

Forschendes Lernen mit lebenden Hummeln als Modellorganismen im Unterricht

Verhaltens- und Neurobiologie mit originaler Begegnung unterrichten

Anne-Kathrin Sieg, Michelle Schäfer, Daniel Dreesmann

Johannes Gutenberg-Universität Mainz, AG Didaktik der Biologie, Institut für Organismische und Molekulare Evolutionsbiologie (iomE), D-55099 Mainz, anne.sieg@uni-mainz.de

Mit Dunklen Erdhummeln (*Bombus terrestris*) lassen sich praktische Versuche zur Verhaltens- und Neurobiologie im Unterricht durchführen. Dabei lernen Schülerinnen und Schüler in der originalen Begegnung mit Hummeln und führen u. a. Versuche der aktuellen Forschung in einer didaktisch reduzierten Weise durch. Hierdurch werden den Schülerinnen und Schülern Einblicke in aktuelle Forschungsthematiken, Forschungssettings und das wissenschaftliche Arbeiten eröffnet. Der im *Hallo Hummel!*-Projekt genutzte Aufbau aus Nest-, Futterkammer und Flugarena bietet Schülerinnen und Schülern darüber hinaus die Möglichkeit selbst generierten Forschungsfragen nachzugehen und kreativ, forschend zu lernen. Bei den im Artikel vorgestellten und erprobten Versuchen liegt der Schwerpunkt auf den Themen Stoff- und Energieaustausch zwischen Organismen, Informationsaustausch zwischen Innenwelt und Umwelt und Kommunikation mit Artgenossen, die in praktischen Versuchen mit den Tieren erarbeitet werden.

Stichwörter: Hummeln, *Bombus terrestris*, Wildbienen, Originale Begegnung, Insekten, Neurobiologie, Verhaltensbiologie, Schülerversuche, Hummelhaltung, forschendes Lernen.

1 Hummeln als Modellorganismen in der aktuellen Forschung

Die Hummel ist aufgrund einer vergleichsweise platzsparenden Haltung und einfacher Beschaffungsmöglichkeit ein beliebter Modellorganismus in der aktuellen biologischen Forschung (z.B. Ceuppens et al. 2015; Rollings und Goulson 2019; Li et al. 2017; Stöbbe et al. 2016). Dabei werden von unterschiedlichen Forschungsgruppen neben botanischen, ökologischen oder neurobiologischen Fragestellungen auch die Verhaltensbiologie des Superorganismus untersucht. Im Labor-Setting wird ein Hummelnest mit einer Flugarena verbunden, in der unterschiedliche Versuche aufgebaut werden können. Solche Versuche können didaktisch reduziert mit ähnlichem Aufbau auch im Schulunterricht durchgeführt werden, um die jeweiligen Inhalte von den Schülerinnen und

Schülern erarbeiten zu lassen (Sieg und Dreesmann 2020). In der Projekt-Erprobung zeigten Schülerinnen und Schüler der Oberstufe ein großes Interesse am aktuellen Forschungsstand in Bezug auf eine künftige Studienwahl. Darüber hinaus wurde deutlich, dass für Schülerinnen und Schüler die Erkenntnis, dass bei Organismen wie Hummeln noch Forschungsbedarf besteht, mit großem Staunen verbunden war. Dies widersprach der gewohnten Eindeutigkeit der Faktenvermittlung des Biologieunterrichts.

1.1 Die Haltung und Pflege von Dunklen Erdhummeln (*Bombus terrestris*) als zentrales Element im Unterricht

Für die hier vorgestellten Versuche aus dem *Hallo Hummel!*-Projekt der AG Didaktik der Biologie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz ist die vorübergehende Haltung eines Hummelvolkes im Unterrichtsraum notwendig (Sieg und Dreesmann 2020). Hierdurch können Schülerinnen und Schüler direkt in das Hummelnest hineinschauen und in einer an das Nest angeschlossenen Flugarena einzelne praktische Versuche mit den Hummeln durchführen (vgl. Abb. 1).

Über den Zeitraum der praktischen Versuche wird das Hummelvolk im Unterrichtsraum gehalten (Sieg und Dreesmann 2020). In dieser Zeit müssen die Tiere betreut und gepflegt werden. Das Pflegen von Lebewesen fördert bei Schülerinnen und Schülern die Übernahme von Verantwortung und eine fürsorgliche Haltung. Darüber hinaus wird der Umgang mit den Tieren erlernt. Dabei können den Lernenden Umweltansprüche deutlich werden, ein Einblick in Lebensgewohnheiten von Organismen gewonnen und Beobachtungen von Entwicklungsvorgängen und verhaltensbiologische Einsichten ermöglicht werden (Randler 2013; Killermann et al. 2009).

Unterrichten mit Lebewesen sowie deren Haltung und Pflege gehören zu den Arbeitsweisen bzw. Prinzipien des Biologieunterrichts (Gropengießer et al. 2013; Killermann et al. 2009). Der Umgang mit lebendigen Tieren kann zur Erhöhung des Interesses, zum Abbau von Furcht und zur Festigung einer positiven Einstellung führen (Killermann et al. 2009). Schülerinnen und Schüler können zudem auf Lebewesen aus ihrer unmittelbaren Umgebung aufmerksam gemacht werden (Berck und Graf 2018).



Abbildung 1: Schülerinnen und Schüler bei der Versuchsbeobachtung im *Hallo Hummel!*-Projekt. Alle Fotos, sofern nicht anders vermerkt: AG Didaktik der Biologie

2 Verhaltens- und Neurobiologie mit mit Dunklen Erdhummeln unterrichten

Im Folgenden werden die erprobten Unterrichtsmaterialien aus dem Modul Verhaltens- und Neurobiologie des *Hallo Hummel!*-Projekts vorgestellt, bei denen Schülerinnen und Schüler in der originalen Begegnung mit Dunklen Erdhummeln Inhalte erarbeiten (vgl. Tab. 1). In den erprobten Beobachtungsaufgaben und Versuchen liegt der Schwerpunkt auf Fachbegriffen und Kompetenzen, die den Konzepten System, Entwicklung und Energie zugerechnet werden können. Dabei wurden die einzelnen Versuche exemplarisch in den rheinland-pfälzischen Lehrplan eingeordnet und auf Grundlage dessen auf unterschiedlichen Niveaustufen konzipiert. Die Materialien sind als Anlage an diesen Artikel vorhanden.

Titel	Inhalt	Konzept	Fachbegriffe	Anlage
Der Hummelstaat	Beobachtungsaufgaben am Hummelvolk zu Körpermerkmalen, Entwicklungsstadien, Nahrung und Wärmeregulation (Stationsarbeit)	Entwicklung System	Individualentwicklung Superorganismus	S. 1-6
Pfefferminz oder Anis? / Duft als Erkennungsmerkmal von Blüten	Überprüfung des Erfolges einer Duftkonditionierung	System	Reiz – Erregung – Weiterleitung Sinnesorgan Nerv Gehirn	S. 7
Überprüfen der Behaltensleistung	Erneutes Überprüfen der Geruchskonditionierung nach zwischenzeitlichem Füttern mit geruchsneutralem Zuckerwasser	System	Reiz – Erregung – Weiterleitung Sinnesorgan Nerv Gehirn	-
Pheromon-Kommunikation	Zugabe des Sammelpheromons und Beobachtung der sich ändernden Aktivität im Hummelvolk	System	Reiz – Erregung – Weiterleitung Sinnesorgan Nerv Gehirn	S. 8
Wie stark ist eine Hummel?	Ermitteln des maximalen Gewichtes, das Hummeln hochstemmen können; Bezug des gestemmtten Gewichtes zum eigenen Körpergewicht.	Energie	Energieträger Energieumwandlung	S. 9
Zuckerpräferenz der Hummel	Bereitstellung unterschiedlicher Zuckerkonzentrationen und Beobachtung der Präferenz der Sammlerinnen.	Energie	Energieträger Energieumwandlung Subjektivität Objektivität	S. 10

Tabelle 1: Erprobte praktische Versuche des *Hallo Hummel!*-Projektes im Kontext der Neuro- und Verhaltensbiologie.

Im Folgenden werden die erprobten praktischen Versuche mit Dunklen Erdhummeln (vorgestellt). Diese finden in einem Gehege aus Nest-, Futterkammer und Flugarena statt (vgl. Abb. 2).

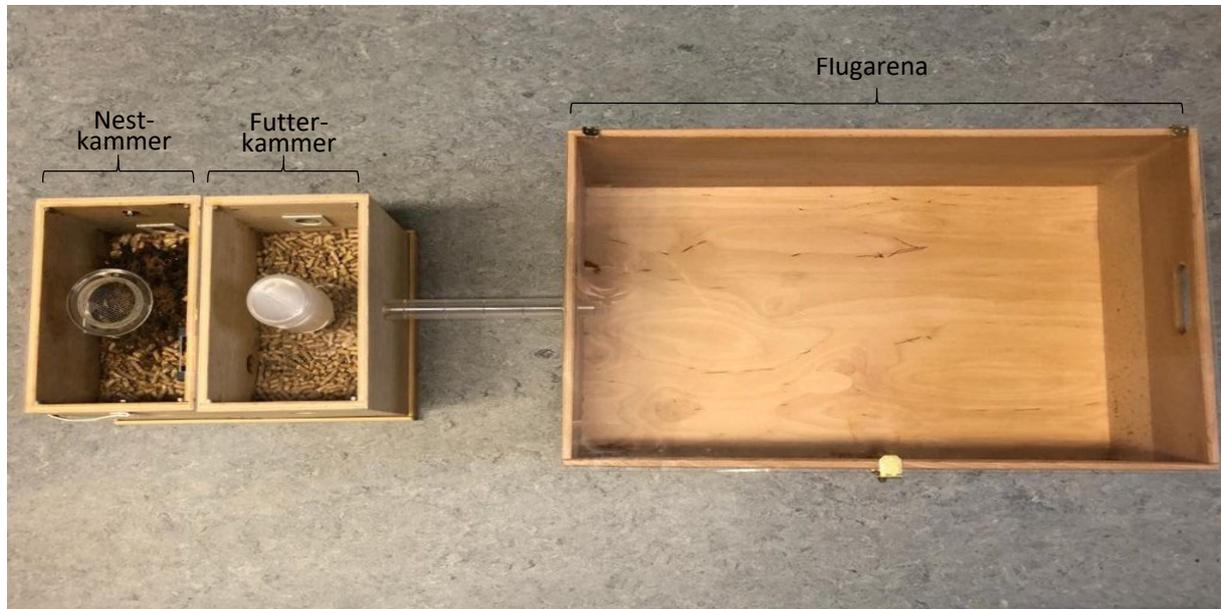


Abb. 2: Vorübergehende Haltungsmöglichkeit des Hummelvolkes in einem Gehege im Unterrichtsraum: Auf der Nest-, Futterkammer und Flugarena befinden sich Plexiglasscheiben, sodass die Hummeln gut beobachtet werden können. Die Nestkammer kann in eine Nisthilfe im Freiland eingesetzt werden (vgl. Sieg und Dreesmann 2020).

2.1 Der Hummelstaat

Vom Blick in ein echtes Nest der Dunklen Erdhummel geht für Schülerinnen und Schüler eine große Faszination aus (vgl. Abb. 1). In einer Stationsarbeit mit Aufgabenstellungen zum zielgerichteten Beobachten wird der Fokus der Schülerinnen und Schüler auf die folgenden Aspekte gelenkt:

- Körpermerkmale (Körpergröße und Bedeutung; Exoskelett)
- Entwicklungsstadien (Identifikation der vorhandenen Entwicklungsstadien in den Brutzellen; Metamorphose)
- Nahrung (Sammelaufwand und Honigtöpfchen)
- Ausscheidungen (Hinterlassenschaften der Hummeln)
- Wärmeregulation (Bebrüten und Kühlen der Brutzellen)



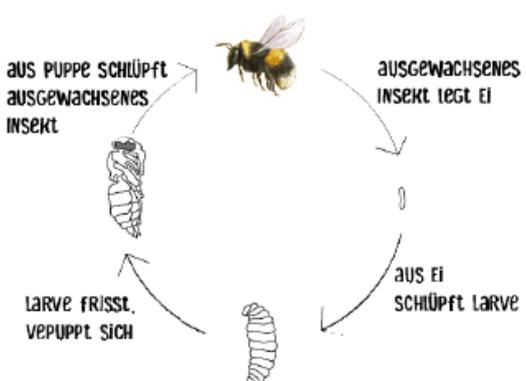
Abbildung 3:
Videoaufnahmen
im Hummelnest.

Die Stationskarten (vgl. Abb. 4) sind als Anlage zu diesem Artikel verfügbar. Zu den jeweiligen Beobachtungsaufgaben sind Videoaufnahmen vorhanden. Auf diese kann zurückgegriffen werden, falls punktuell einzelne Aspekte, wie das Eierlegen der Königin, nicht beobachtbar sein sollten. Die Videos stehen auf unserer Homepage zur Verfügung (vgl. Abb. 3).

station 2: ENTWICKLUNGSSTADIEN

Hummeln besitzen eine vollständige Verwandlung (Metamorphose). Tiere, die noch nicht ausgewachsen sind, befinden sich zuerst als Eier und dann als Larven in Brutzellen aus Wachs. Die Larven verpuppen sich. Aus den Puppen schlüpfen die ausgewachsenen Hummeln, die wir im Nest sehen. Die Entwicklungsstadien der Hummeln in den Brutzellen lässt sich an der Form der Wachsellen unterscheiden.

Das Wachs, aus dem die Brutzellen bestehen, wird von den Hummeln produziert. Sie können es aus Wachsdrüsen an ihrer Bauchseite ausscheiden. Anschließend formen sie das Wachs mit ihren Mundwerkzeugen.



AUS PUPPE SCHLÜPFT AUSGEWACHSENES INSEKT

AUSGEWACHSENES INSEKT LEGT EI

AUS EI SCHLÜPFT LARVE

LARVE FRISST, VERPUPPT SICH



Honigtöpfchen Eier



Puppen Larven

Jetzt bist du dran:

Notiere die Antworten in deinem Heft. Kannst du etwas nicht am Hummelnest vor dir beobachten, kannst du den QR-Code einscannen und dir dort einen Film anschauen.

- 1) Notiere dir, woran du die Königin erkennst. Suche die Königin im Nest.
- 2) Beschreibe das Verhalten der Königin.
- 3) Benenne die Arten der Brutzellen, die du im Nest entdecken kannst.



Abb. 4: Beispiel einer Stationskarte mit Beobachtungsaufgaben zum Hummelstaat.

2.2 Pfefferminz oder Anis? Duft als Erkennungsmerkmal von Blüten

Blüten senden Signale aus, um Bestäuber anzulocken. Über Farbe, Duft und Form können Bestäuber Pflanzen der gleichen Art wiedererkennen. Dadurch können sie, wenn sie eine gute Trachtquelle gefunden haben, dieser treu bleiben und durch Routine und Wissen über den Ort des Nektars, schneller an die Nahrung gelangen. Diese Blütenstetigkeit nutzt Bestäubern und Pflanzen. Denn neben dem effizienteren Sammeln des Nektars und Pollens, können die jeweiligen Pflanzen nur von Pollen der gleichen Art bestäubt werden. Im Versuch wird der Duft als Erkennungsmerkmal von Blüten untersucht.

Als Vorbereitung wird das Volk der Dunklen Erdhummel mit einer 50 prozentigen Zuckerlösung gefüttert, die mit einem Pfefferminzöl (5-10 μ l Duft-Öl pro 100ml 50%iger Zuckerlösung) versetzt wurde. Das zufällige Anfliegen der Lösung mit Pfefferminzgeruch, wird durch den enthaltenen Zucker bestärkt. Dadurch wird das Anfliegen des Pfefferminzduftes mit Futter assoziiert und somit durch die Konditionierung zum erlernten Verhalten.

Stellt man den Dunklen Erdhummeln im Schülerversuch nun jeweils 50 prozentige Zuckerlösungen mit Anis- und mit Pfefferminzduft zur Verfügung, sammeln die Hummeln weiterhin Zuckerwasser, das nach Pfefferminz duftet (vgl. Abb. 5). Dabei ist darauf zu achten, dass während der Konditionierungsphase kein Ort zum Füttern gewählt wird, der in der Testphase zur Auswahl steht, um die Lernleistung tatsächlich auf den Duft und nicht den Ort zurückführen zu können. Der Versuch kann nach mehreren Tagen der Fütterung mit neutraler Zuckerlösung wiederholt werden, um die Dauer der Lernfähigkeit der Hummeln unter Beweis zu stellen.



Abbildung 5: Blick der Schülerinnen und Schüler während der Testphase der Duftkonditionierung in die Flugarena.

2.3 Pheromonkommunikation

Pheromone sind chemische Botenstoffe, die innerhalb einer Gruppe von Individuen einer Art eine Signalwirkung besitzen. Gibt eine Hummel über spezielle Drüsen Pheromone ab, breiten sich diese über die Luft aus. Erreichen die Pheromone ein anderes Tier, kann die jeweilige Hummel die Pheromone über Sensillenhaare an den Antennen wahrnehmen. Bei Pheromonen kann bereits ein einziges Molekül einen Nervenimpuls auslösen (Fleischer und Krieger 2018; Sachse und Krieger 2011).

Im Versuch beobachten die Schülerinnen und Schüler das Verhalten der Dunklen Erdhummeln im Nest und zählen die Anzahl der Tiere, die sich zum Sammeln außerhalb des Nestes befinden. Anschließend wird 1 ml einer 1,8-Cineol-Lösung (400µl 1,8-Cineol in 1l Aceton) auf einen Wattebausch gegeben und in das Nest gehalten (vgl. Abb. 6). Bei 1,8-Cineol handelt es sich um ein Sammelpheromon, das auch unter dem Namen Eucalyptol bekannt ist. Hummeln reagieren auf die Zugabe mit einer gesteigerten Aktivität (Molet et al. 2008). Die Schülerinnen und Schüler können beobachten, dass die Bewegungsaktivität im Nest zunimmt und sich nun eine größere Anzahl an Hummeln außerhalb des Nestes zum Sammeln befindet.



Abbildung 6: Vorbereitung des Pheromonversuchs.

Foto: M. Seimetz, Mainz

2.4 Wie stark ist eine Hummel?

Hummeln sind im Verhältnis zu ihrem Körpergewicht starke Tiere. Welches Gewicht eine Hummel mit ihrem Kopf hochstemmen kann, finden die Schülerinnen und Schüler in diesem Versuch heraus. In den Gang zwischen

Eine Hummel wiegt 0,31g. Sie kann ein Gewicht von 2,13g stemmen. Der Schüler Anton wiegt 43kg. Welches Gewicht müsste er im Verhältnis mit seinem Kopf stemmen?

$$2,13\text{g} : 0,31\text{g} = 6,87$$

$$43\text{kg} * 6,87 = 295,45\text{ kg}$$

Anton müsste im Verhältnis zu seinem Körpergewicht 295,45kg stemmen.

Abbildung 8: Beispielrechnung.

Flugarena werden Plättchen eingesetzt, die von

den Schülerinnen und Schülern mit Gewichten aus Knete versehen werden (vgl. Abb. 7). Die Hummeln



Abbildung 7: Hummeln stemmen Gewichte aus Plastikplättchen mit Knete im Gang zwischen Nest und Flugarena mit dem Kopf hoch.

stemmen diese Gewichte hoch, um in die Flugarena zu gelangen. Ein Anleitungsvideo mit dem Titel „Wie stark ist eine Hummel?“, befindet sich auf der Projekthomepage (vgl. Abb. 3). Das von den Hummeln maximal gestemmte Gewicht, wird nun mit dem Körpergewicht der Hummel in das Verhältnis gesetzt. Hierzu wird eine Dunkle Erdhummel gewogen. Das Verhältnis von gestemmttem Gewicht und Körpergewicht können die Schülerinnen und Schüler wiederum auf sich selbst übertragen (vgl. Abb. 8).

2.5 Zuckerpräferenz der Hummel

Hummeln benötigen beim Fliegen viel Energie, sodass sie hierzu ihre Stoffwechselrate um das 150fache gegenüber ihrem Grundumsatz steigern müssen. Beim Menschen steigt im Vergleich dazu der Energieumsatz bei starken physischen Belastungen, wie einem Sprint, auf das 10-20fache (Müller et al. 2009). Außerdem können Hummeln unter dem Verbrauch von Energie Wärme erzeugen. Daher können sie bei niedrigen Außentemperaturen zu Sammelflügen starten, obwohl sie erst ab einer Körpertemperatur von 30°C

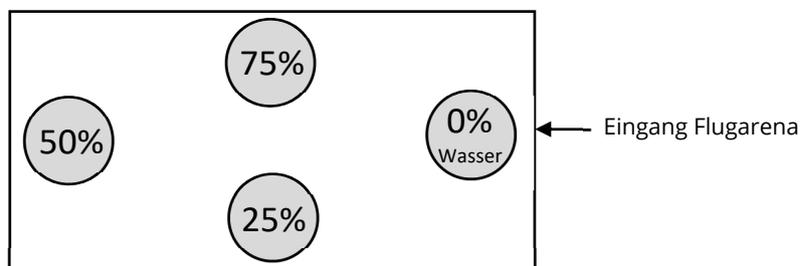


Abbildung 9: Schemazeichnung der Versuchsaufbaus in der Flugarena.

fliegen können. Die Möglichkeit den Körper zu erwärmen ist eine Besonderheit unter den wechselwarmen Insekten (Hagen und Aichhorn 2014). Der Energieträger, den Hummeln zur Bewegung und Wärmeerzeugung nutzen, ist Zucker aus dem Nektar der Blütenpflanzen.

Im Versuch bieten die Schülerinnen und Schüler Dunklen Erdhummeln reines Wasser, 25%ige, 50%ige und 75%ige Zuckerlösung an und beobachten, welche Futterlösung in welcher Häufigkeit



Abbildung 10: Versuchsbobachtung von Schülerinnen und Schülern.

genutzt wird (vgl. Abb. 9 & 10). Die Ergebnisse hinsichtlich der Präferenz einer Zuckerkonzentration können sich situativ ändern. Grundsätzlich werden hohe Konzentrationen bevorzugt, da mehr Energie enthalten ist. Stellt man Hummeln eine 75%ige und eine 50%ige Zuckerlösung als Nahrungsquellen zur Verfügung, kann in Stresssituationen auch die 50%ige Konzentration bevorzugt werden. Denn hier kann aufgrund der geringeren Viskosität pro Zeiteinheit der meiste Zucker aufgenommen werden (Nardone et al. 2013).

Bei der Durchführung des Versuches müssen die Dunklen Erdhummeln zuerst herausfinden, dass unterschiedliche Konzentrationen angeboten werden. Erst dann können sie zwischen den Konzentrationen wählen. Daher sollte der Versuch über den Zeitraum einer Doppelstunde stattfinden und sich die Beobachtungsgruppen abwechseln, während die andere Hälfte der Klasse die theoretischen Grundlagen bearbeitet.

2.6 Kreatives forschendes Lernen und wissenschaftliches Arbeiten

Im Rahmen von Wahlpflichtkursen, die an der Erprobung des *Hallo Hummel!*-Projektes teilnahmen, generierten Schülerinnen und Schüler in Kleingruppen eigene Forschungsprojekte, die im Aufbau aus Nest-, Futterkammer und Flugarena mit einem Volk der Dunklen Erdhummel durchgeführt wurden. Die Planung, Erprobung und Dokumentation mit anschließender Reflektion möglicher Fehlergrößen, Übertragbarkeit und Reichweite der Ergebnisse, wurde schriftlich dokumentiert und als Portfolio bewertet. Das so ermöglichte kreative, forschende Lernen vermittelt Schülerinnen und Schülern das Handwerkszeug wissenschaftlichen Arbeitens. Jedoch ist dieser Prozess sehr zeitintensiv, sodass sich diese Umsetzung in der Erprobung auf Wahlpflichtkurse beschränkte und keinen Einzug in den Regelunterricht erhielt. Durch flexiblere Inhalte und ausreichendem Stundenumfang bieten Wahlpflichtkurse eine besondere Möglichkeit zur Förderung des forschenden Lernens in der originalen Begegnung mit Hummeln für Schülerinnen und Schüler.

2.7 Didaktische und methodische Überlegungen zur Handhabung von Dunklen im schulischen Kontext

Zum praktischen Arbeiten im Unterricht haben sich Materialien, Methoden und Vorgehensweisen bewährt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Beobachtungsaufgaben und Versuche

Der Platz um Flugarena und Nest ist begrenzt (vgl. Abb. 6 & 10), sodass nur die Hälfte einer Schulklasse zeitgleich mit den Tieren arbeiten kann. Während eine Hälfte der Klasse Beobachtungen und Versuche mit den Hummeln durchführt, bearbeitet die andere Hälfte der Schülerinnen und Schüler den theoretischen Hintergrund der jeweiligen Aufgabe. In der darauffolgenden Stunde tauschen beide Gruppen, sodass jeder und jede sowohl die originale Begegnung als auch die wissenschaftlichen Grundlagen zur Deutung der Beobachtungen erarbeitet.

Federstahlpinzetten und Snapys

Ob zum Aufbau von Versuchen oder zum Reinigen einzelner Teile des Geheges: Hummeln können im verdunkelten Raum mit einer Federstahlpinzette oder einem Snapy entnommen und in das Nest gesetzt werden (vgl. Abb. 11). Hierbei kann es vorkommen, dass sich einzelne Hummeln durch das Umsetzen erschrecken und daher trotz Verdunklung auffliegen. Das jeweilige Tier fliegt in diesem Fall hoch und landet kurz darauf wieder oder fliegt, falls vorhanden, in Richtung einer Lichtquelle. Setzen mehrere Schülerinnen und Schüler die Tiere gemeinsam um, können Weithalsflaschen zum Sammeln der Tiere genutzt werden. Hummeln können aus den Weithalsflaschen bei verdunkeltem Raum nicht entkommen. Sie fliegen an den Wänden der Weithalsflaschen herauf. Die Verengung des Flaschenhalses verhindert jedoch ein Herausfliegen.



Abbildung 11: Umsetzen von Hummeln mit Snapys und Federstahlpinzetten.

Gerade zu Beginn der Pflege des Hummelvolkes bevorzugen die meisten Schülerinnen und Schüler einen Snapy zum Umsetzen der Tiere, da hier eine größere Distanz zwischen Hand und Tier vorhanden ist. Je häufiger die Schülerinnen und Schüler mit den Dunklen arbeiteten, desto vertrauter wurden sie mit der Handhabung. Daraus folgte eine häufigere Nutzung der Federstahlpinzetten, mit denen einzelne Tiere gezielt an einem Bein gepackt werden und das Umsetzen schneller stattfinden kann. Das Exoskelett der Hummeln ist so stabil, dass sie durch Federstahlpinzetten unverletzt bleiben. Durch die Aufforderung der Schülerinnen und Schüler, sich selbst mit der Federstahlpinzette in den Finger zu kneifen, kann veranschaulicht werden, dass Federstahlpinzetten nachge-

Füttern und Pflege

Das Hummelvolk muss über die Zeitspanne der Haltung im Unterrichtsraum täglich mit frischem Pollen gefüttert werden. Dieser kann im Imkereibedarf erworben werden und sollte im Tiefkühlfach gelagert werden. Zudem benötigen die Hummeln einen Nektarersatz, der den Hummeln in Form von Zuckerwasser zur Verfügung gestellt wird. Neben der Fütterung sollten Futterkammer und Flugarena, je nach Volkgröße, 1-2x wöchentlich gereinigt werden.

Das vorübergehende Halten von Hummeln im geschlossenen System ist mit einem erhöhten Zeitaufwand durch das Füttern und Reinigen des Geheges verbunden, wodurch im Rahmen des erarbeiteten Konzeptes nur die hier vorgestellte Auswahl an Versuchen durchgeführt und erprobt wurde. Der Aufbau des Geheges (vgl. Abb. 2) ermöglicht jedoch zahlreiche weitere spannende Versuche, die auch mit den Schülerinnen und Schülern gemeinsam entwickelt werden können.

T
i
e

Weitere methodische Hinweise zur Beschaffung, Haltung und Handhabung von Dunklen Erdhumeln im schulischen Kontext können Sieg und Dreesmann (2020) entnommen werden. Diese sollten vor der Durchführung bezüglich rechtlicher Hinweise sowie dem sicheren Umgang mit Humeln durchgesehen werden.

Dank

Wir bedanken uns herzlich bei den Schülerinnen und Schülern und Lehrkräften, die bei der Erarbeitung und Erprobung des Projektes teilnahmen. Ihre Bereitschaft und Freude bei der Einarbeitung in die neue Thematik haben uns begeistert. Ein besonderer Dank gilt Martin Seimetz (Gymnasium am Kurfürstlichen Schloss, Mainz), der durch seine vielfältigen Ideen und konstruktiven Rückmeldungen das Projekt besonders bereicherte.

Literaturverzeichnis

Berck, Karl-Heinz; Graf, Dittmar (2018): Biologiedidaktik. Grundlagen und Methoden. Unter Mitarbeit von Anke Fischer und Melek Yaman. 5., aktualisierte Auflage. Wiebelsheim: Quelle & Meyer Verlag.

Ceuppens, Bob; Eraerts, Maxime; Vleugels, Tim; Cnops, Gerda; Roldan-Ruiz, Isabel; Smagghe, Guy (2015): Effects of dietary lambda-cyhalothrin exposure on bumblebee survival, reproduction, and foraging behavior in laboratory and greenhouse. In: *J Pest Sci* 88 (4), S. 777–783. DOI: 10.1007/s10340-015-0676-9.

Fančovičová, Jana; Prokop, Pavol (2017): Effects of Hands-on Activities on Conservation, Disgust and Knowledge of Woodlice. In: *Eurasia J. Math. Sci. Tech. Educ.* DOI: 10.12973/ejmste/80817.

Fleischer, Jörg; Krieger, Jürgen (2018): Insect Pheromone Receptors - Key Elements in Sensing Intra-specific Chemical Signals. In: *Frontiers in cellular neuroscience* 12, S. 425. DOI: 10.3389/fncel.2018.00425.

Gropengießer, Harald; Harms, Ute; Kattmann, Ulrich; Bögeholz, Susanne; Eschenhagen, Dieter (Hg.) (2013): Fachdidaktik Biologie. 11. Auflage. Seelze: Aulis Verlag.

Hagen, Eberhard von; Aichhorn, Ambros (2014): Hummeln. Bestimmen, ansiedeln, vermehren, schützen. (Bumblebees). 6. neu bearb. Aufl. Nottuln: Fauna-Verl.

Hosaka, Tetsuro; Sugimoto, Koun; Numata, Shinya (2017): Childhood experience of nature influences the willingness to coexist with biodiversity in cities. In: *Palgrave Commun* 3 (1), S. 117. DOI: 10.1057/palcomms.2017.71.

Kahn, Peter H. (1999): The human relationship with nature. Development and culture. Cambridge, Mass., London: The MIT Press.

Kellert, Stephen R. (2002): Experiencing Nature: Affective, Cognitive, and Evaluative Development in Children. In: Peter H. Kahn und Stephen R. Kellert (Hg.): Children and nature. Psychological, sociocultural, and evolutionary investigations. Cambridge, Mass.: MIT Press, S. 117–151.

Killermann, Wilhelm; Hering, Peter; Starosta, Bernhard (2009): Biologieunterricht heute. Eine moderne Fachdidaktik. 17. Auflage. Augsburg: Auer (Didaktik).

Li, Li; MaBouDi, HaDi; Egertová, Michaela; Elphick, Maurice R.; Chittka, Lars; Perry, Clint J. (2017): A possible structural correlate of learning performance on a colour discrimination task in the brain of the bumblebee. In: *Proceedings. Biological sciences* 284 (1864). DOI: 10.1098/rspb.2017.1323.

Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz (1998): Lehrplan Biologie. Grund- und Leistungsfach Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe).

Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Jugend und Kultur (2010): Rahmenlehrplan Naturwissenschaften. für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz.

Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur (2014): Lehrpläne für die Naturwissenschaftlichen Fächer Biologie, Chemie, Physik. für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz.

- Molet, Mathieu; Chittka, Lars; Stelzer, Ralph J.; Streit, Sebastian; Raine, Nigel E. (2008): Colony nutritional status modulates worker responses to foraging recruitment pheromone in the bumblebee *Bombus terrestris*. In: *Behav Ecol Sociobiol* 62 (12), S. 1919–1926. DOI: 10.1007/s00265-008-0623-3.
- Müller, Werner; Frings, Stephan; Müller, Werner A. (2009): Chemische Sinne / Tier- und Humanphysiologie. Eine Einführung. 4., überarbeitete und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Nardone, Erika; Dey, Tania; Kevan, Peter G. (2013): The effect of sugar solution type, sugar concentration and viscosity on the imbibition and energy intake rate of bumblebees. In: *Journal of insect physiology* 59 (9), S. 919–933. DOI: 10.1016/j.jinsphys.2013.06.007.
- Randler, Christoph (2013): Unterrichten mit Lebewesen. In: Harald Gropengießer, Ute Harms, Ulrich Kattmann, Susanne Bögeholz und Dieter Eschenhagen (Hg.): *Fachdidaktik Biologie*. 11. Auflage. Seelze: Aulis Verlag, S. 299–311.
- Rollings, Rosi; Goulson, Dave (2019): Quantifying the attractiveness of garden flowers for pollinators. In: *J Insect Conserv* 6, e23459. DOI: 10.1007/s10841-019-00177-3.
- Sachse, Silke; Krieger, Jürgen (2011): Der Geruchssinn der Insekten – Primärprozesse der Duftstofferkennung und Kodierung. In: *e-Neuroforum* 17 (3), S. 3970. DOI: 10.1515/nf-2011-0303.
- Sieg, Anne-Kathrin; Dreesmann, Daniel (2020): Mit und von Hummeln lernen. Originale Begegnungen mit einem lebenden Hummelvolk im Biologieunterricht der Sekundarstufe I und II. BU praktisch - Das Online-Journal für den Biologieunterricht, Vol 3 No 1 (2020): Quer durch das Tierreich. In: *BU praktisch* 3 (1). DOI: 10.4119/bupraktisch-3287.
- Sieg, Anne-Kathrin; Teibtner, Rudolf; Dreesmann, Daniel (2018): Don't Know Much about Bumblebees? - A Study about Secondary School Students' Knowledge and Attitude Shows Educational Demand. In: *Insects* 9 (2). DOI: 10.3390/insects9020040.
- Stöbbe, Janina; Schramme, Jürgen; Claßen-Bockhoff, Regine (2016): Training experiments with *Bombus terrestris* and *Apis mellifera* on artificial 'Salvia' flowers. In: *Flora* 221, S. 92–99. DOI: 10.1016/j.flora.2015.12.007.
- Wells, Nancy M.; Lekies, Kristi S. (2006): Nature and the Life Course: Pathways from Childhood Nature Experiences to Adult Environmentalism. In: *Child. Youth Environ.* 16 (1), S. 1–24.
- Wüst-Ackermann, Peter; Vollmer, Christian; Randler, Christoph; Itzek-Greulich, Heike (2018): The Vivarium. Maximizing Learning with Living Invertebrates-An Out-of-School Intervention Is more Effective than an Equivalent Lesson at School. In: *Insects* 9 (1). DOI: 10.3390/insects9010003.