

Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science

Einfluss der anthropogenen Luftverschmutzung auf das Insektensterben am Beispiel des Wirtschaftsstandortes Jena

| | |
|--------------------------|---|
| eingereicht von: | Hanjo Beyer |
| geboren am: | 19.11.1993 |
| Hochschule: | Ernst-Abbe-Hochschule Jena |
| Bachelorstudiengang: | Wirtschaftsingenieurwesen (Industrie) |
| Matrikelnummer: | 643051 |
| Hochschulbetreuer: | Prof. Dr. Andreas Schleicher |
| Praxisbetreuer: | Dr. Markus Knaden |
| Institution: | Max-Planck-Institut für chemische Ökologie Jena |
| Datum der Themenausgabe: | 14.06.2021 |
| Abgabedatum: | 03.09.2021 |

Ehrenwörtliche Erklärung und Einverständniserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die inhaltlich oder wörtlich aus Veröffentlichungen stammen, sind kenntlich gemacht. Diese Arbeit lag in der gleichen oder ähnlichen Weise noch keiner Prüfungsbehörde vor und wurde bisher noch nicht veröffentlicht.

Hiermit erkläre ich mich mit der Einsichtnahme in meine Abschlussarbeit im Archiv der Bibliothek der EAH Jena einverstanden.

Jena, 03.09.2021

Hanjo Beyer

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis..... | 4 |
| 1. Einleitung | 5 |
| 1.1 Zielstellung der Arbeit..... | 6 |
| 2. Forschungsstand..... | 6 |
| 2.1 Ausmaß des Insektensterbens..... | 6 |
| 2.1.1 Westeuropa..... | 6 |
| 2.1.2 Weltweit..... | 9 |
| 2.2 Ökologische Wechselbeziehungen | 9 |
| 2.3 Wirtschaftliche Folgen des Insektensterbens | 10 |
| 3. Schadstoffbelastungen in der Luft | 12 |
| 3.1 Störung der Geruchswahrnehmung der Insekten | 12 |
| 3.2 Anthropogene Luftverschmutzung und Ozonbildung..... | 13 |
| 4. Versuchsvorbereitung..... | 15 |
| 4.1 Verwendete Technik | 15 |
| 4.2 Züchten der Versuchsfiegen..... | 16 |
| 4.3 Versuchsaufbau und Vorbereitung..... | 18 |
| 5. Versuchsauswertung | 20 |
| 5.1 Versuch V1 - prüfen des Versuchsaufbaus | 20 |
| 5.2 Versuch V2, V3 - Ozonmessungen an unterschiedlichen Standorten..... | 22 |
| 5.3 Versuch V4 – Experimente mit Fliegenfallen an der Autobahn..... | 26 |
| 5.4 Versuch V5 – Replikation des Experiments..... | 29 |
| 5.5 Versuch V6 Parkhaus | 30 |
| 5.6 Zusammenfassung | 31 |
| 6. Ausblick..... | 32 |
| Literaturverzeichnis | 33 |
| Anhang..... | 35 |
| A1. Rohdaten..... | 35 |
| A2. Fliegenzählen | 36 |
| A3. Fliegenfalle | 36 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|--|----|
| Abbildung 1 | Zeitliche Verteilung der Insektenbiomasse zwischen 1989 – 2016..... | 7 |
| Abbildung 2 | Saisonale Verteilung der Insektenbiomasse zwischen 1989 – 2016..... | 8 |
| Abbildung 3 | Rückgang von Ernten beim Wegfall von Fremdbestäubung..... | 11 |
| Abbildung 4 | Ozontagesgang in einem Ballungsgebiet mit starker Abhängigkeit von der Uhrzeit..... | 15 |
| Abbildung 5 | Luftmessgerät Air-Q..... | 16 |
| Abbildung 6 | Kunststoffröhre mit Nährboden und <i>Drosophila</i> Fliegen..... | 17 |
| Abbildung 7 | Installierte Versuchsboxen..... | 18 |
| Abbildung 8 | Betäubte Fliegen auf Kunststoffplatte..... | 19 |
| Abbildung 9 | Versuch V1 erster Durchgang..... | 20 |
| Abbildung 10 | Versuch V1 zweiter Durchgang..... | 21 |
| Abbildung 11 | Ozonmessung an unterschiedlichen Standorten Versuch V2..... | 22 |
| Abbildung 12 | Ozonmessung an unterschiedlichen Standorten Versuch V3..... | 24 |
| Abbildung 13 | Versuch V4 Ozonwerte und gefangene Fliegen..... | 26 |
| Abbildung 14 | Versuchsstandorte auf Google Maps und Versuchsaufbau neben Autobahntunnel..... | 28 |
| Abbildung 15 | Versuch V5 Ozonwerte und gefangene Fliegen..... | 29 |
| Abbildung 16 | Versuch V6 gefangene Fliegen..... | 31 |

1. Einleitung

Der *Insektenatlas 2020* von der *Heinrich-Böll-Stiftung, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland und Le Monde Diplomatique* gibt Auskunft über die wesentlichsten Eigenschaften von Insekten, der Grundlage für eine Einführung in diese Abschlussarbeit geben soll.

Keine anderen Lebewesen dieser Erde haben eine solch enorme Vielfalt wie die Insekten entwickelt. Insekten stellen gut 70 Prozent aller Tierarten weltweit, wobei davon ausgegangen werden kann, dass die meisten Insekten noch nicht einmal entdeckt und wissenschaftlich beschrieben sind. Die Biologische Diversität ist also zum großen Teil von Insekten, die man auf jedem Kontinent dieser Erde findet, bestimmt. Sie schillern in den verschiedensten Farben und sind mikroskopisch klein bis handflächengroß. Wichtigstes Merkmal aber sind drei Beinpaare, sodass andere Krabbeltiere wie Spinnen, Zecken oder Tausendfüßer nicht zu ihnen gezählt werden. Der Wissenschaftliche Name lautet demnach: Sechsfüßer oder auch Hexapoden. Insekten erfüllen wesentliche ökologische Wechselbeziehungen. Sie bestäuben drei Viertel der wichtigsten Kulturpflanzen in der Landwirtschaft. Somit ist das Vorkommen von Insekten und die menschliche Ernährung untrennbar miteinander verbunden. Der Abbau abgestorbener Pflanzen und Tiere wäre ohne sie ebenfalls nicht möglich. Hexapoden sind außerdem Nahrungsgrundlage vieler Vögel, Frösche, Mäuse oder Fledermäuse. In 130 Ländern bilden sie außerdem für die Bevölkerung wegen ihrer vielen Nährstoffe eine wichtige Grundlage der Ernährung.

Der Schutz und Erhalt der Insekten sollten daher in dem Interesse von uns allen sein. In den letzten Jahren zeigten allerdings immer mehr Studien einen massiven Rückgang der Biomasse der Sechsfüßer. Eine ähnliche Beobachtung kann jeder selbst machen: das Fernbleiben toter Insekten auf der Windschutzscheibe nach einer Autobahnfahrt. Es gilt also genau zu untersuchen wie weit das Insektensterben schon vorangeschritten ist, und welchen Einfluss dies auf unser Ökosystem in Zukunft haben wird. Die bedeutendste Frage, die sich daraus ergibt, ist, welchen Einfluss der Mensch auf diese Entwicklung hat und wie möglicherweise aktiv dagegen gesteuert werden kann. Welche anthropogenen Umwelteinflüsse stören also die Insekten in ihrer Lebensweise [1, S. 6-10].

1.1 Zielstellung der Arbeit

Innerhalb dieser Bachelorarbeit soll mit Sekundärliteratur untersucht werden, inwieweit das Insektensterben schon vorangeschritten ist und welche menschlichen Einflüsse schon erforscht sind. Ebenfalls wird beleuchtet, welche Bedeutung Insekten für die Umwelt und unsere Landwirtschaft haben. Praktisch wird in einem Feldversuch die anthropogene Luftverschmutzung und deren Einwirkung auf den Geruchssinn von Insekten analysiert. Es wird sich dabei gänzlich auf den Schadstoff bodennahes Ozon fokussiert. Ein Experiment mit einer Futterfalle soll zeigen, wie effizient 100 Fliegen (*Drosophila melanogaster*) unter stark und weniger stark verschmutzten Luftbedingungen eine Nahrungsquelle finden. Die Fliegen und die Futterfalle befinden sich in belüfteten Kunststoffboxen mit einem Messgerät, das viele verschiedene Parameter misst. Die Kunststoffboxen werden an verschiedenen Standorten aufgestellt: In relativ sauberer Umgebung wie z.B. einem Waldgebiet nahe Jena sowie in eher verschmutzter Luft, wie z.B. nahe der Autobahn oder sogar innerhalb eines Parkhauses. Nach bestimmten Zeitintervallen werden die Fliegen gezählt, die in die Futterfalle geflogen sind. Zeitliche Unterschiede zum Finden des Futters werden so aufgezeichnet und mit der Luftqualität verglichen. So kann eine Aussage getroffen werden, inwieweit der Mensch mit der Verschmutzung der Luft das Leben der Insekten beeinflusst.

Es handelt sich hierbei um eine Pilotstudie des Max-Planck-Instituts für Chemische Ökologie in Jena. Sollten sich die Messgeräte und der Versuchsaufbau bewähren, würden ähnliche Experimente in größerem Maßstab an Orten, die besonders für ihre Luftverschmutzung bekannt sind (z.B. Großstädte Indiens) durchgeführt.

2. Forschungsstand

2.1 Ausmaß des Insektensterbens

2.1.1 Westeuropa

Hobby Wissenschaftler untersuchten die vorhandene Insektenbiomasse zwischen 1989 und 2016 an über 96 einzigartigen Standort-Jahres-Kombinationen in Deutschland, die repräsentativ für westeuropäische Naturschutzgebiete sind. In allen Jahren wurden sämtliche Insekten während der gesamten Saison (März bis Oktober) beprobt, basierend auf sogenannten Malaise-Fallen, die nach dem schwedischen Entomologen René Malaise (1892–1978) benannt sind. Eine Malaisefalle ist ein Zelt aus Netzen mit einer oben liegenden großen Öffnung. Einfliegende Insekten orientieren sich aufgrund ihres phototaktischen Verhaltens in

Richtung des hellsten Lichtes. Sonne scheint durch eine oben befestigte mit Flüssigkeit gefüllte Fangflasche, die die Insekten ansteuern. In dem Fangbehälter werden sie direkt konserviert. Auch nachtaktive flugfähige Insektenarten werden mit Malaisefallen gut erfasst, da der Mond ebenfalls eine Lichtquelle zur Orientierung bildet [4, S. 1-3]. In den 27 Jahren der Studie wurden mit diesem Fallenmodell insgesamt 53,54 kg wirbellose Tiere gesammelt. Jedes Jahr wurden mehrere Fallen an unterschiedlichen Standorten aufgestellt und somit 1503 Proben untersucht [2, S. 2-4].

Nachfolgende Diagramme zeigen die Verteilung der Biomasse der gefangenen Insekten in den Jahren zwischen 1989 und 2016.

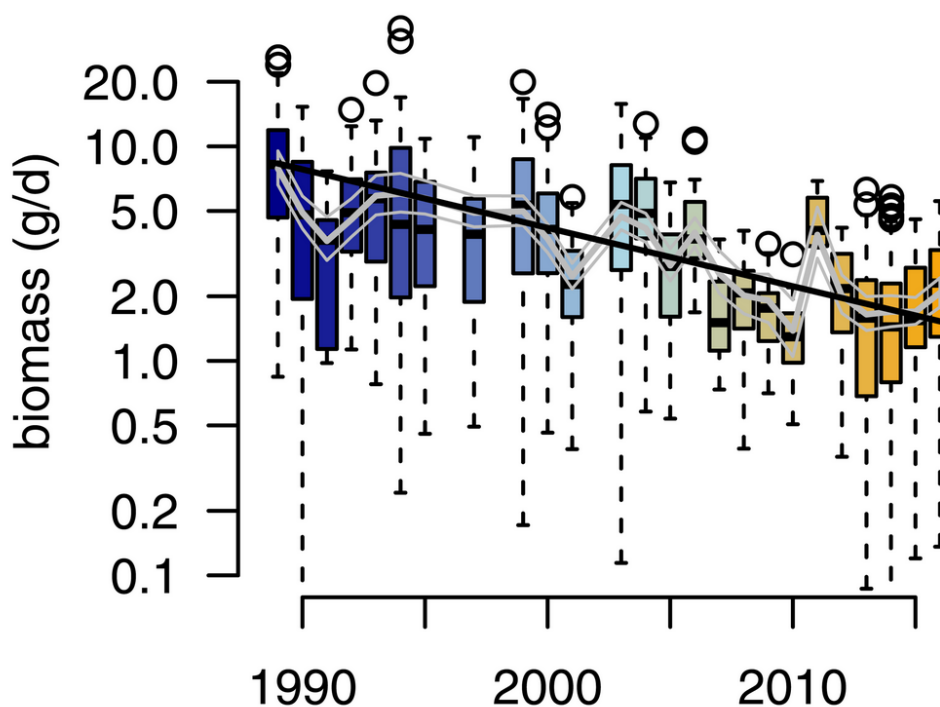


Abbildung 1 *Diagramm aus Studie: Zeitliche Verteilung der Insektenbiomasse zwischen 1989 – 2016 [2, S. 11]*

Abbildung 1 zeigt die gesammelte Biomasse in Gramm pro Tag (Y-Achse) im Vergleich zu den aufgezeichneten Jahren (X-Achse). Für die bessere Darstellung der Ergebnisse wurde für die Teilstriche eine logarithmische Skalierung gewählt. Die einzelnen Jahresdaten sind in blauen bis gelb-orangen Boxplots dargestellt. Die Länge eines Boxplots beinhaltet die mittleren 50 % der Daten. Der jeweils kleine schwarze Balken stellt den Median dar. Die beiden Enden der gestrichelten Linien bzw. Antennen stehen für den kleinsten und größten relevanten Datenwert. Kreise über den Antennen bedeuten extreme Ausreißerwerte, die nicht in dem Boxplot einberechnet sind, da sie wahrscheinlich fehlerhaft sind. Der Vollständigkeit werden sie dennoch mit angegeben. Verdeutlicht werden die Werte durch ein Vertrauensintervall

(graue Linien). Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegt der wahre Unterschied, zwischen den Jahren, in diesem Intervall. Die Kernaussage des Diagramms, berechnet aus allen genannten Daten, bildet der Trend (schwarze durchgezogene Linie). Er zeigt eindeutig eine beständige jährliche Verringerung der Biomasse der Insekten bis 2016. In diesem Feldversuch lag der Verlust über den Versuchszeitraum bei ca. 70 %. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird dieser Trend bis zum aktuellen Jahr 2021 angehalten haben.

In welchen Jahreszeiten diese Entwicklung am stärksten vorkommt soll folgendes Diagramm aufzeigen.

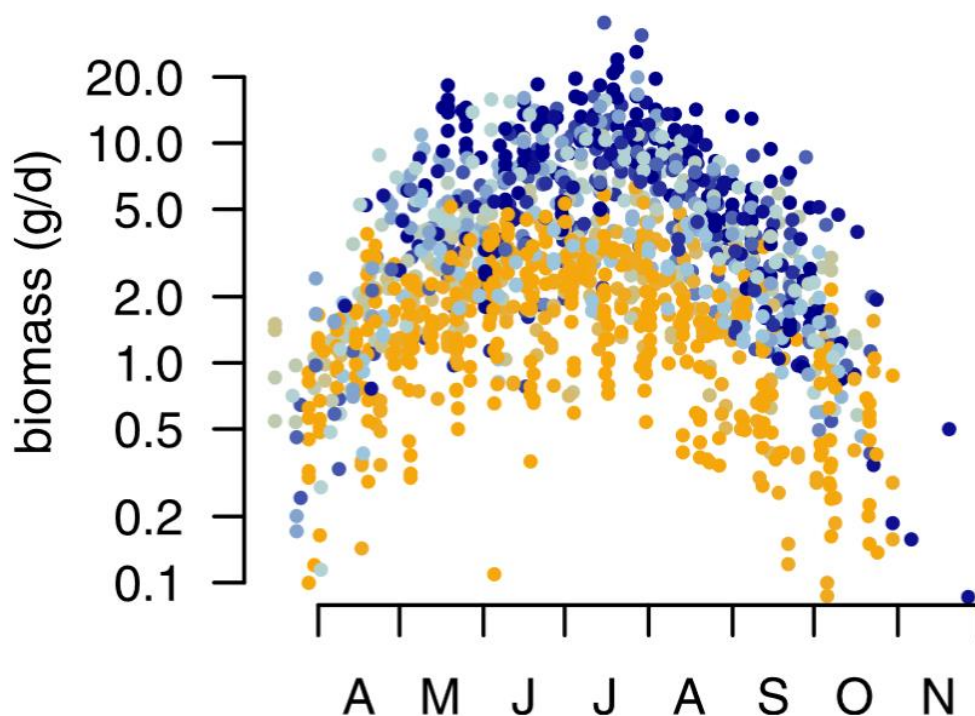


Abbildung 2 Diagramm aus Studie: Saisonale Verteilung der Insektenbiomasse zwischen 1989 (blau) – 2016 (gelb-orange) [2, S. 11]

Obige Abbildung zeigt, wie Abbildung 1 die gesammelte Biomasse in Gramm pro Tag (Y-Achse), jedoch hier im Vergleich zu den Jahreszeiten (X-Achse). Der Vergleich zu den aufgezeichneten Jahren wird in blauen Punkten für alte Daten und in gelb-orangen für die neuesten Daten wiedergegeben. In den Monaten April und Mai bzw. September und Oktober lässt sich kaum eine eindeutige Abweichung erkennen. Im Hochsommer dagegen zeigt sich der deutlichste Unterschied der gesammelten Masse in den Fallen. In den wärmsten Sommermonaten nahm die Biomasse der Insekten also am stärksten ab. Eine Vermutung dazu wird im Kapitel 3.2 erläutert.

2.1.2 Weltweit

Die Artenvielfalt ist nicht nur in Europa, sondern weltweit bedroht. Einen Überblick gibt ein Bericht von 2019 aus der wissenschaftlichen Zeitschrift *Biological Conservation*. Die zwei Wissenschaftler *Francisco Sánchez-Bayo* und *Kris A.G. Wyckhuys* von der *University of Sydney & University of Queensland* bewerteten insgesamt 73 repräsentative Studien zum Insektensterben aus verschiedenen Weltregionen. Sie prognostizierten sogar ein gänzlich Aussterben von 40 % aller weltweit vorkommenden Insektenarten in den nächsten Jahrzehnten bei gleichbleibender Entwicklung. Eine neuere Studie in den Regenwäldern von Puerto Rico berichtet von Biomasseverlusten zwischen 98 % und 78% für boden- und kronenbewohnende Arthropoden über einen Zeitraum von 36 Jahren, mit jährlichen Verlusten zwischen 2,7 % und 2,2 % [12, S. 8-9].

Zu den Arthropoden (Gliederfüßern) zählen zwar auch Spinnentiere, Krebstiere und viele weitere Arten mit einem Außenskelet jedoch werden Arthropoden zu 85 % von Insekten repräsentiert [13, S. 173].

Mehrere große Studien in Nordamerika untersuchten unter anderem die Hummelpopulation. Die Hälfte der 14 Hummelarten, die im Süden Ontarios (Kanada) zwischen 1971 und 2006 beobachtet wurden, war rückläufig, während drei weitere Arten in diesem Zeitraum nicht mehr gefunden werden konnten. Datenerhebungen in Kalifornien ergaben zur Anwesenheit/Abwesenheit von 67 Schmetterlingsarten an vier Standorten zwischen 1972 und 2012, dass die durchschnittliche Anzahl der Arten an jedem Standort (30) bis 1997 stabil blieb, aber auf 23 im letzten Jahr der Studie abfiel. Der Gesamttrend impliziert, dass 23 % der Arten verschwinden. Im asiatischen Raum sind in Japan 15 % der 240 Schmetterlingsarten bedroht, wobei zwei Arten auf dem nationalen Territorium kurz vor dem Aussterben stehen [12, S. 11].

2.2 Ökologische Wechselbeziehungen

Es wird allgemein von einem Rückgang der Insektenbiomasse von ca. 75 % in den letzten 30 Jahren ausgegangen [3, S. 245] [2, S. 1]. Der eingangs erwähnte große Anteil der Insekten an allen Tierarten weltweit (gut 70 %), wird für terrestrische Ökosysteme noch bedeutsamer, wenn bedacht wird, dass in den Meeren praktisch keine Insekten vorkommen [3, S. 246].

Es ist zu beachten, dass diese Abnahme nicht nur in urbanen Gebieten, sondern auch in Naturschutzflächen, zu beobachten ist. Der Verlust von Insekten wird mit Sicherheit negative Auswirkungen auf das Funktionieren von Ökosystemen haben, da Insekten eine zentrale Rolle bei einer Vielzahl von Prozessen spielen. So sind schätzungsweise 80 % der Wildpflanzen für

die Bestäubung auf Insekten angewiesen, während 60 % der Vögel sie als Grundnahrungsquelle benötigen [2, S. 1]. Die Funktion der Sechsheiner als Aas- und Dungfresser wird ebenfalls oft unterschätzt. Insekten ernähren sich sowohl von pflanzlicher und tierischer Kost und helfen so bei der Beseitigung toter Organismen. Auch die Bodenfruchtbarkeit ist wesentlich von Ihnen bestimmt. So beseitigen sie Laub, lockern die Böden auf und sorgen damit für eine ausreichende Belüftung und Nährstoffversorgung des Erdreichs. Die Landwirtschaft ist ebenfalls untrennbar mit der Existenz der Insekten verbunden. Drei Viertel aller weltweit angebaute landwirtschaftlich Nutzpflanzen sind auf Insekten als Bestäuber angewiesen [1, S.12].

Beispielsweise könnte der Ertrag in verschiedenen Anbausystemen durch Förderung durch Wildbienen erheblich gesteigert werden. Eine Studie beschäftigte sich speziell mit der Bestäubungseffizienz von Wild- und Honigbienen auf über 600 verschiedenen landwirtschaftlich genutzten Feldern auf allen Kontinenten. Es zeigte sich, dass Wildbienen bei der gleichen Anzahl an Blütenbesuchen einen doppelt so hohen Fruchtansatz erreichten wie die Honigbienen. Die Ausprägung des Fruchtansatzes ist entscheidend für eine ertragreiche Ernte und wird durch den Eintrag von Pollen bewirkt, den die Wildbienen in größerer Menge und Qualität vollbringen. Ein von Menschen gemachter Ersatz durch kultivierte Honigbienen sichert also nur den Grundertrag [10, S. 1608-1609].

So wie Insekten notwendig für gute Ernten sind, so können sie auch einen Verlust dergleichen verursachen. Neben Dürren und Umweltkatastrophen gehen weltweit 17 bis 30 Prozent aller Ernteverluste auf das Konto von Schädlingen die Nutzpflanzen anfressen. Gegen diese Schädlinge werden meist Pestizide versprüht, die jedoch negative Auswirkungen auf die gesamte Insektenwelt haben. Monokulturen fördern Schädlinge und verlangen somit immer häufigeren Einsatz von Pestiziden. Eine Entwicklung, die zum Aussterben von Bestäubern und dadurch zu Verlusten in der Landwirtschaft führen kann [1, S. 12]. Folgendes Kapitel 2.3 geht dabei auf wirtschaftliche Folgen ein und betrachtet das ökonomische Potenzial des Insektenschutzes.

2.3 Wirtschaftliche Folgen des Insektensterbens

Ulrich Schmid und *Johannes LM Steidle* vom *Schwäbischer Heimatbund* beschreiben Ökosysteme als funktionelle Einheiten aus Tieren und Pflanzen, die in vielfältiger Weise interagieren. Insekten erbringen dabei eine „Ökosystemdienstleistung“ für die Bestäubung der Nutzpflanzen und die biologische Schädlingsbekämpfung. So vertilgen die Larven einer heimischen Schwebfliege innerhalb weniger Tage bis zu 1000 Blattläuse. Ein starker Befall

von Blattläusen von Agrarpflanzen bedeuten meist Ertrags- und Qualitätsverlust bei der Ernte. [3, S. 246-249]. Doch durch welche Herangehensweise, kann man monetäre Werte in einem Ökosystem heranziehen, wo es im Grunde keine geben kann? Ein *Verbund von US-amerikanischen Institutionen* hat dies 1997 untersucht.

Grundlage dieser Studie ist die damalige Auffassung eine ganze Reihe ökologischer Leistungen durch technische Prozesse ersetzen zu können. In diesen Kalkulationen wurden die Kosten für ein entsprechendes technischen Verfahren berechnet. Selbstverständlich sind solche Zahlen mit Vorsicht zu genießen. Sie geben jedoch zumindest eine ungefähre Vorstellung von den Leistungen der globalen Ökosysteme. Demnach sind Ökosystemdienstleistungen von Insekten weltweit rund 500 Milliarden Dollar pro Jahr wert [5, S. 393]. Investitionen in den Schutz und Erhalt der Insektenpopulation sind also durchaus auch wirtschaftlich sinnvoll. Folgende Abbildung (Auszug aus dem *Insektenatlas 2020*) zeigt einen Ausblick auf die Ernterückgänge verschiedener landwirtschaftlicher Erzeugnisse beim totalen Wegfall von tierischer Bestäubung.

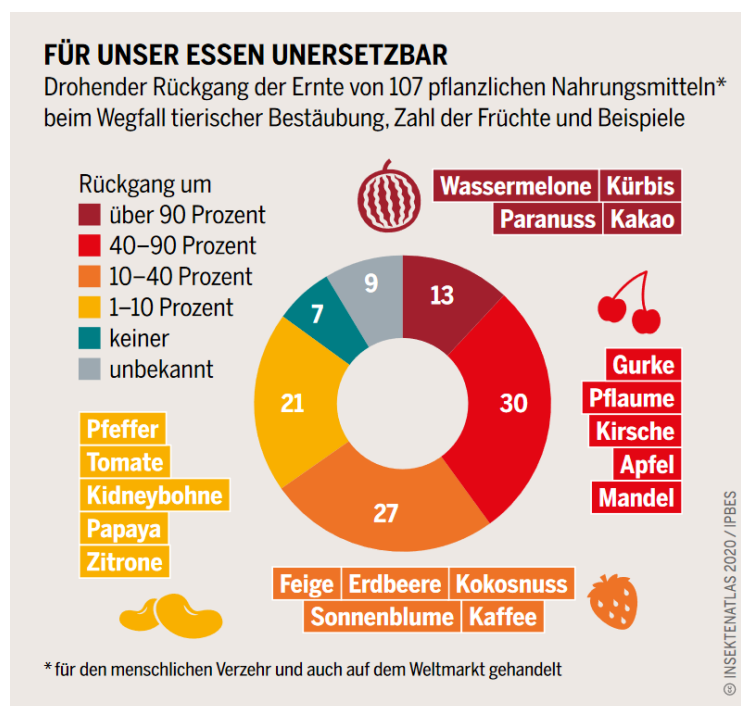


Abbildung 3 Rückgang von Ernten beim Wegfall von Fremdbestäubung [1, S. 13]

Abbildung 3 zeigt ein Kreisdiagramm mit Ernteaussfällen von extremen Rückgängen (rot) bis wenigen Verlusten (gelb). Feldfrüchte wie Tomaten oder Zitronen können sich zum größten Teil auch ohne fremde Hilfe durch beispielsweise Wind oder selbst bestäuben [1, S. 11]. Insekten haben auf die Ernten dieser Pflanzen also einen eher geringeren Einfluss, den man mit bis zu 10 Prozent allerdings nicht unterschätzen sollte. Anders sieht es mit Äpfeln, Kirschen

Wassermelonen oder Kürbissen aus, bei denen ohne Fremdbestäubung teilweise 90 Prozent der Ernte wegfallen würde [1, S. 13].

Eine technische Bestäubung wäre eine Milliarden Investition, die die Preise der Früchte ansteigen lassen würden. Verschiedene Anbauregionen haben verschieden hohe Abhängigkeiten von tierischer Bestäubung. Viele Getreidearten sind nicht auf fremde Bestäubung angewiesen, hingegen sind Insekten für die meisten Obst- und Gemüsesorten erforderlich. Da der Insektenschwund schon vorangeschritten ist und die „Ökosystemdienstleistung“ vielerorts nicht mehr ausreicht, wird nach einer Alternative gesucht. Es existieren verschiedene Ideen und Konzepte von „Roboterbienen“, doch die Technik ist weit davon entfernt, die Komplexität von ökologischen Systemen durch künstliche Intelligenz zu ersetzen. So sind in über 20 Ländern, darunter Japan, Neuseeland, Italien und China, deshalb Handbestäubung von Menschen in der Apfel, Kürbis-, Kirsch- und Kiwiproduktion schon heute Alltag [1, S. 44-45].

3. Schadstoffbelastungen in der Luft

3.1 Störung der Geruchswahrnehmung der Insekten

Die Grundlage für dieses Kapitel bilden das Journal of Chemical Ecology 2020 bzw. das Jahrbuch 2006/2007 des Max-Planck-Instituts für chemische Ökologie Jena.

Insekten verlassen sich bei ihrer Nahrungssuche auf Duftstoffe, die von Pflanzen emittiert werden. Visuelle Hinweise, wie z. B. hell gefärbte Blüten können von Insektenbestäubern nur aus direkter Nähe wahrgenommen werden und benötigen daher für lange Entfernungen einen „Duftpfad“ zur Orientierung. Diese Blumendüfte bestehen im Wesentlichen aus flüchtigen organischen Verbindungen (englisch: volatile organic compounds) auf Kohlenstoffbasis. Im Folgenden kurz „VOCs“ genannt. Diese Stoffe verdunsten bei warmen Temperaturen und können so im Wind eine Spur bilden. Insekten riechen diese Duftmoleküle mit ihren Antennen auf denen Riechhaare sitzen. Ihr Detektionssystem ist also ständig der Umgebungsluft ausgesetzt. Im Laufe der Zeit haben sich so koevolutionäre Partnerschaften zwischen Pflanzen und Bestäubern gebildet. Die gegenseitige Existenz ist also davon abhängig, dass die Signale der Pflanze in der Landschaft aufrechterhalten werden können und die Bestäuber diese erkennen können. Auf Veränderungen im Blütenduft über evolutionäre Zeitskalen, z. B. aufgrund von Modifikationen in Genen, konnten die Bestäuber langsam reagieren. Variationen in der Duftproduktion können jedoch durch den Einfluss des Menschen auch außerhalb des Paradigmas der Koevolution zwischen Pflanze und Bestäuber auftreten und die Symbiose zwischen Pflanze und Insekt erheblich stören. Beispielsweise verändert Luftverschmutzung

die Zusammensetzung der VOCs, die nun für Bestäuber weniger attraktiv oder unerkennbar sind. Auch Emissionen von fremden VOCs durch technische Prozesse ist möglich, die ebenfalls zu einer Störung der Geruchswahrnehmung führen kann [7, S. 1-3] [8, S. 2].

Die gegenseitige Abhängigkeit von Pflanzen und Sechsheinern hat sich über Millionen von Jahren entwickelt und funktioniert außerordentlich gut – bis zum Einfluss des Menschen. Doch was hat sich an unserer Luftqualität geändert und welche Prozesse oder Technologien sorgen für eine stetige Veränderung von unserer Atmosphäre und könnten potenziell die Kommunikation zwischen Pflanzen und Insekten stören? Diese Fragen soll folgendes Kapitel 3.2 klären.

3.2 Anthropogene Luftverschmutzung und Ozonbildung

Wie schon erwähnt sind VOCs flüchtige organische Verbindungen, die natürlicherweise in der Umwelt vorkommen. Das Umweltbundesamt gibt dazu folgende Auskunft: Zahlreiche organische Verbindungen, die in biologischen Prozessen gebildet werden, emittieren stetig in die Luft. Natürliche Quellen dafür sind Pflanzenstoffwechsel, sowie Fäulnis- und andere Abbauprozesse. Neben diesen gibt es seit dem industriellen Zeitalter nicht natürliche Quellen durch technische Prozesse. Besonders Stoffe aus unvollständiger Verbrennung wie Kraftverkehrsabgase oder flüchtige Nebenprodukte aus industriellen und gewerbemäßigen Vorgängen spielen dabei eine große Rolle. Aber auch beim Verdunsten von Lösemitteln in Farben, Lacken und Klebstoffen gelangen VOCs in die Umgebungsluft [B Umweltbundesamt]. Die wichtigen VOCs für die Orientierung von Insekten zu ihren Nahrungsquellen können aber auch durch atmosphärische Oxidationsmittel wie Ozon verändert werden [7, S. 1]. Besonders Einfluss darauf hat dabei bodennahes Ozon. Es bildet sich unter Einwirkung des Sonnenlichts aus Vorläuferschadstoffen wie Stickoxiden (Begriff Stickoxide werden zusammengefasst mit Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid) und aus VOCs [9, S. 4]. *Ozonbildung ist daher stark von der Tageszeit und damit unterschiedlichen Sonneinstrahlung abhängig* [11, S. 88]. Ein typischer Tagesverlauf von der Ozonkonzentration findet sich in Abbildung 4.

Bodennahes Ozon kommt also auch natürlicherweise vor. Seit Beginn des Anthropozäns lassen jedoch VOCs aus nicht natürlichen Quellen und besonders Stickoxide, die beim Verbrennen von Treibstoffen entstehen, die Ozonkonzentration insgesamt stetig steigen. Dieses Ozon reagiert dann mit den natürlichen Blumendüften, verändert deren chemische Zusammensetzung und kann dadurch das Verhalten von Bestäubern negativ beeinflussen [9, S. 4]. Viele Störstoffe in der Umgebungsluft sind für die Insekten ein erhebliches Hindernis bei der Nahrungssuche. Viel Sonneneinstrahlung bedeutet also eine hohe bodennahe

Ozonbildung, somit könnte erklärt werden, wieso der Biomassendefizit der Insekten in Abbildung 2 im Kapitel 2.1 in den Sommermonaten über höher ist.

Viele menschengemachte Schadstoffe in der Luft, beispielsweise in Ballungsgebieten, bedeuten jedoch nicht zwangsläufig eine hohe Ozonkonzentration an genau diesen Stellen. Dazu ist es notwendig sich die Reaktion nochmal genauer anzusehen. Der Klimatologie Prof. Dr. Wilhelm Kuttler von der Universität Duisburg-Essen hat dazu in einem Sonderdruck aus der Entsorgungspraxis von 1996 bodennahes Ozon genauer untersucht. Die beim Verbrennen von Treibstoffen entstehenden Stickoxide beinhalten Stickstoffdioxid (NO_2) und Stickstoffmonoxid (NO). Als Katalysator für die Ozonbildung wirkt nur NO_2 . Vom NO_2 wird zum einem durch UV-Strahlung ein Sauerstoffatom (O) abgespalten das sich mit einem Sauerstoffmolekül in der Luft (O_2) zu Ozon (O_3) verbindet. Zum anderen bleibt NO übrig das indessen erneut mit Ozon zu Stickstoffdioxid und Sauerstoff reagiert. So stellt sich nach einer gewissen Zeit ein Gleichgewicht zwischen Ozonaufbau und Ozonabbau ein. Der zusätzliche ausgestoßene Schadstoff Stickstoffmonoxid (NO) kann einen schnellen Ozonabbau in Urbanen Gebieten fördern. Winde können die Schadstoffe in ländlichen Regionen transportieren und so gleich hohe bzw. sogar höhere Ozonkonzentrationen ermöglichen. Diese Konzentrationsunterschiede hängen allerdings von der Wetterlage und von topografischen Gegebenheiten ab [11, S. 88-90]. Wie Ozonsituation am Standort Jena vorkommt, ist Teil meiner Untersuchung. Obwohl auch andere Schadstoffe und erhöhte Temperaturen sich sicherlich negativ auf die Insekten auswirken können, konzentriert sich diese Untersuchung hauptsächlich auf die Auswirkungen gesteigener Ozonwerte. Es soll also untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen einer erhöhten bodennahen Ozonkonzentration und dem Verhalten von Insekten besteht.

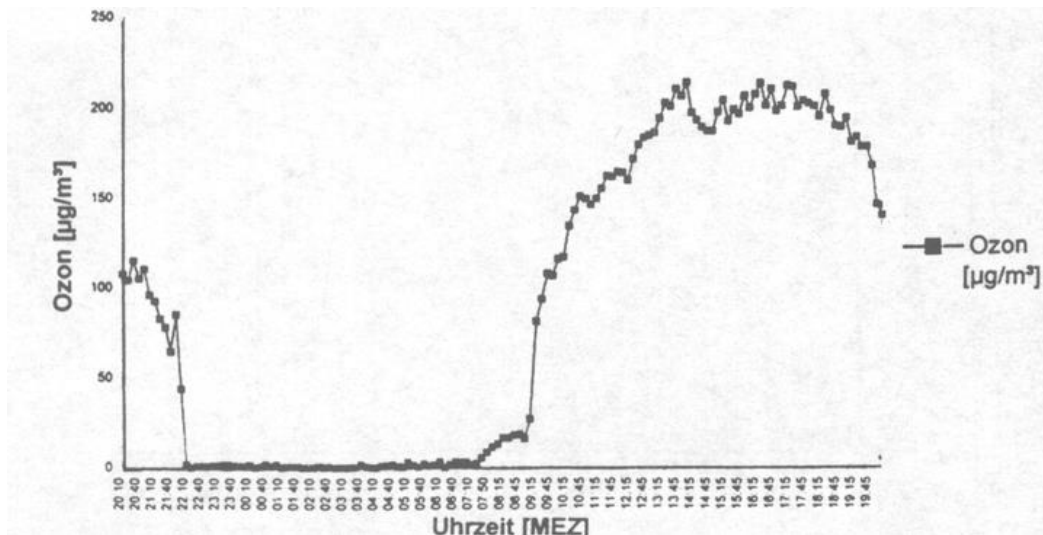


Abbildung 4 Ozontagesgang in einem Ballungsgebiet mit starker Abhängigkeit von der Uhrzeit in Millionstel Gramm pro Kubikmeter [11, S. 88 Abb. 3]

4. Versuchsvorbereitung

4.1 Verwendete Technik

Für die Auswertung der Luftqualität wurde das Raumlufmessgerät „Air-Q“ der Firma Corant GmbH verwendet. Dieses Messgerät mit den Maßen 135 x 49 x 118 mm beinhaltet alle wichtigen Sensoren, die für die Experimente relevant sind. Durch seine geringe Größe ist es optimal, um im Versuchsaufbau Platz zu finden. Es kann neben Ozon (O₃) viele verschiedene Parameter messen: Sauerstoff (O₂), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffdioxid (NO₂), Schwefeldioxid (SO₂), VOC (Flüchtige organische Substanzen als Stoffgruppe) Temperatur, relative + absolute Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Lärmpegel).

Das Messintervall beträgt minimal 1,8 Sekunden. Außerdem besitzt das Air-Q eine SD-Card Schnittstelle für die Datenübertragung an den PC [A1 Corant]. Die Sensortechnologie basiert auf elektrochemischen Signalen. Ozonmoleküle docken auf der Oberfläche des Sensors an und verursachen einen kleinen Strom. Die Ströme können dann in ablesbare Werte übersetzt werden [A2 Corant].

Für eine übersichtliche Ausgabe konvertiert die Herstellerseite tools.air-q.com die Rohdaten in Excel Tabellen, die anschließend bearbeitet und in Diagrammen ausgegeben werden können. Das Kalibrieren der AirQs funktioniert mittels einer geschlossenen Ozonbox in die ein genau definierter Ozonwert mit einem Ozongenerator eingeleitet wird. Diese steht in einem Raum mit ebenfalls gleichbleibender Temperatur. Zwei bzw. später drei AirQ Geräte wurden in die Ozonbox hineingelegt und gewartet, bis sich Temperatur und Ozon stabilisiert hatten.

Die externen Messzahlen von Raum und Generator wurden manuell in das AirQ Interface eingegeben. Nach dem Kalibrieren wurden die Geräte aus der Ozonbox herausgenommen und getestet, ob alle Geräte in einem Raum mit gleichbleibender Temperatur und geringer Ozonkonzentration die gleichen Ergebnisse liefern. Alle Geräte zeigten zwar im Test einen geringeren Ozonwert als in der mit Ozon angereicherten Box an, jedoch unterschieden sich stets die Werte der verschiedenen Geräte. Dadurch war es mir nicht möglich einen belastbaren absoluten Ozonwert zu messen. Da jedoch jedes einzelne Gerät bei wiederholter Messung vergleichbare Daten lieferte, konnte ich wenigstens mit den Geräten relative Ozonkonzentrationen bestimmen, d.h. feststellen, ob ein Ort eine höhere Ozonkonzentration hatte als ein anderer. Die Messprobleme wurden dem Hersteller mitgeteilt, der sich momentan immer noch um die Fehlerbehebung bemüht. Um dennoch möglichst aussagekräftige Daten zu erzielen, wurden fast alle Experimente nur mit einem Air-Q Gerät durchgeführt.



Abbildung 5 Luftmessgerät Air-Q

4.2 Züchten der Versuchsfiegen

Für die Geruchsexperimente wurden Fliegen der Art *Drosophila melanogaster* verwendet. Im Allgemeinen werden diese auch als schwarzbäuchige Taufliegen bezeichnet und gehören zur Familie der Taufliegen. Wie alle Insekten fällt *Drosophila* nicht unter das Deutsche Tierschutzgesetz, wodurch Experimente mit ihr einfach möglich sind. Durch ihre geringe Größe von wenigen Millimetern benötigen sie für die Haltung nur ein transparentes

Plastikgefäß mit einem Nährboden. Dieser Nährboden besteht aus Rübensirup, Bierhefe, Agarpulver, Maisgrieß und Wasser. Unter optimalen Bedingungen von 25 Grad in einer Brutkammer entwickeln sich aus den gelegten Eiern des *Drosophila*-Weibchens innerhalb von 2 Tagen Larven, die sich wenige Tage später verpuppen. Zwölf Tage nach der Eibablage schlüpft die nächste Generation Fliegen aus den Puppen. Pro Jahr können so 25 Fliegengenerationen heranwachsen, die sich ohne Zugabe weiterer Tiere von außen vermehren können. Somit stehen genau kontrollierte Versuchstiere innerhalb kurzer Zeit zur Verfügung. Diese Eigenschaften machen *Drosophila melanogaster* zu einem idealen Versuchsobjekt. Einhergehend mit der kurzen Generationsdauer ist die Lebenserwartung der Tiere entsprechend gering, wodurch ihr Einsatz auf den Tag genau geplant werden muss. Für optimale Ergebnisse sollten die Fliegen bei jedem Versuch gleich „jung“ sein – optimal 4 Tage nach dem Schlupf aus der Puppe. Für eine neue Generation wird eine alte Generation Elternfliegen in ein ansonsten leeres Kunststoffgefäß mit Nährboden eingesetzt. Die *Drosophila*-Weibchen legen nun neue Eier in den Nährboden, die sich entwickeln. Vor dem ersten Schlüpfen der Nachkommen sind die Elterntiere zu entfernen, da sonst nicht mehr zwischen den verschiedenen Generationen unterschieden werden kann. Nach 11-12 Tagen sind erste Fliegen im Gefäß zu sehen, die dann täglich umgesiedelt werden, da nicht alle Eier gleichzeitig gelegt worden sind. Schlussendlich hat man verschiedene Gefäße mit genau datierten Jungtieren, die zum richtigen Zeitpunkt für das Experiment eingesetzt werden können.



Abbildung 6 Kunststoffröhre mit Nährboden und *Drosophila* Fliegen

4.3 Versuchsaufbau und Vorbereitung

Der gesamte Aufbau für sämtliche Experimente befand sich in einer undurchsichtigen aber gut lichtdurchlässigen Kunststoffbox. Die Insekten benötigen genügend Licht für eine hohe Aktivität, jedoch sollen keine fremden visuellen Effekte von außerhalb der Box das Verhalten der Fliegen beeinflussen. Für eine ausreichende Luftzirkulation sorgte ein Ventilator an der Seite der Box, der Luft durch eine feinmaschige Membran bläst. So ist gewährleistet, dass keine Fliege die Versuchsbox verlässt und dass dennoch genug Kontakt mit der umgebenen Atmosphäre garantiert ist. Durch eine Schiebeöffnung an der Oberseite konnten Fliegen eingebracht werden. Die Futterfalle bestand im Wesentlichen aus einem Gemisch aus 50 % haushaltsüblichen Essig und 50 % Wasser. Diese Kombination hat eine starke Anziehung auf Taufliegen und ist gleichzeitig gut handhabbar. Essig und Wasser haben jedoch eine Oberflächenspannung und können die Insekten nicht zuverlässig einfangen und absinken lassen. Da dies für die Zählung wichtig ist wurde dem Essigwasser noch ein Spritzer Spülmittel beigefügt, um die Oberflächenspannung zu unterbinden. Das Gemisch wurde in einer Kunststoffröhre abgefüllt und mit einem Stopfen versehen. Im Stopfen befindet sich ein Loch, das gerade groß genug für die Fliegen ist und einen Rückflug aus der Falle verhindern soll. Für die Experimente wurden die Insekten durch die Schiebeöffnung in die Versuchsboxen ausgesetzt und für einen bestimmten Zeitraum ihrer Futtersuche überlassen. Die oben genannten Luftmessgeräte standen außerhalb an der freien Luft. Den benötigten Strom für jegliches Equipment (Ventilator, AirQs) lieferten Akkus.



Abbildung 7 *Installierte Versuchsboxen mit Membran für Luftzirkulation (Mitte) und angeschlossenem Akku (schwarzer Balken in Plastiktüte)*

Für aussagekräftige Ergebnisse ist es wichtig, die gleichen Experimente auf exakt die gleiche Art und Weise mehrfach zu wiederholen. Das heißt nicht nur der immer gleiche Aufbau der Versuche ist entscheidend, auch die immer gleiche Anzahl an Fliegen die potenziell in die Fallen gehen können. Bei der Züchtung der Fliegen in den Kunststoffröhren entstehen bei jeder Generation unterschiedliche viele neue Fliegen. Diese von außen zu zählen ist nicht möglich, da diese ständig umherfliegen. Außerdem sind die *Drosophila* vor jedem Entlassen in die Versuchsboxen vom Futter in den Röhren zu trennen, um eine Nahrungssuche anzuregen. Die Tiere mussten also exakt gezählt für den Transport zum Versuchsstandort in einer leeren Röhre vorbereitet werden. Dies geschah mithilfe von Kohlenstoffdioxid. Einleitung von CO₂ in eine Röhre mit enthaltenen Fliegen bewirkt deren Bewusstlosigkeit. Wie alle Tiere auf diesem Planeten benötigen auch *Drosophila* Sauerstoff zum Leben. Durch das Einatmen des Kohlenstoffdioxids und den Mangel an Sauerstoff sind die Fliegen innerhalb weniger Sekunden betäubt und bewegungsunfähig. So können sie auf eine Oberfläche gekippt und mit vorsichtig mit einem Pinsel gezählt werden. Da dieser Betäubungseffekt nur wenige Minuten anhält fand die Zählung auf einer feinporigen Kunststoffplatte statt. Durch diese strömt neues CO₂, dass längere Betäubung sicherstellt. Nach gewünschter Menge der Fliegen wurden sie mit einem Pinsel in eine leere Röhre gestrichen. Sie erleiden keinerlei Schaden dabei und erwachen innerhalb kurzer Zeit wieder.

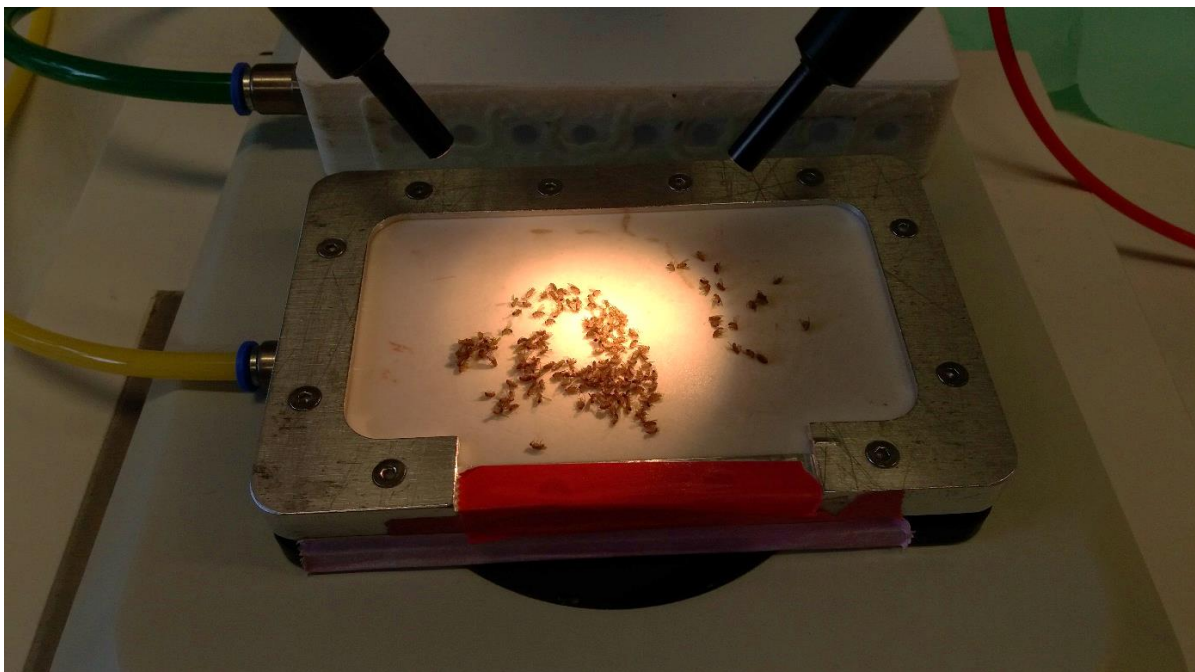


Abbildung 8 Betäubte Fliegen auf Kunststoffplatte

5. Versuchsauswertung

5.1 Versuch V1 - prüfen des Versuchsaufbaus

Ziel des Versuches war es, zu schauen, ob Fliegen durch steigende Ozonwerte negativ bei ihrer Nahrungssuche beeinflusst werden. Zuerst ging es jedoch darum, herauszufinden, welches die optimale Zeitdauer für ein derartiges Experiment ist. Der erste Versuch bestand aus acht verschiedenen Versuchsboxen, wie in Abbildung 7 gezeigt. Die Wahl des Ortes fiel auf die Terrasse des Max-Planck-Institutes in der Nähe vieler Grünflächen, wodurch eine eher *saubere Luft* zu erwarten war. Gleichzeitig zum Start befanden sich in jeder Box 100 abgezählte Fliegen. Alle 90 Minuten wurden zwei der Boxen geöffnet und die schon gefangenen Fliegen in der Flüssigkeit zu dokumentieren. Ein Zurückstellen der Fallen in die Boxen nach der Zählung war nicht möglich, da die Tiere durch die Fallenentnahme gestört wurden und einzelne Tiere beim Öffnen der Boxen entkamen. Insgesamt fand der Versuch zweimal mit demselben Aufbau an unterschiedlichen Tagen statt. So konnten bessere Mittelwerte erzielt werden, da unterschiedliche Sonneneinstrahlung Auswirkungen auf das Ergebnis hätte haben können. Beide Resultate der Durchgänge des Versuchs sind in folgenden Diagrammen dargestellt.

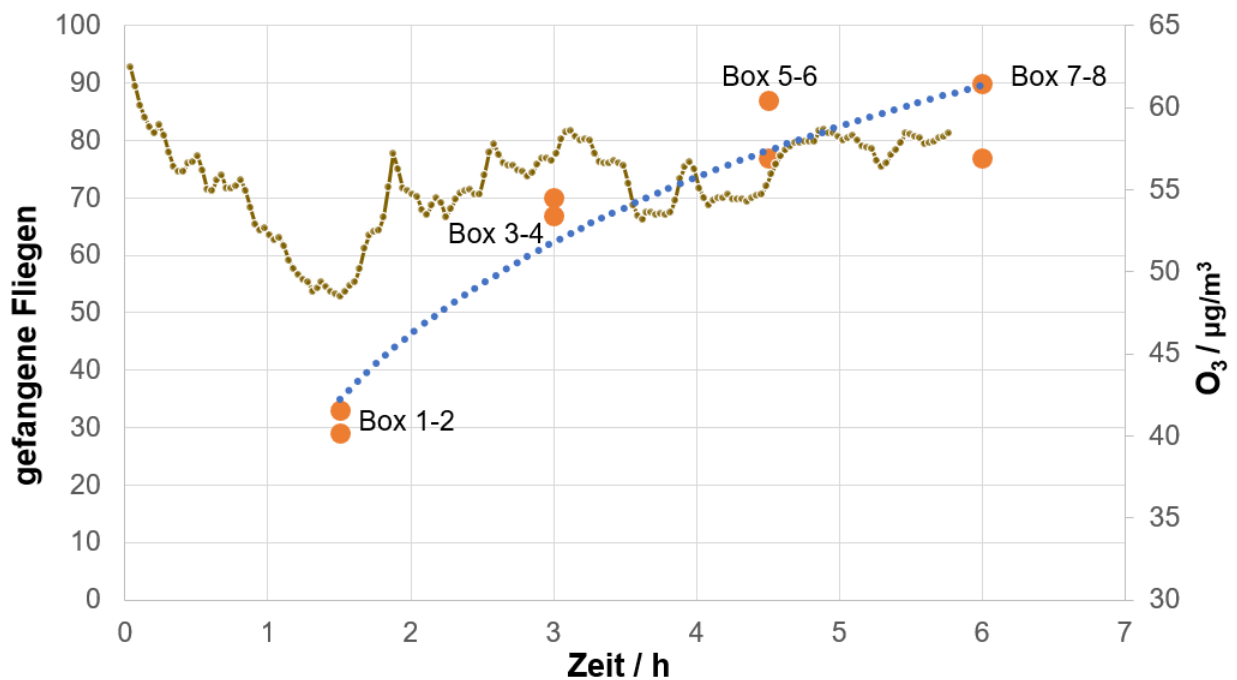


Abbildung 9 Versuch V1 erster Durchgang

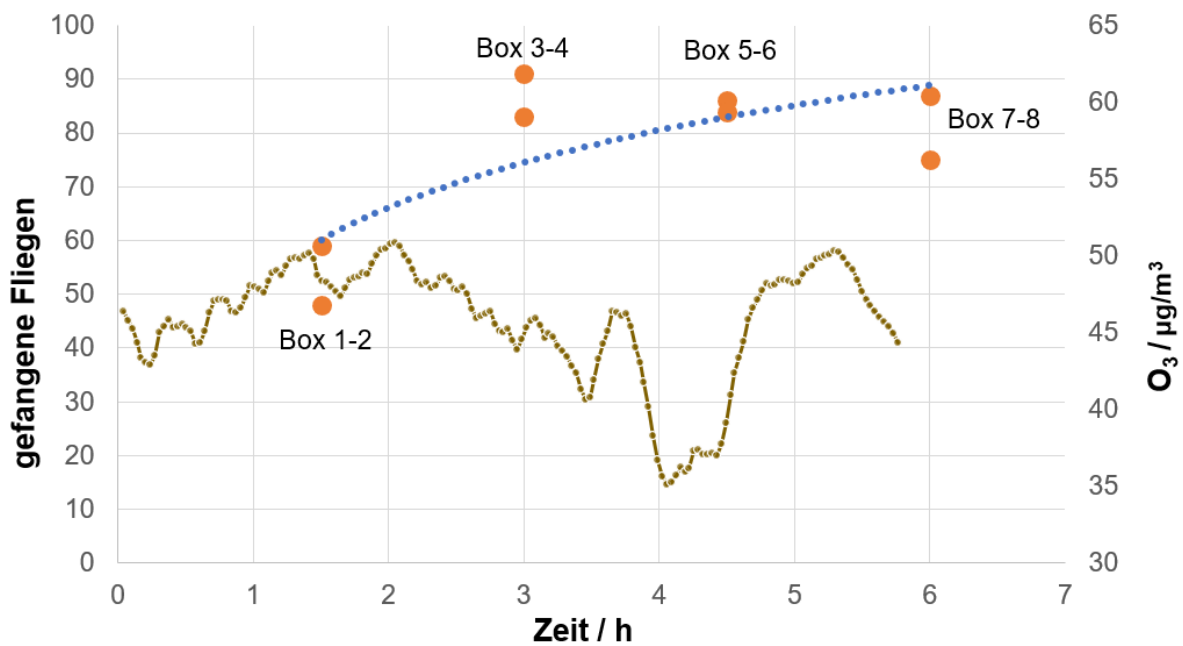


Abbildung 10 Versuch V1 zweiter Durchgang

Der Aufbau beider Diagramme ist identisch. Sie beinhalten auf der X-Achse die Zeit sowie zwei Y-Achsen mit den gefangenen Fliegen (links) und der O₃ Konzentration (rechts). Die orangenen Punkte zeigen die Zahl der Fliegen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt schon in der Falle angetroffen wurden. Da sich allein aus den Punkten und dem Ablesen der gefangenen Fliegen keine genaue Aussage über das Verhalten der Fliegen erkennen lässt, ist eine blau gepunktete exponentielle Trendlinie eingefügt. Diese macht eindeutig wie schnell die Tiere bei der Fallensuche waren. Die braune Linie stellt die O₃ Konzentration in Millionstel Gramm pro Kubikmeter dar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Im ersten Durchgang (Abbildung 9) ist das Maximum der gefangenen Fliegen zum Zeitpunkt der dritten Messung nach 4,5 Stunden erreicht. Im zweiten Durchgang (Abbildung 10) ist das Maximum schon am zweiten Messpunkt, nach 3 Stunden zu sehen. Alle darauffolgenden Messpunkte zeigten keine höheren Werte. Der zweite Durchgang zeigte überdies weniger Insekten nach längerer Zeit in den Boxen 5-8. Die Abweichungen sind jedoch marginal und bei Versuchen mit lebenden Tieren nicht zu vermeiden.

Die Ozonkonzentration war dabei über beide Durchgänge hinweg relativ stabil bei durchschnittlich $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Abbildung 9 sowie durchschnittlich $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Abbildung 10. Dieser Unterschied und somit geringere Konzentration im zweiten Durchgang könnte eine Erklärung für das schnellere Finden der Fallen sein. Da die Luftmessgeräte für diesen Versuch noch nicht vollständig für den Messbereich geeicht waren, kann keine genaue Aussage über

die wirklichen Ozonwerte getroffen werden. Es ist jedoch ein Unterschied der Werte zu erkennen, der sich möglicherweise auf das Verhalten der Fliegen auswirkt.

Als wichtigstes Ergebnis geht aus dem Versuch jedoch hervor, dass schon nach 90 min viele Fliegen in der Falle waren. Dieser Zeitraum wurde daher später auch in Versuch V4 verwendet.

5.2 Versuch V2, V3 - Ozonmessungen an unterschiedlichen Standorten

Mit den Erkenntnissen aus Versuch V1 konnte nun auf die Suche nach Standorten mit unterschiedlicher Luftqualität gegangen werden. Dabei war es entscheidend, die Messungen möglichst bei gleichbleibenden Wetterbedingungen auszuführen, um Schwankungen zu vermeiden. Ebenfalls mussten die Standorte gut mit dem Auto erreichbar sein und aus organisatorischen Gründen nicht zu weit auseinander liegen, da nur ein Fahrer zur Verfügung stand. Dazu erfolgten am gleichen Tag Luftmessungen sowohl direkt am Eingang des Autobahntunnels Lobeda, also auch in einiger Entfernung in einer autofreien Zone oben auf dem Tunnel sowie für einen weiteren Vergleich nochmals auf der Terrasse des Instituts. Die genaue Lage der Versuchsstandorte ist in Abbildung 14 dargestellt. Auch hier gab es wieder Probleme mit der Eichung der Geräte, sodass wieder nur die relativen Ozonwerte festgestellt werden konnten. Folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse.

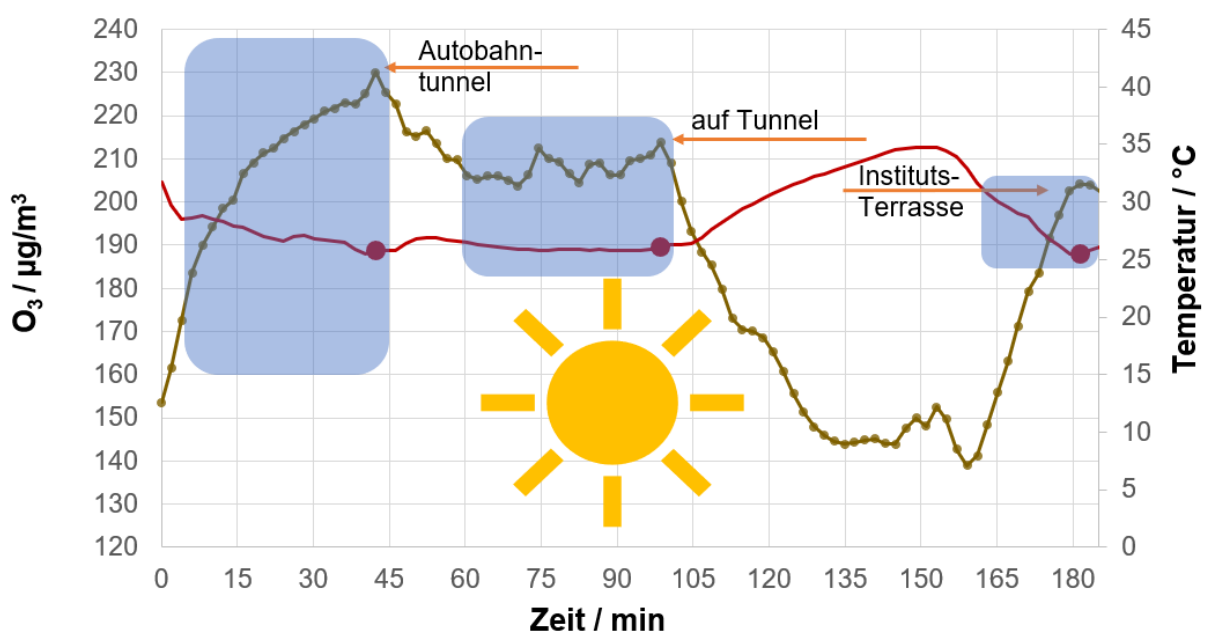


Abbildung 11 Ozonmessung an unterschiedlichen Standorten Versuch V2 (Ozon braune Linie, Temperatur rote Linie)

In Abbildung 11 ist die Ozonkonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Verhältnis zu der Zeit abgebildet. Ziel war die Messung der jeweils höchsten Ozonwerte an den Standorten Autobahntunnel Lobeda direkt neben der Straße, auf genanntem Tunnel mit einiger Entfernung zur Straße und für einen Vergleich nochmals auf der Institutsterrasse. Auf der Terrasse wurde schon der Versuch V1 durchgeführt. Für eine Stabilisierung der Werte war eine Zeit von ca. 40 Minuten nötig. Die Werte schwankten danach zwar immer noch, aber das Gerät maß innerhalb dieser Zeit ein Maximum. Der genaue *Messzeitraum* an den jeweiligen Standorten ist mit einer *blauen Box* umrandet. Da die Ozonbildung maßgeblich von der Sonne beeinflusst wird, fand zur Kontrolle auch eine Temperaturmessung statt. Die *Ozonmaxima* und die *zeitgleiche Temperatur* sind mit einem *orange Pfeil* bzw. einem *roten Punkt* markiert.

Es zeigte sich der höchste Ozonwert direkt neben der Autobahn mit $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Der lange Anstieg von Minute 0 - 30 lag an der „Aufwärmzeit“ des Air-Qs. Für eine Erfassung sich schnell verändernder Werte benötigen die Geräte in der Regel ein wenig Zeit. Auf dem Tunnel sank das Maximum auf $213 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Jedoch ein Großteil der Versuchszeit auf den Tunnel stabilisierte sich das Ozonlevel bei ca. $205 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Minute 105 – 165 zeigen die Rückfahrt im Auto mit entsprechenden niedrigen Ozonwerten. Beim Aufstellen auf der Institutsterrasse lag das Maximum bei $205 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die unterschiedlichen Maxima bei gleichbleibendem Wetter weisen zunächst auf einen Zusammenhang zwischen erhöhtem Verkehrsaufkommen und damit höheren Ozonwerten hin. Alle Höchstwerte standen im Zusammenhang mit einer nahezu stabilen Temperatur. Die großen Temperaturanstiege waren ausschließlich auf die Transportzeit im Auto zurückzuführen, in dem sich die Hitze staute.

Um diese Aussagen zu bestätigen, wurde die Vorgehensweise mit dem gleichen Gerät wiederholt. Die nächste Abbildung Versuch V3 zeigt das gleiche Experiment, nur mit anderen Wetterbedingungen und einen anderen Standort.

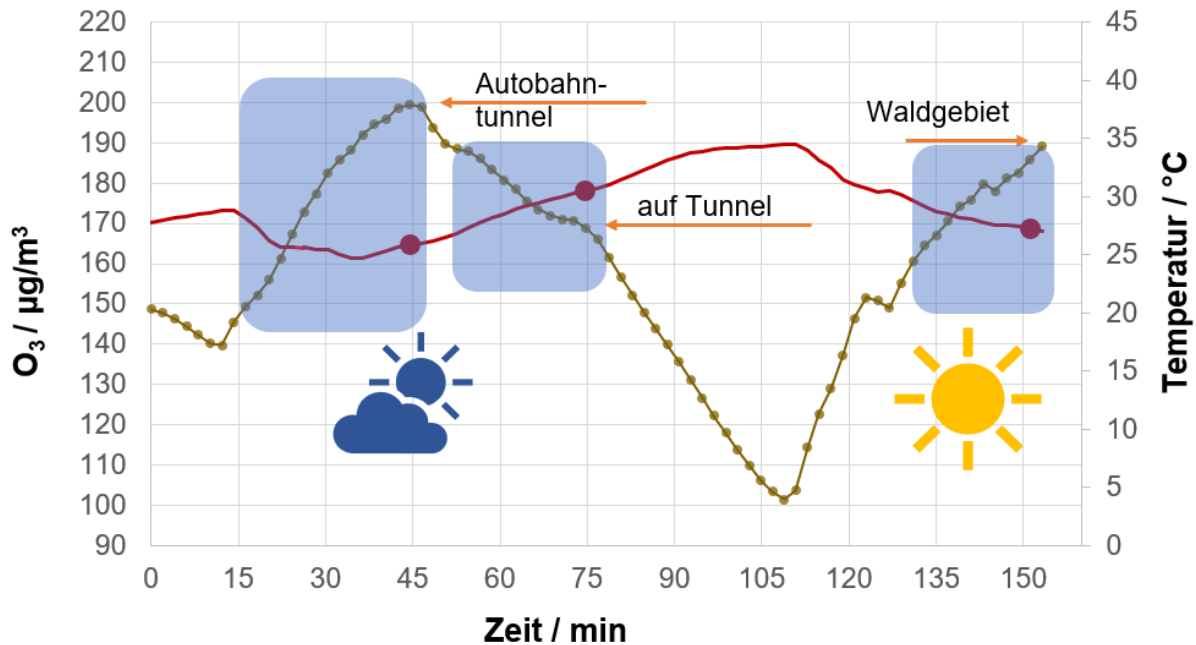


Abbildung 12 Ozonmessung an unterschiedlichen Standorten Versuch V3 (Ozon braune Linie, Temperatur rote Linie)

Obiges Diagramm für Versuch V3 hat den gleichen Aufbau wie für Versuch V2. An diesem Tag war es anfangs bewölkt mit weniger Sonneneinstrahlung und demzufolge waren geringere Ozonwerte zu erwarten. Der höchste Ozonwert zeigte sich dennoch wieder in direkter Nähe zu der Autobahn mit $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Auf dem Tunnel stabilisierte sich das Maximum auf $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Jedoch änderte sich das Wetter, der Himmel klarte auf und somit erhöhte sich die Sonneneinstrahlung. Gut zu erkennen an den roten Temperaturpunkten „Autobahntunnel“ und „auf Tunnel“, die sich um ca. $5 \text{ }^\circ\text{C}$ unterscheiden von ca. 25 auf $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Auf dem Weg in ein Waldgebiet zwischen Minute $80 - 130$ maß das Air-Q wieder hohe Temperaturen und niedrige Ozonwerte im Auto. Jedoch blieben die Außentemperaturen bei $30 \text{ }^\circ\text{C}$ im urbanen Bereich, dass eine vermehrte Ozonbildung förderte.

Die chemischen Reaktionen zum bodennahen Ozon benötigen ein wenig Zeit und lassen sich daher nicht sofort messen. Wahrscheinlich ließen sich diese höheren Werte allerdings nach einer Stunde fahrt in dem Waldgebiet nachweisen, da bei erhöhter Sonneneinstrahlung überall mehr Ozon gemessen wird – auch in Waldgebieten die Kohlenstoffverbindungen emittieren, aus denen wiederum Ozon entsteht [11, S. 88]. Geringere Mengen Stickstoffmonoxid im Gegensatz zu Urbanen Gebieten zum schnelleren Abbau des Ozons, könnte ebenfalls ein Grund für die hohen Werte sein (Kapitel 3.2).

Der maximale Ozonwert im Waldgebiet stieg daher stetig an auf nahezu den gleichen Wert wie neben der Autobahn mit $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obwohl die Messung in einem Gebiet stattfand, für

das eher sehr saubere Luft erwartet wurde. Die eher niedrige Temperatur im Wald von 25 °C bei gleichzeitig hoher Sonneneinstrahlung lässt sich mit der allgemeinen Verdunstungskälte der Vegetation erklären. Wie in diesem Versuch zu sehen sind die gemessenen Ozonwerte stark von der Sonneneinstrahlung oder eben fehlender Ozon-abbauender Stoffe beeinflusst. Eine pauschale Aussage über unterschiedliches Ozonlevel muss also unter möglichst ähnlichen Wetterbedingungen getroffen werden.

Anmerkung zu folgenden Experimenten mit den Fliegen und deren Auswertung:

Aufgrund der bereits erwähnten technischen Probleme und der langwierigen, bisher nicht erfolgreichen Optimierungsversuche zusammen mit dem Hersteller, waren leider keine weiteren Ozonmessungen in unterschiedlichen Gebieten mehr möglich. Gleichbleibende Wetterbedingungen, die nicht immer anzutreffen sind, machen eine pauschale Aussage über unterschiedliche Ozonwerte in und rund im Jena schwierig. Außerdem beeinflussen wechselnde Windrichtungen die Werte wahrscheinlich drastisch. Langzeitmessungen wären für aussagekräftige Ergebnisse erforderlich, sind aber nach meinen Erfahrungen, mit den derzeitig zur Verfügung stehenden Messgerät im Rahmen einer Bachelorarbeit kaum zu realisieren. Hinzu kam, dass das Kalibrieren der Luftmessgeräte mehrere Versuche und Wochen in Anspruch nahm. Selbst nach mehreren technischen Einstellungen zeigten sämtliche Geräte unterschiedliche Ozonwerte an. So war es nicht möglich, zwei Messungen für absolute Werte *zeitgleich* bei den geplanten Fliegenexperimenten (die jeweils viel Vorbereitungszeit in Anspruch nahmen), an unterschiedlichen Standorten wie Wald und Stadt durchzuführen. Eine Aussage über den Zusammenhang von *absoluten* Ozonkonzentrationen und dem Verhalten der Fliegen ist so nicht möglich. *Zeitlich versetzte* Versuche mit einem Luftmessgerät sind durch den Ozontagesgang keine gute Lösung. Die einzige Möglichkeit bestand daher darin, neben dem Autobahntunnel und auf dem Tunnel die Experimente durchzuführen, da hier die Geräte innerhalb weniger Minuten zwischen den Orten hin- und hertransportiert werden konnten, was eine zeitnahe Messung an beiden Orten ermöglichte.

5.3 Versuch V4 – Experimente mit Fliegenfallen an der Autobahn

An den beiden oben erwähnten Stellen neben und oberhalb des Autobahntunnels wurden jetzt Experimente durchgeführt, bei denen gemessen wurde, wie schnell die Fliegen unter den jeweiligen Bedingungen die Futterfallen aufsuchten. Der Versuchsaufbau entsprach dem oben beschriebenen Versuch (V1). Es wurden je Standort 9 Boxen mit je 100 Fliegen und einer Essigfalle versehen und (hervorgehend aus Versuch V1) nach einer Zeitspanne von 90 Minuten die Fliegen in den Fallen ausgezählt. Insgesamt wurden so 1800 Fliegen gleichzeitig zur Futtersuche in den Boxen ausgesetzt. Ein Air-Q Luftmessgerät kam ebenfalls wieder zum Einsatz, um die relativen Ozonwerte zu messen. Die Ergebnisse zeigt folgende Abbildung.

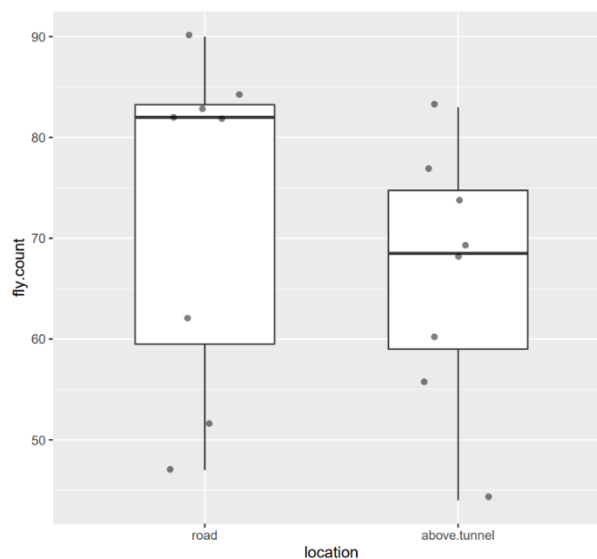
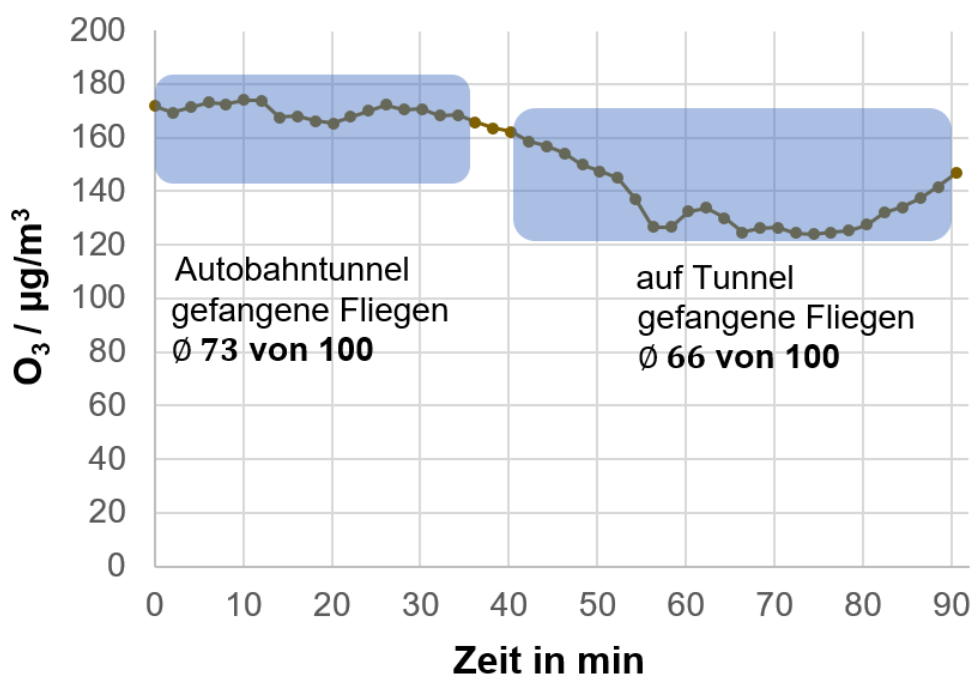


Abbildung 13 Versuch V4 Ozonwerte (oben) und gefangene Fliegen mit Boxplot (unten)

Abbildung 13 zeigt die bekannten Standorte „Autobahntunnel“ und „auf Tunnel“. Die Messzeiträume für die Ozonwerte sind mit blauen Boxen jeweils markiert. Es kam wieder nur ein Air-Q Gerät zum Einsatz, da die technischen Probleme nicht behoben werden konnten und so nur eine Aussage über den Konzentrationsunterschied zwischen den Standorten möglich war. Dieser war wie in den vorangegangenen Versuchen neben der Autobahn (maximum $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$) höher als auf dem Tunnel (maximum $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Das Ansteigen der Ozonwerte am Ende des Versuches am ozonärmeren Standort lässt sich vielleicht auf Wind und Wetter zurückzuführen, was aber kein Problem darstellte, da der Versuch bereits als abgeschlossen galt. Das Leeren der Fallen erfolgte nach 90 Minuten am Ende des Versuches. Neben der Autobahn gingen im Durchschnitt *73 von 100 Fliegen* in die Fallen. Auf dem Tunnel dagegen *66 von 100*. Um die Verteilung gegen Ausreißer besser darzustellen, bietet sich die Darstellung als Boxplot mit Median, 50% Intervall und Ausreißern an (Boxplots Abbildung 13 unten). Die grauen Punkte spiegeln jeweils die gezählten Fliegen in den Fallen wider. Der Median zeigte leicht abweichende Zahlen: neben der Autobahn *83 von 100* und auf dem Tunnel *68 von 100* Fliegen. Aufgrund der aus der Abbildung ersichtlichen großen Streuung der Daten lässt sich noch nicht abschließend beurteilen, ob die Fliegen die Futterfalle je nach Standort unterschiedlich effizient lokalisieren konnten. Eine klare Aussage über mögliche Störungen der Insekten durch Ozon lässt sich nach einem Versuch nicht treffen.



Abbildung 14 Versuchsstandorte auf Google Maps (oben) Versuchsaufbau neben Autobahntunnel (unten)

5.4 Versuch V5 – Replikation des Experiments

Versuch V5 fand unter denselben Bedingungen wie Versuch V4 statt. Insgesamt 1800 Fliegen aufgeteilt in 9 Boxen mit je 100 Versuchstieren, pro Standort (Autobahntunnel und auf Tunnel). Das Experiment musste auf eine Stunde begrenzt werden, da die Außentemperatur während der Versuchszeit auf über 30 Grad anstieg und der Hitzestau in den Versuchsboxen den Tod der Fliegen bedeuten könnte. Die Ergebnisse zeigt folgende Abbildung.

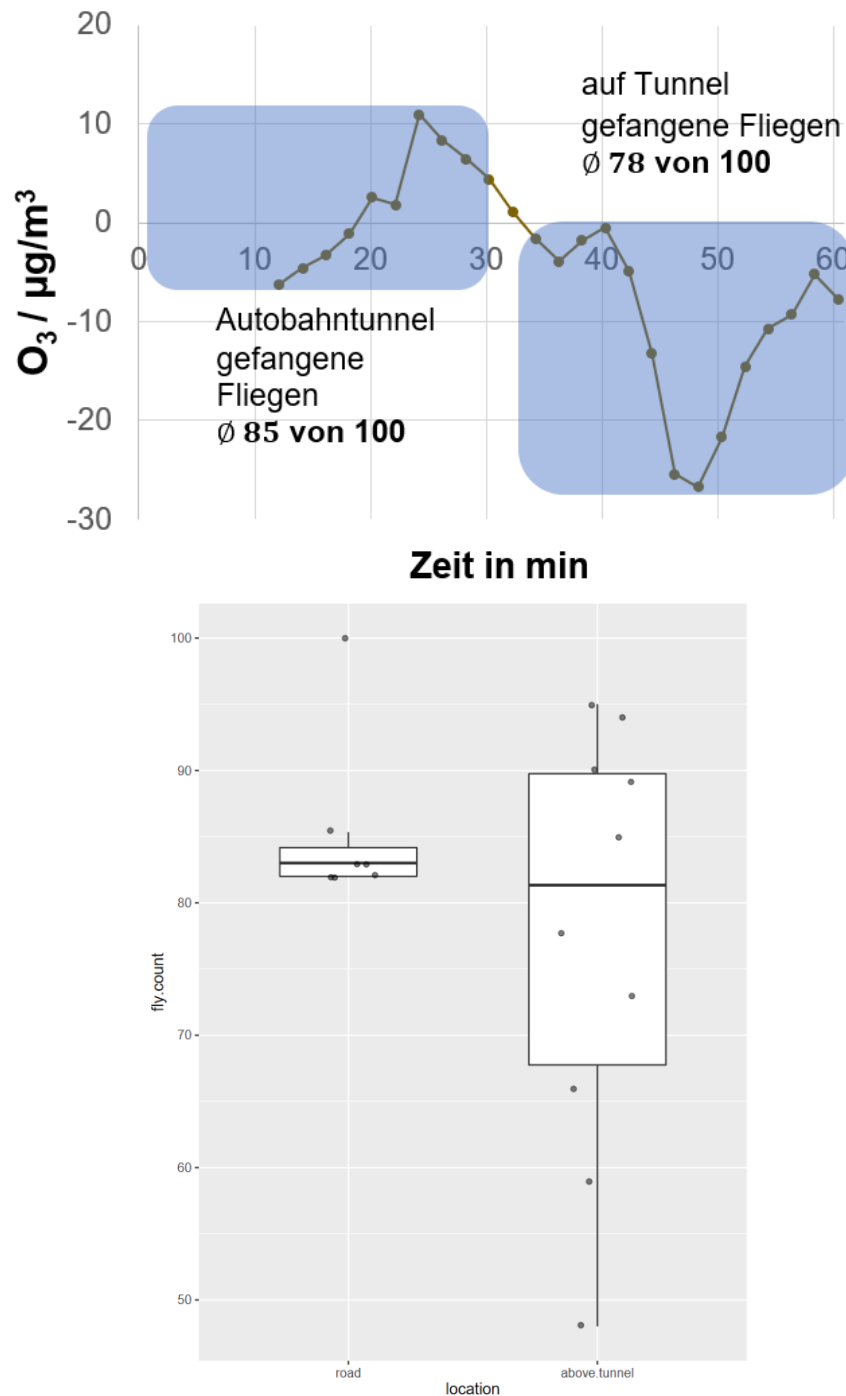


Abbildung 15 Versuch V5 Ozonwerte (oben) und gefangene Fliegen mit Boxplot (unten)

Leider waren die Messdaten des AirQs während dieser Experimente noch weniger aussagekräftig als zuvor (siehe negative Ozonwerte in Abbildung 15). Dennoch kann aus den vorhergegangenen Messungen erwartet werden, dass die Fliegen direkt an der Autobahn höheren Konzentrationen ausgesetzt waren als die oberhalb des Tunnels positionierten. Neben der Autobahn gingen im Durchschnitt *85 von 100 Fliegen* in die Fallen. Auf dem Tunnel dagegen *78 von 100*. Der Median zeigte wieder leicht abweichende Zahlen: neben der Autobahn *83 von 100* und auf dem Tunnel *82 von 100* Fliegen.

Es zeigte sich trotz verkürzter Versuchszeit eine sehr gute Auslastung der Fallen, wobei es jedoch erneut keine nennenswerten Unterschiede zwischen den beiden Standorten gab (Boxplots in Abbildung 15 unten). Auch lag abermals eine große Streuung der Daten (insbesondere über dem Tunnel) vor, die wenig Aussagekraft besitzen.

5.5 Versuch V6 Parkhaus

Die vorangegangenen Versuche V4 und V5 erbrachten keinen genauen Zusammenhang zwischen Ozonkonzentration und dem Verhalten der Fliegen. Daher wurde ein weiterer Standort ausgemacht der Potenzial für besonders verschmutzte Luft hat: ein Parkhaus. Erfahrungsgemäß entstehen hier viele Abgase, die sich gut auf engen Raum ansammeln können, wie jeder an dem unangenehmen Geruch eines Parkhauses feststellen kann. Ein weiteres Fliegenexperiment fand demnach in der Tiefgarage der Neuen Mitte in Jena statt.

Da die Air-Qs bisher keinerlei belastbaren Daten geliefert hatten, wurde bei diesem Versuch auf Luftmessung verzichtet und die Fliegen einfach unter der Annahme einer hohen Luftverschmutzung getestet. Folgender Boxplot zeigt die Auslastung der Fallen.

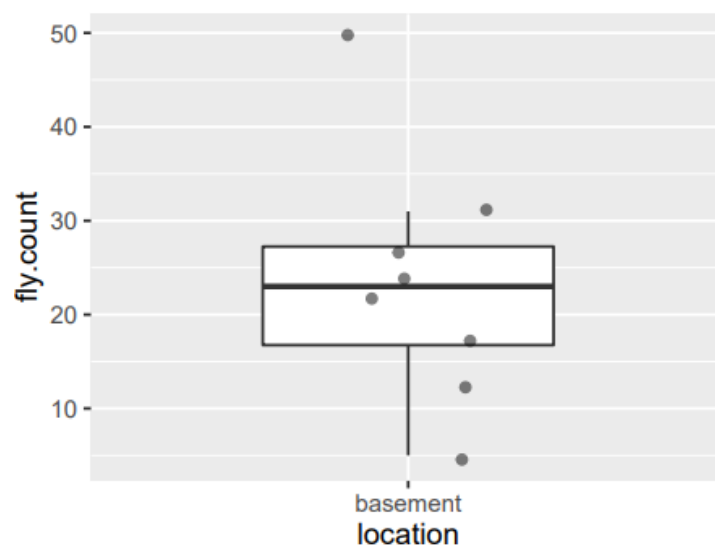


Abbildung 16 Versuch V6 gefangene Fliegen mit Boxplot

Erstaunlicherweise waren nach einer Stunde in der Tiefgarage wesentlich weniger Tiere in den Fallen anzutreffen als in den anderen Experimenten. Der Median liegt hier bei ca. 23 von 100 gefangenen Fliegen in den Fallen. Die vorangegangenen Versuchen V4 und V5 hatten Werte von weit über 60 von 100. Unter den Bedingungen, die im Parkhaus vorhanden sind, scheinen die Fliegen große Probleme zu haben ihr Futter zu finden. Ob dies an den erhöhten Schadstoffwerten oder vielleicht nur an den veränderten Lichtverhältnissen (im Parkhaus war es naturgemäß etwas dunkler als an den Versuchsflächen nahe der Autobahn), konnte ich im Rahmen meiner Bachelorarbeit nicht weiter untersuchen.

5.6 Zusammenfassung

Es wurde die These untersucht, ob sich Fruchtfliegen (*Drosophila melanogaster*) von anthropogener Luftverschmutzung in ihrer Nahrungssuche beeinflussen lassen. Dazu fanden Fallenexperimente statt, um den Geruchssinn der Fliegen zu testen und zeitliche Unterschiede beim Finden des Futters zu beobachten. Die Auswahl der Versuchsstandorte fiel auf eine viel befahrene Kraftfahrstraße, ein in der Nähe befindlichen autofreien Park sowie eine Tiefgarage. Der Fokus der Luftuntersuchungen lag dabei auf bodennahes Ozon. Die Herausforderungen dieser Pilotstudie des Max-Planck-Institutes für chemische Ökologie Jena lag dabei an vielen Stellen. Zum einem bei den bisher wenig genutzten Luftmessgeräten, deren Kalibrierung sich als fehlerhaft herausstellte. Vergleichsmessungen zwischen den Standorten fanden daher mit demselben Gerät statt. Zum anderen an der fehlenden Zeit im Rahmen einer Bachelorarbeit, da Luftmessungen immer Wetterabhängig sind und dadurch Langzeitmessungen mit vielen Messdaten nötig sind.

Es gelang mir jedoch, ein Experiment zu etablieren, bei dem Fliegen unter einerseits natürlichen Umgebungsbedingungen was die Luftverschmutzung angeht, andererseits unter Laborbedingungen was den sonstigen Versuchsaufbau (definierte Zahl von Fliegen, genormte Futterfalle, etc.) angeht, getestet werden können. Dabei ergaben sich zumindest erste Hinweise darauf, dass zumindest unter extremen Bedingungen, wie denen in einem Parkhaus, Insekten in ihrem duftgesteuerten Verhalten beeinflusst werden.

Sollte es in Zukunft möglich sein, verlässlichere Geräte als das Air-Q zur einfachen Messung der Luftverschmutzung zu entwickeln, bietet sich eine Wiederholung des Experiments mit einer größeren Bandbreite an getesteten Versuchsstandorten an.

6. Ausblick

Das Max-Planck-Institut für chemische Ökologie wird in jedem Fall weiter der Frage nachgehen ob wie sich Luftverschmutzung auf Insekten und das Zusammenspiel mit Pflanzen auswirkt. Bei Motten konnte ein Forschungsteam in Jena schon eine Reaktion auf Veränderungen von Ozon nachweisen. Die Klimaveränderungen und der menschliche Einfluss auf die Natur sind real. Es gilt weiterhin zu erforschen welche Konsequenzen in den kommenden Jahren auf uns zukommen werden und welche sinnvollen Maßnahmen dagegen ergriffen werden müssen. Die benötigten Fördermittel dazu werden der Max-Planck-Gesellschaft bis Ende 2024 mit einem Volumen von insgesamt 1,5 Millionen Euro zur Verfügung gestellt [D MDR].

Auch andere Einrichtungen wie die *Pennsylvania State University* und die *University of Virginia* publizierten schon 2013 einen Artikel über die Auswirkungen von Ozon auf die Geruchskommunikation von Pflanze und Insekt. Sie untersuchten speziell einen Pflanzenfressenden Käfer und deren Fähigkeit seine Wirtspflanze zu finden. Sie stellten eine Verwirrung des Geruchssinns bei Beimischungen von Ozon in die Umgebungsluft fest. Die Wissenschaftler legten nahe, dass eine weitergehende Bewertung der Risiken stattfinden müsse, um die Zusammenhänge besser verstehen zu können. Drohende Ökologische und wirtschaftliche Konsequenzen könnten so abgewendet werden [14, S. 3-5].

Das Insektensterben und allgemein der Einfluss des Anthropozäns auf unsere Erde muss in das Bewusstsein von mehr Menschen gebracht werden. Nur so wird weiterhin Forschungsgeld für Studien aufgebracht und nachhaltig mit unserer Umwelt umgegangen.

Literaturverzeichnis

[A1] Corant GmbH, Produkt: AIR-Q, Datenblatt: <https://www.air-q.com/technologie#spezifikationen>

(Zugriff: 03.06.2021)

[A2] Corant GmbH, Produkt: AIR-Q, Messwerte: <https://www.air-q.com/messwerte/ozon>

(Zugriff: 21.08.2021)

[B] Umweltbundesamt:

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungen>

(Zugriff: 08.06.2021)

[C] Max-Planck-Gesellschaft

<https://www.mpg.de/10885922/warum-erforschen-wissenschaftler-fruchtfliegen>

(Zugriff: 21.06.2021)

[D] Mitteldeutscher Rundfunk

<https://www.mdr.de/nachrichten/thueringen/ost-thueringen/jena/luftverschmutzung-geruchssinn-insekten-106.html>

(Zugriff: 29.08.2021)

[1] „*Insektenatlas, Daten und Fakten über Nütz- und Schädlinge in der Landwirtschaft*“, Heinrich-Böll-Stiftung, 2.Auflage, Februar 2020

[2] Caspar A. Hallmann, Martin Sore, Eelke Jongejans, Henk Siepel, Nick Hofland, Heinz Schwan, Werner Stenmans, Andreas Muller, Hubert Sumser, Thomas Horren, Dave Goulson, Hans de Kroon: „*More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas*“, University of Saskatchewan, CANADA 2017

[3] Ulrich Schmid, Johannes LM Steidle: „*Insektensterben*“, Schwäbischer Heimatbund, Article August 2020

[4] Axel Ssymank, Martin Sorg, Dieter Doczkal, Björn Rulik, Gisela Merkel-Wallner & Mareike Vischer-Leopold: „*Praktische Hinweise und Empfehlungen zur Anwendung von Malaisefallen für Insekten in der Biodiversitätserfassung und im Monitoring*“, Entomologischer Verein Krefeld, Series Natura Vol. 1 2018

- [5] Wolfgang Fritsche: „Überlastetes Ökosystem Erde. Wie der Mensch über seine Verhältnisse lebt. – Biologie in unserer Zeit“, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2008
- [7] Brynn Cook, Alexander Haverkamp, Bill S. Hansson, T'ai Roulston, Manuel Lerdau, Markus Knaden: „Pollination in the Anthropocene: a Moth Can Learn Ozone-Altered Floral Blends“, Journal of Chemical Ecology 2020
- [8] Bill S. Hansson: „Geruchswahrnehmung bei Insekten“, Max-Planck-Institut für chemische Ökologie Jena, Jahrbuch 2006/2007
- [9] Denise Felber Dietrich: „Luftverschmutzung und Gesundheit“, Bundesamt für Umwelt, Bern 2014
- [10] Lucas A. Garibaldi et al.: „Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey-bee abundance“, VOL 339, 28 Feb 2012, Science Express online (Sciencedemag.org)
- [11] Prof. Dr. rer. Nat. Wilhelm Kuttler „Bodennahes Ozon – Entstehung, standortabhängige Tagesgänge und Minderungsmaßnahmen“, Sonderdruck aus Entsorgungspraxis EP 14(5), 84-93 Essen, 1996
- [12] Francisco Sánchez-Bayo, Kris A.G. Wyckhuys, „Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers“, Biological Conservation 232, University of Sydney & University of Queensland, Australia 2019
- [13] H. Börner, „Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz“, Springer 2009
- [14] Jose D Fuentes, T'ai H Roulston and John Zenker, „Ozone impedes the ability of a herbivore to find its host“, Department of Meteorology, The Pennsylvania State University, Department of Environmental Sciences, University of Virginia, 400 Blandy Farm Lane, Boyce, VA 22620, USA 2013

Anhang

A1. Rohdaten

Exceltabellen mit gezählten Fliegen in den einzelnen Boxen

Versuch V4

| Autobahn | über Tunnel |
|----------|-------------|
| 82 | 69 |
| 82 | 83 |
| 62 | 44 |
| 83 | 74 |
| 90 | 68 |
| 47 | 56 |
| 52 | 60 |
| 84 | 77 |

Versuch V5

| Autobahn | über Tunnel |
|----------|-------------|
| 83 | 59 |
| 82 | 89 |
| 100 | 95 |
| 82 | 48 |
| 83 | 90 |
| 82 | 85 |
| | 94 |
| | 73 |
| | 66 |

Versuch V6

| Parkhaus |
|----------|
| 49 |
| 31 |
| 22 |
| 18 |
| 13 |
| 5 |
| 26 |
| 24 |

A2. Fliegenzählen

Tote Fliegen nach Entleerung der Fallen



A3. Fliegenfalle

Falle mit Essig-Spülmittelkonzentrat

