

Ökotoxikologische Forschung im Unterricht



Digital gestütztes Schulexperiment zur Wirkung eines Pflanzenschutzmittels auf den Wasserfloh *Daphnia magna*

ISABELL KERN – INGEBORG HEIL – JOHANNES BOHRMANN

Die Ökotoxikologie bietet zahlreiche Anknüpfungspunkte für einen an Wissenschaft und nachhaltiger Entwicklung orientierten Biologieunterricht. Basierend auf dem Ansatz der curricularen Innovationsforschung wurde ein ökotoxikologisches Schulexperiment zur Wirkung eines Pflanzenschutzmittels auf *Daphnia magna* entwickelt. Die originale Begegnung kann dabei mit einem variablen Einsatz digitaler Werkzeuge verbunden werden, um auch Digitalisierung als Kennzeichen von Forschung zu berücksichtigen.

1 Curriculare Innovationsforschung in der Biologiedidaktik

Aufgrund des sich ständig weiterentwickelnden, naturwissenschaftlichen Wissensstands stellt die theoriegeleitete Aufbereitung neuer Inhalte für den Unterricht eine wesentliche Aufgabe innovativer Fachdidaktik dar. Idealerweise werden hierbei auch Querschnittsthemen wie z.B. Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) und Digitalisierung berücksichtigt, die integrale Bestandteile des Fachunterrichts sein sollen (KMK, 2016, 2024a; SCHREIBER & SIEGE, 2016). Das Modell der curricularen Innovationsforschung bietet eine Möglichkeit, sich dieses Anliegens anzunehmen und zu aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen Experimente und Unterrichtsmaterialien für die Schulpraxis zu entwickeln (GRANDRATH & BOHRMANN-LINDE, 2022; PARCHMANN et al., 2017; TAUSCH, 2004; TAUSCH & FLINT, 2017). Der Prozess gliedert sich gemäß GRANDRATH und BOHRMANN-LINDE (2022) im Wesentlichen in drei Schritte: 1.) Auswahl einer Thematik mit Bezug zu Curricula, 2.) Entwicklung und Optimierung von Experimenten, 3.) Einbettung der Experimente in Konzepte und Materialien. Entsprechend wurden für den Fachunterricht relevante Aspekte der Ökotoxikologie auf Grundlage aktueller Forschungsliteratur herausgearbeitet (Kap. 2 und 3), in Form eines ökotoxikologischen Experiments konkretisiert (Kap. 4) und Unterrichtsmaterial entwickelt (Kap. 5). Schülermaterial (inkl. Protokoll, Video zur Durchführung, ...), Musterlösungen und weitere Materialien für eine analoge und digitale Umsetzung stehen online zur Verfügung (Kasten 1).

2 Relevanz der Ökotoxikologie für den Unterricht

Herausforderungen nachhaltiger Entwicklung sind bei Schüler/innen sehr präsent: Das Greenpeace Nachhaltigkeitsbarometer 2021 zeigt, dass das Nachhaltigkeitsbewusstsein deutscher Jugendlicher im Vergleich zu vorherigen Studien zugenommen hat (KRESS, 2021). Während allerdings Umweltschutz und Klimawandel zu den Top-Themen der Jugendlichen zählen und z.B. die Erhaltung der Artenvielfalt von 95% der Befragten als eher bis sehr wichtig erachtet wird, fühlen sich über 60% der

Schüler/innen weniger oder gar nicht gut durch ihre Ausbildung auf die Herausforderungen der Zukunft vorbereitet (KRESS, 2021).

Nachhaltigkeitsbezogene Themen können also für Schüler/innen bedeutsame Kontexte beim Erwerb lehrplanrelevanter Fachkompetenzen darstellen. So kann BNE als integrales Element fachlichen Lernens etabliert werden (KMK, 2024a; MSB, 2019b; SCHREIBER & SIEGE, 2016). Für den Biologieunterricht in der Schule und an außerschulischen Lernorten ist die Ökotoxikologie als Thema sehr gut geeignet (FRENGER et al., 2011; GIOVIO et al., 2020; HOLLERT et al., 2013; MÜLLER, 2013).

2.1 Thematik mit Lehrplanbezug

Als interdisziplinäres Forschungsfeld und Teilgebiet der Umweltwissenschaften untersucht die Ökotoxikologie die Auswirkungen von anthropogenen Chemikalien auf die Umwelt auf allen biologischen Ebenen (FENT, 2013; HOLLERT et al., 2013; NEWMAN, 2020; SPARLING, 2016). Ökotoxikologische Fragestellungen ermöglichen die Erarbeitung und Anwendung von Basiswissen zu Ökologie und Neurobiologie, zeigen den Einfluss des Menschen auf Ökosysteme und nachhaltige Entwicklung und erfüllen somit die curriculare Obligatorik (MSB, 2019a, 2022; KMK, 2020, 2024b).

2.2 Repräsentation aktueller nachhaltigkeitsbezogener Forschung

Anhand ökotoxikologischer Forschungsfragen und -methoden können Schüler/innen einen authentischen Einblick in die Wissenschaftspraxis nachhaltiger Entwicklung erhalten. So kann Nachhaltigkeitsforschung inhaltlich Eingang in den Fachunterricht finden (BURMEISTER et al., 2012; EILKS, 2015; NIEBERT, 2023). Führen Schüler/innen ökotoxikologische Tests selbst durch, werden Prinzipien nachhaltigkeitsbezogener Forschung auch praktisch in den Unterricht integriert (BURMEISTER et al., 2012; EILKS, 2015; NIEBERT, 2023). Schul- und Forschungsexperiment können aufeinander bezogen und eigene Ergebnisse und Methoden in den aktuellen Forschungsstand eingeordnet werden. Durch die Nähe zur laufenden Wissenschaftspraxis kann ein Beitrag zur Berufsorientierung in den Naturwissenschaften geleistet werden (BURMEISTER et al., 2012; EILKS, 2015; PARCHMANN et al., 2017).

2.3 Generalisierung als Merkmal authentischer Erkenntnisgewinnungsprozesse

Die Durchführung ökotoxikologischer Tests mit Schüler/innen kann das kritische Denken im Bereich Erkenntnisgewinnung fördern. Durch den Bezug zu aktuellen Umweltproblemen ist die Frage nach der Generalisierung selbst gewonnener Ergebnisse besonders relevant: Inwiefern sind unsere Ergebnisse auf die natürliche Umwelt übertragbar? Was können wir hierzu aus dem Experiment ableiten und was nicht? Wie könnte man vorgehen, um Experimente zu planen, die uns weitere Antworten auf die Frage nach der aktuellen Umweltbelastung liefern? Durch solche Fragen kann ein wissenschaftlicher Umgang mit experimentellen Ergebnissen gefördert werden, der so bei „klassischen“ Schulexperimenten oft nicht möglich ist (CHINN & MALHOTRA, 2002).

2.4 Bedeutung von Wissenschaft für nachhaltige Entwicklung

Ökotoxikologische Erkenntnisse bilden die Basis für präventive und reaktive Umweltschutzmaßnahmen und haben eine hohe Praxisrelevanz, z.B. bei der Zulassung von Chemikalien, in der Umweltpolitik oder bei der Prozessoptimierung in Industrie und Landwirtschaft (FENT, 2013). Sie eignen sich gut, um die Relevanz wissenschaftlicher Erkenntnisse für nachhaltige Entwicklung exemplarisch zu verdeutlichen. Dies ist vor dem Hintergrund unserer stark von Wissenschaft geprägten Gesellschaft wesentlich (BURMEISTER et al., 2012; EILKS, 2015; NIEBERT, 2023). Anhand von Beispielen kann der Einfluss in allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen (Ökologie, Ökonomie, Soziales) konkretisiert und diskutiert werden, um die Bedeutung für Gesellschaft und Individuum hervorzuheben. Dies fördert eine multiperspektivische Betrachtung und kritisches Denken, was Lernende bei informierten Entscheidungen bezüglich ihres individuellen

Verhaltens unterstützen kann (z.B. Konsumententscheidungen im Hinblick auf Produkte, Dienstleistungen oder Medien). Ein holistisches Verständnis nachhaltigkeitsbezogener Prozesse erlaubt auch eine bewusste politische Positionierung und Partizipation, was ebenfalls als Ziel von BNE gilt (BOEVE-DE PAUW et al., 2015; NIEBERT, 2023; UNESCO, 2020).

Nachfolgend wird durch die Konkretisierung eines Schulexperiments eine mögliche Variante zur Integration der Ökotoxikologie in den Unterricht dargelegt. Es handelt sich um einen Toxizitätstest zur akuten Wirkung eines Pflanzenschutzmittels auf den Wasserfloh *Daphnia magna*.

3 Exemplarische Relevanz des Experiments für den Biologieunterricht

3.1 Warum Toxizitätstests?

Toxizitätstests (auch Biotests) mit Einzelorganismen sind aufgrund ihrer Standardisierung, Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit ein zentrales Werkzeug bei der ökotoxikologischen Testung von Chemikalien, z.B. bei Zulassungsverfahren (BIDWELL, 2020; FENT, 2013; SPARLING, 2016; VIGHI & VILLA, 2013). Jedoch können sie aufgrund ihrer starken Vereinfachung nur basale Erkenntnisse liefern, die für einen effektiven Schutz realer Ökosysteme allein nicht ausreichen (Tab. 1) (BIDWELL, 2020; EGGEN et al., 2004; FENT, 2013; VIGHI & VILLA, 2013). Für eine valide Risikobeurteilung sind weitere Forschungsansätze notwendig, wie der Einbezug weiterer Variablen (z.B. Stressfaktoren, nicht-letale Toxizitätsindikatoren, Chemikalienmischungen), die Nutzung komplexerer Testsysteme (z.B. Mikro-/ Mesokosmos-Studien) oder die Modellierung von Toxizitätsdaten

Umweltbedingungen	Toxizitätstests
Organismen sind Chemikalien meist wiederholt und über einen langen Zeitraum ausgesetzt, was eher subletale Effekte zur Folge hat. Umweltrelevante Konzentrationen sind oft niedrig.	In der Regel erfolgt eine einmalige Exposition mit einer hohen Konzentration der Testsubstanz. Untersucht wird die Wirkung nach eher kurzer Zeit, oft im Hinblick auf Effekte, die den Tod beinhalten oder zur Folge haben.
Wirkungen von Umweltchemikalien sind stark artspezifisch.	Toxizitätstests werden oft nur an wenigen Modellarten durchgeführt.
Chemikalien wirken auf allen biologischen Ebenen, die sich wiederum gegenseitig beeinflussen. Ökosysteme sind in ihrer ganzen Komplexität von anthropogenen Chemikalien betroffen.	Untersucht wird die Wirkung einer Chemikalie auf Ebene der Reaktion eines einzelnen Organismus oder einer Population. Höhere biologische Organisationsebenen werden nicht erfasst.
Organismen sind oftmals nacheinander oder gleichzeitig verschiedenen Stressfaktoren ausgesetzt. Der Stressor Chemikalienbelastung kann die Anfälligkeit gegenüber anderen Stressoren beeinflussen, ebenso umgekehrt. Eine erhöhte Toleranz durch Adaptationen ist möglich, geht aber oft mit evolutionären Kosten (z.B. erhöhte Anfälligkeit für andere Stressoren) einher.	Toxizitätstests werden unter standardisierten Bedingungen und mit Organismen aus einer standardisierten und „stressfreien“ Laborzucht durchgeführt, damit die Wirkung der Testsubstanz ohne Konfundierung durch andere Bedingungen untersucht werden kann. Sonstige Stressoren sowie Adaptationen werden nicht berücksichtigt.
Umweltchemikalien bilden komplexe Mischungen. Diese können andere Toxizitätseigenschaften haben, als die Einzelchemikalien erwarten lassen.	Es wird der Einfluss einer einzelnen Chemikalie auf einen Testorganismus untersucht.

Tab. 1. Gegenüberstellung von Umweltbedingungen und den Bedingungen bzw. Untersuchungsschwerpunkten bei Toxizitätstests, zusammengestellt u.a. aus EGGEN et al. (2004); FENT (2013) und VIGHI & VILLA (2013)

aus bereits vorhandenen Daten (BEKETOV & LIESS, 2012; BOWNIK et al., 2017; EGGEN et al., 2004; FENT, 2013; LIESS et al., 2016; MORRISSEY et al., 2015; REIBER et al., 2022; SURES & BOENIGK, 2021; VIGHI & VILLA, 2013).

Die Grenzen von Toxizitätstests sowie potenzielle Optimierungsstrategien können ausgehend vom hier dargestellten Experiment (Kap. 4) sehr anschaulich mit Schüler/innen thematisiert werden, um eine kritische Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Prozessen und Erkenntnissen zu fördern.

3.2 Warum Daphnien?

Daphnien sind klassische Modellorganismen in der Biologie (EBERT, 2011; EBERT, 2022; MALHOTRA et al., 2021; SEDA & PETRUSEK, 2011; SICILIANO et al., 2015). Sie kommen in vielen stehenden Süßgewässern vor und spielen dort als Primärkonsumenten von Phytoplankton sowie als Futterquelle für Sekundärkonsumenten eine wichtige Rolle im Nahrungsnetz (EBERT, 2022; MINER et al., 2012). Daphnien können relativ leicht und günstig gehalten werden, haben einen kurzen Lebenszyklus und eine hohe Reproduktionsrate (NICK et al., 2019; SEDA & PETRUSEK, 2011; TKACZYK et al., 2021). Die geringe genetische Varianz aufgrund der unter Laborbedingungen dominierenden parthenogenetischen, also unisexuellen Fortpflanzung, ist z.B. von Vorteil für die Vergleichbarkeit der Tiere (EBERT, 2022; MINER et al., 2012). Aufgrund ihres durchsichtigen Körpers können Daten zu verschiedenen physiologischen Prozessen auch mit wenig Aufwand und nicht invasiven Mitteln (z.B. Videografie am Durchlichtmikroskop) erhoben werden (BOWNIK et al., 2017; EBERT, 2022; GREENE et al., 2017; SANTOSO et al., 2020; TKACZYK et al., 2021; VILLEGAS-NAVARRO et al., 2003).

Daphnientests zählen zu den am häufigsten eingesetzten Tests in der Ökotoxikologie (FENT, 2013). Es gibt zwei Standardtests im Zulassungsprozess von Chemikalien: Beim acute immobilisation test wird der sog. EC50-Wert (effective concentration) ermittelt. Dies ist die Konzentration, bei der innerhalb eines bestimmten Zeitraums (i.d.R. 24 oder 48 h) 50 % der Versuchstiere (Neonaten) immobil werden (FENT, 2013; OECD, 2004; TKACZYK et al., 2021). Beim reproduction test wird der chronische Einfluss einer Testsubstanz (i.d.R. 14 oder 21 Tage) auf die Reproduktionsrate untersucht (FENT, 2013; OECD, 2012; TKACZYK et al., 2021). Aufgrund der Dauer bzw. des intendierten Todes der Tiere sind beide Tests für den Schulkontext eher ungeeignet.

Hingegen haben andere akute Toxizitätstests mit *Daphnia magna* bereits mehrfach Eingang in die unterrichtspraktische Literatur gefunden und sich vorwiegend als schulpraktikabel erwiesen: Dort wird der kurzfristige Einfluss einer Testsubstanz auf die Herzschlagfrequenz des Tiers untersucht (COROTTO et al., 2010; GIOVIO et al., 2020; GREENE et al., 2017; KREUTZBERG et al., 2011; MEIER & ASSHOFF, 2016). Auch in aktuellen wissenschaftlichen Arbeiten, z.B. zur Untersuchung von Pflanzenschutzmitteln, wird die Veränderung der Herzschlagfrequenz als potenzieller Indikator für die Wirkung einer Testsubstanz ermittelt, was die Relevanz der Methode für einen authentischen Fachunterricht unterstreicht (BOWNIK et al., 2017; BOWNIK

& SZABELAK, 2021; FARKAS et al., 2022; KWON et al., 2021; SANTOSO et al., 2020).

3.3 Warum Pflanzenschutzmittel?

Pflanzenschutzmittel sind Gegenstand aktueller ökotoxikologischer Forschung. Denn ihr Einsatz hat nach derzeitigem wissenschaftlichem Stand vielerorts Nachteile für die Umwelt, und die intensive Landwirtschaft zählt, u. a. aufgrund des Pestizideinsatzes, zu den Top-Treibern des globalen Biodiversitätsverlusts (GEIGER et al., 2010; GOULSON, 2013; IPBES, 2019; JAUREGUIBERRY et al., 2022). Warum jedoch ein völliger Verzicht momentan keine Lösung ist, und welche Handlungsmöglichkeiten bestehen, verdeutlichen z.B. folgende Fragen, die man auf die Nachhaltigkeitsdimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales beziehen kann: Wie werden Pflanzenschutzmittel aktuell eingesetzt? Was sind ihre Nach-, aber auch Vorteile? Wie sehen Alternativen aus und welche Vor- und Nachteile haben diese? Wie könnte ein nachhaltiger Umgang mit Pestiziden aussehen? Antworten auf solche Fragen sind sicherlich nicht trivial und erfordern die Abwägung von Argumenten zu verschiedenen Perspektiven (z.B. Individuum, Wissenschaft, Landwirtschaft, Politik; Stichwort: Pluralismus) und inhaltlichen Schwerpunkten (z.B. verschiedene Fachdisziplinen, verschiedene Raum- und Zeitdimensionen; Stichwort: Holismus) (BOEVE-DE PAUW et al., 2015). So geht der Unterricht über das rein naturwissenschaftliche Lernen über Pflanzenschutzmittel hinaus und stellt auch deren Bedeutung und Diskussion in der Gesellschaft in den Mittelpunkt, um nachhaltige Entwicklung im Fachunterricht zu adressieren (BURMEISTER et al., 2012; EILKS, 2015; NIEBERT, 2023).

3.4 Warum digitale Werkzeuge?

Die Digitalisierung hat mittlerweile flächendeckend Einzug in die Biologie als experimentelle Wissenschaft gehalten. Demnach ist im Biologieunterricht die Integration digitaler Werkzeuge bei der Durchführung von Experimenten wesentlich, um ein authentisches Bild des Fachs zu vermitteln (HUWER et al., 2019; NEUMANN & WAIGHT, 2020; VON KOTZEBUE et al., 2021). Werden sie zum Zwecke der Erkenntnisgewinnung eingesetzt, bietet sich die Gelegenheit, sie auch in fachlicher Hinsicht zum Lerngegenstand zu machen. Dies kann bspw. bei der Diskussion eines Experiments geschehen, wenn der Nutzen verschiedener digitaler Arbeitsschritte (z.B. Einsatz von Videos zur Dokumentation und Auswertung, Nutzung von Excel) für die Qualität des Experiments erörtert wird. Das vorliegende Experiment wurde so gestaltet, dass digitale Werkzeuge in verschiedenen Prozessschritten in unterschiedlichem Maße eingesetzt werden können. So ist eine individuelle unterrichtliche Umsetzung möglich, je nach Schwerpunktsetzung der Lernziele und Ausstattung der Schule.

4 Experiment zur akuten Wirkung des Pflanzenschutzmittels Flupyradifuron auf *Daphnia magna*

Auf Basis der Arbeit von GIOVIO et al. (2020) wurde ein Schulkonzept entwickelt, das einen praktischen Zugang zur Ökotoxikologie ermöglicht. Wesentlich war die Gestaltung entlang

der Unterrichtsrealität, um Akzeptanz und Implementationsbereitschaft bei Lehrkräften hervorzurufen. Bei der Diskussion des experimentellen Vorgehens ist daher zu berücksichtigen, dass fachliche, didaktische, unterrichtspraktische sowie transferbezogene Entscheidungen die Entwicklung geleitet haben und der Versuch unternommen wurde, diese Aspekte in ein geeignetes Verhältnis zueinander zu setzen.

4.1 Durchführung

Im Experiment wird die Herzschlagfrequenz des Wasserfloh *Daphnia magna* in zwei Testzeiträumen gemessen: direkt nach Zugabe des Pflanzenschutzmittels sowie 30 Minuten später. Die Beobachtung der Tiere erfolgt über ein Lichtmikroskop bei 40- bis 100-facher Vergrößerung (Abb. 1).



Abb. 1. *Daphnia magna* im Durchlichtmikroskop (Vergrößerung: Objektiv 4x, Okular 10x). Das Herz liegt dorsal, hinter dem Darm und über dem Brutraum

Hierzu wird das Tier mit einer schräg aufgeschnittenen Plastikpipette auf einen Hohlsliffobjektträger überführt und mit einem Deckglas abgedeckt. Es ist gerade so viel Flüssigkeit zu wählen, dass das Tier nicht mehr mobil ist und zugleich nicht gequetscht wird. Pro Testzeitraum wird die Herzschlagfrequenz zehn Mal gemessen. Die Messung erfolgt in 15-Sekunden-Intervallen, entweder direkt am Mikroskop oder über Videos, die z.B. mithilfe eines Smartphones inkl. Okularaufsatz (Abb. 2) aufgezeichnet werden. Zum Zählen der Herzschläge wird eine Zähler-App (Beispiele siehe Schülerprotokoll) genutzt. Pro Herzschlag wird einmal auf das Display getippt. Die natürliche Herzschlagfrequenz beträgt zwischen 300 und 450 BPM (Herzschläge pro Minute) (BOWNIK et al., 2017; BOWNIK & SZABELAK, 2021; COROTTO et al., 2010; FARKAS et al., 2022; GIOVIO et al., 2020; GREENE et al., 2017; KWON et al., 2021; SANTOSO et al., 2020).

Untersucht wird der Effekt zweier verschiedener Testlösungen: Die gebrauchsfertige Lösung des Pflanzenschutzmittels Lizetan Plus Schädlingsfrei AF (SBM Life Science GmbH, 2021) fungiert als Wirkstofflösung (0,08 g/L Flupyradifuron). Indem man die gebrauchsfertige Lösung durch Rühren und Erhitzen bei 200 °C auf zwei Drittel des Volumens eindampft, erhält man eine konzentrierte Wirkstofflösung. Zwar wird die genaue Flupyradifuron-Konzentration hier nicht bestimmt, doch lässt sich aus den experimentellen Ergebnissen (Abb. 3) schließen, dass die beschriebene Methode zu einer erhöhten Wirkstoffkonzentration (>0,08 g/L Flupyradifuron) führt. Als Kontrolllösung dient die pflanzenschutzmittelfreie Nährlösung, in der die Wasserflöhe gehalten werden.



Abb. 2. Durchlichtmikroskop mit Okular-Aufsatz für Smartphone

4.2 Ergebnisse

Zur Auswertung des Experiments wird eine Excel-Tabelle genutzt, die eine automatische Aufbereitung eingegebener Rohdaten beinhaltet: Umrechnung in die Einheit Herzschläge pro Minute, Bildung von Mittelwerten und Standardabweichungen sowie die Erstellung eines Säulendiagramms (Abb. 3). Die Tabelle steht online zur Verfügung (Kasten 1, Bereich für Lehrkräfte). Sie kann im Unterrichtskontext entweder als kollaboratives Tabellen-Dokument über einen Cloud-Service (z.B. Excel Online bzw. OneDrive) oder an einem Endgerät im Klassenraum, an dem man alle Ergebnisse sammelt, genutzt werden.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse, die die Autoren anhand von Videos bei halber Abspielgeschwindigkeit ermittelten. Pro Ansatz wurde bei 20 Tieren jeweils zehn Mal die Herzschlagfrequenz in einem Testzeitraum gemessen. Aus diesen jeweils 200 Messwerten wurden Mittelwerte und Standardabweichungen für die Herzschlagfrequenz im entsprechenden Testzeitraum ermittelt.

Sowohl bei der Kontrollgruppe (Nährlösung) als auch bei beiden Testgruppen (Wirkstofflösung und konzentrierte Wirkstofflösung) konnte im zweiten Testzeitraum eine signifikante Abnahme der Herzschlagfrequenz im Vergleich zum ersten Testzeitraum festgestellt werden. Bei den Testgruppen war die Herzschlagfrequenz

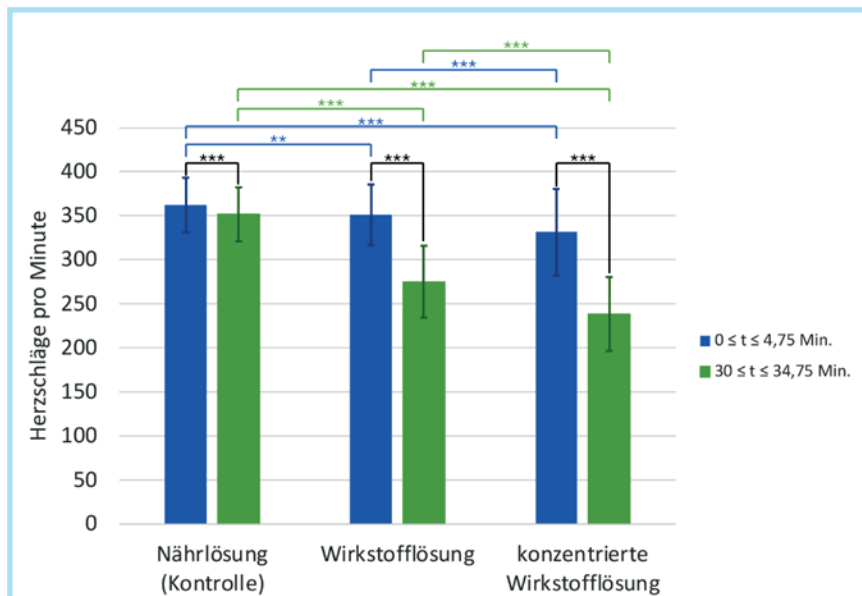


Abb. 3. Wirkung von Lizetan Plus Schädlingsfrei AF sowie einer stärker konzentrierten Lösung dieser Formulierung auf die Herzschlagfrequenz von *Daphnia magna*. Auswertung bei halber Videogeschwindigkeit. Dargestellt sind Mittelwert, Standardabweichung und Signifikanzniveau für zwei Zeitintervalle (** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$; grüne & blaue Klammern: Welch-ANOVA mit Games-Howell Post-hoc-Test, schwarze Klammern: t-Test für abhängige Stichproben). Pro Ansatz $n = 200$ (je 20 Tiere x 10 Werte)

in beiden Testzeiträumen allerdings signifikant niedriger als bei der Kontrolle, sodass ein durch das Pflanzenschutzmittel verursachter Effekt wahrscheinlich ist. Je höher die Konzentration des Wirkstoffs war, desto niedriger war die gemessene Herzschlagfrequenz. Die Daten sprechen also für eine Abhängigkeit des Effekts von der Konzentration.

Zwar ist das Videografieren am Mikroskop auch für den Schulunterricht eine gewinnbringende Methode, um bei der sehr schnellen Herzschlagfrequenz von Daphnien qualitativ hochwertige Ergebnisse mithilfe digitaler Werkzeuge zu erhalten. Dennoch kann es Gründe geben, hierauf zu verzichten (z.B. Material-/Zeitaufwand). Durch eine zusätzliche Auswertung von 25 % des Videomaterials in Originalgeschwindigkeit wurde die direkte Messung am Mikroskop ohne Videodokumentation simuliert und getestet, ob beide Methoden zu den gleichen Ergebnissen führen. Bei Herzschlagfrequenzen kleiner oder gleich 250 BPM ergaben sich mit beiden Messmethoden keine oder nur leichte Unterschiede. Bei Herzschlagfrequenzen ab ca. 300 BPM zeigten sich hoch signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Messmethoden: Die Messung bei Realgeschwindigkeit führte zu niedrigeren Werten im Vergleich zu den Messergebnissen bei halber Videogeschwindigkeit (Abb. 4, Online-Ergänzung). Dennoch zeigten sich bei beiden Auswertungen dieselben Trends (Abb. 5, Online-Ergänzung):

- 1) Tiere der Testgruppen hatten in beiden Testzeiträumen eine signifikant niedrigere Herzschlagfrequenz als Tiere der Kontrollgruppe.
- 2) Die Herzschlagfrequenz in den Testgruppen nahm in der gleichen Zeit deutlich stärker ab als bei der Kontrollgruppe.

- 3) Eine höhere Konzentration des Wirkstoffs führte in der gleichen Zeit zu niedrigeren Herzschlagfrequenzen.

4.3 Diskussion des Experiments

Der Wirkstoff Flupyradifuron zählt zu den Agonisten des nicotinergen Acetylcholin-Rezeptors (nAChR) (JESCHKE et al., 2013; NAUEN et al., 2015). Zwar sind uns für diesen Wirkstoff keinerlei Studien zum akuten Einfluss auf die Herzschlagfrequenz von *Daphnia magna* bekannt. Doch gibt es Untersuchungen zur Wirkung von Neonicotinoiden, ebenfalls Agonisten am nAChR, die bei niedrigen Konzentrationen eine Steigerung und bei hohen Konzentrationen eine Reduktion der Herzschlagfrequenz nach 24 bzw. 48 Stunden nachweisen (BOWNIK et al., 2017; FARKAS et al., 2022). Wie genau es zur Veränderung der Herzschlagfrequenz kommt, ist nicht endgültig geklärt. Es werden direkte Wirkungen auf Schrittmacherzellen oder indirekte Wirkungen auf die Gesamtfitness angenommen (BOWNIK et al., 2017; FARKAS et al., 2022).

Die Ergebnisse zeigen auch eine leichte Reduktion der Herzschlagfrequenz bei der Kontrollgruppe (Abb. 3). Ein Einfluss der Mikroskopbeleuchtung oder anderer handhabungsbedingter Aspekte ist nicht auszuschließen. Da jedoch nach Zugabe des Pflanzenschutzmittels ein statistisch signifikanter und größerer Unterschied im Vergleich zur Kontrolle gefunden wurde, kann ein Effekt des Pflanzenschutzmittels auf die Reduktion der Herzschlagfrequenz innerhalb der untersuchten Zeitspanne angenommen werden.

4.3.1 Reduktion von Fehlerquellen

Welche Faktoren können dazu führen, dass die Ergebnisse schwanken? Wie könnte man die Aussagekraft der Ergebnisse stärken? Inwiefern spielt die Digitalisierung einzelner Arbeitsschritte hierbei eine Rolle?

Prinzipiell ergeben sich Messwertschwankungen durch den Einsatz verschiedener Individuen, die sich zum Beispiel in Fitness und Alter unterscheiden können. Die Standardisierung dieser beiden Faktoren wäre unter Schulbedingungen zu aufwändig und ist deshalb nicht Teil des experimentellen Designs. Schwankende Werte finden sich auch in der Literatur, wo die natürliche Herzschlagfrequenz von Wasserflöhen mit Werten zwischen 300 und 450 BPM angegeben wird (4.1).

Wenn in Originalgeschwindigkeit gemessen wurde, ergaben sich signifikant niedrigere Werte für die bei halber Abspielgeschwindigkeit erfassten hohen Herzschlagfrequenzen (>300 BPM) (Abb. 4, Online-Ergänzung). Entsprechend ist insbesondere beim Kontrollansatz mit größeren Messunsicherheiten zu rechnen, sofern die Videogeschwindigkeit nicht reduziert wird. Hier zeigt sich ein Vorteil einer digitalen Aufzeichnung des

Experiments: Die Videos können zugunsten einer genaueren Auswertung bearbeitet und/oder mehrfach ausgewertet werden. Wird ein Video von mehreren Personen ausgewertet, so kann durch Zusammenführen der Daten der Einfluss der Messkompetenz einer einzelnen Person auf das Gesamtergebnis verringert werden. Dies ist im unterrichtlichen Kontext von besonderem Vorteil, da Schüler/innen i.d.R. nicht in der Arbeitsmethode geübt sind und aufgrund unterschiedlich guter Hand-Augen-Koordination beim Zählen der Herzschläge Schwankungen erwartbar sind.

Der Umfang der Stichprobe ist ein weiteres Kriterium für die Aussagekraft der Ergebnisse. Die Digitalisierung der Auswertung mit Excel bietet den Vorteil, dass auch größere Datenmengen mit wenig Aufwand zusammengeführt, aufbereitet und statistisch weiterverarbeitet werden können (4.2). Dies stärkt die Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse. Eine vergleichbare Datenverarbeitung in analoger Form ist aus Sicht der Autoren im Unterricht nicht praktikabel. Außerdem ist eine Datenauswertung mit Tabellenkalkulationsprogrammen authentischer im Hinblick auf die Repräsentation wissenschaftlichen Arbeitens im Unterricht.

4.3.2 Generalisierung der Ergebnisse

Inwiefern können die gewonnenen Erkenntnisse auf die reale Situation im Ökosystem See übertragen werden? Inwiefern hängt dies mit der Aussagekraft von Toxizitätstests in der ökotoxikologischen Forschung bzw. Testung zusammen?

Im Experiment wird der akute Einfluss eines Pflanzenschutzmittels mit relativ hoher Wirkstoffkonzentration untersucht. Eine Exposition gegenüber solch hohen Konzentrationen ist im Ökosystem See normalerweise selten und kurz, wenn beispielsweise starke Regenfälle zur plötzlichen Auswaschung einer großen Pflanzenschutzmittelmenge führen (MORRISSEY et al., 2015; RABY et al., 2018). Stattdessen sind Daphnien und andere Organismen Pestiziden i.d.R. in viel geringerer Konzentration und über einen längeren Zeitraum ausgesetzt, wobei nicht-letale Langzeiteffekte auftreten können (BOWNIK et al., 2017; BOWNIK & SZABELAK, 2021; EGGEN et al., 2004; MORRISSEY et al., 2015). Diese können mithilfe des hier dargestellten Experiments nicht untersucht werden. Außerdem liegen im Freiland i.d.R. komplexe Mischungen verschiedener Umweltchemikalien vor. Hierdurch können Interaktionseffekte auftreten, die bei der Untersuchung von Einzelsubstanzen nicht festgestellt werden können (DUCHET et al., 2023; ESCHER et al., 2020). Zusätzlicher Stress (z.B. durch Nahrungsmangel oder Infektionen), unter natürlichen Bedingungen üblich, kann die Reaktion auf Pflanzenschutzmittel verändern (CUENCA CAMBRONERO et al., 2018; LIESS et al., 2016). Darüber hinaus sind indirekte Einflüsse durch Interaktion mit anderen Wasserorganismen möglich, die ggf. auch von Pflanzenschutzmitteln beeinflusst werden (BRÜHL & ZALLER, 2019; HALLMANN et al., 2014; JENSEN, 2019; YAMAMURO et al., 2019). Zusammenfassend deutet das Experiment zwar auf ein Gefährdungspotenzial von Lizetan Plus Schädlingsfrei AF für Daphnien und die durch sie repräsentierten Organismen hin. Es ist aber nur begrenzt auf die reale Situation im Ökosystem See übertragbar. Prinzipiell gelten die o. g. Grenzen auch für Toxi-

zitätstests in der ökotoxikologischen Forschung bzw. Testung (Tab. 1). Dennoch sind sie ein wichtiges Instrument, um erste Hinweise auf eine potenzielle Gefährdung zu erhalten und das mögliche Vorgehen bei der weiteren Erforschung bzw. Risiko-beurteilung einer Substanz zu bestimmen (3.1).

5 Umsetzung im Unterricht

Das Experiment war bereits Gegenstand verschiedener digitaler und analoger Lehrformate in Schule, Lehr-Lern-Labor, Hochschullehre und Lehrkräftefortbildungen (z.B. GIOVIO et al., 2020; HELBING et al., 2021a, 2021b). Hieraus wurden Empfehlungen für die Umsetzung im Unterricht abgeleitet.

5.1 Durchführung des Experiments

Das im Experiment verwendete Lizetan Plus Schädlingsfrei AF ist im Fachhandel (z.B. Baumarkt) frei erhältlich (ca. 10–15 €). Daphnien stehen bspw. als Lebendfutter im Aquarienbedarf zur Verfügung oder können selbst gehalten werden. Statt eines Hohlschliff-Objekttägers kann auch ein Standardobjekttäger verwendet werden, bei dem das Deckglas mithilfe kleiner Füße aus Knetmasse o. ä. höher gelagert wird, um die Tiere nicht zu zerquetschen. Smartphone-Adapter für die Videografie am Mikroskop können online günstig erworben werden. Die Bearbeitung aufgenommener Videos ist mithilfe vorinstallierter oder kostenfreier Apps (z.B. iMovie) auch in der Schule gut möglich. Sollen Schüler/innen selbst videografieren, ist allerdings eine Verkürzung des Untersuchungszeitraums empfehlenswert, damit eine Umsetzung im Rahmen des Stundenrasters realistisch bleibt. So erhält man zwar insgesamt weniger Werte, die aber wahrscheinlich genauer sind (4.3.1).

Soll auf eine Videografie verzichtet werden, kann die Herzschlagfrequenz der Daphnien durch direkte Beobachtung am Mikroskop ermittelt werden. Die o. g. Vorteile einer Videografie fallen dann weg, wodurch es zu einer stärkeren Streuung bei den Ergebnissen kommen kann (4.3.1). Auch ist damit zu rechnen, dass im Vergleich zu den in Abbildung 3 gezeigten Daten der Unterschied zwischen der ersten und zweiten Teilmessung beim Kontrollansatz deutlich größer sein kann, wie die Auswertung von Schülerergebnissen gezeigt hat (unveröffentlichte Daten). Mögliche Ursachen könnten z.B. zu wenig Flüssigkeit auf dem Objekttäger, zu starke Mikroskopbeleuchtung oder längere Verweilzeiten des Tiers auf dem Objekttäger sein. Sicherlich sind solche Fehlerquellen zumindest teilweise vermeidbar, wenn Schüler/innen vorab ausdrücklich darauf hingewiesen werden. Für eine fachgemäße Einordnung der erhaltenen Daten sollten sie im Rahmen der Diskussion des Experiments thematisiert werden. Zusätzlich ist eine Zusammenführung aller von Schüler/innen generierten Daten (bei Excel) empfehlenswert, um eine ausreichend große Stichprobe zu erhalten. Dies bietet auch den Vorteil, dass arbeitsteilig vorgegangen werden kann: Alle Schüler/innen sollten eine Kontrolle durchführen, um das Prinzip der Variablenkontrolle deutlich zu machen; die Ansätze Wirkstofflösung und konzentrierte Wirkstofflösung können in der Lerngruppe aufgeteilt werden. Die Durchführung des Experiments ist dann in einer Doppelstunde

(90 Min.) realisierbar. Für die Vor- und Nachbereitung sollten zusätzlich mindestens 3 Unterrichtsstunden à 45 Minuten eingeplant werden.

5.2 Digitales Lernmodul

Es wurde ein digitales Lernmodul entwickelt (Kasten 1), mit dem alle Erkenntnisschritte des Experiments vollständig durchlaufen werden können. Die Messwertgewinnung erfolgt anhand mikroskopischer Videos. Das digitale Lernmodul kann als eigener Lernbaustein fungieren und somit das Realexperiment ersetzen oder vorbereitend zum Kennenlernen der Messmethode vor der Durchführung des Realexperiments eingesetzt werden.



Kasten 1. Links zum Unterrichtsmaterial

Umgekehrt könnten vor der Arbeit mit dem digitalen Lernmodul Wasserflöhe mikroskopiert werden, um praktische Fertigkeiten im Umgang mit den Tieren und dem Mikroskop als Arbeitsmittel zu fördern. Mögliche Aufgaben wären die Identifi-

kation des Herzens sowie eine „Probemessung“ der Herzschlagfrequenz.

Eine weitere Variante wäre die Durchführung des Kontrollansatzes am realen Objekt und eine anschließende Messwert-erhebung zu den Testansätzen anhand der Videografien im Online-Modul. So könnte im Unterricht auf die Behandlung der Tiere mit Pflanzenschutzmittel verzichtet werden. In diesem Fall müssten die Grenzen der Vergleichbarkeit der Tiere aus Schule und Forschungslabor bei der Diskussion der Ergebnisse thematisiert werden.

Aufgrund des Umfangs befinden sich die Liste der im Beitrag verwendeten Quellen sowie weitere Diagramme zum Vergleich der Messwert-erhebungen in der Online-Ergänzung.



ISABELL KERN, isabell.helbing@rwth-aachen.de, ist Doktorandin der Biologiedidaktik an der RWTH Aachen.

Dr. INGEBORG HEIL, OStR i. H., heil@ddb.rwth-aachen.de, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Lehr- und Forschungsgebiet Didaktik der Biologie an der RWTH Aachen.

Prof. i.R. Dr. JOHANNES BOHRMANN, bohrmann@bio2.rwth-aachen.de, war bis 2020 Leiter des Lehr- und Forschungsgebiets Zoologie und Humanbiologie an der RWTH Aachen. ■

Ökotoxikologische Forschung im Unterricht



Digital gestütztes Schulexperiment zur Wirkung eines Pflanzenschutzmittels auf den Wasserfloh *Daphnia magna*

ISABELL KERN – INGEBORG HEIL – JOHANNES BOHRMANN

Online-Ergänzung

1 Literatur

- BEKETOV, M. A., & LIESS, M. (2012). Ecotoxicology and macroecology-time for integration. *Environmental Pollution*, 162, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.11.011>.
- BIDWELL, J. R. (2020). In vivo ecotoxicology models. In *An Introduction to Interdisciplinary Toxicology* (S. 507–523). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813602-7.00036-3>.
- BOEVE-DE PAUW, J., GERICKE, N., OLSSON, D., & BERGLUND, T. (2015). The Effectiveness of Education for Sustainable Development. *Sustainability*, 7(11), 15693–15717. <https://doi.org/10.3390/su71115693>.
- BOWNIK, A., PAWŁOCIK, M., & SOKOŁOWSKA, N. (2017). Effects of neonicotinoid insecticide acetamiprid on swimming velocity, heart rate and thoracic limb movement of *Daphnia magna*. *Polish Journal of Natural Sciences*, 32(3), 481–493.
- BOWNIK, A., & SZABELAK, A. (2021). Short-term effects of pesticide fipronil on behavioral and physiological endpoints of *Daphnia magna*. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 33254–33264. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13091-6>.
- BRÜHL, C. A., & ZALLER, J. G. (2019). Biodiversity Decline as a Consequence of an Inappropriate Environmental Risk Assessment of Pesticides. *Frontiers in Environmental Science*, 7, Artikel 177. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00177>.
- BURMEISTER, M., RAUCH, F., & EILKS, I. (2012). Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 13(2), 59–68. <https://doi.org/10.1039/c1rp90060a>.
- CHINN, C. A., & MALHOTRA, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86(2), 175–218. <https://doi.org/10.1002/sce.10001>.
- COROTTO, F., CEBALLOS, D., LEE, A., & VINSON, L. (2010). Making the Most of the *Daphnia* Heart Rate Lab: Optimizing the Use of Ethanol, Nicotine & Caffeine. *The American Biology Teacher*, 72(3), 176–179. <https://doi.org/10.1525/abt.2010.72.3.9>.
- CUENCA CAMBRONERO, M., MARSHALL, H., DE MEESTER, L., DAVIDSON, T. A., BECKERMAN, A. P., & ORSINI, L. (2018). Predictability of the impact of multiple stressors on the keystone species *Daphnia*. *Scientific Reports*, 8(1), ARTIKEL 17572. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35861-y>.
- DUCHET, C., MITCHELL, C. J., MCINTYRE, J. K., & STARK, J. D. (2023). Chronic toxicity of three formulations of neonicotinoid insecticides and their mixture on two daphniid species: *Daphnia magna* and *Ceriodaphnia dubia*. *Aquatic Toxicology*, 254, Artikel 106351. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106351>.
- EBERT, D. (2011). A Genome for the Environment. *Science*, 331(6017), 539–540. <https://doi.org/10.1126/science.1202092>.
- EBERT, D. (2022). *Daphnia* as a versatile model system in ecology and evolution. *Evodevo*, 13(1), ARTIKEL 16. <https://doi.org/10.1186/s13227-022-00199-0>.
- EGGEN, R. I. L., BEHRA, R., BURKHARDT-HOLM, P., ESCHER, B. I., & SCHWEIGERT, N. (2004). Challenges in Ecotoxicology. *Environmental Science & Technology*, 38(3), 58A–64A. <https://doi.org/10.1021/es040349c>.
- EILKS, I. (2015). Science Education and Education for Sustainable Development – Justifications, Models, Practices and Perspectives. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 11(1), 149–158. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2015.1313a>.
- ESCHER, B. I., STAPLETON, H. M., & SCHYMANSKI, E. L. (2020). Tracking complex mixtures of chemicals in our changing environment. *Science*, 367(6476), 388–392. <https://doi.org/10.1126/science.aay6636>.
- FARKAS, A., SOMOGYVARI, D., KOVACS, A. W., MORTL, M., SZEKACS, A., & GYORI, J. (2022). Physiological and metabolic alterations induced by commercial neonicotinoid formulations in *Daphnia magna*. *Ecotoxicology*, 31(3), 415–424. <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02520-y>.
- FENT, K. (2013). ÖKOTOXIKOLOGIE: Umweltchemie – Toxikologie – Ökologie. Georg Thieme Verlag.
- FRENGER, N., STRAUSS, T., WÜLLER, M., & BOHRMANN, J. (2011). Wie wird die Umweltverträglichkeit von Chemikalien geprüft? *Unterricht Biologie*, 35(362), 42–48.
- GEIGER, F., BENGTSOON, J., BERENDSE, F., WEISSER, W. W., EMMERSON, M., MORALES, M. B., CERYNGIER, P., LIIRA, J., TSCHARNTKE, T., WINQVIST, C., EGGERS, S., BOMMARCO, R., PÄRT, T., BRETAGNOLLE, V., PLANTEGENEST, M., CLEMENT, L. W., DENNIS, C., PALMER, C., ONATE, J. J., . . . INCHAUSTI, P. (2010). Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic and Applied Ecology*, 11(2), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.12.001>.
- GIOVIO, H., HEIL, I., & BOHRMANN, J. (2020). Wirkung von Neurotoxinen aus Pflanzenschutzmitteln auf den Wasserfloh *Daphnia magna*. *BU praktisch*, 3(1), ARTIKEL 3. <https://doi.org/10.4119/bupraktisch-3218>.
- GOULSON, D. (2013). An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977–987. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12111>.
- GRANDRATH, R., & BOHRMANN-LINDE, C. (2022). Development of a low-cost experiment for chemistry lessons using the example of the enzymatic fuel cell with lactase. *Chemkon*, 29(S1), 233–238. <https://doi.org/10.1002/ckon.202200001>.
- GREENE, M., PITTS, W., & DEWPRASHAD, B. (2017). Using Videography to Study the Effects of Stimulants on *Daphnia magna*. *The American Biology Teacher*, 79(1), 35–40. <https://doi.org/10.1525/abt.2017.79.1.35>.
- HALLMANN, C. A., FOPPEN, R. P., VAN TURNHOUT, C. A., DE KROON, H., & JONGEJANS, E. (2014). Declines in insectivorous birds are associated with high neonicotinoid concentrations. *Nature*, 511(7509), 341–343. <https://doi.org/10.1038/nature13531>.
- HELBING, I., HEIL, I., & BOHRMANN, J. (2021A). Digital-analoge Lehrerfortbildungen zu Experimenten im Biologieunterricht. *MNU-Journal*, 74(3), 254–257.
- HELBING, I., HEIL, I., & BOHRMANN, J. (2021B). Experimentieren im Kontext aktueller biologischer Forschung stärken – durch digital-analoge Lehrerfortbildungen auf Distanz In C. MAURER, K. RINCKE, L. HOLZÄPFEL, & F. LIPOVSKY (HG.), *Wie viel Wissenschaft braucht die Lehrerfortbildung – Arbeitsbündnisse im analogen und virtuellen Raum. Online-QLB-Tagung an der Universität Regensburg 2021* (S. 96–99). Universität Regensburg. <https://doi.org/10.25656/01:23404>.
- HOLLERT, H., SEILER, T.-B., BOHRMANN, J., & MÜLLER, O. (2013). Ökotoxikologie – Eine interdisziplinäre Wissenschaft. *Praxis der Naturwissenschaften – Biologie in der Schule*, 62(3), 4–6.
- HUWER, J., IRION, T., KUNTZE, S., SCHAAL, S., & THYSSEN, C. (2019). Von TPaCK zu DPaCK – Digitalisierung im Unterricht erfordert mehr als technisches Wissen. *MNU-Journal*, 05.2019, 358–364.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>.
- JAUREGUIBERRY, P., TITEUX, N., WIEMERS, M., BOWLER, D. E., COSCIEME, L., GOLDEN, A. S., GUERRA, C. A., JACOB, U., TAKAHASHI, Y., SETTELE, J., DIAZ, S., MOLNAR, Z., & PURVIS, A. (2022). The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science Advances*, 8(45), eabm9982. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm9982>.

- JENSEN, O. P. (2019). Pesticide impacts through aquatic food webs. *Science*, 366(6465), 566–567. <https://doi.org/10.1126/science.aaz6436>.
- JESCHKE, P., NAUEN, R., & BECK, M. E. (2013). Nicotinic acetylcholine receptor agonists: a milestone for modern crop protection. *Angewandte Chemie International Edition*, 52(36), 9464–9485. <https://doi.org/10.1002/anie.201302550>.
- KRESS, D. (2021). *Greenpeace Nachhaltigkeitsbarometer 2021*. <https://www.greenpeace.de/publikationen/greenpeace-nachhaltigkeitsbarometer-2021-0>.
- KREUTZBERG, K., DAHMEN, R., SCHMIDT, B., & BOHRMANN, J. (2011). Wie wirken Neurotoxine? *Unterricht Biologie*, 35(362), 36–41.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2016). Strategie der Kultusministerkonferenz „Bildung in der digitalen Welt“ https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2018/Digitalstrategie_2017_mit_Weiterbildung.pdf.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2020). Bildungsstandards im Fach Biologie für die Allgemeine Hochschulreife. https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-Bildungsstandard-sAHR_Biologie.pdf.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2024a). Empfehlung der Kultusministerkonferenz zur Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schule https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2024/2024_06_13-BNE-Empfehlung.pdf.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2024b). Weiterentwickelte Bildungsstandards in den Naturwissenschaften für das Fach Biologie (MSA). https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2024/2024_06_13-WeBiS_Biologie_MSA.pdf.
- KWON, I. H., KIM, I. Y., HEO, M. B., PARK, J. W., LEE, S. W., & LEE, T. G. (2021). Real-time heart rate monitoring system for cardiotoxicity assessment of *Daphnia magna* using high-speed digital holographic microscopy. *Science of The Total Environment*, 780, ARTIKEL 146405. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146405>.
- LIESS, M., FOIT, K., KNILLMANN, S., SCHAFER, R. B., & LIESS, H. D. (2016). Predicting the synergy of multiple stress effects. *Scientific Reports*, 6, ARTIKEL 32965. <https://doi.org/10.1038/srep32965>.
- MALHOTRA, N., CHEN, K. H., HUANG, J. C., LAI, H. T., UAPIATANAKUL, B., ROLDAN, M. J. M., MACABEO, A. P. G., GER, T. R., & HSIAO, C. D. (2021). Physiological Effects of Neonicotinoid Insecticides on Non-Target Aquatic Animals-An Updated Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(17), Artikel 9591. <https://doi.org/10.3390/ijms22179591>.
- MEIER, J. D., & ASSHOFF, R. (2016). Die Wirkung von Neuroenhancern auf die Herzschlagfrequenz von *Daphnia magna*. *MNU Journal*, 3.2016, 190–196.
- MINER, B. E., DE MEESTER, L., PFRENDER, M. E., LAMPERT, W., & HAIRSTON, N. G. (2012). Linking genes to communities and ecosystems: *Daphnia* as an ecogenomic model. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1735), 1873–1882. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2404>.
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (MSB) (2019a). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe I – Gymnasium in Nordrhein-Westfalen. Biologie*. Ritterbach. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/197/g9_bi_klp_%203413_2019_06_23.pdf.
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (MSB) (2019b). Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung. https://www.schulministerium.nrw/sites/default/files/documents/Leitlinie_BNE.pdf.
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (MSB) (2022). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Biologie*. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/325/gost_klp_bi_2022_06_07.pdf.
- MORRISSEY, C. A., MINEAU, P., DEVRIES, J. H., SANCHEZ-BAYO, F., LIESS, M., CAVALLARO, M. C., & LIBER, K. (2015). Neonicotinoid contamination of global surface waters and associated risk to aquatic invertebrates: a review. *Environment International*, 74, 291–303. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.024>.
- MÜLLER, O. (2013). ÖKOTOXIKOLOGIE. *Praxis der Naturwissenschaften – Biologie in der Schule*, 62(3).
- NAUEN, R., JESCHKE, P., VELTEN, R., BECK, M. E., EBBINGHAUS-KINTSCHER, U., THIELERT, W., WOLFEL, K., HAAS, M., KUNZ, K., & RAUPACH, G. (2015). Flupyradifurone: a brief profile of a new butenolide insecticide. *Pest Management Science*, 71(6), 850–862. <https://doi.org/10.1002/ps.3932>.
- NEUMANN, K., & WRIGHT, N. (2020). The digitalization of science education: Déjà vu all over again? *Journal of Research in Science Teaching*, 57(9), 1519–1528. <https://doi.org/10.1002/tea.21668>.
- NEWMAN, M. C. (2020). *Fundamentals of ecotoxicology the science of pollution* (5. AUFL.). CRC Press.
- NICK, P., FISCHER, R., GRADL, D., GUTMANN, M., KÄMPER, J., LAMPARTER, T., & RIEMANN, M. (2019). *Modellorganismen*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54868-4>.
- NIEBERT, K. (2023). Biologische Bildung für Nachhaltigkeit. In H. GROPEN-GIEßER & U. HARMS (Hg.), *Fachdidaktik Biologie* (S. 522–546). Aulis.
- OECD. (2004). *Test No. 202: Daphnia sp. Acute Immobilisation Test*. <https://doi.org/10.1787/9789264069947-en>.
- OECD. (2012). *Test No. 211: Daphnia magna Reproduction Test*. <https://doi.org/10.1787/9789264185203-en>.
- PARCHMANN, I., SCHWARZER, S., WILKE, T., TAUSCH, M., & WAITZ, T. (2017). Von Innovationen der Chemie zu innovativen Lernanlässen für den Chemieunterricht und darüber hinaus. *Chemkon*, 24(4), 161–164. <https://doi.org/10.1002/ckon.201790001>.
- RABY, M., NOWIERSKI, M., PERLOV, D., ZHAO, X., HAO, C., POIRIER, D. G., & SIBLEY, P. K. (2018). Acute toxicity of 6 neonicotinoid insecticides to freshwater invertebrates. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37(5), 1430–1445. <https://doi.org/10.1002/etc.4088>.
- REIBER, L., FOIT, K., LIESS, M., KARAOGLAN, B., WOGRAM, J., & DUQUESNE, S. (2022). Close to reality? Micro-/mesocosm communities do not represent natural macroinvertebrate communities. *Environmental Sciences Europe*, 34, ARTIKEL 65. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00643-x>.
- SANTOSO, F., KRYLOV, V. V., CASTILLO, A. L., SAPUTRA, F., CHEN, H. M., LAI, H. T., & HSIAO, C. D. (2020). Cardiovascular Performance Measurement in Water Fleas by Utilizing High-Speed Videography and ImageJ Software and Its Application for Pesticide Toxicity Assessment. *Animals*, 10(9), Artikel 1587. <https://doi.org/10.3390/ani10091587>.
- SBM Life Science GmbH (2021). *Lizetan Plus Schädlingsfrei AF - Sicherheitsdatenblatt*. https://www.seezon.de/product/lizetan-plus-schaedlingsfrei-af/zzdatasheet_3664715026938_86600652_lizetan_plus_schaedlingsfrei_af_800_ml_de_v2-0/.
- SCHREIBER, J.-R., & SIEGE, H. H. (2016). Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2015/2015_06_00-Orientierungsrahmen-Globale-Entwicklung.pdf.
- SEDA, J., & PETRUSEK, A. (2011). *Daphnia* as a model organism in limnology and aquatic biology: introductory remarks. *Journal of Limnology*, 70(2), 337–344. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2011.337>.
- SICILIANO, A., GESUELE, R., PAGANO, G., & GUIDA, M. (2015). How *Daphnia* (Cladocera) assays may be used as bioindicators of health effects? *Journal of Biodiversity & Endangered Species*, 51, S1.005. <https://doi.org/10.4172/2332-2543.S1-005>.

SPARLING, D. W. (2016). *Ecotoxicology Essentials*. Academic Press.

SURES, B., & BOENIGK, J. (2021). Angewandte Ökologie. In J. BOENIGK (Hg.), *Boenigk, Biologie* (S. 989–1014).
https://doi.org/10.1007/978-3-662-61270-5_38.

TAUSCH, M. W. (2004). Curriculare Innovation. *Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule*, 53(8), 18–21.

TAUSCH, M. W., & FLINT, A. (2017). Chemiedidaktik 2016: Experimentell-konzeptionelle Forschung. *Nachrichten aus der Chemie*, 65(3), 383–384.
<https://doi.org/10.1002/nadc.20174060851>.

TKACZYK, A., BOWNIK, A., DUDKA, J., KOWAL, K., & SLASKA, B. (2021). Daphnia magna model in the toxicity assessment of pharmaceuticals: A review. *Science of The Total Environment*, 763, 143038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143038>.

UNESCO (2020). *Education for sustainable development: a roadmap*.
<https://doi.org/10.54675/yfre1448>.

VIGHI, M., & VILLA, S. (2013). Ecotoxicology: The Challenges for the 21st Century. *Toxics*, 1(1), 18–35. <https://doi.org/10.3390/toxics1010018>.

VILLEGAS-NAVARRO, A., ROSAS, L. E., & REYES, J. L. (2003). The heart of Daphnia magna: effects of four cardioactive drugs. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 136(2), 127–134. [https://doi.org/10.1016/s1532-0456\(03\)00172-8](https://doi.org/10.1016/s1532-0456(03)00172-8).

VON KOTZEBUE, L., MEIER, M., FINGER, A., KREMSER, E., HUWER, J., THOMS, L.-J., BECKER, S., BRUCKERMANN, T., & THYSSEN, C. (2021). The Framework DiKoLAN (Digital Competencies for Teaching in Science Education) as Basis for the Self-Assessment Tool DiKoLAN-Grid. *Education Sciences*, 11(12), Artikel 775. <https://doi.org/10.3390/educsci11120775>.

YAMAMURO, M., KOMURO, T., KAMIYA, H., KATO, T., HASEGAWA, H., & KAMEDA, Y. (2019). Neonicotinoids disrupt aquatic food webs and decrease fishery yields. *Science*, 366(6465), 620–623. <https://doi.org/10.1126/science.aax3442>.

2 Diagramme zum Vergleich der Messwerterhebung bei halber und voller Videogeswindigkeit

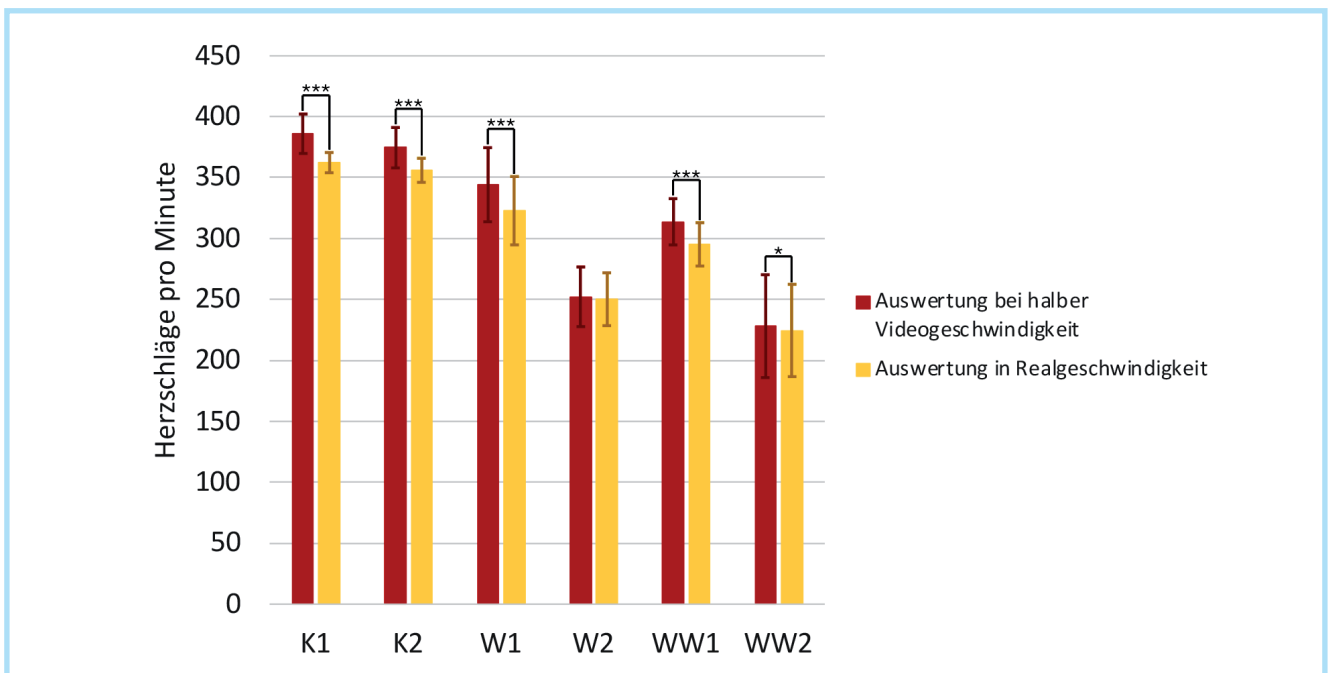


Abb. 4. Wirkung von Lizetan Plus Schädlingfrei AF (0,08 g/L Flupyradifuron) sowie einer stärker konzentrierten Lösung dieser Formulierung auf die Herzschlagfrequenz von *Daphnia magna*. Auswertung von Videos bei halber und voller Abspielgeschwindigkeit. K = Kontrolle, W = Wirkstofflösung, WW = konzentrierte Wirkstofflösung, 1 = 1. Teilmessung (0 ≤ t ≤ 4,75 Min.), 2 = 2. Teilmessung (30 ≤ t ≤ 34,75 Min.). Dargestellt sind Mittelwert, Standardabweichung und Signifikanzniveau (* = p < 0,05; *** = p < 0,001; t-Test für abhängige Stichproben). Pro Ansatz n = 50 (je 5 Tiere x 10 Werte).

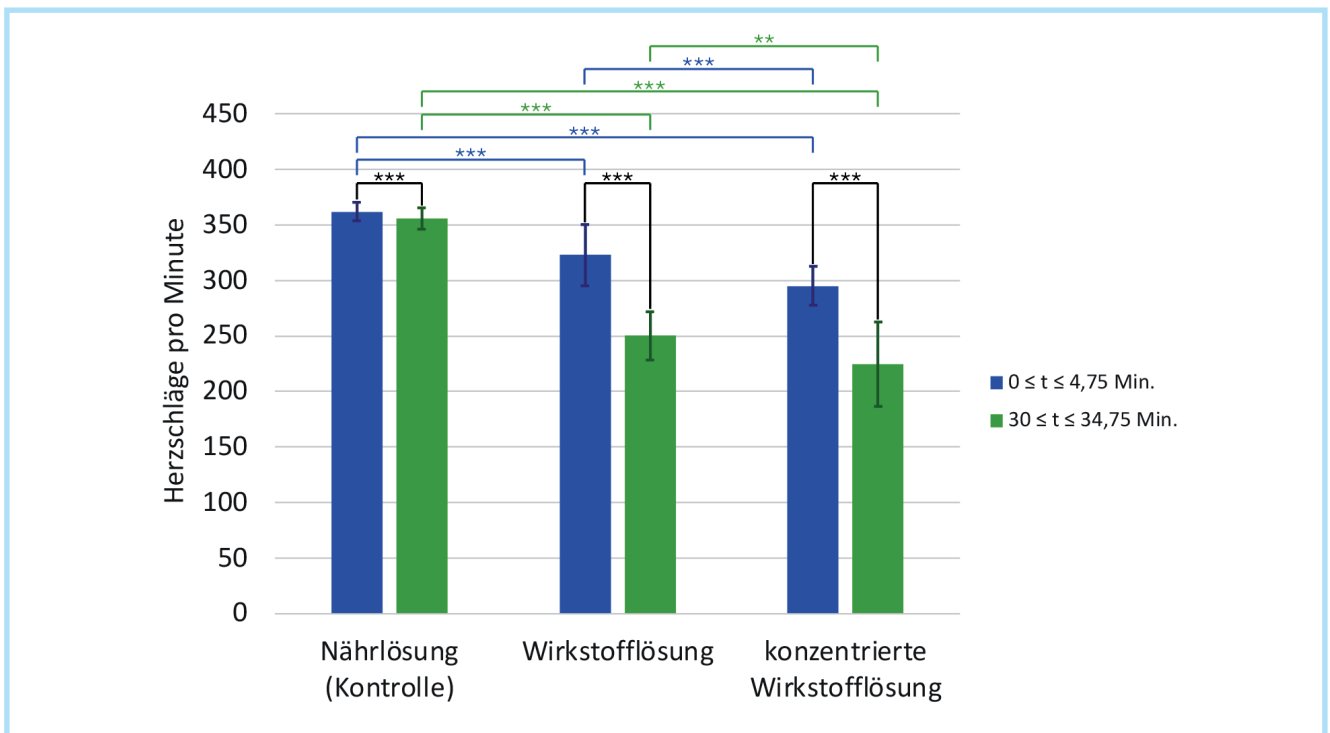


Abb. 5. Wirkung von Lizetan Plus Schädlingfrei AF (0,08 g/L Flupyradifuron) sowie einer stärker konzentrierten Lösung dieser Formulierung auf die Herzschlagfrequenz von *Daphnia magna*. Auswertung von Videos in Realgeschwindigkeit. Dargestellt sind Mittelwert, Standardabweichung und Signifikanzniveau für zwei Zeitintervalle (** = p < 0,01; *** = p < 0,001; grüne & blaue Klammern: Welch-ANOVA mit Games-Howell Post-hoc-Test, schwarze Klammern: t-Test für abhängige Stichproben). Pro Ansatz n = 50 (je 5 Tiere x 10 Werte).