschäden auftraten, konnten die Baugruppen wieder instandgesetzt werden. In den anderen Fällen mussten neue Baugruppen angefertigt und eingebaut werden.

Die getroffenen Schutzmaßnahmen bestanden aus einer nach außen abfallenden transparenten Abdeckung über dem Flugloch, Abdichtung der Spalten auf der Gerätevorderseite

und der Anbringung eines Regenschutzes über dem Bienenstock. Darüber hinaus wurde die Elektronik in den Geräten zusätzlich in eine wasserdichte Hülle geschweißt.

Die bei den Geräten erst zu Saisonbeginn angebrachten Wechselspeicher (SD Karten) mussten wieder zurückgebaut werden, weil die Platzierung zwar gut zugänglich, aber mit ihrer Anordnung im vorderen, unteren Gerätebereich für eindringende Feuchtigkeit auch besonders sensibel war. Sie wurden daraufhin auch in die wasserdichte Hülle der restlichen Elektronik mit eingeschweißt, was aber den Zugriff erschwerte.

Die beschriebenen Maßnahmen erfolgten nicht in einem Zuge, sondern sukzessive aufgrund der gemachten Erfahrungen.

Um etwaige Störungen frühestmöglich zu erkennen und Datenlücken zu vermeiden, wurden die Geräte durch die Mitarbeiter des JKI viel häufiger kontrolliert als es eigentlich vorgesehen war. Besonders nach starkem Regen konnten Folgeschäden durch das Wasser auf ein Minimum beschränkt werden, wenn ein Schaden durch eine Kontrolle rechtzeitig erkannt wurde.

Da eingedrungenes Wasser auch die Batterien durch Kriechströme beeinträchtigte, mussten in allen betreffenden Fällen auch neue Batteriepacks angefertigt und eingebaut werden. Weil die Geräte an verschiedenen Standorten eingesetzt wurden und nur wenige Arbeiten direkt vor Ort durchgeführt werden konnten, war die Behebung der Schäden, die kurzfristige Anfertigung von Ersatzbaugruppen und Batteriepacks sowie die Durchführung der oben angeführten Maßnahmen mit einem erheblichen zusätzlichen Zeitaufwand für die JKI und GERO Mitarbeiter verbunden.

Erst gegen Ende der Versuche wurde durch die Summe aller Maßnahmen ein betriebssicherer Zustand, trotz der Niederschläge, erreicht.

## **5.10 Funktionsbeschreibung des Auswertungsalgorithmus**

Bei dem Auswertungsalgorithmus handelt es sich um ein in der Programmiersprache C++ geschriebenen Programmteil, der aus den Rohdaten die Anzahl der ein- und ausfliegenden Bienen berechnet.

An den numerischen Sensordaten lässt sich bestenfalls erkennen, dass eine Biene an einem der Durchgänge erscheint. Erst die grafische Darstellung der Sensordaten auf einem PC ermöglicht einen Rückschluss auf das Bewegungsverhalten. Mit fortschreitender Verbesserung des Auswertungsalgorithmus war es erforderlich auch die Darstellungsqualität

für die Sensorrohwerter auf einem PC zu verbessern. Nur so war es möglich Aussagen über das Verhalten der Bienen innerhalb des 15mm langen Sensorfeldes zu treffen.

Im Rahmen des Projektes wurde deshalb eine grafische Darstellungssoftware als Werkzeug zur Veranschaulichung der Rohdaten erstellt. Die Resultate wurden u.a. als Kurvenmuster dargestellt, an denen sich das Verhalten der Bienen ablesen ließ. Durch eine freie Programmierbarkeit von zeitlichen Parametern, mathematischen Zusammenhängen sowie definierbaren Grenzwerten und Bedingungen konnte die zu erwartende Funktion des später in den Geräten arbeitenden Auswertungsalgorithmus schon vorab simuliert werden. Zwischenergebnisse, die sich aus mehreren Einzelparametern zusammensetzten, konnten zusätzlich dargestellt und ihre Aussagekraft an Hand des Kurvenverlaufs geprüft werden.

Eine grundlegende Funktion war dabei die Unterdrückung von feuchtigkeits- und temperaturbedingten Drifteffekten.

Die hohe Auflösung der Sensordaten erlaubt sogar die Körperkontur der Bienen im Kurvenverlauf der Rohdaten zu erkennen. Für die reine Zählung und Erkennung der Bewegungsrichtung ist dies jedoch nachteilig. Denn eine Biene löst beim Überschreiten der Sensorelemente nicht ein markantes Maximum in der Körpermitte aus, sondern mindestens 2 oder sogar mehr, wenn sie leicht vor und zurück tänzelnd über die Sensorfelder bewegt.

Es war daher Ziel mittels geeigneter Filterfunktionen die Körpermitte zu berücksichtigen, ohne durch die Filterung wichtige Informationsgehalte zu verlieren. Die große Spannweite der Bewegungsgeschwindigkeit machte es dabei äußerst schwer die Parameter des Filters festzulegen.

Anschaulich beschrieben wurde anschließend versucht festzustellen, ob die Körpermitte der Biene die Mitte des 7-teiligen Sensorfeldes überschritten hat. Die Methode die Werte der 3 ersten und der 3 letzten Felder einzeln zu summieren und anschließend miteinander zu vergleichen zeigte für Bienen, die nicht zu lange in den Durchgängen verweilten, gute Ergebnisse. Durch eine geeignete Wichtung konnten die Resultate noch verbessert werden.

Allerdings traten bei sehr langsamen und auch bei dicht aufeinanderfolgenden Bienen spezielle Probleme auf. Wenn eine Biene mehr als eine Minute bewegungslos in einem Durchgang verweilte, wurde der nun auf allen 7 Sensorfeldern konstant höhere Wert von der Software als Drift interpretiert und die Filterung entsprechend angepasst. Eine Verschie-

bung des zeitlichen Limits, ab dem ein konstant höherer Wert aller Sensorfelder als neuer Bezugswert übernommen wurde, war nicht erfolgreich. Denn es konnte beobachtet werden, dass die Bienen nahezu beliebig lange in den Durchgängen verweilten.

Bei dicht aufeinanderfolgenden Bienen tritt ein anderes systematisches Problem des Verfahrens auf. Wenn eine Biene gerade die letzten 3 Sensorfelder verlässt, also der Summenwert dieser 3 Felder höher ist als der Summenwert der 3 ersten Sensorfelder, und im nächsten Augenblick eine andere Biene die ersten Felder betritt, dann ergeben sich die selben Bedingung als wenn die erste Biene wieder zurückläuft. Eine gedachte Wippe, über die die Bienen schreiten, würde in beiden Fällen wieder zurück kippen.

Abhilfe konnte die zusätzliche Auswertung der mittleren Sensorfelder bringen. Ein Zurückkippen der gedachten Wippe darf nur dann als gültiges Durchschreiten erkannt werden, wenn eine Biene zuvor in der Mitte der 7 Felder lokalisiert wurde. Ein Zurückkippen, ohne dass diese Bedingung erfüllt ist, bedeutet es darf nicht gezählt werden, weil kein Transit erfolgt ist, sondern gerade eine andere Biene, der ersten Biene folgend, die Wippe betritt.

Nur durch eine Vielzahl weiterer Bedingungen war es möglich den zahlreichen, beobachteten Sonderfällen Rechnung zu tragen und diese korrekt auszuwerten. Dazu gehört z.B der Fall, dass sich 2 Bienen gleichzeitig in Gegenrichtung in einem Durchgang begegnen und eine der beiden die andere vor sich her aus dem Durchgang schiebt.

Eine entscheidende Verbesserung der Zuverlässigkeit wurde dadurch erreicht, dass es gelang softwaremäßig die Kontur der Bienen im Sensorfeld zu erkennen und diese beim Passieren der Durchgänge zu verfolgen.

Eine besondere Herausforderung war die anschließende Vereinfachung des Berechnungsverfahrens. Nur so konnte erreicht werden, dass die Berechnung direkt im Gerät erfolgt. Denn die nur begrenzt zur Verfügung stehende Energie der Batterien und die dadurch begrenzte Rechenleistung des Prozessors hätten sonst nicht ausgereicht.

Der aktuelle Stand stellt eine Kombination aus verschiedenen, parallel arbeitenden Auswertungsfunktionen dar. Durch einen Bewertungsparameter wird das Bienenverhalten zusätzlich in Kategorien eingeteilt und die Funktion mit der erfahrungsgemäß höchsten Trefferquote für das betreffende Verhalten für die Auswertung herangezogen.

## 5.11 Verifikation mit Videoaufzeichnungen

Die Überprüfung und Bewertung des Auswertungsalgorithmus erforderte es, die tatsächliche Anzahl der ein- und ausfliegenden Bienen über einen begrenzten Zeitraum zu bestimmen.

Im Rahmen der Projektverlängerung wurden deshalb vom JKI 32 Versuche mit paralleler Videoaufzeichnung durchgeführt. Dabei wurden alle 24 Durchgänge des Flugloches gleichzeitig aufgezeichnet. Die Qualität der Videoaufzeichnungen vor dem Flugloch waren qualitativ so gut, dass auf die ursprünglich ebenfalls geplante Aufzeichnung in den Durchgängen mittels Infrarotkamera verzichtet wurde.

Die große Zahl der gleichzeitig ein- und ausfliegenden Bienen bedingte, dass man jeden Durchgang einzeln, manuell auszählen musste. Wenn kurz nacheinander mehrere Bienen in unterschiedlichen Richtungen einen Durchgang durchschritten, war es nur durch vielfach wiederholtes Ansehen der Filmausschnitte möglich die Bienen korrekt zu zählen. Der zeitliche Aufwand für die sorgfältige Auszählung betrug je Durchgang ca. das dreifache des Auswertungszeitraums. Für die 24 Durchgänge wurden somit für die manuelle Auswertung einer Minute Videoaufzeichnung mehrere Stunden benötigt.

Die Arbeiten wurden von Mitarbeitern des JKI durchgeführt. Sie erforderten hohe Konzentration und konnten nur mit ausreichend Pausen geleistet werden.

Für die Videoaufzeichnungen wurden 9 der Geräte eingesetzt. Ein beispielhaftes Ergebnis der manuellen Videoauswertung eines Versuches ist im Anhang beigefügt (Abbildungen 25 bis 27, Seite 59 bis 61). Das Resultat des automatischen Auswertungsalgorithmus besteht nur aus den zwei Summenwerten für ein- und ausfliegende Bienen. Ein direkter Vergleich, zu welchem Zeitpunkt eine Biene in welchem Durchgang eine Zählung ausgelöst hat, wird in den Summenwerten nicht berücksichtigt. Zur Überprüfung und Klärung von Abweichungen können die Informationen aber aus den aufgezeichneten Rohwerten entnommen werden.

Besonders wichtig war dabei die Synchronität des Betrachtungszeitraums zwischen der Videoaufzeichnung und der automatischen Auswertung in den Geräten. Die nahezu pausenlos ein- und ausfliegenden Bienen konnten dazu führen, dass bereits bei einer Sekunde Abweichung Bienen in der Videoaufzeichnung bereits erfasst wurden, während in der ständig laufenden automatischen Auswertung diese Bienen noch unberücksichtigt blieben.

Eine Abweichung von bis zu ca.10 Bienen wäre die Folge gewesen. Bei einer Gesamtzahl von 800 Bienen, während eines 3 minütigen Zeitraums, wäre eine scheinbare Abweichung von über 1% die Folge.

Durch einen Vergleich der Rohwertkurven konnte an dieser Stelle gewährleistet werden, dass die Betrachtung mit den selben Bienen am selben Sensordurchgang startete und auch ebenso endete.

Als Resultat der Versuche wurde eine mittlere Abweichung der automatischen Auswertung von kleiner 8% gegenüber den Videoauswertungen ermittelt.

Wir danken besonders Frau Alina Gombert und Herrn Sven Bermig vom Institut für Bienenforschung am Julius Kühn-Institut in Braunschweig für ihre Einsatzbereitschaft bei der Durchführung und der Auswertung der Feldversuche.

## 6 Ergebnisse

Für die ersten Versuche unter Laborbedingungen wurden einzelne Sensoreinheiten mit optischer und kapazitiver Erfassung erstellt. Damit wurden einzelne Bienen und Paare von Bienen beobachtet, die sich in einem sehr dünnwandigen und optisch durchlässigen Rohr bewegten.

Die Messreihen zeigten, dass die optische Erfassung mit zwei Lichtschranken zwar funktionierte, aber die Bewegungsrichtung nicht mit der angestrebten Verlässlichkeit festgestellt werden konnte. Nachfolgend wurde zunächst nach der Ursache gesucht und anschließend verschiedene Optimierungen durchgeführt.

Die Erfassung der Bienen mittels des kapazitiven Messverfahrens zeigte dagegen eine sehr gute Ansprechempfindlichkeit. Um diese weiter zu verbessern, wurde die ursprüngliche Sensoreinheit von einem auf zunächst 3 größere, dann auf 7 sehr kleine dicht hintereinander liegende Messfelder geändert. Damit erlaubte die kapazitive Messung nicht nur den Rückschluss auf die Größe der Bienen, sondern lieferte zusätzlich die Information der Bewegungsrichtung.

Für die Analyse der Rohdaten wurden verschiedene mathematische Funktionen erstellt und auf einem PC im Vergleich getestet. Die Analysefunktionen wurden solange optimiert, bis die einzelnen Bienen und Ihre jeweilige Bewegungsrichtung korrekt erkannt wurden. Erst dann wurde eine entsprechende Analysefunktion für die Steuerungsrechner des Feldsystems erstellt.

Die erzielte Auflösung bzw. Messgenauigkeit der Kapazitätsmesswerte scheinen aus derzeitiger Sicht nicht nur hinsichtlich der Amplitude, sondern auch in zeitlicher Hinsicht völlig ausreichend zu sein. Beides ließe sich bei Bedarf noch steigern, ginge aber zu Lasten des Stromverbrauchs. Die derzeitige messtechnische Präzision erlaubt bereits die Kontur eines Bienenkörpers mit Brustkorb und Hinterleib zu unterscheiden. Eine Anwendung für diese über die Planungen hinausgehende Möglichkeit ist noch nicht absehbar.

Für die Freilandversuche wurden komplette Systeme inklusive Gehäuse erstellt. Optische Sensoreinheiten mit 4 Lichtschranken sowie kapazitive Sensoreinheiten mit 3 bzw. 7 Kondensatoren je Ein-/Ausgang wurden getestet. Dabei bestätigten die kapazitiven Sensoren

nicht nur die geringere Empfindlichkeit gegen Verschmutzung, sondern zeigten in dieser Konfiguration auch, dass durch den Einsatz der optischen Sensoren kein zusätzlicher Informationsgehalt zu gewinnen war. Im weiteren wurde deshalb auf die optischen Sensoren verzichtet und die 24 Ein-/Ausgänge des Flugloches der aktuellen Version nur noch mit einer ausschließlich kapazitiv abtastenden Sensoreinheit ausgestattet.

Es konnten leider nicht alle geplanten Versuche innerhalb des ursprünglich gesetzten Zeitrahmens durchgeführt werden. Die extrem heiße und trockene Witterung im Jahr 2018 beeinträchtigte die zusätzlich Ergebnisse. Im Sommer und Herbst 2019 wurden noch weitere Langzeitversuche durchgeführt, bei denen u.a. die Alltagstauglichkeit überprüft wurde. Häufige und starke Niederschläge im Sommerhalbjahr zeigten noch bestehende Schwachstellen auf, die noch während der Versuche beseitigt wurden.

Das entwickelte System lieferte aussagekräftige Rohwerte der Kapazitätsänderung, wenn sich eine Biene durch einen der 24 Ein-/Ausgänge bewegt. An den aufgezeichneten Ein- und Ausflugdaten waren insbesondere Niederschlagsereignisse sofort ablesbar.

Die Überprüfung u.a. anhand von Räubertests ergab jedoch, dass die angestrebte Genauigkeit für quantitative Auswertungen noch nicht erreicht war. Auf der Suche nach den Ursachen wurde durch die Auswertung der Rohdaten und den Vergleich mit einer Videoaufzeichnung klar, dass die Bienen ein wesentlich komplexeres Bewegungsverhalten zeigen, als vor den ersten Messergebnissen angenommen. Abhängig von der Tageszeit, Lufttemperatur, Niederschlag, Jahreszeit und anderen Faktoren zeigen die Bienen unterschiedliche Verhaltensmuster.

Um eine Vielzahl unterschiedlicher Auswertungsalgorithmen testen zu können, ohne die Versuche wiederholen, wurde die Auswertung ab Mitte 2018 auf einem PC simuliert. Dadurch konnte der gesamte Rohdatenbestand vielfach mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung ausgewertet werden. Das Berechnungsverfahren mit den optimalsten Ergebnissen wurde anschließend in den Geräten installiert.

Mit der Analysesoftware ist es online möglich, die Bewegungsrichtung der Bienen zu bestimmen und mit einer Auflösung von 3 % ihre Körpermasse zu bestimmen. Die Toleranz bei der Erkennung der Anzahl aus- und einfliegender Bienen liegt mit 8 % noch über dem angestrebten Wert.



## 6.1 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Das entwickelte Gerät könnte als Standardsystem für die versuchsbegleitende Überwachung der Bienenvitalität für die Zulassung von Pflanzenschutz- und Düngemitteln eingesetzt werden. Reproduzierbare Ergebnisse können die derzeit üblichen Schätzungen ersetzen und helfen die Anzahl der benötigten Versuchsreihen zu reduzieren.

Auf diese Weise könnten neue Produkte mit guter Umweltverträglichkeit schnelleren Marktzugang finden und auch in kürzerer Zeit der Nachweis erbracht werden, wenn Stoffe einen negativen Effekt auf die Vitalität der Bienen haben.

Der über lange Zeiten wartungsfrei verlaufende Betrieb und die optionale Fernbedienbarkeit helfen die Anzahl der Kontrollbesuche zu minimieren. Die mit den Fahrten zu weiter entfernten Standorten verbundenen Schadstoffemissionen werden dadurch reduziert.

Die online Verfügbarkeit der Messdaten und Betriebsparameter wirkt sich positiv auf die Reaktionszeiten in Störfall aus.

Die Stromversorgung durch handelsübliche quecksilberfreie Alkaline Batterien ermöglicht einen Einsatz auch an entlegenen Standorten ohne eine Netzversorgung herstellen zu müssen. Der Einsatz von Lithiumbatterien wurde bewusst vermieden. Durch den extrem niedrigen Stromverbrauch bleibt die Anzahl der benötigten Batterien gering. Gleichzeitig ergibt sich mit einem Batteriesatz eine durchgehende Einsatzdauer von 9 Monaten. Weil keine anderen Verbrauchsmaterialien anfallen und 85% des Gerätes aus Fichtenholz besteht, ist die Umweltbelastung damit auf ein Minimum beschränkt.

Die Sensoreinheit und der Prozessorkern enthalten keine Materialien oder Bauteile, deren Einsatzdauer durch Alterung beschränkt ist. Es wurde konstruktiv angestrebt den Anwendern eine maximale Nutzungsdauer zu ermöglichen, um so Abfälle durch vorzeitigen Ausfall zu vermeiden. Die Holzbauteile sind bei Bedarf einfach austauschbar.

## 6.2 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Mehrere auf ausgewählte Fachkreise beschränkte Vorstellungen führten zu einer durchweg positiven Reaktion und bestätigten durch konkretes Interesse die Alleinstellungsmerkmale des entwickelten Gerätes.

Die Vorstellung auf Tagungen und Kongressen sowie in der Fachpresse ist in Vorbereitung.

## 7 Fazit

Nach dem Projektstart im Jahr 2015 wurde zunächst grundlegende Entwicklungsarbeit geleistet um im Labormaßstab optische und auch kapazitive Erfassung von ein- und ausfliegenden Bienen zu realisieren. Beide Verfahren wurden verglichen, optimiert und anschließend so weiterentwickelt, dass sie in Form von autark arbeitenden Geräten unter gängigen Bienenstöcken eingesetzt werden konnten.

Dazu wurden Gehäuse, ein Prozessorsystem, die beiden Sensoreinheiten, die Betriebssoftware, PC- Bediensoftware und eine grafische Darstellungssoftware für Rohdaten entwickelt. Von den zwei gegenübergestellten Sensorsystemen zeigte nur das auf einem kapazitiven System beruhende gute Ergebnisse. Die optische Erfassung wurde u.a. wegen der Empfindlichkeit gegen Verschmutzungen nicht weiter verfolgt.

Es ist gelungen ein über 9 Monate batteriebetrieben arbeitendes Gerät mit allen benötigten Einzelkomponenten zu entwickeln.

Zur Durchführung der Feldversuche wurden 16 Geräte erstellt und zum Einsatz gebracht. Dabei konnten sie durch Ihren mehrjährigen Einsatz die Praxistauglichkeit nachweisen. Bei dem mehrmonatigen Einsätzen im Freien ergaben sich jedoch noch Verbesserungsmöglichkeiten in mechanischer Hinsicht. Die Betriebssicherheit bei starken Niederschlägen war ein Schwachstelle, die aber noch während der Versuche ausgeräumt werden konnte. Anhand der mittels Videoaufzeichnung und manueller Auszählung ermittelten Referenzzahlen wurde der automatische Auswertungsalgorithmus entwickelt und überprüft. Eine Optimierung zur Steigerung der Genauigkeit der ermittelten Ein- und Ausflugzahlen ist wünschenswert und geplant.

Die bereits jetzt erreichte Betriebssicherheit der neu entwickelten Geräte ist überdurchschnittlich. Damit konnte die Grundlage für die Weiterentwicklung zu einem serienreifen Messgerät für den Einsatz im Umweltschutz und Forschung geschaffen werden.

Der Praxistest der Geräte ergab von Seiten des JKI folgende Verbesserungsvorschläge und Anforderungen:

- Die Bedienung der Geräte sollte seitlich oder von hinten erfolgen.
- Die kleinen herausnehmbaren Belüftungsgitter im Gehäuseboden können entfallen, statt dessen sollte der gesamte Boden zur Belüftung mit einem Gitter versehen sein.

- Die Elektronik mit Sensoren und die Aufzeichnungselektronik sollte besser in einen herkömmlichen Beutenboden passen.
- Um den Bienen mehr Halt zu geben, sollte die schräge Fläche des Flugloches flacher und aus unbehandeltem Holz gefertigt sein.
- Die Geräte sollten über eine Funkuhr verfügen oder die interne Uhr über die Datenfernabbindung stellen.
- Die Datenfernabbindung mit der Möglichkeit des Datenabrufs und der Funktionskontrolle ist essentiell.
- Der Wechselspeicher sollte einfacher erreichbar sein und jederzeit Zugriff auf die Daten bieten.
- Die Geräte sollten so gestaltet werden, dass sie auch mit anderen Beutenmaßen kompatibel sind (z.B. Deutsch Normalmaß und Langstroth)

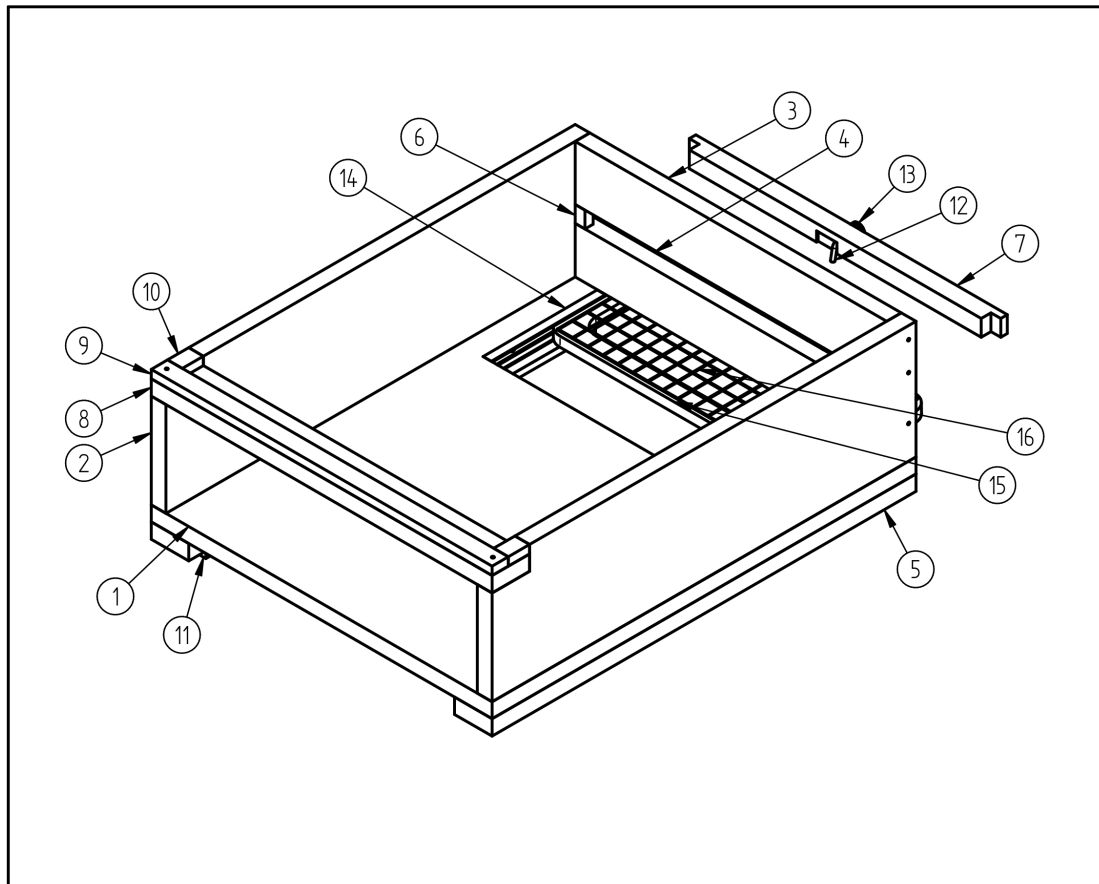
Im Rahmen eines Folgeprojektes „VIBee“ zur Etablierung digitaler Indikatoren der Bienenvitalität in Agrarlandschaften, das federführend von Herr Dr. Jens Pistorius vom JKI initiiert wurde, soll der Bienenzähler zur Serienreife gebracht und eine erste Serie geliefert werden. Die Firma GERO tritt dabei, zusammen mit anderen Firmen und Instituten, als Projektpartner auf. Die Förderung des Projektes durch die Deutsche Innovationspartnerschaft Agrar (DIP) wurde im Jahr 2019 beantragt.

## **8 Anhänge**

### **8.1 Zeichnungen**



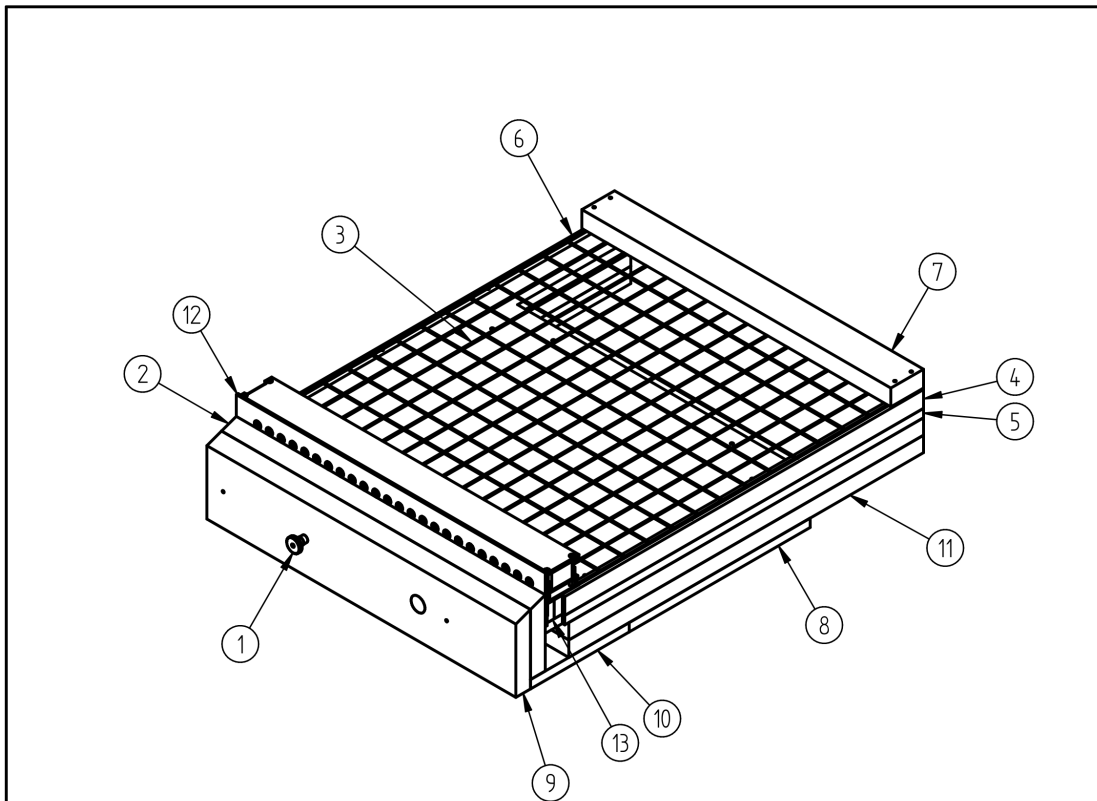
Abbildung 18: Gesamtansicht im montierten Zustand



Pos.	Titel	Menge	Zeichnung
1	Gehäuse - Basisplatte	1	13
2	Gehäuse - Seitenplatte	2	11
3	Gehäuse - Rückseite - Oben	1	
4	Gehäuse - Rückseite - Unten	1	
5	Basisleiste	2	
6	Gehäuse - Anschlag Verschlussleiste	2	
7	Gehäuse - Verschlussleiste	1	14
8	Gehäuse - Front - Rahmen lang	1	
9	Gehäuse - Front - Rahmen kurz	1	
10	Gehäuse - Front - Rahmen Füllstück	2	
11	Basisleiste - Isolation	2	12
12	Gehäuse - Verschlussleiste - Haken	1	118
13	Rändelmutter DIN 466 - M4	1	
14	Gehäuse - Alu-Profil	2	1.
15	Gehäuse - Einschubrahmen	1	
16	Gehäuse - Gaze - Einschubrahmen	1	

Maßstab 1,5	Blatt 2 von 26
(Werkstoff) Diverse	
(Benennung) Aufbau - Schubfach	

Abbildung 19: Aufbau Schubfach



Pos.	Titel	Menge	Zeichnung
1	Schublade - Griff	1	
2	Schublade - Untere Front	1	15
3	Gaze	1	
4	Schublade - Gaze - Längs - Seite B	1	18
5	Schublade - Gaze - Boden	1	16
6	Schublade - Gaze - Längs - Seite A	1	
7	Schublade - Gaze - Abdeckleiste	1	
8	Schublade - Boden B	1	1.12
9	Schublade - Blende	1	1.13
10	Schublade - Boden A	1	1.11
11	Schublade - Fach	1	
12	Sensorik	1	
13	Schublade - Gaze - Quer	1	1.7

Maßstab	1,5	Blatt	3 von 26
(Werkstoff)	Diverse		
(Benennung)	Aufbau - Schublade		

Abbildung 20: Aufbau Schublade

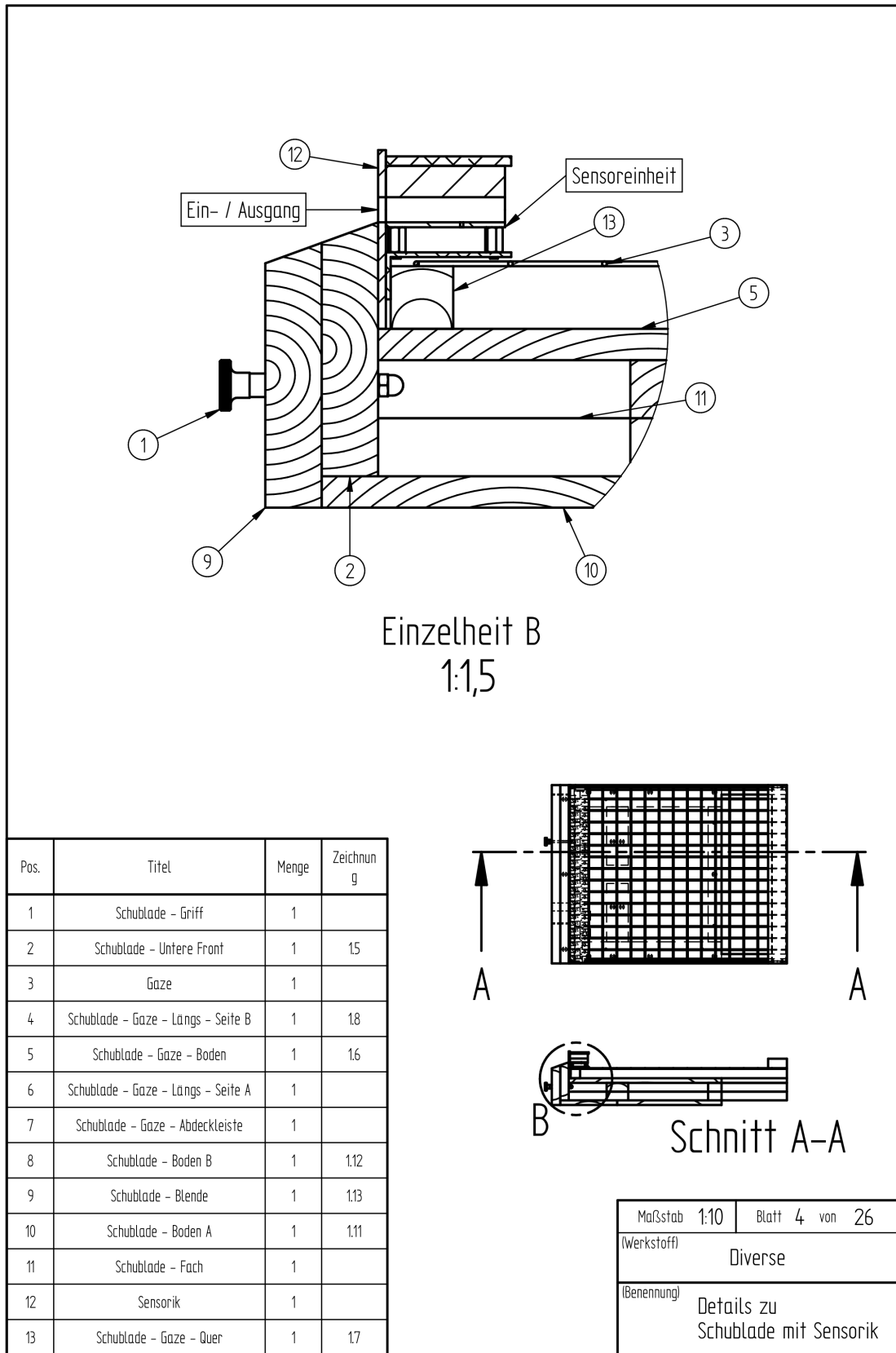


Abbildung 21: Details zu Schublade mit Sensorik



## 8.2 Bilder Feldversuche



Abbildung 22: Gerät im Feldversuch



Abbildung 23: Flugloch mit Sensoreinheit



*Abbildung 24: Videodokumentation parallel zur Messung*





