

Potenziale von Citizen Science für die Gewässerforschung und Bildung

Ein partizipatives Forschungsprojekt
zur Nitratbelastung von Gewässern
unter Beteiligung von Wissenschaft,
Gesellschaft und Schule

Dissertation zur Erlangung des
Doktorgrades (Dr. rer. nat.)
des Fachbereichs Biologie/Chemie
der Universität Osnabrück

vorgelegt von
Frauke Brockhage

Osnabrück, 2023



Erster Gutachter: Prof. Dr. Marco Beeken

Zweite Gutachterin: Prof. Dr. Verena Pietzner

Tag der mündlichen Prüfung: 08.08.2023

Dekanin: Prof. Dr. Sabine Zachgo

*"It's no longer us against 'Nature.' Instead, it's we who decide what nature is and what it will be.
To master this huge shift, we must change the way we perceive ourselves and our role in the world."*

Crutzen & Schwägerl, 2011

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mich persönlich in der Promotionszeit und auf dem Weg dahin unterstützt haben:

Zuerst danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Marco Beeken für die Unterstützung, Betreuung und Motivation über die gesamte Zeit an der Universität Osnabrück, für sein Vertrauen in meine Forschungsarbeit (obwohl ich mit einem Mathe-/Physik-Studium bei ihm in der Chemie gelandet bin) und für die Zusammenstellung des Teams der Chemiedidaktik! Diesem Team, bestehend aus den Mitdoktorand:innen, unserer Sekretärin, den technischen Assistentinnen und studentischen Hilfskräften danke ich dafür, dass wir gemeinsam unzählige Projekte auf die Beine gestellt und dabei die Begeisterung nie aus den Augen verloren haben.

Darüber hinaus danke ich dem Oldenburger Team, Prof. Dr. Verena Pietzner und Dr. Mientje Lüsse, für die gemeinsame Umsetzung des Projektes und die allzeit offenen Ohren! Dr. Jörg Klasmeier danke ich herzlich für die fachliche Unterstützung und die gemeinsame Ideenschmiede für Messmethoden und Co. Ein großer Dank gilt außerdem den Bürger:innen, Schüler:innen und Lehrer:innen für das große Engagement, für über 8000 Messwerte und viele Monate, in denen ihr das Projekt gemeinsam mit uns vorangetrieben habt.

Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt danke ich für die großzügige finanzielle Förderung, mit welcher wir das Projekt ins Leben rufen konnten, dem FCI und der Universität Osnabrück für die Unterstützung weiterer Projekte in der Promotionszeit und dem Verkehrsverein Stadt und Land Osnabrück e.V. für die Auszeichnung mit einem Förderpreis für meine Promotions- und Projektarbeit. Durch das Abschlussstipendium der Universität Osnabrück aus dem Pool Frauenförderung konnte ich mich in den letzten Monaten weiterhin auf die Promotion fokussieren und bin hierfür ebenfalls sehr dankbar.

Besonderer Dank gilt meinem Partner dafür, dass er mich in stressigen Zeiten immer unterstützt und mir den Rücken freigehalten hat. Ihm, meiner Familie und meinen Freund:innen danke ich nicht nur für die offenen Ohren, sondern vor allem für den überlebenswichtigen Ausgleich in der Promotionszeit. Meiner Familie danke ich dafür, dass Sie mich von der Kindheit bis zur Promotion für das Forschen und die Naturwissenschaften begeistert hat.

Danke!

Zusammenfassung

Der Citizen Science-Ansatz, bei dem die Öffentlichkeit aktiv an wissenschaftlicher Forschung partizipiert, verspricht als potenziell leistungsfähiges Instrument zur Generierung und Auswertung großer Datenmengen einen bedeutenden Beitrag für die Wissenschaft (Vohland et al., 2021). Daher wird er unter anderem empfohlen, um noch bestehende Datenlücken, beispielsweise in Bezug auf die Güte von Gewässern, zu schließen (Campbell et al., 2020; World Water Quality Alliance [WWQA], 2021). Auch in der Bildung erlangt Citizen Science eine steigende Aufmerksamkeit, wobei die von Citizen Science intendierten Lernziele von einem wachsenden Interesse an wissenschaftlichen Themen über ein besseres Wissenschaftsverständnis bis hin zu positiven Verhaltensänderungen oder einem gesteigerten Verantwortungsbewusstsein reichen (Phillips et al., 2018). Durch die Zusammenführung wissenschaftlicher und bildungsorientierter Zielsetzungen offenbart Citizen Science ein großes Potenzial für die Erforschung gesellschaftsrelevanter Problemstellungen aus dem Bereich der Nachhaltigkeit und kann beispielsweise nicht nur für ein Monitoring verschiedener Umweltindikatoren herangezogen werden, sondern auch das Ziel einer Sensibilisierung der Gesellschaft verfolgen (Berndt, 2021; Conrad & Hilchey, 2011; Fraisl et al., 2020). Damit lässt sich Citizen Science auch als geeigneter Ansatz legitimieren, um partizipativ die im Nordwesten Deutschlands vorliegende Stickstoffbelastung von Gewässern zu erforschen, welche zu negativen Auswirkungen auf die Umwelt und zu kostenaufwändigen Maßnahmen für die Trinkwasseraufbereitung führt (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit [BMU], 2020; Oelmann et al., 2019).

Trotz der erwarteten Vorteile sind das tatsächliche Potenzial von Citizen Science für die Gewässerforschung und die Wirksamkeit für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung bisher nur wenig erforscht. An dieser Stelle setzt ein von den Universitäten Osnabrück und Oldenburg durchgeführtes Citizen Science-Projekt an, in dem rund 600 Bürger:innen und 200 Schüler:innen die Nitratbelastung von Gewässern in den Landkreisen Osnabrück, Emsland, Vechta und Cloppenburg und der Stadt Osnabrück untersucht haben. Die Schüler:innen haben dabei als sogenannte Forschungspat:innen agiert und die Bürger:innen bei den Nitratmessungen unterstützt.

Die von den Teilnehmer:innen von September 2019 bis März 2021 erhobenen Daten wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausgewertet, um das Potenzial von Citizen Science für die Gewässerforschung zu evaluieren. Hierzu wurden raumbezogene Datenanalysemethoden mit deskriptiver Statistik und nichtparametrischen statistischen Testverfahren kombiniert. Die Ergebnisse von 545 Probenahmestellen, die von den Teilnehmenden untersucht wurden, und 8754 Einzelmessungen bestätigen das große Potenzial von Citizen Science für die Gewässerforschung, wie aus den folgenden Teilergebnissen hervorgeht.

In einer Begleituntersuchung wurde zunächst gezeigt, dass Nitrat-Teststäbchen als kostengünstige und einfache Messmethode für Citizen Science geeignet sind, um einen ersten Überblick über die Nitratbelastung von Oberflächengewässern, Grundwasser und Regenwasser zu erhalten. Anschließend wurde das Potenzial von Citizen Science anhand der mit dem Citizen Science-Ansatz erhobenen Monitoring-Daten hinsichtlich verschiedener Subforschungsfragen untersucht. Für Fließgewässer und Brunnen konnten durch das Citizen Science-Projekt flächendeckende Messnetze realisiert werden, die einen großen Teil des Untersuchungsgebietes umfassen und somit einen Überblick über die Nitratbelastung in der Region geben und Einblicke in verschiedene Einflüsse auf diese ermöglichen. Jedoch fehlen insbesondere in ländlichen Gebieten und für die Gewässertypen Standgewässer, Quellwasser und Regenwasser Probenahmestellen für ein flächendeckendes Monitoring der Nitratbelastung. Dennoch konnten räumliche Einflüsse, beispielsweise die Landbedeckung und -nutzung oder hydrogeologische Bedingungen, mit den Citizen Science-Daten nachgewiesen werden. 38,8 % der Probenahmestellen wurden auch nach 15 Monaten noch von den Schüler:innen und Bürger:innen beprobt, sodass auch jahreszeitliche Verläufe anhand der Citizen Science-Daten beobachtet werden konnten. Darüber hinaus deutet ein Vergleich der Citizen Science-Daten mit den Messergebnissen anderer Messinitiativen auf eine hohe Qualität des Citizen Science-Datensatzes hin. Für eine abschließende Bewertung der Datenqualität lagen jedoch zu wenige direkt vergleichbare Probenahmestellen von anderen Messinitiativen vor. Damit ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden, um erstens die Güte der durch den Citizen Science-Ansatz erhobenen Daten zu untersuchen, zweitens weitere für den Citizen Science-Ansatz geeignete Messmethoden zu entwickeln und drittens aus dem Projekt abgeleitete Handlungsempfehlungen zu evaluieren.

In einer quantitativen Fragebogenstudie wurde begleitend die Wirksamkeit des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung in einem quasi-experimentellen Zwei-Gruppen Pre-Post-Design untersucht. Aufgrund einer zu geringen Stichprobengröße und einer starken Beeinflussung der Studie, unter anderem durch die COVID-19-Pandemie, konnten Wirkungen der Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt auf das Umweltbewusstsein sowie auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, das Interesse, die motivationale Regulation, die Selbstwirksamkeit und das Selbstkonzept im Kontext des naturwissenschaftlichen Unterrichts nicht verifiziert oder falsifiziert werden. Dennoch liefern die Daten erste Hinweise darauf, dass die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt einen positiven Einfluss auf das Umweltverhalten und Umweltkenntnisse in Bezug auf den Gewässerschutz hat und damit einen aktiven Beitrag zum Gewässerschutz leisten kann. Weiterer Forschungsbedarf zur Wirksamkeit von Citizen Science in der Umweltbildung und naturwissenschaftlichen Schulbildung ist vorhanden, um Citizen Science in diesen Bereichen zu legitimieren, optimieren und etablieren.

Abstract

The active participation of citizens in scientific research, called Citizen Science, offers huge potential to generate and analyze large amounts of data (Vohland et al., 2021). Therefore, this approach is recommended to fill data gaps related to, for example, water quality (Campbell et al., 2020; WWQA, 2021). Citizen Science is also receiving increasing attention in education, whereby the intended learning outcomes of citizen science vary from a growing interest in scientific topics and a better understanding of science to increased awareness or a positive change in behavior (Phillips et al., 2018). By combining scientific and educational objectives, Citizen Science reveals a great potential for research and education on sustainability issues and can not only be used for the monitoring of environmental indicators, but also to raise awareness of several environmental problems (Berndt, 2021; Conrad & Hilchey, 2011; Fraisl et al., 2020). Thus, Citizen Science can be legitimized as a suitable approach for participatory research on nitrogen pollution of water bodies in northwestern Germany, which leads to negative impacts on the environment as well as expensive measures for drinking water treatment (BMU, 2020; Oelmann et al., 2019).

Despite its presumed benefits, the actual potential of Citizen Science for water research and its impact on environmental education and scientific education in school have not yet been fully researched. In this context, the Universities of Osnabrück and Oldenburg conducted a Citizen Science project in which approximately 600 citizens and 200 students investigated the nitrate pollution of water bodies in northwestern Germany. The students acted as so-called research mentors and supported the citizens with the nitrate measurements.

Data collected from participants from September 2019 to March 2021 were used in this thesis to analyze the potential of Citizen Science for research into nitrogen pollution of water bodies. Geoprocessing tools such as spatial joins and heatmaps were for this purpose combined with descriptive statistics and non-parametric statistical test methods. The results of 545 monitoring sites examined by the participants indicate the great potential of Citizen Science for water research, as derived from the following sub-results.

A preliminary investigation showed that nitrate test strips are suitable for Citizen Science as an inexpensive and simple measurement method to provide an overview of the nitrate pollution of surface waters, groundwater, and rainwater. For the water body types well water and flowing water, a major part of the sampling area was investigated by the participants providing an overview of the nitrate pollution and insight into different influences. However, especially in rural areas and for the water body types standing water, spring water and rainwater, there is a lack of monitoring points for an area-wide monitoring of nitrate pollution. Nevertheless, spatial influences such as land cover and land use or hydrogeological conditions could be evidenced with the Citizen Science data. 38.8% of all monitoring points were examined longer

than 15 months revealing also seasonal differences in the citizen science data. Furthermore, the comparison of the data with the measurement results of other measurement initiatives indicates a high quality of the Citizen Science data set. However, insufficient directly comparable monitoring points from other measurement initiatives were available for a final assessment of data quality. Thus, there is a need for further research, firstly to check the quality of the collected data, secondly to develop further measurement methods suitable for the Citizen Science approach and thirdly to evaluate the recommendations for further Citizen Science projects derived from this project.

An accompanying quantitative questionnaire study was conducted to examine the effectiveness of Citizen Science regarding environmental education and scientific education in school. Due to the small sample size and the influence of the COVID-19 pandemic on the study, it was not possible to verify impacts of participation in the Citizen Science project on environmental awareness as well as on the understanding of the nature of science, interest, motivational regulation, self-efficacy, and self-concept in the context of science education. Nevertheless, the data indicate that participation in the Citizen Science project can have a positive impact on environmental behavior and environmental knowledge regarding water protection. Further research on the impact of Citizen Science in environmental education and scientific education in school is needed to legitimize, optimize, and establish Citizen Science in these contexts.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....	15
1.1. Ausgangssituation	15
1.2. Potenzial von Citizen Science für die fachwissenschaftliche Forschung: Partizipativ die Stickstoffbelastung von Gewässern untersuchen	17
1.3. Empirische Begleitforschung: Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung.....	18
1.4. Gliederung der Arbeit	19
2. THEORETISCHER HINTERGRUND UND STAND DER FORSCHUNG 20	
2.1. Nachhaltige Entwicklung	20
2.1.1. Definition und Dimensionen von nachhaltiger Entwicklung	20
2.1.2. Ziele und Indikatoren einer nachhaltigen Entwicklung	23
2.1.3. Die planetaren Leitplanken im Zeitalter des Anthropozän.....	25
2.1.4. Bildung für nachhaltige Entwicklung.....	28
2.1.5. Die Stickstoffproblematik im Kontext der Nachhaltigkeit.....	30
2.2. Die Stickstoffbelastung von Gewässern.....	37
2.2.1. Der natürliche Stickstoffkreislauf.....	37
2.2.2. Anthropogene Einträge von reaktivem Stickstoff.....	40
2.2.3. Auswirkungen anthropogener Einflüsse auf den Stickstoffkreislauf.....	43
2.2.4. Die Stickstoffbelastung von Gewässern in Deutschland und Niedersachsen	51
2.2.5. Zeitliche und räumliche Einflüsse auf die Nitratbelastung	57
2.2.6. Präventive und reaktive Maßnahmen.....	61
2.3. Der Citizen Science-Ansatz.....	66
2.3.1. Definitionen und Klassifikationen von Citizen Science.....	66
2.3.1. Participation Inequality – Die Ungleichheit der Beteiligung	70
2.3.2. Rahmenwerk für die Beteiligung der Öffentlichkeit an der Wissenschaft.....	71
2.3.3. Von der globalen zur deutschen Citizen Science-Landschaft.....	73
2.3.4. Das Bildungspotenzial von Citizen Science.....	74
2.3.5. Der Citizen Science-Ansatz im Bereich der Nachhaltigkeit.....	82
2.4. Identifizierte Forschungslücke.....	88
3. KONZEPTION DES CITIZEN SCIENCE-PROJEKTES	90
3.1. Zielsetzung.....	90
3.2. Konzeption und Aufbau.....	91
3.2.1. Allgemeines Konzept.....	91

3.2.2. Partizipation der Wissenschaftler:innen	93
3.2.3. Partizipation der Schüler:innen: Der Forschungspatenansatz	96
3.2.4. Partizipation der Bürger:innen: Der Citizen Science-Ansatz.....	99
3.2.5. Partizipation weiterer Projektpartner:innen.....	103
3.2.6. Ergänzende Bildungsangebote zur Stickstoffproblematik	104
3.3. Übergeordnete Forschungsfragen	105
4. BEITRÄGE DES CITIZEN SCIENCE-PROJEKTES ZUR FACHWISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG	106
4.1. Konkretisierung der Forschungsfragen.....	106
4.2. Hypothesenbildung	107
4.3. Forschungsdesign	111
4.3.1. Auswahl des Beprobungsgebietes	111
4.3.2. Auswahl der Gewässertypen.....	112
4.3.3. Häufigkeit und Dauer der Beprobungen	113
4.3.4. Auswahl und Validierung der Messmethode.....	113
4.3.5. Ablauf und Methoden der Datenerhebung und -auswertung.....	117
4.4. Ergebnisse des Nitrat-Monitorings.....	133
4.4.1. Begleituntersuchung: Validierung der Teststäbchen.....	133
4.4.2. Datenübersicht.....	137
4.4.3. Räumliche Verteilung der Probenahmestellen.....	140
4.4.4. Bewertung der Nitratbelastung der beprobten Gewässer.....	142
4.4.5. Einflüsse der Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung	146
4.4.6. Räumliche Einflüsse auf die Nitratbelastung	149
4.4.7. Zeitliche Einflüsse auf die Nitratbelastung.....	154
4.4.8. Vergleich der Ergebnisse mit weiteren Messinitiativen.....	158
4.5. Diskussion und Fazit: Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung.....	164
4.5.1. Realisierung der Projektziele.....	164
4.5.2. Potenziale, Grenzen und Optimierungen des dargestellten Citizen Science- Konzeptes für die Gewässerforschung	166
4.5.3. Handlungsempfehlungen für Citizen Science in der Gewässerforschung.....	177
4.6. Ausblick	183
5. BEGLEITFORSCHUNG: WIRKSAMKEIT DES CITIZEN SCIENCE- UND FORSCHUNGSPATENANSATZES FÜR DIE BILDUNG	186
5.1. Forschungsfragen.....	186
5.2. Hypothesenbildung	187

5.3. Forschungsdesign	192
5.3.1. Ablauf der Erhebung: Zwei-Gruppen Pre-Post-Design	192
5.3.2. Erhebungsinstrument.....	193
5.3.3. Statistische Methoden.....	202
5.3.4. Planung und Beschreibung der Stichprobe	205
5.4. Ergebnisse der Begleitstudie	208
5.4.1. Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes auf das Umweltbewusstsein	208
5.4.2. Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes im Kontext der naturwissenschaftlichen Schulbildung.....	215
5.4.3. Evaluation und Verbesserungspotenzial des Citizen Science-Ansatzes und Forschungspatenansatzes.....	227
5.5. Diskussion und Fazit: Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung	240
5.5.1. Zusammenfassung und Diskussion der Begleitstudie.....	240
5.5.2. Methodendiskussion und Limitationen der Begleitstudie	245
5.5.3. Weiterer Forschungsbedarf	250
6. FAZIT UND AUSBLICK	253
7. PUBLIKATIONEN	259
8. FÖRDERUNG	261
LITERATURVERZEICHNIS	262
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	296
TABELLENVERZEICHNIS	303
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	306
ANHANG	307

1. Einleitung und Zielsetzung

1.1. Ausgangssituation

Wir befinden uns im Anthropozän – ein Zeitalter, das durch den Einfluss des Menschen dominiert wird, der sich auf verschiedene Prozesse des Erdsystems auswirkt (Crutzen, 2002). Die seit 1950 rapide wachsende Weltbevölkerung und der steigende Pro-Kopf-Verbrauch verschiedener Ressourcen der Erde führen zu erheblichen Veränderungen der globalen Umwelt (Steffen, Broadgate et al., 2015). Durch anthropogene Einflüsse wurden bereits sechs der neun planetaren Belastungsgrenzen überschritten, welche einen sicheren Handlungsraum für zentrale Systeme und Prozesse des Erdsystems eingrenzen, in dem eine Destabilisierung unwahrscheinlich ist. Hierzu gehört auch die planetare Belastungsgrenze des geochemischen Stickstoffkreislaufs, die aufgrund von wenigen, landwirtschaftlich intensiv genutzten Regionen mit hohen Stickstoffausbringungsraten überschritten wird (Steffen, Richardson et al., 2015). Der übermäßige Eintrag reaktiver Stickstoffverbindungen führt unter anderem zu einer Belastung des Grundwassers, einer Eutrophierung von Oberflächengewässern und einer Ausbildung von sauerstoffarmen oder -freien Todeszonen in Meeren (BMU, 2020; Faulstich, 2015; Feistel et al., 2016; Galloway et al., 2003). Ziel- und Grenzwerte, welche zur Reduzierung dieser negativen Auswirkungen festgelegt wurden, werden in Deutschland, insbesondere im Nordwesten, an vielen Probenahmestellen überschritten (BMU, 2020). Um diesen und weiteren Problemstellungen zu begegnen, haben die Vereinten Nationen die Sustainable Development Goals (kurz SDGs) mit einem Indikatorenrahmenwerk zur Überprüfung von insgesamt 169 Unterzielen verabschiedet (A/RES/71/313, 2017/E/CN.3/2022/2; A/RES/70/1, 2015). Für 68 % der umweltbezogenen SDG-Indikatoren, darunter auch Indikatoren aus dem Bereich des Gewässerschutzes und der Stickstoffproblematik, liegen jedoch nicht ausreichend Daten vor, um die globale Entwicklung zu bewerten (United Nations Environment Programme, 2019).

Der Citizen Science-Ansatz, bei dem sich Bürger:innen aktiv an wissenschaftlicher Forschung beteiligen, wird als eine Möglichkeit gesehen, diese Datenlücken zu schließen (Campbell et al., 2020; Fraisl et al., 2020). Die World Water Quality Alliance (2021) und das European Marine Board (Garcia-Soto et al., 2017) empfehlen den Citizen Science-Ansatz beispielsweise als potenziell leistungsfähiges Instrument zur Generierung großer räumlich und zeitlich skalierten Datenmengen für das Monitoring und die Forschung zur Güte verschiedener Gewässertypen.

Mit Citizen Science werden jedoch nicht nur wissenschaftliche Zielsetzungen verfolgt, auch in der Bildung erlangt Citizen Science eine immer größere Bedeutung (Kermish-Allen et al., 2019; Roche et al., 2020). Die von Citizen Science intendierten Bildungsziele reichen von einer Interessenssteigerung über ein besseres Naturwissenschaftsverständnis bis hin zu einer Verhaltensänderung, beispielsweise in Bezug auf das Umweltverhalten oder das politische Engagement (Phillips et al., 2018). Durch die intensive Auseinandersetzung mit realen

Umweltproblemen im regionalen Umfeld erhält der Citizen Science-Ansatz auch für die Umweltbildung eine besondere Bedeutung (Berndt, 2021; Stern et al., 2014).

Trotz des vermuteten Potenzials sind der tatsächliche Nutzen des noch jungen Forschungsansatzes Citizen Science für die Gewässerforschung und die Wirksamkeit in Bezug auf verschiedene Learning Outcomes bislang nur wenig erforscht. An dieser Stelle setzt die vorliegende Forschungsarbeit an, in der ein Citizen Science-Projekt zur Stickstoffbelastung von Gewässern konzipiert, durchgeführt und hinsichtlich des Potenzials für die Gewässerforschung und Bildung untersucht wurde. In diesem Citizen Science-Projekt haben rund 600 Bürger:innen und 200 Schüler:innen die Nitratbelastung von Gewässern in den Landkreisen Osnabrück, Emsland, Vechta und Cloppenburg sowie der Stadt Osnabrück gemeinsam mit Wissenschaftler:innen der Universitäten Osnabrück und Oldenburg untersucht. Daten von insgesamt 545 Probenahmestellen, welche von den Bürger:innen und Schüler:innen über 18 Monate beprobt wurden, werden im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich des Potenzials von Citizen Science für die Gewässerforschung ausgewertet. Die Schüler:innen haben in dem Citizen Science-Projekt als sogenannte Forschungspat:innen agiert und die Bürger:innen bei der Durchführung der Nitratmessungen unterstützt. Parallel haben die Schüler:innen die Stickstoffproblematik in projektbegleitenden Seminarfächern sowie durch den Besuch eines Schülerlabors und weitere Bildungsangebote vertieft erarbeitet. Für die am Projekt teilnehmenden Bürger:innen wurden Begleitmaterialien zum Ablauf des Nitrat-Monitorings, zur Stickstoffproblematik und zu den Ergebnissen von den Wissenschaftler:innen entwickelt. Darüber hinaus wurde in einem zweiten Teilprojekt an der Universität Oldenburg eine das Projekt ergänzende Heimexperimentierbox konzipiert, mit welcher sich interessierte Schüler:innen und Bürger:innen vertieft experimentell mit der Stickstoffproblematik auseinandersetzen konnten (Lüsse, 2022). Übergeordnetes Ziel des Projektes war neben dem Monitoring der Nitratbelastung verschiedener Gewässertypen eine Sensibilisierung der Bürger:innen und Schüler:innen für die Stickstoffbelastung von Gewässern. In einer quantitativen Begleitstudie wird diesbezüglich in dieser Forschungsarbeit die Wirksamkeit der Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt auf das Umweltbewusstsein untersucht. Darüber hinaus werden Effekte des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes auf verschiedene Learning Outcomes erforscht, die mit dem Citizen Science-Konzept im Rahmen der naturwissenschaftlichen Schulbildung verfolgt werden können.

Damit gliedert sich diese Arbeit in zwei Bereiche (vgl. Abbildung 1), die nachfolgend konkretisiert werden.



Abbildung 1: Gliederung der Arbeit (eigene Abbildung).

1.2. Potenzial von Citizen Science für die fachwissenschaftliche Forschung: Partizipativ die Stickstoffbelastung von Gewässern untersuchen

Das Potenzial von Citizen Science für die Forschung zur Stickstoffbelastung von Gewässern wird anhand der Monitoringdaten untersucht, die rund 600 Bürger:innen und 200 Schüler:innen in dem Citizen Science-Projekt innerhalb von 18 Monaten in den Landkreisen Osnabrück, Cloppenburg, Vechta, Emsland und der Stadt Osnabrück gesammelt haben. Die Teilnehmer:innen haben von September 2019 bis März 2021 insgesamt 248 Brunnen, 3 Quellen, 186 Probenahmestellen in Fließgewässern, 73 Probenahmestellen in stehenden Gewässern und 35 Regenwasser-Probenahmestellen regelmäßig beprobt und insgesamt 8754 Gewässerproben mit Teststäbchen hinsichtlich ihrer Nitratbelastung untersucht. Die Ergebnisse der Nitratmessungen und weitere Angaben zu den beprobten Gewässern wurden über eine Webseite an die Wissenschaftler:innen der Universität Osnabrück übermittelt. Im Rahmen dieser Dissertation werden diese Daten hinsichtlich verschiedener Subfragestellungen ausgewertet, die sich aus folgender Hauptforschungsfrage ableiten:

1. „Inwieweit kann der Citizen Science-Ansatz einen Beitrag zur Untersuchung der Stickstoffbelastung von Gewässern leisten?“

Zunächst wird aufbauend auf einer von Rolf (2021) durchgeführten Studie untersucht, inwieweit die verwendeten Nitrat-Teststäbchen eine für den Citizen Science-Ansatz geeignete Messmethode sind, mit welcher einfache und kostengünstige, jedoch auch hinreichend genaue Nitratmessungen durchgeführt werden können. Die Ergebnisse der Validierung der Teststäbchen werden im Anschluss zur Auswertung der Monitoring-Daten herangezogen.

In einem zweiten Schritt werden die Monitoring-Daten hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Probenahmestellen sowie des zeitlichen Verlaufs der Messwerteintragungen ausgewertet, um zu analysieren, ob ein flächendeckendes, längerfristiges Nitrat-Monitoring verschiedener Gewässertypen in einem definierten Gebiet mit dem Citizen Science-Ansatz realisiert werden

kann. Neben deskriptiver Statistik werden Heatmaps zur Analyse der Probenahmestellendichte verwendet.

Im Anschluss wird untersucht, inwieweit verschiedene Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung anhand der Citizen Science-Daten nicht nur deskriptiv beobachtet, sondern auch mit statistischen Testverfahren nachgewiesen werden können. Aufgrund der ordinalen Skalierung der mit den Teststäbchen gemessenen Nitratbelastungen werden nichtparametrische Testverfahren zur Untersuchung von Unterschieden (z. B. Kruskal-Wallis-Test, Kruskal & Wallis, 1952) oder Zusammenhängen (z. B. Kendall-Tau-b Rangkorrelationskoeffizient, Kendall, 1938) herangezogen. Neben jahreszeitlichen Schwankungen der Nitratbelastungen werden Einflüsse der Landbedeckung und -nutzung sowie hydrogeologischer Bedingungen untersucht.

In einem vierten Schritt werden die durch das Citizen Science-Projekt erhobenen Daten mit verschiedenen Referenzdaten, unter anderem mit den Monitoring-Daten des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (kurz NLWKN), verglichen. Aus diesem Vergleich wird abgeleitet, inwieweit die Ergebnisse des Citizen Science-Projektes konsistent mit oder komplementär zu den Datensätzen anderer Messinitiativen sind, um die Güte und den Nutzen der Citizen Science-Daten zu bewerten.

Anhand der Ergebnisse zu diesen vier Subforschungsfragen und weiterer Ergebnisse von Citizen Science-Projekten, die bereits durchgeführt wurden, wird schlussendlich das Potenzial von Citizen Science für die Gewässerforschung diskutiert. Aufbauend auf dem erprobten Projektdesign werden Optimierungen der Datenerhebung und -auswertung sowie Handlungsempfehlungen für Citizen Science im Bereich der Gewässerforschung abgeleitet.

1.3. Empirische Begleitforschung: Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung

Ergänzend zu den Outcomes des Projektes für die fachwissenschaftliche Forschung werden verschiedene Learning Outcomes des Citizen Science-Projektes im Rahmen einer quantitativen Begleitstudie im Zwei-Gruppen Pre-Post-Design untersucht. Neben der Wirksamkeit für die Umweltbildung wird die Wirksamkeit des Forschungspatenansatzes für die naturwissenschaftliche Schulbildung fokussiert. Der Begleitstudie liegen dabei die folgenden beiden Forschungsfragen zugrunde:

2. „Inwiefern kann das Citizen Science-Projekt das allgemeine Umweltbewusstsein und das themenspezifische Umweltbewusstsein (Einstellungen, Verhalten und Kenntnisse zum Thema Gewässerschutz) der Projektteilnehmer:innen positiv beeinflussen?“
3. „Inwieweit hat die Teilnahme der Schüler:innen als Forschungspat:innen an einem Citizen Science-Projekt eine Wirkung auf Interesse und Motivation, Selbstwirksam-

keitserwartung und Selbstkonzept sowie das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften im naturwissenschaftlichen Unterricht?“

Auf Basis der Pre- und Posttestdaten von insgesamt 138 Schüler:innen und Bürger:innen einer Interventions- und Vergleichsgruppe werden aus der Theorie abgeleitete Hypothesen zur Wirksamkeit des Citizen Science-Projektes auf das allgemeine und themenspezifische Umweltbewusstsein überprüft. Zur Untersuchung der Wirksamkeit des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes auf die naturwissenschaftliche Schulbildung werden Daten von insgesamt 77 Pre- und Posttests von Schüler:innen einer Interventions- und Vergleichsgruppe ausgewertet. Zur Auswertung werden neben deskriptiven statistischen Methoden, sofern die Voraussetzungen erfüllt sind, parametrische Testverfahren wie *t*-Tests und Varianzanalysen durchgeführt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Projektevaluation herangezogen, um Verbesserungsmöglichkeiten für das erprobte Konzept abzuleiten. Zuletzt werden die Limitationen der Begleitstudie, insbesondere resultierend aus der COVID-19-Pandemie und zu kleiner Stichproben, sowie der weitere Forschungsbedarf dargestellt.

1.4. Gliederung der Arbeit

Zur Beantwortung der insgesamt drei übergeordneten Forschungsfragen wird die Forschungsarbeit wie folgt gegliedert. In einer theoretischen Rahmung (Kapitel 2) wird zunächst der aktuelle Stand der Forschung dargestellt, welcher neben einer allgemeinen Betrachtung des Themenbereiches „Nachhaltige Entwicklung“ (Kapitel 2.1) die Stickstoffbelastung von Gewässern (Kapitel 2.2) und das Citizen Science-Konzept (Kapitel 2.3) umfasst. Ausgehend vom aktuellen Stand der Forschung wird in Kapitel 2.4 die Forschungslücke identifiziert, welche übergeordnet in das Potenzial von Citizen Science für die Gewässerforschung und Bildung klassifiziert werden kann. Um diese Forschungslücke zu schließen, wurde ein Citizen Science-Projekt zur Nitratbelastung von Gewässern konzipiert, durchgeführt und evaluiert. In Kapitel 3 wird die Konzeption des Citizen Science-Projektes dargestellt. Die Ergebnisse des Nitrat-Monitorings und die Beiträge des Citizen Science-Projektes zur fachwissenschaftlichen Forschung werden sodann in Kapitel 4 dargestellt, bevor in Kapitel 5 die Wirksamkeit des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes auf die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung untersucht wird. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zusammengefasst. Aus dem Projekt entstandene Publikationen werden zuletzt in Kapitel 7 aufgelistet.

2. Theoretischer Hintergrund und Stand der Forschung

2.1. Nachhaltige Entwicklung

Die Destabilisierung des Stickstoffkreislaufs ist eine von vielen aus menschlichen Aktivitäten resultierenden Problematiken, welche eine Reihe negativer Auswirkungen auf die Umwelt und potenzieller Risiken für die menschliche Gesundheit bewirken (Galloway et al., 2003). Der Stickstoffkreislauf und weitere Prozesse wurden durch anthropogene Einflüsse dabei bereits so stark beeinflusst, dass die Stabilität des Erdsystems gefährdet ist (Steffen, Richardson et al., 2015). Um unseren Lebensraum jetzt und zukünftig für die Menschheit zu sichern, ist eine nachhaltige Entwicklung unter Berücksichtigung verschiedener Dimensionen erforderlich, die nicht nur ökologische, sondern auch soziale und ökonomische Grenzen berücksichtigt (Zusammensetzung der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“, 1998). Hierfür wurden 17 Nachhaltigkeitsziele von den Vereinten Nationen (kurz UN) beschlossen, die weltweit eine nachhaltige Entwicklung auf ökologischer, sozialer und ökonomischer Ebene sicherstellen sollen (A/RES/70/1, 2015).

Einen direkten oder indirekten Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung kann der Citizen Science-Ansatz leisten (Liu & Kobernus, 2017). Zahlreiche Citizen Science-Projekte schließen beispielsweise an die UN-Nachhaltigkeitsziele an und können zum Monitoring der entsprechenden Nachhaltigkeitsindikatoren beisteuern (Fraisl et al., 2020; Moczek, Voigt-Heucke et al., 2021; West & Pateman, 2017). Weitere Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung sind die Umweltbildung und Bildung für nachhaltige Entwicklung (kurz BNE), welche ebenfalls durch den Citizen Science-Ansatz unterstützt werden können (Berndt, 2021).

Aus diesem Potenzial legitimiert sich das dieser Promotion zugrunde liegende Citizen Science-Projekt zur Stickstoffbelastung von Gewässern. Zur Einordnung der Stickstoffproblematik in den allgemeinen Kontext der Nachhaltigkeit werden im Folgenden der Begriff der nachhaltigen Entwicklung definiert sowie entsprechende Modelle zu den Dimensionen der Nachhaltigkeit, politische Zielsetzungen und wissenschaftliche Bewertungsmodelle diskutiert, bevor diese auf die Stickstoffproblematik übertragen werden.

2.1.1. Definition und Dimensionen von nachhaltiger Entwicklung

Das Konzept der Nachhaltigkeit taucht in der deutschen Sprache erstmals im frühen 18. Jahrhundert in der wissenschaftlichen Publikation „Sylvicultura oeconomica“ auf und findet damit einen Ursprung in der Forstwirtschaft. Die Folgen des Raubbaus an Wäldern, unter anderem für den Betrieb von Schmelzöfen, ließen sich bereits zu damaliger Zeit beobachten. Hans Carl von Carlowitz forderte in seiner Schrift eine „nachhaltende“ Nutzung der Wälder, in welcher nur so viel Holz geschlagen wird, wie nachwachsen kann (Carlowitz, 1713). Der Begriff

„nachhaltend“ entwickelte sich im Laufe des 18. Jahrhunderts in der deutschen Forstwirtschaft weiter zu dem heute gebräuchlichen Wort „nachhaltig“. Weitere Grundgedanken des Nachhaltigkeitsbegriffes finden ihre Wurzeln im englischen Königreich ebenfalls in der Forstwirtschaft, in dem der Baumbestand durch die Glashütten- und Eisenindustrie bedroht wurde. John Evelyn rief infolge dessen die Gesellschaft und insbesondere den Landadel auf, Bäume zu pflanzen und sah in der Wiederherstellung der Baumbestände eine nationale Aufgabe. In seinen wissenschaftlichen Ausführungen fokussierte er die Verantwortung der Generationen, für die Nachwelt vorzusorgen, sodass diese weiterhin genug Bäume für ihre Tätigkeiten zur Verfügung haben (Evelyn, 1664; Grober, 2002).

Diese historischen Grundgedanken sind im modernen Nachhaltigkeitsverständnis wiederzufinden, welches durch die erste Weltkonferenz über die menschliche Umwelt der Vereinten Nationen 1972 geprägt wird, die als Beginn der grenzüberschreitenden Umweltpolitik betrachtet wird. Unter Zustimmung von 112 Staaten wurden 26 Prinzipien für einen grenzübergreifenden Umweltschutz abgeleitet (Vereinte Nationen [UN], 1972). Das Verantwortungsbewusstsein der Generationen wird in den ersten beiden dieser Prinzipien aufgegriffen: “Man has the fundamental right to freedom, equality and adequate conditions of life, in an environment of a quality that permits a life of dignity and well-being, and he bears a solemn responsibility to protect and improve the environment for present and future generations. [...] The natural resources of the earth, including the air, water, land, flora and fauna and especially representative samples of natural ecosystems, must be safeguarded for the benefit of present and future generations through careful planning or management, as appropriate.” (UN, 1972, S. 71)

Im Anschluss folgten eine Reihe weiterer Beschlüsse, aus welchen sich die heutige Nachhaltigkeitspolitik entwickelt hat. Im Bericht „Our Common Future“ der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (kurz WCED), auch bekannt als Brundtland-Bericht, wird der Begriff der nachhaltigen Entwicklung 1987 im politischen Kontext erstmals konkret definiert.

“Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs”
(UN & World Commission on Environment and Development, 1987, Kapitel 2, Abs. 1)

Die Brundtland-Kommission begründete globale Umweltprobleme durch die Armut im Süden sowie nicht nachhaltige Produktions- und Konsummuster im Norden. Um Umweltschutz mit der Bekämpfung der Armut in Einklang zu bringen, müssten wirtschaftliche und soziale Entwicklungen in allen Ländern unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit verordnet werden, so die Kommission (UN & World Commission on Environment and Development, 1987).

Der Umweltschutz ist damit nur eine von drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung. Die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ (1998, eingesetzt vom Deutschen Bundestag) beschrieb den Begriff Nachhaltigkeit im Anschluss an den Brundtland-

Bericht durch das Drei-Säulen-Modell, welches die Ziele der Nachhaltigkeit in ökologische, ökonomische und soziale Ziele klassifiziert und damit die Interdisziplinarität des Begriffes widerspiegelt (Zusammensetzung der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“, 1998). Unter Berücksichtigung der Dreidimensionalität verfolge eine nachhaltige Entwicklung die Schaffung einer solidarischen Gesellschaft (soziale Dimension), die Erhaltung der Lebensgrundlage für Mensch und Tier (ökologische Dimension) und ein Wirtschaften, bei dem die Versorgung der Bevölkerung jetzt und in Zukunft bestmöglich sichergestellt wird (ökonomische Dimension). Die gesellschaftliche Entwicklung müsse sich, so die damalige Enquete-Kommission, darauf berufen, „Nachhaltigkeitspolitik als Gesellschaftspolitik zu interpretieren, die im Prinzip und auf lange Sicht alle genannten Dimensionen gleichberechtigt und gleichwertig behandelt“ (Zusammensetzung der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“, 1998, S. 18).

Eine mögliche Visualisierung des Drei-Säulen-Modells ist die Darstellung in parallel angeordneten Säulen, welche eine „Nachhaltige Entwicklung“ als Dach tragen (vgl. Abbildung 2 (a)). Diese Darstellung kann das Konzept der nachhaltigen Entwicklung jedoch nicht vollständig abbilden, da das Dach der nachhaltigen Entwicklung auch nach Entfernung einzelner Säulen gehalten wird und keine Wechselwirkungen zwischen den Dimensionen dargestellt werden (Kleine, 2009). Die Interaktionen zwischen der ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimension werden vollständiger durch das Schnittmengenmodell der Nachhaltigkeit beschrieben (vgl. Abbildung 2 (b)). Die Zusammenhänge zwischen den Dimensionen werden durch Überschneidungen der Kreise dargestellt, wobei sich vollständige Nachhaltigkeit im engen Sinne auf die Interaktion aller Dimensionen berufen müsse. Im erweiterten Sinne bilden die Schnittmengen zweier Dimensionen weitere Bereiche der Nachhaltigkeit ab, so zum Beispiel zu sozial-ökologischen Themen wie Gesundheit und Umweltbildung oder zu ökologisch-ökonomischen Interaktionen wie dem Ressourcenfluss zwischen Umwelt und Wirtschaft (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2000).

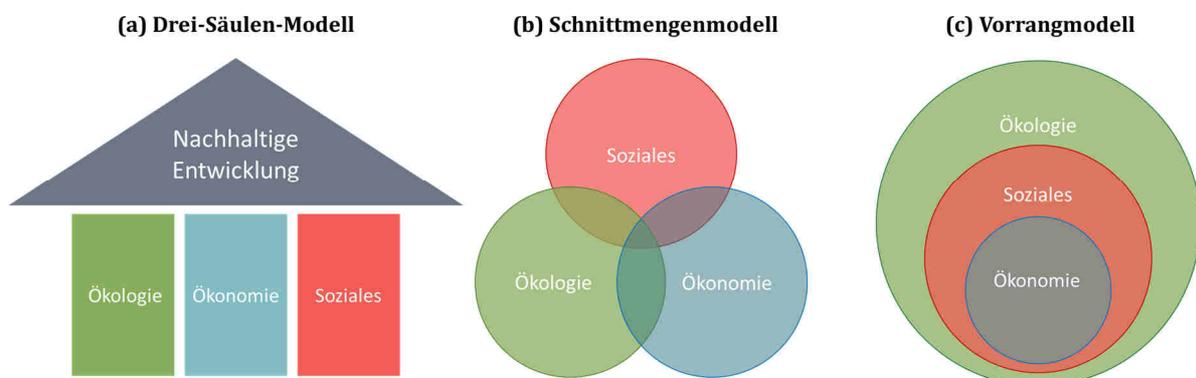


Abbildung 2: Vom Säulen- über das Schnittmengen- zum Vorrangmodell (eigene Abbildung, angelehnt an M. Müller & Niebert, 2017, S. 65).

Das dargestellte Gleichgewicht zwischen den Dimensionen führe jedoch auch zu einer Unverbindlichkeit und trage „zu einem Bedeutungsverlust von Nachhaltigkeit bei, der der Anschluss- und Kompromissfähigkeit des Modells geschuldet ist“ (Ott, 2009, S. 1). Es besteht die Gefahr, dass ökologische Zielsetzungen schnell zugunsten sozialer oder ökonomischer Zielsetzungen in den Hintergrund gelangen. Nachhaltige Entwicklung erfordert jedoch ein Wirtschaften innerhalb der ökologischen und sozialen Belastungsgrenzen (M. Müller & Niebert, 2017). Aufbauend auf dieser Verschiebung der Fokussierung leitet sich die Darstellung der drei Dimensionen in einem Vorrangmodell ab (vgl. Abbildung 2 (c)).

2.1.2. Ziele und Indikatoren einer nachhaltigen Entwicklung

Ausgehend von der Vieldimensionalität und Interdisziplinarität ergeben sich verschiedene Interessen und Zielvorstellungen für eine nachhaltige Entwicklung. Mit den Sustainable Development Goals (kurz SDGs), die 2015 von den Vereinten Nationen als Fortsetzung der Millenniumsentwicklungsziele verabschiedet wurden, wurde eine globale Zielsetzung geschaffen, mit der bis 2030 eine „nachhaltige Entwicklung in ihren drei Dimensionen – der wirtschaftlichen, der sozialen und der ökologischen – in ausgewogener und integrierter Weise“ (A/RES/70/1, 2015, Abs. 2) herbeigeführt werden soll. Die *Agenda 2030* beinhaltet einen Aktionsplan mit 17 Nachhaltigkeitszielen (vgl. Abbildung 3), konkretisiert in 169 Unterziele, die langfristig nachhaltige Strukturen schaffen und die Armut beenden sollen.



Abbildung 3: Sustainable Development Goals (Abbildung aus Vereinte Nationen, o. J.).

193 Länder haben der *Agenda 2030* zugestimmt und sich damit verpflichtet, sich für die Umsetzung der Agenda bis zum Jahr 2030 einzusetzen. Die interinstitutionelle Sachverständigen-Gruppe InterAgency and Expert Group entwickelte als Überwachungsinstrument ein Indikatorenrahmenwerk, das durch die Zusammenarbeit von Politik, internationalen Institutionen,

NGOs (Nichtregierungsorganisationen) und der amtlichen Statistik „die berechtigten und wichtigen Interessen aller relevanten und am Prozess beteiligten Stakeholder repräsentiert“ (Kaumanns et al., 2016, S. 24). Jedes der 169 Unterziele wird durch mindestens einen der Indikatoren abgedeckt, wobei der Indikatorrahmen jährlich überarbeitet und im 5-Jahresrhythmus von der statistischen Kommission umfassend überprüft wird (A/RES/71/313, 2017/E/CN.3/2022/2).

In der Gesamtheit ergibt sich eine Struktur mit 17 Grobzielen, 169 Unterzielen und 231 internationalen Indikatoren, die in Tabelle 1 an einem Beispiel dargestellt wird.

Tabelle 1: Allgemeine Zielsetzung, Konkretisierung in Unterziele und Indikatoren im Rahmen der Agenda 2030 am Beispiel des SDGs 14 (angelehnt an A/RES/71/313, 2017/E/CN.3/2022/2; A/RES/70/1, 2015).

SDG	Beispiel: Unterziel	Indikator
14. Leben unter Wasser: Ozeane, Meere und Meeresressourcen im Sinne nachhaltiger Entwicklung erhalten und nachhaltig nutzen.	14.1 Bis 2025 alle Arten der Meeresverschmutzung, insbesondere durch vom Land ausgehende Tätigkeiten und namentlich Meeresmüll und Nährstoffbelastung, verhüten und erheblich verringern.	a) Küsteneutrophierungsindex und b) Konzentration von Plastikmüll

Nach Verabschiedung der *Agenda 2030* wurden die SDGs wissenschaftlich umfassend diskutiert. Der International Science Council (kurz ICSU) hat in einem Review mit Unterstützung von über 40 Wissenschaftler:innen zusammengefasst, welche Stärken und Schwächen die *Agenda 2030* aus wissenschaftlicher Perspektive mit sich bringt (Stevance, 2015). Notwendigkeiten zur Verbesserung liegen, so der ICSU, in der Entwicklung der Unterziele, von denen 54 % mehr spezifiziert und 17 % erheblich überarbeitet werden sollten, wobei Kriterien wie die Übereinstimmung mit bestehenden Abkommen oder die Quantifizierbarkeit der Ziele herangezogen wurden. Darüber hinaus wurden die Unvereinbarkeit der SDGs in ihrer Gesamtheit, insbesondere hinsichtlich sozioökonomischer Entwicklung und ökologischer Nachhaltigkeit, und die fehlende Thematisierung von Zielkonflikten kritisiert (Stevance, 2015). Diese Kritik nahmen Spaiser et al. (2017) zum Anlass, die Inkonsistenz der SDGs zu untersuchen. Verschiedene Analysen ergaben, dass die SDG-Indikatoren aus dem Bereich „Umwelt“ erstens untereinander inkohärent sind und zweitens in Konflikt mit Indikatoren aus den Bereichen „Armut beenden“ und „Soziale Eingliederung“ stehen (Spaiser et al., 2017). Die Konsistenz der Indikatoren innerhalb der einzelnen SDGs sowie Wechselwirkungen zwischen den SDGs wurden auch von Pradhan et al. (2017) anhand der Indikatorendaten von 227 Ländern analysiert. Die Studie ergab, dass Synergieeffekte mit positiven Korrelationen innerhalb der Indikatoren der einzelnen SDGs die negativen Korrelationen, sogenannte Trade-Offs, weitestgehend überwiegen. Innerhalb einiger SDGs, darunter SDG 7 (Bezahlbare und saubere Energie), SDG 8 (Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum), SDG 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur) und SDG 15 (Leben an Land) wurde jedoch ein erhöhter Anteil an Indikatorpaaren mit negativen Korrelationen festgestellt. Zwischen unterschiedlichen SDGs wurden sowohl positive als

auch negative Wechselwirkungen beobachtet, wobei SDG 1 (Keine Armut) und SDG 3 (Gesundheit und Wohlergehen) beispielsweise überwiegend Synergien zu anderen SDGs aufweisen. SDG 12 (Nachhaltige/r Konsum und Produktion) und SDG 15 (Leben an Land) weisen hingegen vermehrt Zielkonflikte zu anderen SDGs auf, die sich mit einer nicht-nachhaltigen, auf wirtschaftliches Wachstum konzentrierten Entwicklung begründen lassen, welche zwar in einem besseren menschlichen Wohlergehen resultiert, jedoch auch in einem größeren ökologischen und materiellen Fußabdruck (Pradhan et al., 2017). Um eine globale Nachhaltigkeit zu erreichen, kann die Wissenschaft in Form dieser und weiterer Studien dazu beitragen, Synergien und Zielkonflikte zu erkennen, sodass diese als Verstärkung zur Verwirklichung der SDGs genutzt beziehungsweise erkannt und reduziert werden können. Pradhan et al. (2017) ziehen auf Grundlage des Überwiegens der positiven Korrelationen das Fazit, dass für das Erreichen der SDGs eine solide Grundlage vorhanden ist. Insbesondere in Bezug auf SDG 12 (Nachhaltige/r Konsum und Produktion) sind jedoch Zielkonflikte zu lösen, nachhaltige Transformationen anzustreben und optimalerweise neue Synergien zu schaffen.

Trotz der diskutierten Schwierigkeiten bewertet auch der ICSU die SDGs als wesentliche Verbesserung gegenüber den Millennium-Entwicklungszielen, da sie „key systemic barriers to sustainable development such as inequality, unsustainable consumption patterns, weak institutional capacity, and environmental degradation“ (Stevance, 2015, S. 5) einbeziehen. Auf Grundlage dieser Einschätzung werden die SDGs in Kapitel 2.1.5 herangezogen, um die Bedeutung der Stickstoffproblematik zur Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung darzustellen.

2.1.3. Die planetaren Leitplanken im Zeitalter des Anthropozän

In der ökologischen Dimension konkretisiert das Konzept der planetaren Leitplanken die anthropogene Belastung auf das Erdsystem und daraus resultierende Handlungsfelder, in denen bereits jetzt ein hohes Risiko gravierender Folgen besteht (Rockström et al., 2009; Steffen, Richardson et al., 2015). Hintergrund der Forschungsarbeit ist der durch den Menschen ausgeübte Druck auf unser Erdsystem, der das Zeitalter des Anthropozän prägt und die Stabilität unseres Erdsystems beeinträchtigt (Crutzen, 2002). Das Anthropozän löst das Zeitalter des Holozäns ab, in welchem sich das Erdsystem in einem relativ stabilen Zustand befand. Menschliche Aktivitäten beeinträchtigen jedoch die Widerstandsfähigkeit des Erdsystems und gefährden das Verbleiben des Erdsystems in diesem einzig bekannten Zustand, der menschliches Leben in seiner jetzigen Form ermöglicht. Der Beginn des Anthropozän als Übergang zu einer durch den Menschen geprägten Umwelt ist schwer festzulegen und wird von der industriellen Revolution in England Mitte des 18. Jahrhunderts bis zur „Great Acceleration“ Mitte des 20. Jahrhunderts diskutiert (Steffen et al., 2011). Als „Great Acceleration“ wird die Zeit nach dem zweiten Weltkrieg bezeichnet, in der die Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf die Umwelt rapide zunahmen. Seit 1950 vervielfachten sich die Weltbevölkerung und Indikatoren des menschlichen Handelns, beispielsweise die Nutzung von Primärenergie, Wasser und

Düngemitteln, rasant (vgl. Abbildung 4, links). Die Auswirkungen dieser sozioökonomischen Trends führten zu erheblichen Veränderungen der globalen Umwelt (vgl. Abbildung 4, rechts), die sich unter anderem durch einen beschleunigten Anstieg der Kohlenstoffdioxid- und Distickstoffmonoxidkonzentration in der Atmosphäre, durch den erhöhten Stickstofffluss in Küstenregionen, durch die zunehmende Versauerung der Ozeane oder durch den Verlust der Artenvielfalt quantifizieren lassen (Steffen, Broadgate et al., 2015).

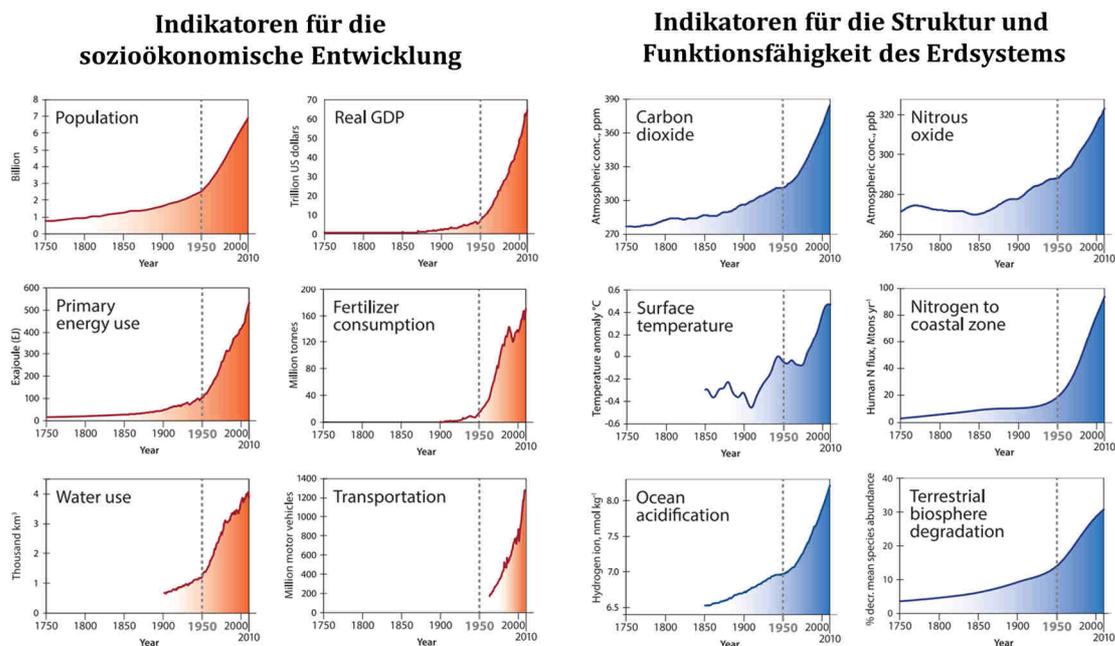


Abbildung 4: "The Great Acceleration". Links: Sozioökonomische Trends, (1) Weltbevölkerung, (2) Reales Bruttoinlandsprodukt, (3) Nutzung von Primärenergie, (4) Nutzung von Düngemitteln, (5) Wassernutzung, (6) Transportmittel. Rechts: Trends in Bezug auf das Erdsystem, (1) Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre, (2) Lachgaskonzentration in der Atmosphäre, (3) Globale Oberflächentemperatur, (4) Stickstofffluss in Küstengebiete, (5) Ozeanversauerung, (6) Prozentualer Rückgang der durchschnittlichen Artenvielfalt an Land im Vergleich zur Häufigkeit in ungestörten Ökosystemen (Ausschnitte aus Steffen, Broadgate et al., 2015, S. 84 & 87).

Während einige Umweltindikatoren zeitnah infolge der sozioökonomischen Veränderungen stark anstiegen, reagierten andere Indikatoren erst verzögert oder zeigen Anomalien auf (z. B. die Erderwärmung), was auf Puffereffekte und Zusammenhänge zwischen den Indikatoren in komplexen natürlichen Systemen zurückzuführen ist. Dennoch bestätigen die Trends der Indikatoren, dass der stabile Zustand des Holozäns verlassen und Umweltprozesse durch anthropogene Einflüsse stark destabilisiert wurden (Steffen et al., 2011). Ausgehend hiervon stellen sich die Fragen, welche Belastungsgrenzen ein stabiles Erdsystem bezüglich verschiedener Umweltprozesse sicherstellen und inwieweit die Menschheit sich aktuell innerhalb dieser Grenzen bewegt.

Mit den planetaren Leitplanken stellen Rockström et al. (2009) ein Konzept vor, welches diese Fragen aufgreift und dabei neun Umweltprozesse umfasst, welche die Funktionsweise des Erdsystems im Wesentlichen regulieren (vgl. Abbildung 5). Anhand definierter Kontrollvariablen wurden 2015 zunächst sieben Umweltprozesse bewertet (Steffen, Richardson et al., 2015). Die

Bewertung für „Neue Substanzen und modifizierte Lebensformen“ wurde 2022 ergänzt, die Bewertung für „Süßwassernutzung“ im gleichen Jahr aktualisiert (Persson et al., 2022; Wang-Erlandsson et al., 2022). In wissenschaftlichen Analysen wurden hierfür sukzessiv planetare Belastungsgrenzen abgeleitet, die Grenzen eines sicheren Handlungsraums abbilden, innerhalb derer eine Destabilisierung des Erdsystems unwahrscheinlich ist (grüner Bereich). Des Weiteren wurde ein Unsicherheitsbereich definiert, in dem das Risiko für ein Verlassen des jetzigen stabilen Zustandes zunehmend steigt (gelb bis orangener Bereich). Wird auch dieser Bereich überschritten, so besteht ein hohes Risiko gravierender Folgen für unser Erdsystem (roter Bereich).

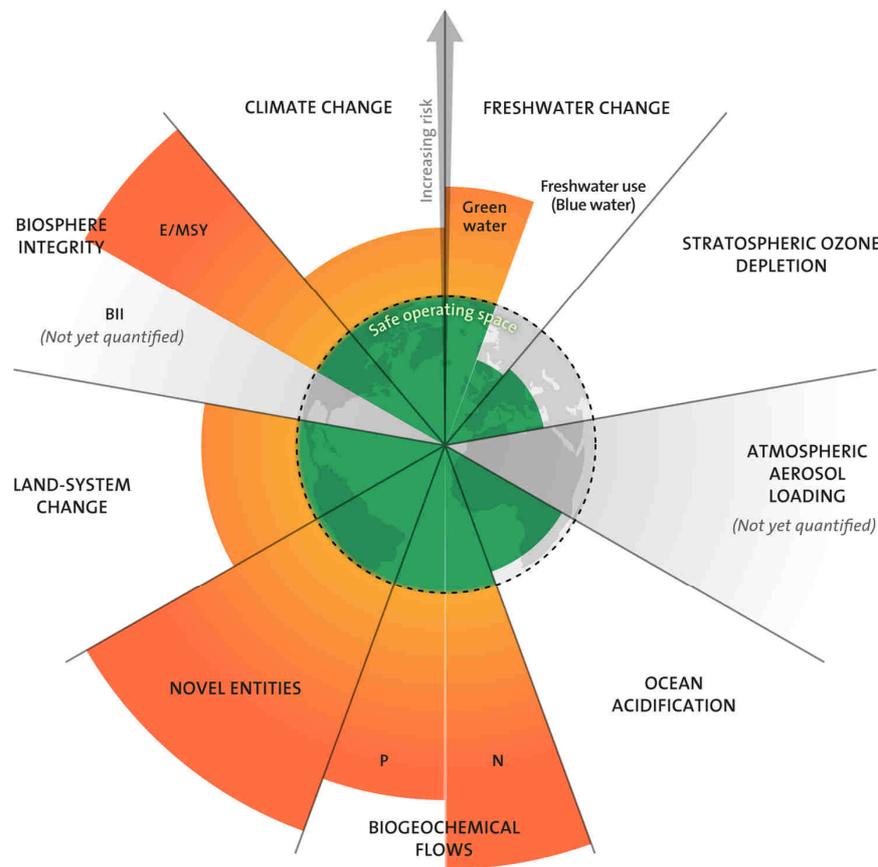


Abbildung 5: Planetare Belastungsgrenzen, Stand 2022 (Abbildung von Azote for Stockholm Resilience Centre, aufbauend auf Persson et al. 2022, Wang-Erlandsson et al., 2022 und Steffen et al., 2015).

Wie Abbildung 5 zeigt, werden aktuell sechs planetare Belastungsgrenzen überschritten, wobei hinsichtlich der genetischen Vielfalt, den biogeochemischen Stoffkreisläufen und der Einbringung neuartiger Substanzen besonders hohe Risiken einer Destabilisierung des Erdsystems vorliegen (Persson et al., 2022; Steffen, Richardson et al., 2015). Der Ozonverlust der Stratosphäre und die Ozeanversauerung werden aktuell in einem sicheren Handlungsraum eingeordnet. Die Belastbarkeitsgrenzen des Aerosolgehalts der Atmosphäre und der funktionalen Diversität sind global noch nicht definiert.

Einige Umweltprozesse weisen besonders ausgeprägte regionale Bezüge auf, so auch der biogeochemische Stickstoffkreislauf. Aufgrund der Rückkopplung regionaler Entwicklungen auf die globale Stabilität des Erdsystems kann ein sicherer Handlungsraum nur erreicht werden, wenn ergänzend zu den globalen auch regionale Belastungsgrenzen eingehalten werden (Steffen, Richardson et al., 2015). Die anthropogenen Einflüsse auf den Stickstoffkreislauf werden in Kapitel 2.1.5, 2.2.2 und 2.2.3 subglobal, national und regional diskutiert sowie die Bedeutung für die Erreichung der UN-Nachhaltigkeitsziele dargestellt.

2.1.4. Bildung für nachhaltige Entwicklung

SDG 4 der UN-Nachhaltigkeitsziele beinhaltet mit Unterziel 4.7 die Sicherstellung, „dass alle Lernenden die notwendigen Kenntnisse und Qualifikationen zur Förderung nachhaltiger Entwicklung erwerben, unter anderem durch Bildung für nachhaltige Entwicklung und nachhaltige Lebensweisen, Menschenrechte, Geschlechtergleichstellung, eine Kultur des Friedens und der Gewaltlosigkeit, Weltbürgerschaft und die Wertschätzung kultureller Vielfalt und des Beitrags der Kultur zu nachhaltiger Entwicklung“ (A/RES/70/1, 2015). Verschiedene Konzepte einer Bildung für nachhaltige Entwicklung (kurz BNE) und die aktuelle Bedeutung von BNE werden im Folgenden dargestellt.

Entsprechend der Studie „Zukunft? Jugend fragen! – 2021“ des BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz) nehmen viele Themen einer nachhaltigen Entwicklung für Jugendliche und junge Erwachsene einen hohen Stellenwert ein. Umwelt- und Klimaschutz und die soziale Gerechtigkeit werden von ihnen überwiegend als wichtig bewertet. Außerdem treten Jugendliche und junge Erwachsene der Umweltzerstörung und dem Klimawandel sehr emotional gegenüber und begegnen den ökologischen Problemen mit Trauer, Wut oder Scham. Darüber hinaus fordert die Jugend, dass BNE zukünftig in den Bereich Bildung und Arbeit eingebettet wird (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUV] & Umweltbundesamt [UBA], 2022). Bereits in der Jugendstudie 2017 wünschten sich 77 % der 14- bis 22-Jährigen Lehrveranstaltungen zu Nachhaltigkeitsthemen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit [BMU], 2018).

Schulen nehmen in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle ein, da sie als Hauptinformationsplattform von jungen Menschen genutzt werden. Das BMU empfiehlt daher, BNE-Angebote in den verpflichtenden Unterricht zu integrieren und anhand verschiedener Themen der Nachhaltigkeit die für eine nachhaltige Entwicklung notwendigen Kompetenzen zu vermitteln (BMU, 2018). Diese sind in der Bildungsforschung nicht einheitlich definiert. Rieckmann (2018a) fasst acht Schlüsselkompetenzen zusammen, die international als besonders relevant bewertet werden (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Zusammenfassung relevanter Schlüsselkompetenzen für BNE nach Rieckmann (2018a) unter Berücksichtigung von Haan et al., 2008; Haan, 2010; Rieckmann, 2018b; Wiek et al., 2011; Wiek et al., 2016.

Kompetenz	Erläuterung
Kompetenz zum vernetzten Denken	„die Fähigkeiten, Zusammenhänge zu erkennen und zu verstehen; komplexe Systeme zu analysieren; zu überlegen, wie Systeme in verschiedene Domänen und verschiedene Skalen eingebettet sind; und mit Unsicherheit umzugehen“ (Rieckmann, 2018a, S. 6)
Kompetenz zum vorausschauenden Denken	„die Fähigkeiten, multiple (mögliche, wahrscheinliche und wünschenswerte) Zukünfte zu verstehen und zu bewerten; eigene Visionen für die Zukunft zu schaffen; das Vorsorgeprinzip anzuwenden; die Konsequenzen von Handlungen zu beurteilen; und mit Risiken und Veränderungen umzugehen“ (Rieckmann, 2018a, S. 6)
Normative Kompetenz	„die Fähigkeiten, die Normen und Werte zu verstehen und zu reflektieren, die den eigenen Handlungen zugrunde liegen; und Nachhaltigkeitswerte, Prinzipien und Ziele im Kontext von Interessenkonflikten und Trade-offs, unsicheren Kenntnissen und Widersprüchen zu verhandeln“ (Rieckmann, 2018a, S. 6)
Strategische Kompetenz	„die Fähigkeiten zur kollektiven Entwicklung und Umsetzung innovativer Maßnahmen, die Nachhaltigkeit auf lokaler Ebene und darüber hinaus voranbringen“ (Rieckmann, 2018a, S. 6)
Kooperationskompetenz	„die Fähigkeiten, von anderen zu lernen; die Bedürfnisse, Perspektiven und Handlungen anderer zu verstehen und zu respektieren (Empathie), eine Beziehung zu ihnen aufzubauen und für sie empfindsam zu sein (empathische Führung); mit Konflikten in einer Gruppe umzugehen; und eine kollaborative und partizipative Problemlösung zu ermöglichen“ (Rieckmann, 2018a, S. 6)
Kompetenz zum kritischen Denken	„die Fähigkeit, Normen, Praktiken und Meinungen zu hinterfragen; die eigenen Werte, Wahrnehmungen und Handlungen zu reflektieren; und sich im Nachhaltigkeitsdiskurs zu positionieren“ (Rieckmann, 2018a, S. 6)
Selbstkompetenz	„die Fähigkeit, über die eigene Rolle in der lokalen Gemeinschaft und (globalen) Gesellschaft nachzudenken; kontinuierlich seine Handlungen zu bewerten und sich weiter zu motivieren; und sich mit den eigenen Gefühlen und Wünschen auseinanderzusetzen“ (Rieckmann, 2018a, S. 6)
Integrierte Problemlösekompetenz	„die übergreifende Fähigkeit, unterschiedliche Problemlösungsrahmen für komplexe Nachhaltigkeitsprobleme anzuwenden und passfähige, inklusive und gerechte Lösungsmöglichkeiten zu entwickeln, die eine nachhaltige Entwicklung fördern und die oben genannten Kompetenzen integrieren“ (Rieckmann, 2018a, S. 6)

Weitere BNE-Konzepte und Schwierigkeiten der vorhandenen Konzepte, die sich insbesondere auf die Operationalisierbarkeit der Kompetenzen beziehen, sind in Rieß et al. (2018) zu finden. Themen für die Bildung für eine nachhaltige Entwicklung sind ebenso vieldimensional wie der Begriff selbst und betreffen die ökologische Dimension (z. B. Globaler Wandel von Ökosystemen), die ökonomische Dimension (z. B. Wachstumskriterien wie der Human Development Index) und die soziale Dimension (z. B. Gerechtigkeitskonzeptionen) (Haan, 2002). Zur Implementierung von BNE in das Bildungssystem sind vor allem bildungspolitische Entscheidungsprozesse bedeutend. Wichtige Meilensteine zur strukturellen Verankerung werden im Paper „Nachhaltigkeit in Gesellschaft, Wissenschaft, Politik und Schule“ (Brockhage et al., 2021b, 4 f.) dargestellt und im Folgenden zusammengefasst.

In der UN-Dekade BNE, mit der die Bildung für eine nachhaltige Entwicklung gefestigt werden sollte, wurden von 2005 bis 2014 zahlreiche BNE-Projekte durchgeführt, jedoch konnte keine ganzheitliche BNE-Struktur in allen Bereichen des Bildungssystems etabliert werden (Das Deutsche Nationalkomitee für die UN-Dekade "Bildung für nachhaltige Entwicklung", 2014). Daher wurde 2015 das fünfjährige Weltaktionsprogramm BNE von der UNESCO (United

Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) ins Leben gerufen mit den Zielen, nachhaltige Entwicklung in die Bildung und Bildung in die nachhaltige Entwicklung zu integrieren (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2014). Dieses Programm wird seit 2020 durch das aktualisierte Programm „ESD (Education for Sustainable Development) for 2030“ weitergeführt, in dem die SDGs insbesondere in Bezug auf lokale Bedingungen und Probleme fokussiert werden (UNESCO, 2018).

Durch den nationalen Aktionsplan für Bildung für nachhaltige Entwicklung wird das UNESCO-Weltaktionsprogramm in Deutschland aufgegriffen mit dem Ziel, „Bildung für nachhaltige Entwicklung langfristig strukturell in der deutschen Bildungslandschaft zu verankern“ (Nationale Plattform Bildung für nachhaltige Entwicklung & Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2017, S. 8). Auf Landesebene wird dieser Aktionsplan in den Nachhaltigkeitsstrategien und von den jeweiligen Kultusministerien berücksichtigt. So soll BNE Lernende beispielsweise befähigen, „informierte Entscheidungen zu treffen und verantwortungsbewusst zum Schutz der Umwelt, für eine bestandsfähige Wirtschaft und für eine gerechte Gesellschaft zu handeln“ (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2017, S. 36).“

2.1.5. Die Stickstoffproblematik im Kontext der Nachhaltigkeit

Für eine nachhaltige Entwicklung nimmt die Stickstoffproblematik eine hohe Relevanz ein, die im Folgenden anhand der dargestellten Nachhaltigkeitstheorien mit Bezug auf die Wissenschaft, Politik, Gesellschaft und Bildung diskutiert wird.

Wissenschaftliche Relevanz: Nach dem zweiten Weltkrieg stieg die Düngemittelnutzung, begünstigt durch das Haber-Bosch-Verfahren, rapide an (vgl. Abbildung 4, S. 26). Infolgedessen haben sich die negativen Auswirkungen auf die Umwelt, so zum Beispiel der Stickstoffeintrag in Küstenregionen, stark erhöht (Steffen, Broadgate et al., 2015). Die planetaren Leitplanken (vgl. Abbildung 5, S. 27) verdeutlichen, dass sich die Menschheit in Bezug auf den Stickstoffkreislauf nicht mehr in einem sicheren Handlungsraum bewegt (Steffen, Richardson et al., 2015). Vries et al. (2013) haben zur Bewertung anhand verschiedener Umweltprobleme Kontrollvariablen und entsprechende planetare Grenzen zur Fixierung und Ausbringung von reaktivem Stickstoff abgeleitet. Basierend auf dieser Studie wurde als Kontrollvariable für die planetare Belastungsgrenze zum Stickstoffkreislauf die Ausbringung von absichtlich industriell fixiertem reaktivem Stickstoff in das landwirtschaftliche System gewählt. Ein sicherer Handlungsraum hierfür wird auf $62 \text{ bis } 82 \cdot 10^9 \text{ kg Stickstoff/Jahr}$ geschätzt, abgeleitet aus dem Umweltproblem der Eutrophierung von aquatischen Ökosystemen (Vries et al., 2013). Entsprechend wurde $62 \cdot 10^9 \text{ kg Stickstoff/Jahr}$ als planetare Belastungsgrenze sowie $62 \text{ bis } 82 \cdot 10^9 \text{ kg Stickstoff/Jahr}$ als Zone der Unsicherheit definiert. Stand 2015 wurde sowohl die Belastungsgrenze als auch die Zone der Unsicherheit mit einer Ausbringung von weltweit etwa $150 \cdot 10^9 \text{ kg Stickstoff/Jahr}$ deutlich überschritten (Steffen, Richardson et al., 2015).

Die negativen Auswirkungen auf die Umwelt (vgl. Kapitel 2.2.3) sind vorwiegend abhängig von der regionalen Austragung von Düngemitteln, weshalb im Folgenden die subglobale Verteilung der Kontrollvariable für Stickstoff betrachtet wird. Die globalen Grenzen zur Ausbringung von Stickstoff wurden hierfür bezogen auf die gesamte globale Ackerfläche auf 41 bis 55 kg ha⁻¹ Jahr⁻¹ umgerechnet (Steffen, Richardson et al., 2015, Supporting Material). Wie Abbildung 6 zeigt, sind wenige landwirtschaftlich intensiv genutzte Regionen mit hohen Stickstoffausbringungsraten hauptverantwortlich für die Überschreitung der globalen planetaren Belastungsgrenze.

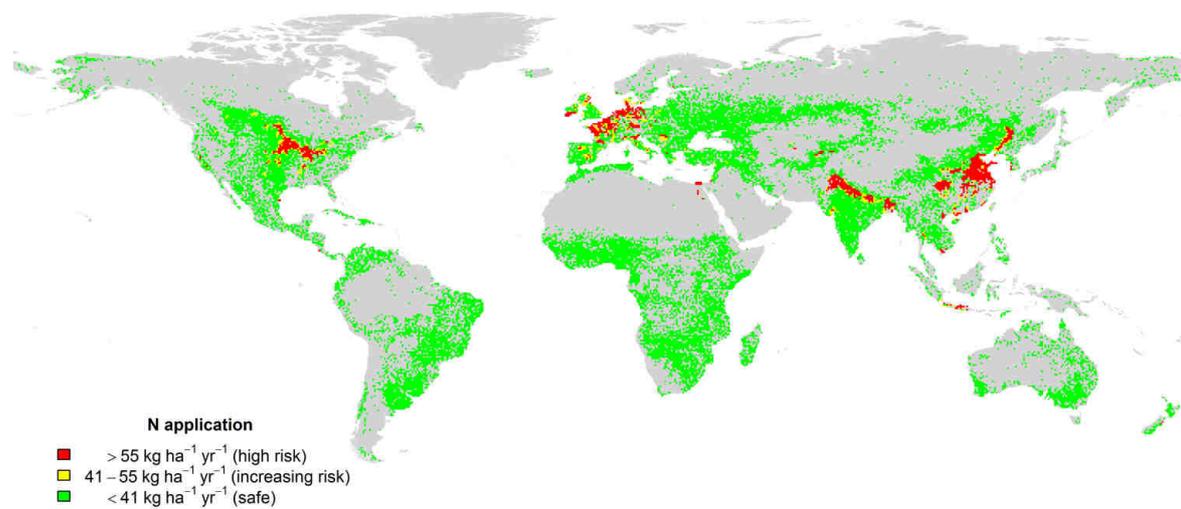


Abbildung 6: Subglobale Betrachtung der Stickstoffproblematik (Abbildung aus Steffen, Richardson et al., 2015, Supporting Material, S. 18).

Negative Auswirkungen von reaktivem Stickstoff auf die Umwelt stehen auf den ersten Blick in Konflikt mit der Notwendigkeit von Stickstoff als Düngemittel zur Sicherstellung der Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung. Ohne eine Umstellung der derzeitigen Produktions- und Konsummuster ließe sich eine ausgewogene Ernährung im Einklang mit den planetaren Leitplanken nur für 3,4 Milliarden Menschen sicherstellen (Gerten et al., 2020). Vries et al. (2013) haben zur Deckung des Nahrungsmittelgrundbedarfs für 9 Milliarden Menschen einen Stickstoffbedarf von 50 bis 80 · 10⁹ kg Stickstoff/Jahr berechnet, bedingt von der Effizienz der Stickstoffnutzung bei der Nahrungsmittelherstellung. Andere Studien ergaben abhängig von unterschiedlichen Maßnahmen ähnliche Ergebnisse, wobei eine räumliche Umverteilung der landwirtschaftlichen Flächen, eine Reduzierung der Lebensmittelverschwendung, ein verbessertes Wasser-Nährstoff-Management und eine Veränderung der Ernährung die wichtigsten Voraussetzungen sind (Bodirsky et al., 2014; Gerten et al., 2020). Der Stickstoffbedarf zur Nahrungsmittelherstellung ließe sich unter diesen Voraussetzungen mit den ökologisch abgeleiteten planetaren Leitplanken vereinen. Conijn et al. (2018) kamen hingegen durch eine Modellierung zu dem Ergebnis, dass die aktuellen planetaren Grenzen zur Fixierung von Stickstoff

trotz Umsetzung zahlreicher Maßnahmen (u. A. einer Reduzierung der Lebensmittelabfälle und einer Umstellung der Ernährung durch Verringerung des Anteils tierischer Produkte) im Jahr 2050 um den Faktor 2 überschritten werden würden. Sie kritisieren allerdings, dass nicht die Fixierung von Stickstoff, sondern der Stickstoffverlust in die Umwelt zu negativen Auswirkungen auf die Umwelt führt und empfehlen die Verwendung des Gesamt-Stickstoffverlustes als Indikator für die planetare Leitplanke zum Stickstoffkreislauf. Wird der hierfür abgeleitete Grenzwert von $85 \cdot 10^9$ kg Gesamt-Stickstoffverlust/Jahr herangezogen, ist es in einem Szenario unter Umsetzung verschiedener Maßnahmen möglich, innerhalb eines sicheren Handlungsraums zu agieren (Conijn et al., 2018).

Politische Relevanz: Ein nachhaltiges Stickstoffmanagement und eine Verringerung des Stickstoffverlustes in die Umwelt können auch zur Erreichung der SDGs beitragen. In Anhang A sind direkte und indirekte Zusammenhänge zwischen der Stickstoffproblematik und den SDGs dargestellt (Sutton et al., 2019). Die deutsche Umwelthilfe hat darüber hinaus konkretisiert, welche SDGs nur mit einer Lösung des Stickstoffproblems erreicht werden können (Frank et al., 2021). In Tabelle 3 werden fünf SDGs, in denen Stickstoff direkt in den Indikatoren für Deutschland verankert ist, und ihr jeweiliger aktueller Status zusammengefasst.

Tabelle 3: Direkte Zusammenhänge zwischen der Stickstoffproblematik und den SDGs nach Frank et al. (2021), aktueller Zustand ergänzt durch (Bundesregierung, 2021; Statistisches Bundesamt, 2022a), Abbildungen aus (Ver-einte Nationen, o. J.).

SDG	Indikator	Aktueller Zustand	Erläuterung
	2.1 a) Stickstoffüberschuss aus der Landwirtschaft	 Abstand zum Zielwert ist konstant oder vergrößert sich	Um eine nachhaltige Ernährungssicherheit in Deutschland gewährleisten zu können, soll der Stickstoffüberschuss auf 70 Kilogramm pro Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche reduziert werden.
	3.2 a) Emissionen von Luftschadstoffen	 Erreichung des Zielwertes oder Verfehlen um maximal 5 % *	Um gesundheitliche und ökosystemische Belastungen zu verringern, sollen die Emissionen von Luftschadstoffen (u. A. Stickstoffoxid, Ammoniak und Feinstaub) bis 2030 um 45 % gegenüber 2005 sinken.
	6.1 b) Nitrat im Grundwasser	 Verfehlen des Zielwertes um mehr als 20 % *	Zur Erhaltung der ökologischen Funktionen und Versorgung des Menschen durch sauberes Trinkwasser soll der Grenzwert von 50 mg/L Nitrat bis 2030 an allen Messstellen eingehalten werden.
	13.1 a) Treibhausgasemissionen	 Verfehlen des Zielwertes um mehr als 20 % *	Um die Folgen auf das Klimasystem zu verringern, sollen Emissionen der Treibhausgase (u. A. der Stickstoffverbindungen Lachgas und Stickstofftrifluorid) bis 2030 um mindestens 65 % gegenüber 1990 gesenkt werden.
	14.1 a) Stickstoffeintrag über die Zuflüsse in Nord- und Ostsee	 Verfehlen des Zielwertes um mehr als 20 % *	Aufgrund der Eutrophierungseffekte in Meeren soll der Eintrag von Stickstoff für alle in die Nordsee mündenden Flüsse unter 2,8 mg/L Stickstoff und für alle in die Ostsee mündenden Flüsse unter 2,6 mg/L Stickstoff liegen.

* Bei Fortsetzung der aktuellen Entwicklung im für den Indikator festgelegten Zieljahr

Für weitere SDGs spielt Stickstoff indirekt ebenfalls eine Rolle, so beispielsweise zur Ernährungssicherheit zur Beendigung der Armut (SDG 1) oder zur Erhaltung der Artenvielfalt durch geringere Stickstoffeinträge (SDG 15), aber auch durch eine Reduktion des Konsum-Stickstoff-Fußabdrucks zu einer nachhaltigen Produktion (SDG 12) oder durch umweltschonende Mobilität und Infrastruktur zu nachhaltigen Städten und Gemeinden (SDG 11) (Frank et al., 2021).

Gesellschaftliche Relevanz: Die Stickstoff-Problematik ist in verschiedenen Formen nicht nur in den Indikatoren der SDGs und damit im internationalen Nachhaltigkeitsdiskurs vertreten, sondern auch in Deutschland in Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft ein viel diskutiertes Thema mit entsprechend diversen Zielvorstellungen. Als Maß für die Relevanz der Thematik im gesellschaftlichen Diskurs und als Übersicht über die verschiedenen thematisierten Inhalte wird im Folgenden eine Presseübersicht, abgeleitet von der Mediendatenbank „GENIOS (beta)“ (GENIOS, 2022), dargestellt (vgl. Abbildung 7). Obgleich die Datenbank nicht alle deutschen Zeitungen umfasst, lässt sich mit dieser Übersicht darstellen, welche Bedeutung die Stickstoff-Problematik im deutschen Nachhaltigkeitsdiskurs einnimmt.

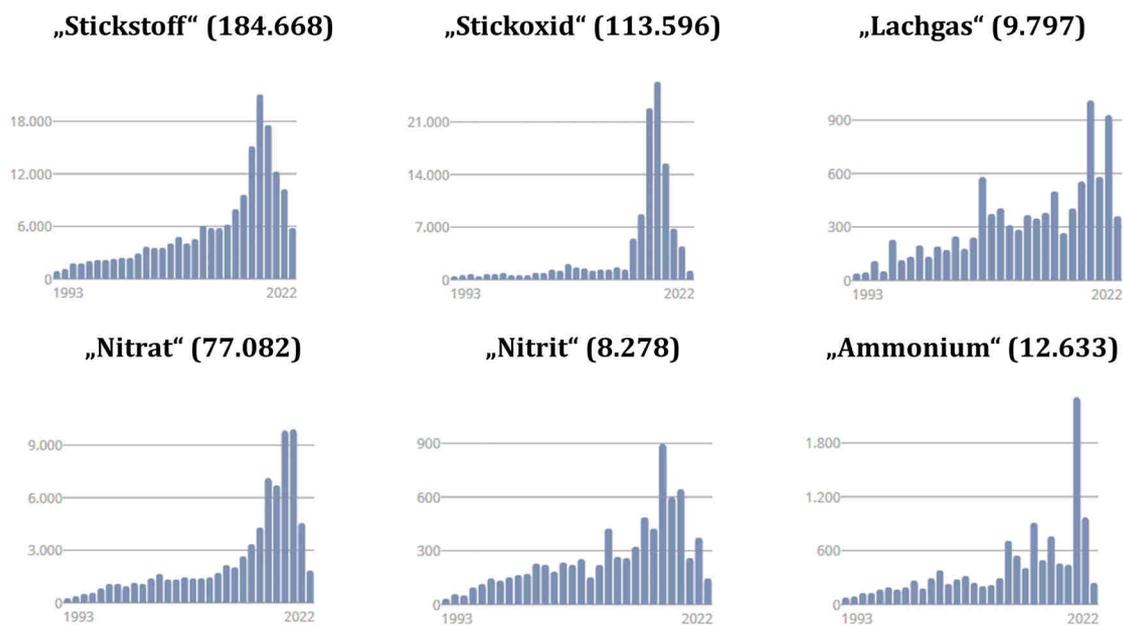


Abbildung 7: Ergebnisse der Datenbankanalyse mit „GENIOS (beta)“ (GENIOS, 2022) mit den genannten Suchworten und der Anzahl an Ergebnissen (Stand 27.06.2022) (eigene Abbildung mit Diagrammen von GENIOS, 2022).

Von 1993 bis dato (Stand 27. Juni 2022) sind 184.668 Beiträge unter dem Suchbegriff „Stickstoff“ in der Presse Deutschlands zu finden, außerdem 113.596 Pressebeiträge zum Suchbegriff „Stickoxid“, 77.082 Beiträge zum Suchbegriff „Nitrat“ sowie zahlreiche weitere Treffer zu weiteren Stickstoffverbindungen wie Nitrit, Ammonium oder Lachgas (vgl. Abbildung 7). Die Berichterstattung über verschiedene Aspekte der Stickstoffproblematik nimmt seit 1993 bis etwa 2018 stetig zu und erreicht in Abhängigkeit der jeweiligen Suchbegriffe ihren Höhepunkt in

den Jahren 2017 bis 2021. Unter dem Schlagwort „Stickstoff“ werden, so die Ergebnisse der Datenbankanalyse, verschiedene Branchen in den Pressebeiträgen thematisiert, mit dem Fokus auf Landwirtschaft (26.789¹), gefolgt von den Branchen Automobilindustrie (5.188), Gartenbauerzeugnisse (4.273), Forstwirtschaft (2.448), Abfallwirtschaft (2.403) und Alternative Energien (2.080).

Die verschiedenen Sichtweisen zur Stickstoffproblematik werden unter anderem unter dem Suchbegriff „Stickstoff“ in Kombination mit Auswahl der Branche „Landwirtschaft“ deutlich. Beiträge über die Proteste von Landwirt:innen, die vor „dem Aus für etwa 30 % [der] [...] Viehbetriebe“ („Proteste in Niederlanden: Bauern blockieren Autobahnen“, 2022) warnen, stehen Beiträgen zu den Auswirkungen von einem erhöhten Eintrag reaktiver Stickstoffverbindungen auf Pflanzen, Tiere, Luft, Böden und Wasser gegenüber (z. B. "Stickstoff bedroht Pflanzen und Tiere", Bauchmüller, 2014).

Ab 2016 stieg die Berichterstattung über die Belastung des Grundwassers durch Nitrat infolge der Nitrat-Klage der EU gegen Deutschland (z. B. "EU reicht Nitrat-Klage gegen Deutschland ein", 2016). Ursprung der Klage war die unzureichende Umsetzung der EU-Nitratrichtlinie, unter anderem aufgrund des übermäßigen Eintrags von Düngemitteln und zu kurzen Düngepausen und der daraus resultierenden Nitratbelastung in vielen Teilen Deutschlands. Bereits 2017 wurde die deutsche Düngeverordnung reformiert, jedoch waren die Verschärfungen nicht ausreichend, sodass Deutschland im Juni 2018 durch den EuGH verurteilt wurde (z. B. "Deutschland hat zu wenig gegen Nitrate im Grundwasser getan", 2018). In einer notwendigen weiteren Überarbeitung der Düngeverordnung (Inkrafttreten im Mai 2020) wurden weitere Maßnahmen abgeändert und eingeführt, so zum Beispiel weitere Aufzeichnungspflichten, verschärfte Vorgaben zur Herbstdüngung und verschärfte Sperrfristen. Seit Januar 2021 gelten darüber hinaus weitere Regelungen für nitratbelastete Gebiete, unter anderem eine um 20 % reduzierte Stickstoffdüngung unter dem berechneten Düngbedarf (DüV, 2017/10.8.2021).

Die Reaktionen auf die Düngeverordnung in der Presse sind different. Während „die einen fachliche und rechtliche Mängel kritisieren, geht der Beschluss anderen hingegen noch immer nicht weit genug“ („Änderung der Düngeverordnung. Unterschiedliche Reaktionen auf Dünge-VO“, Schröder & Agrar Europe, 2020). Sowohl innerhalb der Politik als auch zwischen Verbänden gehen die Meinungen auseinander. Bewertungen der Verordnung als zukunftsweisende Agrarpolitik stehen der Kritik fachlicher und rechtlicher Mängel der Düngeverordnung sowie der Warnung vor resultierenden Existenzgefährdungen landwirtschaftlicher Betriebe gegenüber. Der Deutsche Bauernverband kritisiert darüber hinaus, dass eine „bedarfsgerechte Düngung der Kulturpflanzen und Zwischenfrüchte [...] zukünftig nicht mehr möglich [sei]“ („Änderung

¹ Zusammengefasste Anzahl der Beiträge aus den Branchen Landwirtschaft, Agrochemikalien und Landwirtschaftsmaschinen

der Düngeverordnung. Unterschiedliche Reaktionen auf Dünge-VO", Schröder & Agrar Europe, 2020). Obgleich der Deutsche Bauernverband zum Gewässerschutz stehe, sei die Verordnung fachlich mangelhaft. Umweltverbände haben den Beschluss des Bundesrates zwar begrüßt, bewerteten die Verschärfungen aber als unzureichend. Eine Verringerung der intensiven Tierhaltung und die Begrenzung der Zahl gehaltener Tiere pro Hektar seien versäumt worden. In der kontroversen Presseübersicht spiegeln sich die verschiedenen Dimensionen einer nachhaltigen Entwicklung und entsprechende Zielvorstellungen wider: Ziele zum Umweltschutz, die insbesondere von Umweltverbänden verfolgt werden, stehen wirtschaftlichen Zielsetzungen aus der Landwirtschaft gegenüber, gerahmt durch die Diskussion der Ernährungssicherung als soziale Zielstellung.

Seit einigen Jahren nimmt die Thematisierung der Stickstoffproblematik und damit verbundener Schlagworte in den Medien wieder ab (vgl. Abbildung 7, S. 33), obgleich viele Probleme bis heute nicht gelöst wurden und weiterhin negative Auswirkungen in der Umwelt zu beobachten sind (vgl. Kapitel 2.2.2 und 2.2.3). Ein möglicher Weg, das Bewusstsein für diese Problematik aufrecht zu erhalten, ist die Implementierung in Bildungsprozesse.

Relevanz für die Bildung für nachhaltige Entwicklung: Die Stickstoffproblematik mit ihren verschiedenen Teilproblematiken ist als regionales, vieldimensionales und komplexes Problemfeld geeignet, um Gegenstand einer Bildung für nachhaltige Entwicklung zu sein. Mit verschiedenen Anknüpfungspunkten greift es die Nachhaltigkeitsziele der UN auf, die als thematische Rahmung für den Schulunterricht herangezogen, aber auch hinsichtlich verschiedener Trade-Offs und Synergien diskutiert werden können (A/RES/70/1, 2015). Die Stickstoffproblematik legitimiert sich darüber hinaus als Gegenstand einer Bildung für nachhaltige Entwicklung durch den dringenden Handlungsbedarf, welcher durch die planetaren Leitplanken deutlich wird und sich in weiteren Studien, zum Beispiel zur Sicherstellung der Ernährung unter Berücksichtigung der Belastungsgrenzen der Erde, bestätigt (Conijn et al., 2018; Gerten et al., 2020; Steffen, Richardson et al., 2015). Durch eine Versachlichung der Thematik durch Bildungsangebote kann eine objektive, faktenbasierte Bewertung der Problematik gefördert werden, welche eine kritische Betrachtung verschiedener Medieninhalte sowie eine Reflexion des eigenen Verhaltens erlaubt.

Gleichzeitig lassen sich anhand der Stickstoffproblematik zahlreiche Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung fördern (vgl. Tabelle 2, S. 29), so unter anderem Kompetenzen zum vernetzten Denken in Bezug auf verschiedene, im folgenden Kapitel dargestellte Zusammenhänge der Stickstoffproblematik, normative Kompetenzen bei der Reflexion der den eigenen Handlungen zugrunde liegenden Normen und Werte, beispielsweise in Bezug auf die eigene Ernährungsweise und diesbezüglich auch Kompetenzen zum kritischen Denken und Selbstkompetenz (Rieckmann, 2018a). Um die Auswirkungen des übermäßigen Eintrags reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt zu verstehen und Handlungsoptionen für die Zukunft abzuleiten, sind Kompetenzen zum vorausschauenden Denken notwendig. Nicht zuletzt

erfordert die Auseinandersetzung mit der Thematik eine Betrachtung verschiedener Interessensgruppen und Zielvorstellung, sodass auch strategische Kompetenzen und Kooperationskompetenzen aufgegriffen werden können. Die Entwicklung „passfähige[r], inklusive[r] und gerechte[r] Lösungsmöglichkeiten“ (Rieckmann, 2018a, S. 6) zur vieldimensionalen Stickstoffproblematik vereint sich letztendlich in der integrierten Problemlösekompetenz.

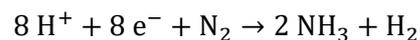
Auf Grundlage der fachlichen und didaktischen Relevanz der Stickstoffproblematik für eine (Bildung für) nachhaltige Entwicklung wurde diese als Gegenstand für die vorliegende Promotionsarbeit und das durchgeführte Citizen Science-Projektes gewählt. Im Folgenden wird die Stickstoffproblematik vertieft fachwissenschaftlich dargestellt.

Stickstoff in sogenannte reaktive Stickstoffverbindungen umgewandelt werden. Dieser Prozess wird als Stickstofffixierung bezeichnet. Auf natürlichem Weg kann Stickstoff entweder durch Bakterien reduziert oder durch atmosphärische Prozesse oxidiert werden (Jaffe, 1992; Reineke & Schlömann, 2020).

Stickstofffixierung:

1) Biologische Stickstofffixierung (vgl. Abbildung 8, S. 37, links):

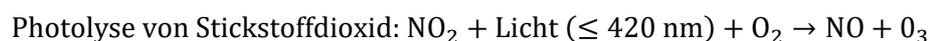
Durch N₂-bindende Bakterien wird molekularer Stickstoff aus der Atmosphäre zu Ammoniak (NH₃) bzw. Ammonium (NH₄⁺) reduziert (Ergas & Aponte-Morales, 2014).



Die Reaktion wird durch das bakterielle Enzym Nitrogenase katalysiert. Stickstofffixierende Bakterien sind sowohl freilebend als auch in Symbiose mit Leguminosen, Wasserfarnen oder verschiedenen Gräsern zu finden (Erfkamp & Müller, 1990). Sowohl in terrestrischen als auch in marinen Ökosystemen wird molekularer Stickstoff auf diese Weise zu reaktivem Stickstoff umgewandelt und kann von Pflanzen als Nährstoff genutzt werden (Fowler et al., 2013). Die vorindustrielle biologische Stickstofffixierung an Land wird von Vitousek et al. (2013) auf $58 \cdot 10^9$ kg N/Jahr geschätzt (Fehlerbereich: 40 bis $100 \cdot 10^9$ kg N/Jahr) und ist damit wesentlich geringer als die marine biologische Stickstofffixierung, welche entsprechend verschiedener Studien auf 125 bis $145 \cdot 10^9$ kg N/Jahr geschätzt wird (Canfield et al., 2010; Duce et al., 2008; Galloway et al., 2004; Gruber & Sarmiento, 1997). In Summe stellt die biologische Fixierung den größten Anteil der natürlichen Stickstofffixierung dar und spielt damit eine bedeutende Rolle als Referenz für die anthropogenen Stickstoffeinträge (Fowler et al., 2013).

2) Abiotische Stickstofffixierung (vgl. Abbildung 8, S. 37, rechts):

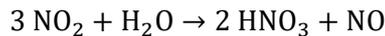
Darüber hinaus kann molekularer Stickstoff durch Blitze mit Luftsauerstoff (O) zu Stickoxiden (NO_x) oxidiert werden, sodass reaktive Stickstoffverbindungen in die Troposphäre gelangen. Zu den wichtigsten Stickoxidverbindungen gehören Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂), Distickstofftetroxid (N₂O₄) und Lachgas/Distickstoffmonoxid (N₂O), die in der Atmosphäre ineinander umgewandelt werden können, wobei unter anderem folgende Reaktionen beteiligt sind (Lammel, 1993).



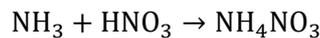
Global wird die Stickstofffixierung durch Blitze in verschiedenen Studien auf 2 bis $10 \cdot 10^9$ kg N/Jahr geschätzt (Levy et al., 1996; Schumann & Huntrieser, 2007; Tie et al., 2002). Der Anteil der abiotischen Stickstofffixierung durch Blitze an der gesamten natürlichen Stickstofffixierung beträgt damit nur etwa 1 bis 5 %. Brasseur et al. (2006) haben jedoch aus

verschiedenen Studien abgeleitet, dass die Stickstofffixierung aufgrund einer erhöhten Gewitteraktivität durch den Klimawandel bei einem Temperaturanstieg pro °K bis zu 12 % zunehmen könnte.

Deposition: Durch nasse, feuchte oder trockene Deposition werden reduzierte und oxidierte, gasförmige Stickstoffverbindungen wie Ammoniak und Stickstoffdioxid über die Ablagerung an Oberflächen, Niederschläge und Nebel in Ökosysteme eingetragen (Schaap et al., 2018, vgl. Abbildung 8, S. 23, rechts). Mit Wasser reagiert Stickstoffdioxid zu Salpetersäure und bildet in wässrigen Lösungen, zum Beispiel mit Natriumhydroxid, Nitrat und Nitrit (Kolar, 1990).



Ammoniak reagiert in der Luft, unter anderem mit Stickoxiden, zu Ammoniumsalzen, welche sich zu Aerosolen anlagern und über die Deposition ebenfalls in Gewässer und Böden gelangen (Stroh et al., 2018).

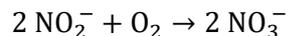


Nitrifikation: Als Ammonium oder Ammoniak fixierter Stickstoff kann durch verschiedene biologische Umwandlungsprozesse zu Nitrit und Nitrat oxidiert werden (vgl. Abbildung 8, S. 37, unten). Dabei wird Ammoniak bzw. Ammonium von Nitrosifizierern, welche anorganische Stickstoffverbindungen als Energiequelle für den Stoffwechsel nutzen, zuerst zu Nitrit-Ionen oxidiert. Im Anschluss werden Nitrit-Ionen durch Nitrifizierer zu Nitrat-Ionen oxidiert (Reineke & Schlömann, 2020).

(1) Ammoniakoxidation:



(2) Nitritoxidation:

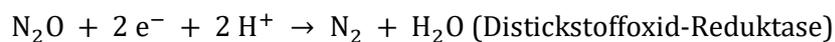
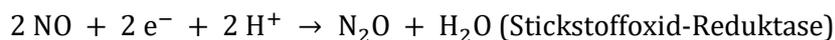
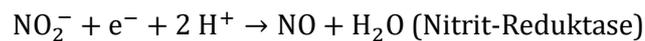
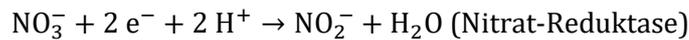


Assimilation und Ammonifikation: Ammonium und Nitrat werden von Pflanzen, Algen und Mikroorganismen aufgenommen und über mehrere enzymatische Schritte umgewandelt (vgl. Abbildung 8, S. 37, Mitte). Nitrat wird dabei zuerst assimilatorisch zu Ammonium reduziert und kann im Anschluss als organisch gebundener Stickstoff in organische Stickstoffverbindungen eingehen, während Ammonium direkt assimiliert werden kann (Reineke & Schlömann, 2020).

Über die Nahrung wird organisch gebundener Stickstoff von Tieren aufgenommen, verstoffwechselt und als Harnstoff ausgeschieden. Durch mikrobielle Prozesse wird Stickstoff wiederum aus den organischen Verbindungen aus abgestorbenem Pflanzenmaterial und tierischen Exkrementen als Ammonium freigesetzt. Ein Großteil des freigesetzten Ammoniums wird in Böden erneut von Pflanzen und Mikroorganismen verwertet oder trägt zur Humusbildung bei.

Bei alkalischen Bedingungen wird Ammonium zu Ammoniak umgewandelt und entweicht in die Atmosphäre (Ergas & Aponte-Morales, 2014; Jaffe, 1992; Reineke & Schlömann, 2020).

Denitrifikation: Reaktive Stickstoffverbindungen können unter anaeroben Bedingungen durch denitrifizierende Bakterien wieder zu molekularem Stickstoff und in geringen Mengen zu Distickstoffmonoxid (N₂O), auch Lachgas genannt, durch folgende Reaktionsschritte umgewandelt werden (Reineke & Schlömann, 2020, vgl. Abbildung 8, S. 23, rechts).



Bakterien können „auf diesem Wege organische Substrate in Abwesenheit von Luftsauerstoff vollständig abbauen, der dabei erzielte Energiegewinn entspricht annähernd dem der Atmung“ (Reineke & Schlömann, 2020, S. 315 f.).

Damit schließt sich der natürliche Stickstoffkreislauf. Die hier dargestellte Version des natürlichen Stickstoffkreislaufes umfasst die wichtigsten Stickstoffverbindungen sowie die Umwandlungsprozesse ebendieser. Weitere Informationen sind unter anderem in Ergas & Aponte-Morales (2014) oder Reineke & Schlömann (2020) zu finden.

2.2.2. Anthropogene Einträge von reaktivem Stickstoff

Da molekularer Stickstoff nicht direkt von Pflanzen genutzt werden kann, galt pflanzenverfügbarer, reaktiver Stickstoff unter naturnahen Bedingungen „als begrenzender Faktor für die Leistungsfähigkeit der Pflanzen sowohl an natürlichen Standorten als auch in landwirtschaftlichen und waldbaulichen Ökosystemen“ (Lehn et al., 1995, S. 1). Aus anthropogenen Einflüssen wie beispielsweise der Mineraldüngung oder Stickoxid-Emissionen bei Verbrennungsprozessen resultierte jedoch ein übermäßiger Eintrag reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt, sodass sich der Stickstoffmangel zu einem Überfluss mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt entwickelte. Im Folgenden werden die Hauptverursacher des Eintrags reaktiven Stickstoffs in die Umwelt sowie die Auswirkungen auf die Umwelt dargestellt.

In Deutschland werden dem Stickstoffkreislauf jährlich rund 6275 kt reaktiver Stickstoff zugeführt, ein Großteil davon durch die Ammoniak-Synthese (43 %), die Förderung und den Transport stickstoffhaltiger fossiler Energieträger (37 %), die natürliche Stickstofffixierung (5 %) und den Import von Nahrungs- und Futtermitteln (12 %). Dem entgegengesetzt steht der Entzug von reaktivem Stickstoff (4648 kt N/Jahr), beispielsweise durch die Abgasreinigung (z. B. mithilfe der selektiven katalytischen Reduktion von Stickoxiden zu molekularem Stickstoff), die Denitrifikation in Gewässern, Böden oder Kläranlagen oder den Export über die

Atmosphäre und Gewässer. Insgesamt resultiert ein Überschuss von rund 1600 kt reaktivem Stickstoff pro Jahr in Deutschland (Bach et al., 2020).

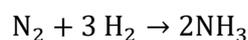
Rund 1547 kt reaktiver Stickstoff/Jahr sind auf anthropogene Einträge von gasförmigen Stickstoffverbindungen und Nitrat in Luft und Oberflächengewässer zurückzuführen, die sich wie folgt auf die vier Haupt-Emittentengruppen verteilen (Mittelwerte 2010 – 2014, vgl. Tabelle 4). Die Landwirtschaft ist mit 67 % hauptverantwortlich für die Emission reaktiven Stickstoffs, gefolgt von den Emissionen aus der Industrie und Energiewirtschaft (16 %), aus dem Verkehrsbereich (11 %) und aus Haushalten, Abwasserwirtschaft und dem Oberflächenablauf in urbanen Flächen (6 %) (Bach et al., 2020).

Tabelle 4: Mengen und Anteile der wichtigsten N-Verbindungen und Emittentengruppen an der Gesamtemission reaktiven Stickstoffs aus anthropogenen Quellen in Luft und Oberflächengewässer, Mittel 2010 – 2014 (nach Bach et al., 2020, S. 152).

Emittentengruppe	Luft			Oberflächen- gewässer	Summe kt N/Jahr	Anteil
	NO _x kt N/Jahr	NH ₃ kt N/Jahr	N ₂ O kt N/Jahr	NO ₃ ⁻ kt N/Jahr		
Landwirtschaft	36,0	558,0	65,4	381,9	1041,3	67 %
Verkehr	159,6	11,5	3,0	0,0	174,1	11 %
Industrie/Energiewirtschaft	184,2	16,6	11,7	29,9	242,4	16 %
Haushalte/Kläranlagen/urbane Flächen	0,1	2,9	2,1	84,4	89,5	6 %
Summe	379,9	589,0	82,2	496,2	1547,3	
Anteil	25 %	38 %	5 %	32 %		100 %

Stickstoffflüsse in der Landwirtschaft: In der Landwirtschaft summieren sich die Stickstoffflüsse der Bereiche Pflanzenproduktion, Tierproduktion und Energieerzeugung aus Biogas zu einem Überschuss reaktiven Stickstoffs. Ein- und ausgehende Flüsse sind unter anderem die Futtermittelherstellung, NO_x-Emissionen aus der Tierproduktion, die Deposition von Stickstoff aus der Atmosphäre auf landwirtschaftliche Flächen sowie NO_x-Emissionen aus der Biogasproduktion. 49 % der Gesamt-Stickstoffzuflüsse in die Landwirtschaft in Deutschland sind dabei auf die Mineraldüngung zurückzuführen (Bach et al., 2020). Der Zufluss von reaktivem Stickstoff überwiegt dabei dem Abfluss in andere Stickstoff-Pools und der Denitrifikation. Überschüssiger Stickstoff wird unter anderem als Nitrat in Oberflächengewässer und das Grundwasser eingetragen oder entweicht als Ammoniak in die Atmosphäre (Bach et al., 2020; Faulstich, 2015; Renger, 2002).

Exkurs: Haber-Bosch-Verfahren: Wesentlicher Treiber der landwirtschaftlichen Stickstoff-Nutzung ist das Haber-Bosch-Verfahren, mit welchem Ammoniak bei einem Druck von etwa 300 bar und einer Temperatur von etwa 450 °C katalytisch aus molekularem Luftstickstoff und Wasserstoff hergestellt wird.



Durch das Anfang des 20. Jahrhunderts von Fritz Haber und Carl Bosch entwickelte Verfahren wurde die ursprüngliche landwirtschaftliche Düngung mit Wirtschaftsdüngern wie Jauche, Gülle oder Mist durch Mineraldünger ergänzt, sodass die Ernteerträge gesteigert werden konnten, was wesentlich zur Ernährung der heutigen Weltbevölkerung beiträgt (Reineke & Schlömann, 2020). Durch dieses Verfahren werden jährlich in Deutschland 2695 kt Stickstoff zu Ammoniak synthetisiert, 47 % hiervon werden zur Herstellung von Mineraldüngern verwendet (Bach et al., 2020, S. 16). Weitere Ausführungen zum Haber-Bosch-Verfahren sind unter anderem in Birch (2016) zu finden.

Stickstoffflüsse in Verkehr, Energiewirtschaft und Industrie: Im Bereich Energiewirtschaft und Verkehr tragen vor allem die NO_x -Emissionen aus Verbrennungsprozessen zu einem Eintrag reaktiven Stickstoffs in die Umwelt bei. Stickoxide entstehen dabei sowohl aus molekularem Luftstickstoff, sodass reaktiver Stickstoff neugebildet wird, als auch aus in Energieträgern bereits enthaltenem Stickstoff, wobei reaktiver Stickstoff lediglich in andere Formen transformiert wird (Bach et al., 2020). Durch Abgasreinigungsverfahren, zum Beispiel die selektive katalytische Reduktion, werden Stickoxide aus Verbrennungsprozessen wieder zu molekularem Stickstoff reduziert, wodurch die Emissionen in diesem Bereich seit 1995 abgenommen haben (Geupel et al., 2021). Die Stickstoffflüsse der industriellen Produktion umfassen darüber hinaus N-Flüsse, „die mit der Erzeugung und stofflichen Verwendung von N-haltigen Produkten verbunden sind“ (Bach et al., 2020, S. 57). Insgesamt summieren sich die Emissionen aus den beiden Bereichen Verkehr und Industrie/Energiewirtschaft auf 416,5 kt Stickstoff/Jahr.

Stickstoffflüsse in Haushalten/Kläranlagen und urbanen Flächen: Unter diesem letzten Bereich werden Ernährung und Konsum sowie Abfallwirtschaft und Abwasserentsorgung zusammengefasst. Ersteres „umfasst den Verbrauch von Lebensmitteln und Konsumgütern, die Haltung von Heimtieren sowie die N-Flüsse, die auf die Siedlungsfläche bezogen sind“ (Bach et al., 2020, S. 75). Hierunter fällt beispielsweise auch die Verwendung von Mineraldünger in Haus- und Kleingärten. Zweiteres umfasst „die Sammlung, Behandlung und Entsorgung von festen und flüssigen Abfällen“ (Bach et al., 2020, S. 109). Stickstoffeinträge über den Ablauf von Kläranlagen und Kanalisationssystemen werden ebenso berücksichtigt wie Abfälle aus Haushalten, die zu NO_x -Emission in Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien führen. In der Summe ergibt sich eine Stickstoffemission von 89,5 kt/Jahr.

Entwicklung des Eintrags reaktiver Stickstoffverbindungen: Von 1995 bis 2014 haben sich die Stickstoffemissionen in Deutschland von 2572 kt/Jahr auf 1547 kt/Jahr verringert, was insbesondere auf einen Rückgang der Emissionen aus Abwasser und dem Verkehrsbereich zurückzuführen ist. Seit einigen Jahren stagniert dieser Rückgang jedoch, unter anderem aufgrund der steigenden biologischen Fixierung von Stickstoff in der Landwirtschaft (Geupel et al., 2021). Um die Stagnation der Gesamtstickstoffemissionen zu durchbrechen und den Eintrag reaktiven Stickstoffs soweit zu reduzieren, dass er innerhalb der ökologischen

Belastungsgrenzen liegt, sind daher insbesondere in der Landwirtschaft Minderungsmaßnahmen erforderlich (Bach et al., 2020).

2.2.3. Auswirkungen anthropogener Einflüsse auf den Stickstoffkreislauf

Der übermäßige Eintrag reaktiven Stickstoffs führt nicht nur zu negativen Auswirkungen auf verschiedene Umweltbereiche, sondern auch zu potenziellen Gesundheitsrisiken für den Menschen durch eine erhöhte Aufnahme, zum Beispiel in Form von Nitrat und Nitrit in Lebensmitteln und Trinkwasser. Einmal in die Umwelt gelangt, löst reaktiver Stickstoff durch den Transport und Umwandlungsprozesse eine Reihe unterschiedlicher Wirkungen aus, was als Stickstoff-Kaskade bezeichnet und im Folgenden konkretisiert wird (Galloway et al., 2003).

(a) Transportwege, Umwandlungsprozesse und Auswirkungen auf die Umwelt:

Luft: Über die Emissionen von Stickoxiden, Ammoniak und Lachgas aus Landwirtschaft, Feuerungsanlagen und Verkehr gelangt reaktiver Stickstoff in die Luft. Hauptquelle der Ammoniak- und Lachgasemissionen ist mit 94 % und 77 % die Landwirtschaft, während für die Stickoxidemissionen der Verkehr mit 43 % sowie stationäre Feuerungsanlagen mit 41 % in Deutschland hauptverantwortlich sind. Während die NO_x-Emissionen durch den Verkehr seit 1990 deutlich gesunken sind, ist der Trend der NH₃-Emissionen aus der Landwirtschaft nur leicht negativ (Faulstich, 2015). Die durch anthropogene Einflüsse in die Luft gelangenden gasförmigen Stickstoffverbindungen lösen in Wechselwirkung mit anderen Verbindungen eine Reihe von negativen Auswirkungen auf die Umwelt aus.

Aufgrund der Bildung von Ozon bei der Photolyse von Stickstoffdioxid (vgl. S. 38) lassen sich erhöhte Ozonkonzentrationen in der Troposphäre insbesondere in naher Umgebung von NO_x-Quellen feststellen. Durch die hohe Transportfähigkeit tragen Stickoxide auch zu erhöhten Ozonkonzentrationen in weiter entfernten Gebieten und damit zur Hintergrundbelastung bei. Als Treibhausgase verstärken Ozon und Lachgas in der Troposphäre den anthropogenen Treibhauseffekt. In der Stratosphäre verstärken Lachgasemissionen den Abbau von Ozon, sodass erhöhte Expositionen von UV-Strahlung auf die marine und terrestrische Biosphäre resultieren (Faulstich, 2015; Galloway et al., 2003; Lammel & Flessa, 1998).

Stickoxide und Ammoniak können von Pflanzen aufgenommen werden und so zunächst zur Stickstoffdüngung beitragen. In zu hohen Konzentration oder bei einem Ungleichgewicht verschiedener Nährstoffe führen Stickoxide, Ammoniak und Ozon jedoch zur Schädigung von Pflanzen, zum Beispiel durch Nekrosen (Smidt, 2008).

Als Aerosole werden Stickoxide und Ammoniak über die Luft weite Strecken transportiert, bevor sie innerhalb von Stunden bis Tagen über eine Deposition auf der Erdoberfläche abgelagert werden und so zur Belastung terrestrischer und aquatischer Ökosysteme beitragen. Gasförmiges Ammoniak deponiert überwiegend quellennah, zum Beispiel in der Nähe von Tierhaltungsanlagen. Stickoxide werden hingegen weiträumiger transportiert, sodass Depositionen zu

85 % auf mehr als 10 km entfernte Quellen zurückgeführt werden konnten (Faulstich, 2015; Kros et al., 2013).

Die Deposition reduzierter Stickstoffgase wie Ammoniak trägt insbesondere im Nordwesten Deutschlands durch die intensive Landwirtschaft mit mehr als 80 % zur Gesamt-Stickstoffdeposition bei (vgl. Abbildung 9). „Oxidierter Stickstoff trägt in nicht landwirtschaftlich genutzten Regionen einen großen Beitrag zur Stickstoff-Gesamtdeposition bei und bedingt in Regionen wie zum Beispiel dem Schwarzwald über die Hälfte der Stickstoff-Gesamtdeposition“ (Schaap et al., 2018, S. 139 f.). Insbesondere in dichtbesiedelten Industrieregionen wie dem Ruhrgebiet liegen hohe Depositionen oxidierter Stickstoffverbindungen vor (vgl. Abbildung 9), die jedoch stark rückläufig sind. Relevante Stickstoffeinträge aus dem Straßenverkehr können bis etwa 800 m vom Straßenrand entfernt auftreten, Veränderungen des Bodens und der Vegetation wurden bis zu 100 m an stärker befahrenen Straßen bzw. 200 bis 230 m an Autobahnen beobachtet (Balla et al., 2013).

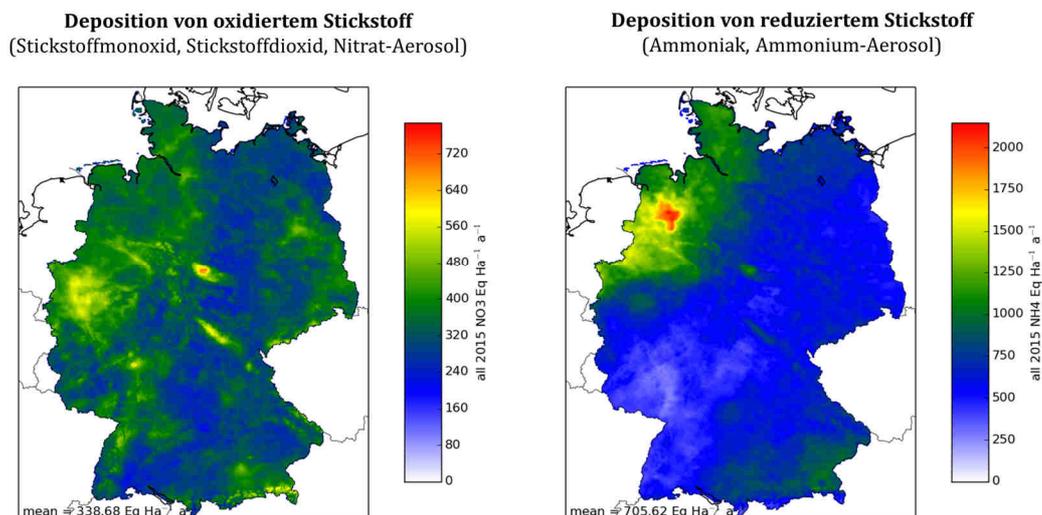


Abbildung 9: Räumliche Verteilung der Deposition von oxidiertem Stickstoff (links) und reduziertem Stickstoff (rechts) (Eq = Versauerungsequivalent: $71,4 \text{ Eq} \approx 1 \text{ kg}$ Stickstoff) (Abbildung aus Schaap et al., 2018, S. 71).

In verschiedenen Studien wurden aus der Deposition von Stickoxiden resultierende Nitratkonzentrationen in Regenwasser von unter 1 mg/L bis $10,3 \text{ mg/L}$ gemessen (Dunea et al., 2021; Lethmate, 2005; Likens & Bormann, 1974; Wagner et al., 1985). Nach Jansen (1987) gelten Nitratkonzentrationen in Regenwasser bis 2 mg/L als unbedeutend, bis 4 mg/L als schwach erhöht, bis 6 mg/L als erhöht, bis 8 mg/L als stark erhöht und darüber hinaus als sehr stark erhöht (Jansen, 1987, zitiert nach Lethmate, 2005).

Boden: Neben der Deposition sind die biologische Stickstofffixierung und die Düngung mit stickstoffhaltigen Düngemitteln die Haupteintragspfade für reaktiven Stickstoff in Böden. In landwirtschaftlich genutzten Flächen überwiegen Einträge aus der direkten Umgebung, in natürlichen oder halbnatürlichen Ökosystemen atmosphärische Einträge durch die Deposition.

In den Boden eingetragenes Ammonium führt bei einer Oxidation zu Nitrat unter Protonenfreisetzung zu einer Versauerung des Bodens, wodurch sich die Artenzusammensetzung langfristig verschiebt und die biologische Vielfalt gefährdet wird. Diese Wirkung wird verstärkt, wenn nährstoffliebende Pflanzen bei einem zu hohen Nährstoffangebot (Eutrophierung) andere Pflanzen durch Licht- und Platzmangel verdrängen (Bobbink et al., 2010; Lehn et al., 1995). Wird die Pufferkapazität des Bodens aufgebraucht und der pH-Wert zu gering, können zudem Aluminium-Ionen und Ionen giftiger Schwermetalle frei werden, die Flora und Fauna schädigen (Amelung et al., 2018).

Überschüssiger Stickstoff, der weder von Pflanzen assimiliert noch in Humus gespeichert oder vom Boden adsorbiert werden kann, wird an Nachbarsysteme wie zum Beispiel Oberflächengewässer und Grundwasser weitergegeben. „Den Böden kommt damit sowohl hinsichtlich der Versauerung als auch der Eutrophierung angrenzender Systeme die Funktion eines Puffers zu“ (Lammel & Flessa, 1998, S. 300). In Abbildung 10 werden am Beispiel eines landwirtschaftlich genutzten Bodens verschiedene Eintragswege von Stickstoffverbindungen in Grundwasser und Oberflächengewässer dargestellt.

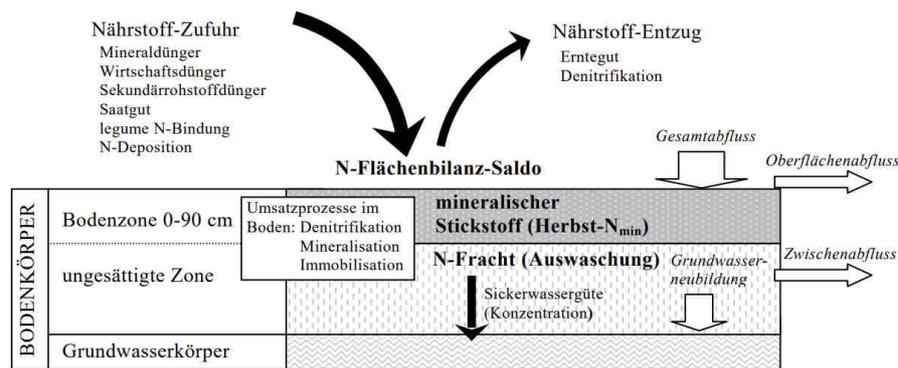


Abbildung 10: Eintragswege von Nitrat in Grundwasser und Oberflächengewässer am Beispiel eines landwirtschaftlich genutzten Bodens (Abbildung aus Osterburg & Runge, 2007, S. 31).

Der Eintrag von reaktivem Stickstoff in das Grundwasser erfolgt überwiegend über Nitrat. Ammonium ist im Boden immobil, da es entweder von Pflanzen verwertet oder an tonmineralischer Bodensubstanz adsorbiert wird (Feigenbaum et al., 1994). Durch die Oxidation zu Nitrat, das aufgrund der negativen Ladung in den meisten Böden kaum adsorbiert wird, kann Ammonium dennoch zur Auswaschung reaktiven Stickstoffs in das Grundwasser beitragen. Die Auswaschungsgeschwindigkeit von Nitrat wird beeinflusst von verschiedenen standort- und nutzungsbedingten Faktoren sowie dem Niederschlag (Faulstich, 2015). In der ungesättigten Zone beträgt die Aufenthaltsdauer von Nitrat zwischen wenigen Monaten bis zu 200 Jahren. In sandigen Böden wird Nitrat schneller in das Grundwasser ausgewaschen als in schweren, tonigen Böden, starke Niederschläge beschleunigen diesen Prozess (Renger, 2002). Sauerstoffreiche Bedingungen in sandigen Böden hemmen zudem eine Denitrifikation, sodass Nitrat ungehindert in das Grundwasser gelangt (Wriedt et al., 2019). Die Menge des Nitratintrags in

Gewässer ist damit vom sogenannten Denitrifikationspotenzial des Bodens abhängig. Böden mit oberflächennahen Grundwasserkörpern, also geringen Grundwasserflurabständen, fördern die Denitrifikation aufgrund der hohen Wassersättigung, der resultierenden geringen Durchlüftung und des Kohlenstoffangebots (Faulstich, 2015). Dabei ist die wichtigste Stickstoffumwandlungsreaktion die Reduktion von Nitrat zu molekularem Stickstoff unter anaeroben Bedingungen. Eine der reduzierenden Verbindungen ist organischer Kohlenstoff, zum Beispiel in Form von Torf. Diese reduzierenden Verbindungen sind ein begrenztes Reservoir, das durch die Denitrifikation erschöpft wird. In Sumpf- und Niederungsgebieten mit überwiegend oberflächennahem Grundwasser kann die Denitrifikation durch im Sickerwasser gelöste organische Bodensubstanzen aufrechterhalten werden (Wriedt et al., 2019). Liegen hingegen nur fossile Quellen wie Pyrit als Reduktionsmittel vor, wird das Denitrifikationspotential des Bodens durch hohe Nitrateinträge aufgezehrt, sodass ein Nitratdurchbruch in das Grundwasser resultieren kann (Geupel et al., 2009).

Je nach Bodenbeschaffenheit kann reaktiver Stickstoff nicht nur in das Grundwasser, sondern auch durch natürlichen Oberflächen- und Zwischenabfluss oder Drainagen in Oberflächengewässer und Vorfluter gelangen (vgl. Abbildung 10, S. 45). Die Gefahr eines Nitrateintrags in Oberflächengewässer ist in Hanglagen mit starker Neigung, insbesondere in feuchten Jahren, und bei Vorliegen von Bodenschichten mit einer geringen Leitfähigkeit besonders hoch. Bei Starkregen können auch Gewässerrandstreifen nur bedingt vor einem Nitrateintrag durch Erosion schützen (Kofalk, 1998). Im Winter, außerhalb der Vegetationsperiode, steigt die Gefahr der Nitratauswaschung in Oberflächengewässer und Grundwasser aufgrund der fehlenden Assimilation in der durchwurzelten Bodenzone (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz [NLWKN], 2007).

Gewässer: Die bereits dargestellten Transportwege der Auswaschung, des Ablaufes und der Deposition sind die wichtigsten Eintragspfade von reaktivem Stickstoff aus dem Boden und der Atmosphäre in Gewässer. Transportwege innerhalb der Gewässer und Auswirkungen der Stickstoffeinträge auf aquatische Ökosysteme werden im Folgenden in Anlehnung an Faulstich (2015) differenziert nach Grundwasser, Binnenoberflächengewässern und Küstengewässern zusammengefasst.

Die ökologischen Auswirkungen des Stickstoffeintrags in das artenarme Grundwasser sind bisher wenig erforscht, weshalb sich die dargestellten negativen Auswirkungen auf die Trinkwassergewinnung beschränken. Eine Belastung des Grundwassers kann jedoch indirekt über die Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktion zur Belastung der Oberflächengewässer beitragen. Durch die Exfiltration von Grundwasser in Oberflächengewässer und die Infiltration von Oberflächenwasser in Grundwasser werden Wasser und darin gelöste Nährstoffe entlang der Fließpfade zwischen verschiedenen Wasserkörpern transportiert (vgl. Abbildung 11) (Simonds & Sinclair, 2002). Sind Oberflächengewässer durch eine ungesättigte Zone vom Grundwasser getrennt, kann Oberflächenwasser in das Grundwasser versickern.



Abbildung 11: Vereinfachte Darstellung der Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser am Beispiel eines Fließgewässers (Abbildung verändert nach Simonds & Sinclair, 2002, S. 24).

52 % des Gesamtstickstoffeintrags in Oberflächengewässern in Deutschland (Stand 2016: 478,45 kt Gesamtstickstoff) sind durch die Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktion auf das Grundwasser zurückzuführen. Weitere Quellen sind Punktquellen wie kommunale Kläranlagen (17 %) oder industrielle Direkteinleiter (2 %), diffuse Quellen wie Drainagen (15 %), urbane Gebiete (Kanalisationssysteme, 5 %) und der Oberflächenabfluss (6 %). Atmosphärische Deposition auf Gewässerflächen (2 %) und Erosion (1 %) tragen jeweils nur einen kleinen Teil zum Stickstofftransport in Gewässer bei (UBA, 2020). Die Verminderung der Stickstoffeinträge um etwa 54 % seit 1978 ist dabei insbesondere auf den Rückgang der Einträge durch Punktquellen aus Industrie und kommunalen Kläranlagen zurückzuführen.

Als einer der wichtigsten Nährstoffe trägt Stickstoff neben Phosphat maßgeblich zur Eutrophierung von Gewässern bei und beeinträchtigt das Gleichgewicht zwischen Auf- und Abbau organischer Substanz. Das reiche Nährstoffangebot in eutrophen Gewässern führt zu einem verstärkten Wachstum von Wasserpflanzen (u. A. Phytoplankton). Das in Folge dessen anfallende, organische Material sinkt in tiefere Schichten und wird unter Sauerstoffverbrauch bakteriell zersetzt. Unter anaeroben Bedingungen laufen schließlich chemische Umsetzungen unter Freisetzung toxischer Gase wie beispielsweise Schwefelwasserstoff ab, die in Kombination mit dem Sauerstoffmangel zu einer Abnahme der vorkommenden Arten oder schlussendlich zum sogenannten „Umkippen“ des Gewässers führen können, was sich oftmals durch eine starke Wassertrübung und hohe Fischsterblichkeit beobachten lässt (Gleisberg et al., 1976). Für das Wachstum von Phytoplankton wird deutlich mehr Stickstoff benötigt als Phosphor. Dennoch ist aufgrund des hohen Stickstoffvorkommens und Mangels an Phosphor letzterer in Flüssen und Seen der limitierende Faktor für das Algenwachstum (Wittig & Streit, 2004).

In Seen ist die Gefahr der Eutrophierung gegenüber fließenden Gewässern insbesondere im Sommer erhöht, da der Wasseraustausch langsamer erfolgt, sodass sich Nährstoffe stärker anreichern. Sauerstoffarmes Wasser in tieferen Schichten eines Sees wird erst nach der Sommerstagnation durch eine Zirkulation mit Sauerstoff angereichert (Gleisberg et al., 1976).

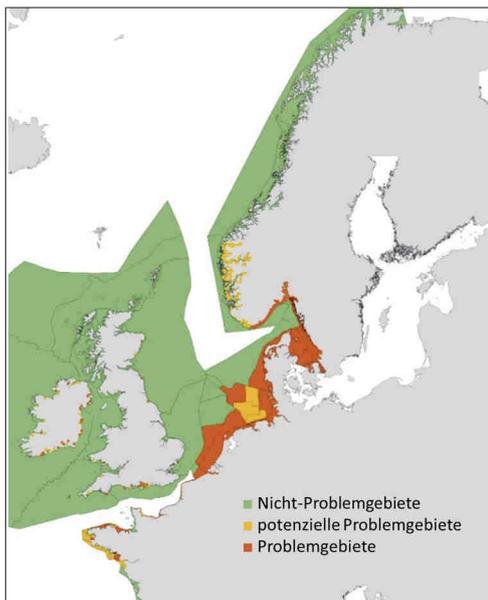
Neben einer Eutrophierung kann ein erhöhter Stickstoffeintrag auch zu einer Versauerung von Gewässern führen, die aber eher mit einer Schwefelauswaschung in Zusammenhang gebracht wird. Weitere negative Auswirkungen entstehen durch die Verbindungen Nitrit und Ammoniak, die toxisch auf aquatische Organismen, unter anderem auf Fische, wirken. Nitrit ist ein

Zwischenprodukt bei der Oxidation von Ammonium zu Nitrat und tritt normalerweise nur in geringen Konzentrationen auf. Die Ammoniakkonzentration in Gewässern steigt infolge der Versauerung bei steigendem pH-Wert (Faulstich, 2015).

Über verschiedene Transportwege gelangt reaktiver Stickstoff schlussendlich in Küstengewässer und Meeresgebiete. Die Stickstoff-Konzentrationen sind in der Nord- und Ostsee in Küstennähe und an den Mündungen der Flüsse am höchsten und nehmen zur offenen See hin ab (BMU, 2020). 26 % des Gesamtstickstoffs im Meeresgebiet AWZ (ausschließlich deutsche Wirtschaftszone) stammen aus lokalen Einträgen aus Flüssen, 14 bis 20 % aus der Atmosphäre und 59 % aus südwestlichen Küstengewässern und dem Atlantik (Brockmann et al., 2021). In Meeren kann ein Stickstoffüberschuss ebenfalls zu einer Eutrophierung führen, wobei Meere besonders sensibel reagieren, da Stickstoff hier der limitierende Faktor für das Algenwachstum beziehungsweise die Primärproduktion ist (Faulstich, 2015).

Infolge der Eutrophierung bilden sich sauerstoffarme oder -freie Zonen nahe dem Meeresgrund, sogenannte Todeszonen, in denen keine höheren Lebensformen existieren können. Direkt beobachtbare Folgen der Eutrophierung sind das Fischsterben sowie die Algenpest an Nord- und Ostseeküste. Besonders betroffen von den Todeszonen ist die Ostsee (vgl. Abbildung 12, rechts), die überwiegend von Landfläche umschlossen ist, sodass nur ein geringer Austausch mit sauerstoffreicherem Wasser aus der Nordsee stattfindet. Darüber hinaus ist die Aufnahme von Luftsauerstoff durch das Ostseewasser aufgrund der wärmeren Temperatur gehemmt. Anthropogene Nährstoffeinträge und der Klimawandel verstärken den Sauerstoffmangel (Fels, 2011).

Eutrophierungsbewertung für den Nordostatlantik (Bewertungszeitraum 2006–2014)



Todeszonen in der Ostsee (Stand Oktober/November 2021)

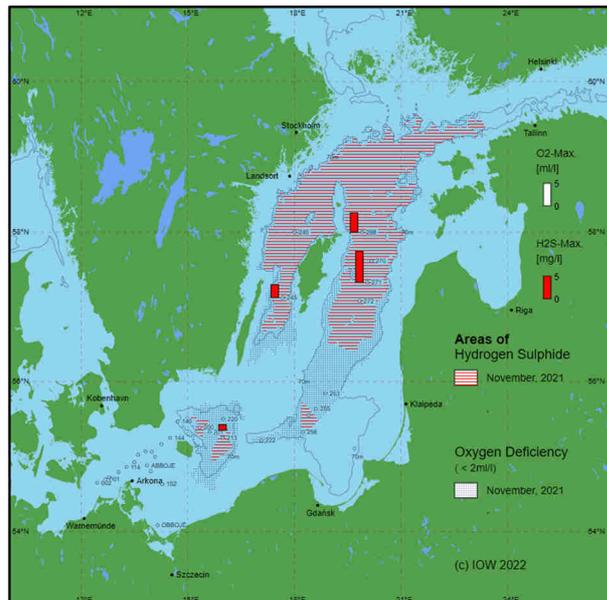


Abbildung 12: Auswirkungen des Stickstoffeintrags in die Nord- und Ostsee. Links: Eutrophierungsbewertung für den Nordostatlantik (Abbildung verändert nach UBA & BMU, 2017, mit Daten von OSPAR). Rechts: Todeszonen in der Ostsee mit Sauerstoffdefizit (grau kariert) und Schwefelwasserstoff (rot gestreift) (Abbildung aus Feistel et al., 2016, CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Durch eine Denitrifikation von Nitrat oder Ammonium-Oxidation gelangen molekularer Stickstoff und Lachgas unter anaeroben Bedingungen in die Atmosphäre und wirken dort wie bereits dargestellt. Weitere Ausführungen zur sogenannten Anammox (anaerobe Ammonium-Oxidation) sind unter anderem in Ward (2003) zu finden.

Räumliche und zeitliche Skalierung: Die genannten Stickstoffverbindungen wirken mit unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalierungen auf Umwelt und Gesundheit (vgl. Abbildung 13). Während Lachgas als Treiber des Klimawandels mittel- bis langfristige globale Auswirkungen verursacht, ist die Belastung der Grundwasserkörper als lokales bis regionales Problemfeld zu betrachten, das aufgrund des geringen Transportes innerhalb des Grundwassers nur nahräumliche Wirkungen entfaltet, die jedoch kurz-, mittel- und langfristig vorliegen. Die Belastung der Oberflächengewässer durch einen Nährstoffüberschuss ist, gekoppelt mit der Belastung der Meere durch den fernräumlichen Transport der Nährstoffe, ein räumlich stärker ausgedehntes Problemfeld, das über regionale Systemgrenzen hinaus vorliegt.

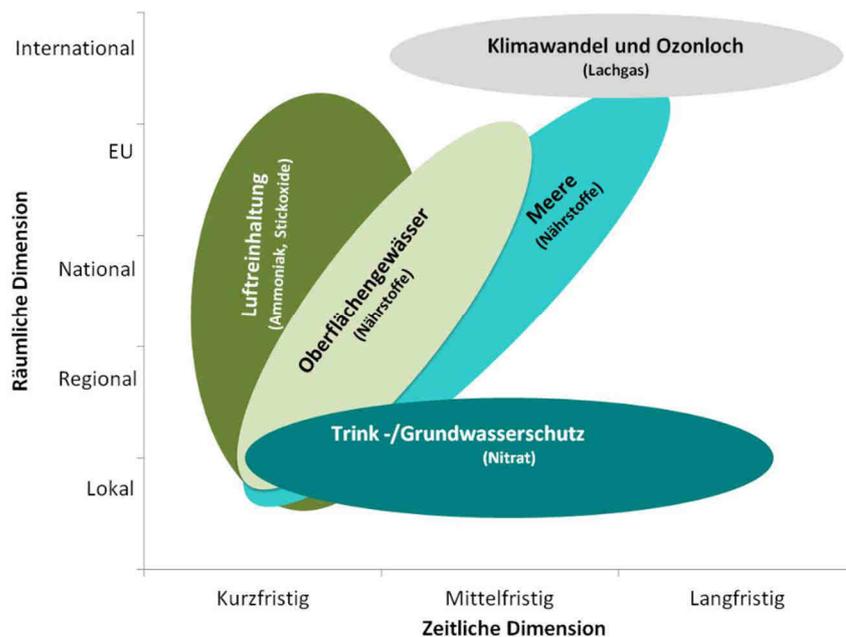


Abbildung 13: Räumliche und zeitliche Skalierung der Wirkungen verschiedener Stickstoffverbindungen im Erdsystem (Abbildung aus Faulstich, 2015, S. 53).

(b) Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Über verschiedene Pfade ist der Mensch ebenfalls einer Exposition gegenüber reaktivem Stickstoff mit entsprechenden gesundheitlichen Risiken ausgesetzt.

Gesundheitliche Auswirkungen durch Luftbelastung: Erhöhte Stickstoffdioxidkonzentrationen in der Luft wirken als starke Oxidationsmittel reizend auf das Atmungssystem und die Augen. Langfristige Expositionen können zu schwerwiegenden Auswirkungen wie Atemnot, Husten, Bronchitis oder Lungeninfekten führen (Faulstich, 2015). Darüber hinaus haben

epidemiologische Studien ergeben, dass langfristige Expositionen die Asthma-Symptome von Kindern verstärken und die Lungenfunktion verringern können. Obgleich die Auswirkungen verschiedener, oftmals gleichzeitig vorliegender Schadstoffe nur schwer voneinander unterschieden werden können, deuten einige Studien auf einen Zusammenhang zwischen einer langfristigen Stickstoffdioxid-Emission und der Sterblichkeit an Atemwegserkrankungen und an Herz-Kreislaufkrankheiten hin (European Environment Agency, 2013).

Aerosole, die sich aus verschiedenen Stickstoffverbindungen bilden können, führen bereits bei geringen Konzentrationen zu schwerwiegenden gesundheitlichen Auswirkungen. Eingeatmete und in die Lunge und den Blutkreislauf gelangende Aerosole wirken sich negativ auf Atmung, Herz-Kreislauf-, Immun- und Nervensystem aus und führen zu einer erhöhten Sterblichkeit (European Environment Agency, 2013).

Gesundheitliche Auswirkungen von Nitrat und Nitrit in Lebensmitteln und Trinkwasser:

Der Großteil des vom Menschen aufgenommenen Nitrats und Nitrits stammt aus Gemüse und Fleisch, 15 bis 20 % aus Trinkwasser (Faulstich, 2015). Insbesondere bei mit der Flasche gefütterten Säuglingen kann Trinkwasser die Hauptursache für die Aufnahme von Nitrat und Nitrit sein (World Health Organization, 2017). Abbildung 14 fasst die Umwandlungsprozesse von Nitrat und Nitrit im Körper zusammen. Nitrat wird im menschlichen Körper fast vollständig im Darm resorbiert. 60 bis 70 % hiervon werden über die Nieren ausgeschieden. 25 % des resorbierten Nitrats gelangen jedoch über den Speichel in die Mundhöhle und den Magen und werden dort zu etwa 20 % zu Nitrit reduziert. Weitere Prozesse sind die Sekretion von Nitrat mit Darmsekreten sowie die Bildung von Nitrat aus vom Organismus synthetisiertem Stickstoffmonoxid (Weiß, 2008).

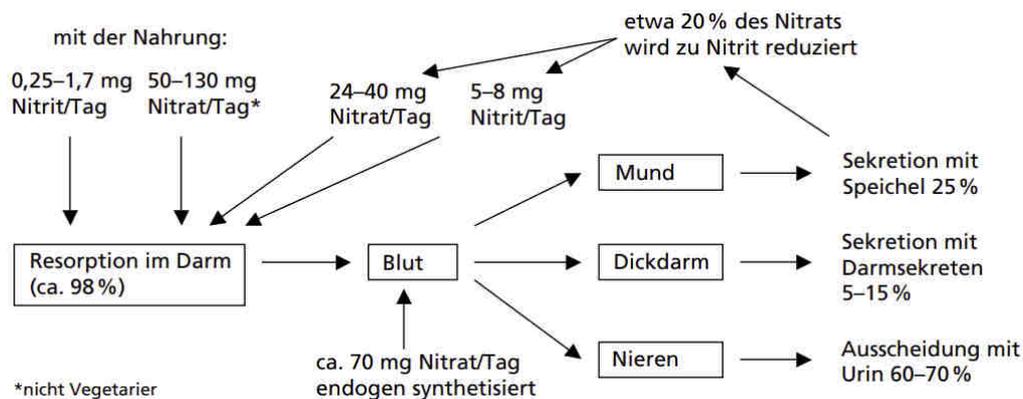


Abbildung 14: Stoffwechsel von Nitrat und Nitrit im Körper (Mengen gerundet) (Abbildung aus Schmid, 2006, S. 490).

Die Gesundheitsgefährdung von Nitrat selbst ist sehr gering, jedoch führt das im Körper zu Nitrit umgewandelte Nitrat zu negativen Auswirkungen auf die Gesundheit, unter anderem in Form einer Methämoglobinämie. Bei der Reduktion von Nitrit im Blut wird das zweiwertige

Eisen des Hämoglobins zu dreiwertigem Eisen oxidiert, wodurch Methämoglobin gebildet wird. Da Methämoglobin keinen Sauerstoff transportieren kann, kommt es bei Methämoglobinkonzentrationen von 10 % zu einem Sauerstoffmangel, Konzentrationen von über 60 % führen zum Tod. Durch das Enzym Methämoglobinreduktase wird Methämoglobin wieder zu Hämoglobin reduziert, sodass bei Erwachsenen nur hohe Nitritaufnahmen zu Vergiftungsercheinungen führen. Für Säuglinge sind bereits geringere Konzentrationen gesundheitsgefährdend, da das Enzym Methämoglobinreduktase nur schwach aktiv ist, sodass eine erhöhte Methämoglobinkonzentration nicht zurückgebildet werden kann (Schmid, 2006). Zur Vermeidung dieser Gesundheitsrisiken empfiehlt die WHO (Weltgesundheitsorganisation) ab einem Alter von 3 Monaten eine maximale tägliche Aufnahmemenge von 0,06 mg/kg für Nitrit und 3,7 mg/kg für Nitrat (World Health Organization, 2002).

Eine weitere potentielle Gesundheitsgefahr, die oftmals im Kontext mit Nitrat thematisiert wird, ist eine kanzerogene Wirkung, die auf die Bildung von N-Nitrosoverbindungen aus Nitrit zurückgeführt wird. In Langzeitstudien an Tieren haben sich diese als krebserregend erwiesen (Faulstich, 2015). In einem systematischen Review haben Picetti et al. (2022) den Zusammenhang zwischen Nitrat und Nitrit im Trinkwasser mit der menschlichen Gesundheit mit besonderem Augenmerk auf Krebs anhand von 60 Studien überprüft und einen positiven Zusammenhang zwischen der Nitratbelastung und Magenkrebs festgestellt, jedoch nicht mit anderen Krebsarten. Da zu einigen Krebsarten nur wenige Studien vorliegen und Störfaktoren wie die Nahrung oder die Kopplung von Nitrat mit anderen Schadstoffen die herangezogenen Studien beeinträchtigen, sind weitere Studien zur kanzerogenen Wirkung von Nitrat und Nitrit erforderlich (Picetti et al., 2022).

Mit Blick auf die ökologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von reaktivem Stickstoff sollte eine Reduktion der Emissionen angestrebt werden. In Deutschland sind insbesondere die Stickstoffbelastungen von Gewässern erhöht, weshalb diese im Citizen Science-Projekt fokussiert werden. Im Folgenden wird die aktuelle Belastungssituation von Gewässern in Deutschland und Niedersachsen dargestellt, wobei durch letzteres das Beprobungsgebiet des Nitrat-Monitorings abgedeckt wird.

2.2.4. Die Stickstoffbelastung von Gewässern in Deutschland und Niedersachsen

Die aktuelle Stickstoffbelastung der Gewässer in Deutschland wird unter anderem im Nitratbericht 2020 zusammengefasst, welcher sich auf verschiedene Bewertungsverfahren stützt, die im Folgenden differenziert nach Oberflächengewässern und Grundwasser dargestellt werden. In Niedersachsen ist der NLWKN für den Gewässer- und Küstenschutz zuständig und stellt entsprechende Berichte über die Belastung von Oberflächen- und Grundwasser zur Verfügung.

(a) Richtlinien und Zustand der Oberflächengewässer

Entsprechend der Oberflächengewässerverordnung gilt für oberirdische Gewässer ohne Übergangsgewässer eine Umweltqualitätsnorm von 50 mg/L Nitrat im Jahresdurchschnitt (OGewV, 2016/09.12.2020). Diese wurde entsprechend des Nitratberichts 2020 an allen untersuchten Fließgewässer- und Seemessstellen in Deutschland eingehalten (BMU, 2020). Zum Schutz der Meeresgewässer wurde für in die Nordsee mündende Flüsse eine Gesamtstickstoffkonzentration von 2,8 mg/L und für in die Ostsee mündende Flüsse von 2,6 mg/L als deutlich strengeres Bewirtschaftungsziel definiert (OGewV, 2016/09.12.2020). Aus diesen Werten wurden von der LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) regionalisierte Reduzierungsziele für Fließgewässer im Binnenland abgeleitet, die den Ländern zur Anwendung empfohlen werden (Ständiger Ausschuss „Oberirdische Gewässer und Küstengewässer“ LAWA-AO, 2017). Im Nitratbericht 2020 werden diese Grenzwerte für eine gesamtdeutsche Bewertung noch nicht berücksichtigt. In Niedersachsen wurde für die Binnengewässer der Zielwert von 2,8 mg/L übernommen und im Jahr 2019 an 75 % der Messstellen überschritten, an 12 % liegt sogar eine doppelte Überschreitung ($\geq 5,6$ mg Gesamtstickstoff/L) vor (NLWKN, 2020d). Besonders hohe Belastungen treten dabei überwiegend im Westen und Süden Niedersachsens auf (vgl. Abbildung 15).

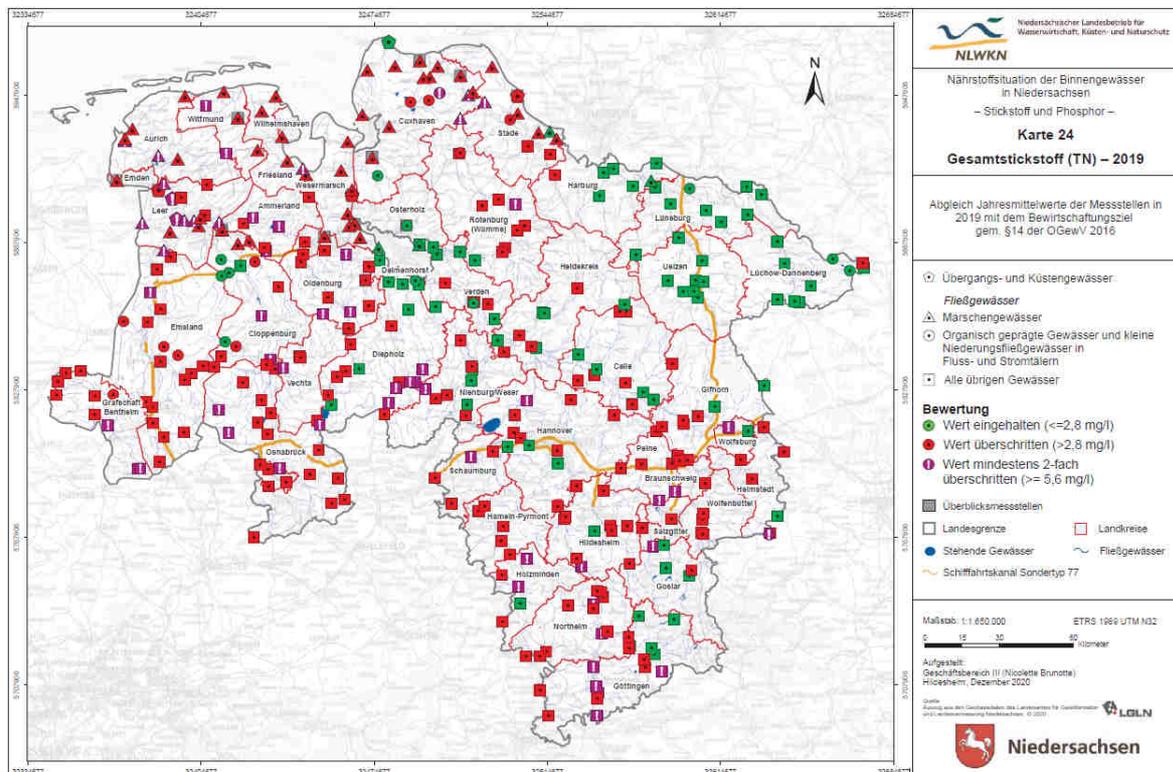


Abbildung 15: Stickstoffbelastung der Oberflächengewässer in Niedersachsen (NLWKN, 2020d, Teil II b Karte 24).

Neben der Umweltqualitätsnorm und den Bewirtschaftungszielen wird häufig die chemische Gewässergüteklassifikation der LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) zur Bewertung der Güte von Binnengewässern herangezogen (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft

Wasser [LAWA], 1998). Die Belastungen durch Nitrat, Nitrit und Ammonium werden durch eine 7-stufige Skala (vgl. Tabelle 5) über das 90. Perzentil von „anthropogen unbelastet“ bis „sehr hohe Belastung“ eingestuft, wobei die Güteklasse II „mäßige Belastung“ jeweils eine Zielvorgabe darstellt, die „sämtliche Schutzgüter (z. B. aquatische Lebensgemeinschaften) sowie allgemeine Gewässerschutzkriterien (z.B. Grundwasserschutz, Korrosionsschutz) berücksichtigt“ (LAWA, 1998, S. 24).

Tabelle 5: Chemische Güteklassifikation der Nährstoffe Nitrat, Nitrit und Ammonium in Fließgewässern, Umrechnung gerundet (LAWA, 1998, S. 26).

Güteklasse	Stoffname	Nitrat [mg/L]		Nitrit [mg/L]		Ammonium [mg/L]	
		NO ₃ ⁻ - N	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻ - N	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺ - N	NH ₄ ⁺
I:	Anthropogen unbelastet	≤ 1	≤ 4,4	≤ 0,01	≤ 0,03	≤ 0,04	≤ 0,05
I – II:	Sehr geringe Belastung	≤ 1,5	≤ 6,6	≤ 0,05	≤ 0,16	≤ 0,1	≤ 0,13
II:	Mäßige Belastung	≤ 2,5	≤ 11,1	≤ 0,1	≤ 0,33	≤ 0,3	≤ 0,39
II – III:	Deutliche Belastung	≤ 5	≤ 22,1	≤ 0,2	≤ 0,66	≤ 0,6	≤ 0,77
III:	Erhöhte Belastung	≤ 10	≤ 44,3	≤ 0,4	≤ 1,31	≤ 1,2	≤ 1,55
III – IV:	Hohe Belastung	≤ 20	≤ 88,6	≤ 0,8	≤ 2,63	≤ 2,4	≤ 3,09
IV:	Sehr hohe Belastung	> 20	> 88,6	> 0,8	> 2,63	> 2,4	> 3,09

Stöchiometrische Umrechnungsfaktoren: 1 NO₃⁻ - N ≙ 4,427 NO₃⁻, 1 NO₂⁻ - N ≙ 3,285 NO₂⁻, 1 NH₄⁺ - N ≙ 1,288 NH₄⁺

Die Zielvorgabe für Nitrat entsprechend dieser LAWA-Empfehlung wurde 2018 in Deutschland an 82 % der Fließgewässer-Messstellen aus dem LAWA-Messstellennetz nicht eingehalten. Seit 1991 zeigt sich ein abnehmender Trend der erhöhten bis sehr hohen Nitratbelastungen (Güteklasse III bis IV) entsprechend der LAWA-Empfehlung, jedoch steigt der Anteil der Messstellen mit deutlicher Belastung (Güteklasse II bis III), während der Anteil der unbelasteten, gering oder mäßig belasteten Messstellen relativ konstant bleibt (BMU, 2020).

Entsprechend der LAWA-Bewertung der Fließgewässer und der Verfehlung des Bewirtschaftungsziels von 2,8 mg/L Gesamtstickstoff sind in Deutschland und konkret in Niedersachsen weitere Minderungsstrategien umzusetzen, um Oberflächengewässer und Meere zu schützen. Die Auswirkungen des Nitratreintrags über die Flüsse auf Nord- und Ostsee wurden bereits in Abbildung 12 (S. 48) dargestellt und erläutert.

Die Belastung der Seen in Deutschland ist deutlich geringer als die der Fließgewässer, sodass 2018 knapp 92 % der Messstellen in Güteklasse I liegen. Nur 5,4 % der Messstellen weisen eine erhöhte Belastung auf, keine Messstelle überschreitet eine Konzentration von 10 mg/L NO₃⁻-N. Bei einem Großteil der Seen liegt zudem ein abnehmender Trend vor (BMU, 2020).

(b) Richtlinien und Zustand des Grundwassers

61,2 % der 5,2 Milliarden Kubikmeter Wasser, die 2016 von Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland gewonnen wurden, stammen aus Grundwasser, weshalb dieses eine besonders schützenswerte Ressource zur Versorgung der Bevölkerung darstellt. In Niedersachsen liegt

der Anteil der öffentlichen Wassergewinnung aus Grundwasser mit 85,3 % über dem bundesweiten Durchschnitt (Statistisches Bundesamt, 2019). Neben der Grundwasserverordnung (GrwV, 2010/04.05.2017) ist daher auch die Trinkwasserverordnung zur Bewertung der Grundwasserqualität in Bezug auf reaktive Stickstoffverbindungen heranzuziehen (TrinkwV, 2001/10.03.2016). In beiden Verordnungen wird ein Schwellen- bzw. Grenzwert von 50 mg/L Nitrat (gemäß der EU-Grundwasserrichtlinie), 0,5 mg/L Ammonium und 0,5 mg/L Nitrit definiert. Entsprechend der Grundwasserverordnung sind Gegenmaßnahmen einzuleiten, wenn dreiviertel der jeweiligen Schwellenwerte erreicht sind und ein steigender Trend vorliegt, für Nitrat liegt der Wert beispielsweise bei 37,5 mg/L.

Zur Erfassung der Grundwassersituation in Deutschland werden verschiedene Messnetze herangezogen. Das EUA-Messnetz ist ein für die Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland repräsentatives Messnetz mit flächenrepräsentativ verteilten Grundwasser-Messstellen in den oberen Grundwasserkörpern, bei dem die Verteilung der Landnutzung berücksichtigt wird. Im EU-Nitratmessnetz werden lediglich Messstellen mit einer Hauptnutzungsbeeinflussung durch die Landwirtschaft berücksichtigt (Acker, Grünland und Sonderkulturen) (BMU, 2020). Folgende Abbildung vergleicht die Monitoring-Ergebnisse beider Messnetze.

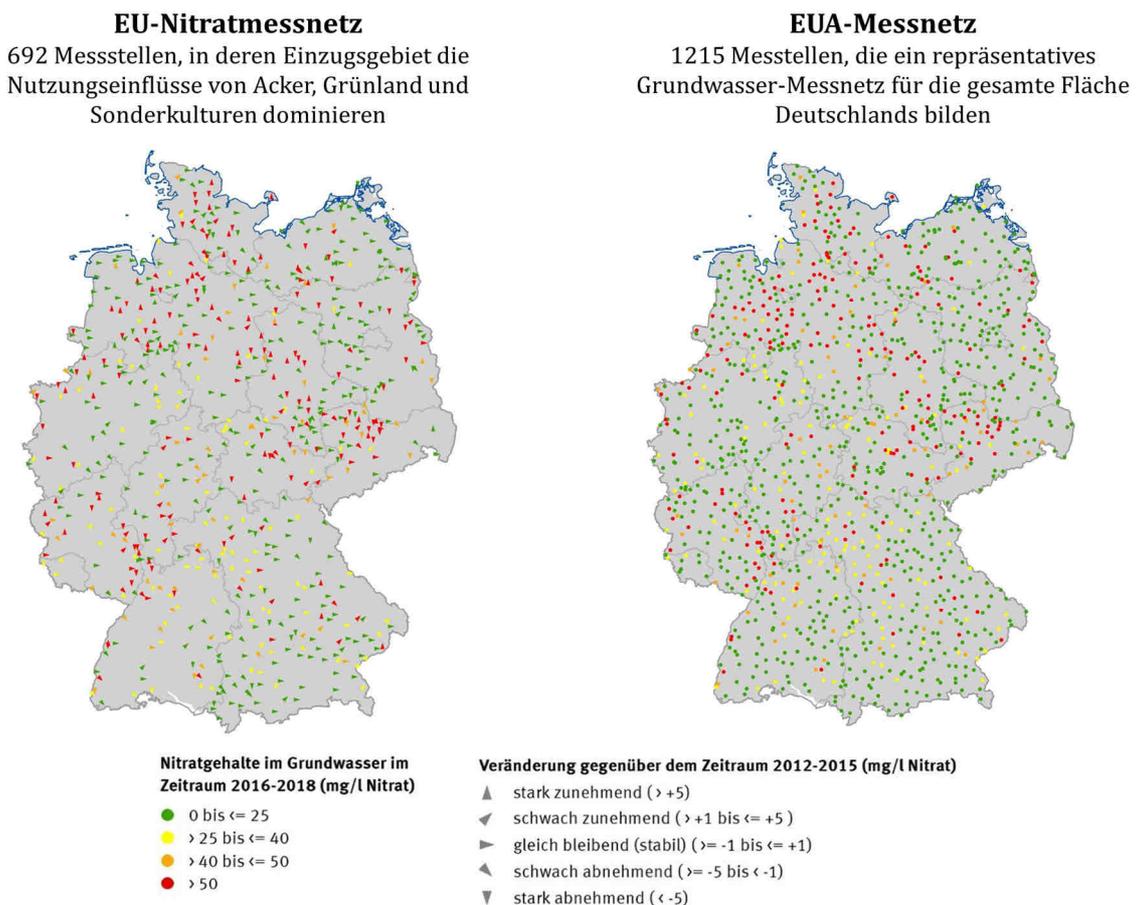


Abbildung 16: Nitratbelastung des Grundwassers in Deutschland, dargestellt anhand des EUA- und EU-Nitratmessnetzes (eigene Abbildung mit Karten aus BMU, 2020, S. 13 & 19, unter Verwendung der Geobasisdaten DLM1000, 2015, BKG, der Fachdaten der LAWA, bearbeitet durch das Umweltbundesamt, FG I 1.7, 2020).

17,3 % der insgesamt 1215 Messstellen des EUA-Messnetzes überschreiten deutschlandweit den Grenzwert von 50 mg/L Nitrat (Berichtszeitraum 2016 bis 2018). Im Vergleich dazu weisen mit 26,9 % deutlich mehr der insgesamt 692 Messstellen des EU-Nitratmessnetzes eine Nitratkonzentration über 50 mg/L auf, was den Einfluss der Landwirtschaft auf die Nitratbelastung des Grundwassers unterstreicht (BMU, 2020). Aufgrund der Nitratbelastung werden 27,1 % der insgesamt 1200 deutschen Grundwasserkörper als in einem chemisch schlechten Zustand bewertet (vgl. Anhang B, UBA, 2017). Hotspot-Regionen der belasteten Grundwasserkörper liegen im Nordwesten und Südosten Deutschlands, die unter anderem auf die hohe Konzentration der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung zurückzuführen sind (Faulstich, 2015).

In Niedersachsen wird das Grundwasser an über 1400 Messstellen hinsichtlich der reaktiven Stickstoffverbindungen Nitrat, Nitrit und Ammonium durch den NLWKN untersucht (NLWKN, 2020a, 2020b, 2020c). Folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Belastung der Grundwasser-Messstellen durch die jeweiligen Verbindungen.

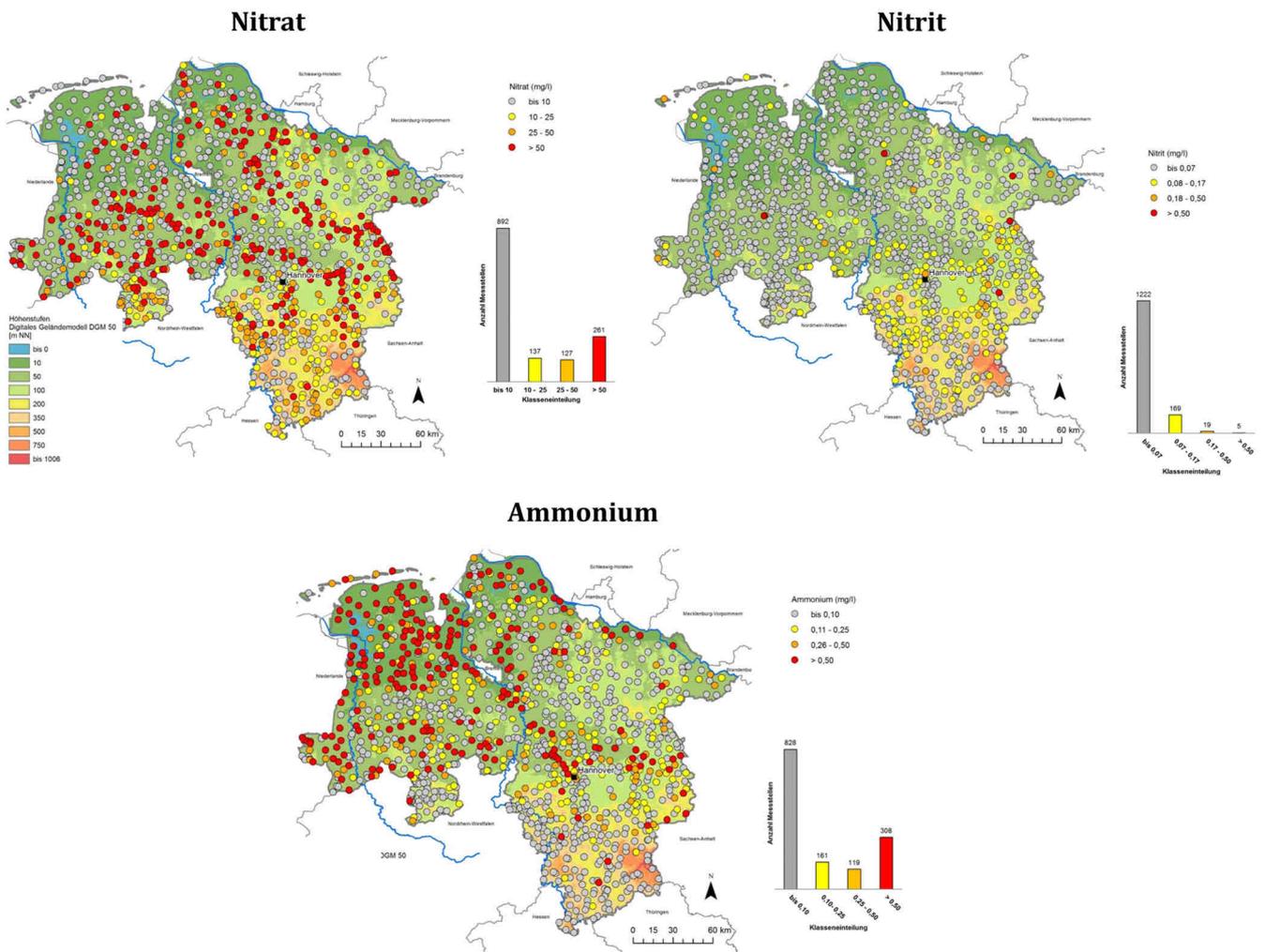


Abbildung 17: Nitrat-, Nitrit und Ammoniumbelastung des Grundwassers in Niedersachsen (Abbildungen verändert nach NLWKN, 2020a, 2020b, 2020c).

18 % aller 1417 Grundwasser-Messstellen in Niedersachsen, an denen der Parameter Nitrat untersucht wurde, überschreiten den Grenzwert von 50 mg/L Nitrat (Datenbestand 2019). Werden die Messstellen des EUA-Messnetzes in den oberen Grundwasserleitern betrachtet, so liegt der Anteil bei 29 %. Bei den Messstellen des EU-Nitratmessnetzes, die durch landwirtschaftlich geprägte Anstrombereiche gekennzeichnet sind, überschreiten 34 % den Grenzwert. Die gemessenen Nitratwerte reichen von unterhalb der Bestimmungsgrenze bis 373 mg/L. An fast 63 % aller Messstellen liegen Nitratkonzentrationen unter 10 mg/L vor, die in der Regel bei unbeeinflusstem Grundwasser auftreten (NLWKN, 2020b).

Nur 5 von 1415 Messstellen überschreiten den Schwellenwert von 0,5 mg/L Nitrit, jedoch stieg der Anteil der Messstellen mit Konzentrationen von 0,07 bis 0,17 mg/L Nitrit in den letztem Jahren stetig (NLWKN, 2020c).

Der Grenzwert für Ammonium (0,5 mg/L) wird an 22 % der niedersächsischen Messstellen überschritten, wobei erhöhte Konzentrationen überwiegend in Küstenablagerungen, Niederungen und Mooren nachgewiesen wurden, die hier unter organischen Böden natürlicherweise auftreten können (NLWKN, 2020a).

In Deutschland und insbesondere in Niedersachsen wird die Güte von Grundwasser und Oberflächengewässern damit stark durch reaktiven Stickstoff und insbesondere Nitrat beeinflusst. Die hat nicht nur die bereits dargestellten negativen Auswirkungen auf die Umwelt und auf die Gesundheit des Menschen zur Folge, sondern auch aufwändigere Maßnahmen und steigende Preise für die Wasserversorgung (vgl. Kapitel 2.2.3).

(c) Fokussierung auf die Nitratproblematik

Obgleich insgesamt eher eine Verbesserung als eine Verschlechterung der Stickstoffbelastung der Gewässer in Deutschland zu verzeichnen ist, wird in einigen Regionen weiterhin zu viel reaktiver Stickstoff in Böden und Gewässer eingetragen. Im Bewertungszeitraum 2020/2021 wurde in Niedersachsen zwar erstmals eine Stickstoff-Düngung unterhalb des berechneten Düngebedarfs erreicht, in 11 Landkreisen Niedersachsens (vgl. Abbildung 18, S. 57) liegen jedoch weiterhin Nährstoffüberschüsse vor, sodass die Qualitätsziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG, 2000/20.10.2014) nicht flächendeckend erreicht werden können (Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2022).

In den entsprechenden Landkreisen sind gleichzeitig viele Grundwasser-Messstellen mit zu hohen Nitratkonzentrationen zu verzeichnen (vgl. Abbildung 17, S. 55). Hinsichtlich der Stickstoffbelastung des Grundwassers durch anthropogene Einflüsse nimmt Nitrat daher eine bedeutende Rolle ein und wird im Citizen Science-Projekt fokussiert.

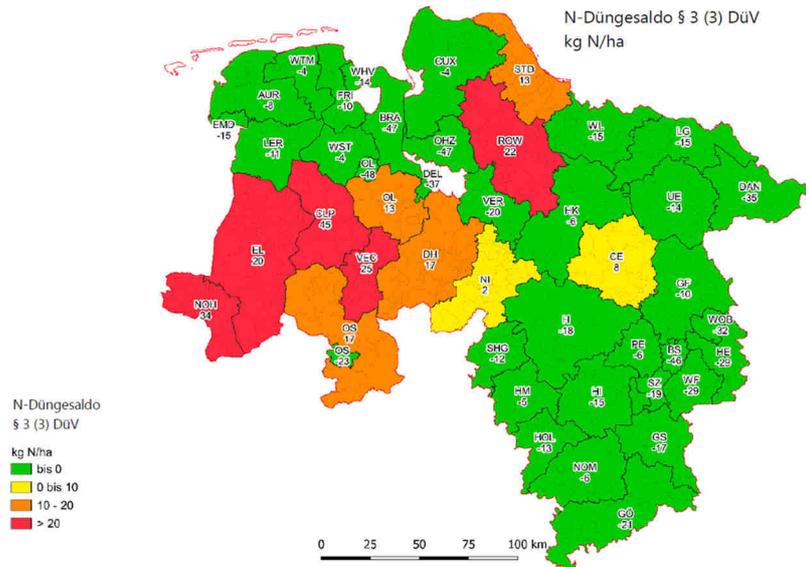


Abbildung 18: N-Düngesaldo der Landkreise und kreisfreien Städte in Niedersachsen (Abbildung geändert nach Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2022, S. 33).

Darüber hinaus trägt Nitratstickstoff im Durchschnitt zu 72 % zum Gesamtstickstoff in niedersächsischen Oberflächengewässern bei, weitere 20 % des Gesamtstickstoffs bestehen aus gelöstem organischen Stickstoff, 7 % aus Ammonium-Stickstoff und unter 1 % aus Nitrit- und Ammoniak-Stickstoff (NLWKN, 2020d). Damit ist reaktiver Stickstoff in Form von Nitrat als Hauptgrund für die Überschreitung der Bewirtschaftungsziele und Zielvorgaben in niedersächsischen Oberflächen- und Küstengewässern zu bewerten, weshalb auch für die Oberflächengewässer Nitratuntersuchungen im Fokus des Citizen Science-Projektes stehen.

2.2.5. Zeitliche und räumliche Einflüsse auf die Nitratbelastung

Die Nitratkonzentration von Gewässern wird nicht nur durch räumliche Einflüsse, zum Beispiel die Flächennutzung, beeinflusst, sondern weist auch zeitliche Schwankungen auf. Im Folgenden werden verschiedene Einflüsse auf die Nitratbelastung der Gewässer in Niedersachsen dargestellt, die im Rahmen des Citizen Science-Projektes untersucht werden sollen. Im Paper „Citizen Science as an Innovative Approach to Analyze Spatial and Temporal Influences on Nitrate Pollution of Water Bodies: Results of a Participatory Research Project in Germany“ (Brockhage, Lüsse, Klasmeier et al., 2022) wurden diese Einflüsse bereits zusammengefasst, die folgenden Ausführungen stellen eine ergänzte Darstellung hiervon dar.

(a) Räumliche Einflüsse:

Einfluss der Flächennutzung: Wie in Kapitel 2.2.2 dargestellt, werden 67 % der Gesamtemissionen reaktiver Stickstoffverbindungen in Deutschland durch die Landwirtschaft verursacht, gefolgt von Emissionen aus der Industrie (16 %), dem Verkehr (11 %) und der Abwasserwirtschaft (6 %) (Bach et al., 2020). Diese wirken sich wie folgt auf die Nitratbelastung verschiedener Gewässertypen aus.

Oberflächengewässer: Über die genannten Quellen gelangt Nitrat diffus oder punktuell in Oberflächengewässer und wird entlang der Fließrichtung transportiert, sodass erhöhte Konzentrationen nicht zwangsläufig auf die direkte Umgebung der Messstelle zurückgeführt werden können (vgl. Abbildung 19). Anhand punktuell gemessener Nitratkonzentrationen sind Aussagen zur Herkunft beziehungsweise zu Eintragspfaden von Nitrat in das Gewässer daher nicht ohne weiteres möglich.

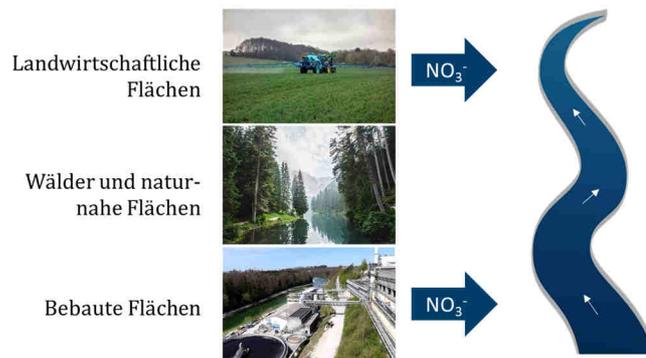


Abbildung 19: Transport von anthropogenem eingetragenem Nitrat in Gewässern (eigene Abbildung).

In Niedersachsen wurden Eintragspfade von Nitrat in Oberflächengewässer durch eine landesweite Nährstoffmodellierung (LNM) berechnet (NLWKN, 2020d). Zur Modellierung wurden Klimadaten (z. B. Jahres-, Winter- und Sommerniederschläge) sowie veränderliche und unveränderliche Standortfaktoren (z. B. hydrologische Karten, Kanalisationen und kommunale Kläranlagen, landwirtschaftliche Strukturen oder relevante Wasserentnahmen) als Eingangsdaten herangezogen. Hieraus wurden als Emission die in das Gewässer eingetragenen Nährstoffmengen, als Retention die Verringerung ebendieser durch natürliche Umsetzungsprozesse sowie als Immission die daraus resultierende im Gewässer verbleibende Menge modelliert. Landesweit sind entsprechend dieser Modellierung rund 70 % der in oberirdische Gewässer eingetragenen Gesamtstickstoffemissionen auf die Eintragspfade „landwirtschaftliche Dräne“ und „Zwischenabfluss“ zurückzuführen sowie 7 % auf „urbane Quellen“ (Einträge aus Siedlungsgebieten) und „punktuelle Einleitungen“.

Grundwasser: Die Nitratbelastung des Grundwassers wird ebenfalls durch die Landnutzung im Zustromgebiet der jeweiligen Messstelle beeinflusst (Cremer, 2015). So ist beispielsweise die Nitratbelastung der landwirtschaftlich beeinflussten Grundwasser-Messstellen des EU-Nitratmessnetzes in Deutschland und Niedersachsen höher als die Gesamtsituation des Grundwassers entsprechend des EUA-Messnetzes (BMU, 2020; NLWKN, 2020b).

Die Zuordnung einer Grundwasser-Messstelle zu einer Flächennutzungsklasse erfolgt dabei nicht oberirdisch, sondern wird entsprechend der unterirdischen Fließkomponenten des Grundwassers und aus dem daraus ermittelten Zustromgebiet abgeleitet (NLWKN, 2017a). Folgende Abbildung verdeutlicht anhand eines Beispiels die Verzerrung, die bei einer rein oberirdischen Zuordnung einer Grundwasser-Messstelle ohne Berücksichtigung der

Filterposition, des Flurabstandes, der Grundwasserströmungsrichtung und der Strömungsmechanik auftreten würde. Obgleich die abgebildete Messstelle unterhalb eines Waldes liegt, wird durch die Messung einer Gewässerprobe aus der entsprechenden Filtertiefe der Einfluss der Landwirtschaft abgebildet (Cremer, 2015).

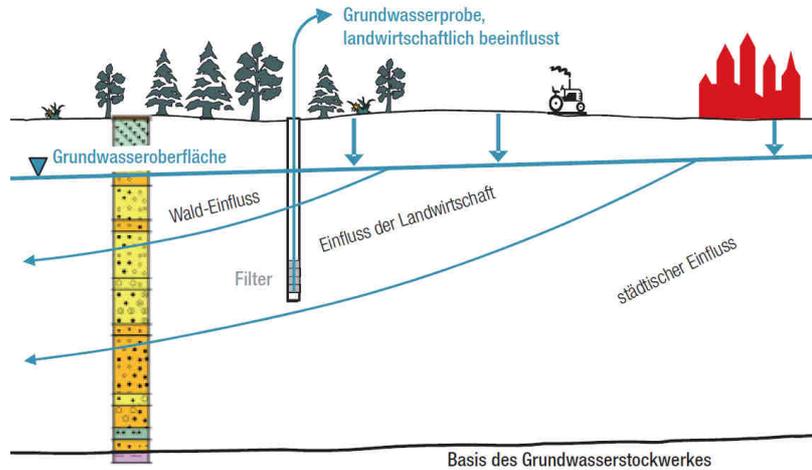


Abbildung 20: Einfluss der Flächennutzung im Zustromgebiet einer Grundwasser-Messstelle auf die Nitratbelastung (Abbildung aus Cremer, 2015, S. 32).

Regenwasser: Die Deposition von oxidierten Stickstoffverbindungen führt zu erhöhten Nitratkonzentrationen im Regenwasser. Damit ist vor allem dort mit erhöhten Nitratkonzentrationen im Regenwasser zu rechnen, wo auch erhöhte Stickstoffdioxidkonzentrationen vorliegen, wie auch Abbildung 9 (S. 44) zeigt. In Deutschland wurden 2020 im städtisch verkehrsnahen Bereich die höchsten Stickstoffdioxidkonzentrationen von $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen, gefolgt von Messstellen mit ausschließlich städtischem Hintergrund ($16 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und zuletzt ländlichem Hintergrund ($7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Kessinger et al., 2021).

Einfluss hydrogeologischer Bedingungen: Die Nitratbelastung des Grundwassers wird nicht nur durch die Flächennutzung im Zustromgebiet beeinflusst, sondern auch durch hydrogeologische Bedingungen, die sich auf die Schnelligkeit der Nitratauswaschung, die Assimilation durch Pflanzen und das Denitrifikationsvermögen auswirken. In Kapitel 2.2.3 wurden diese Einflüsse bereits diskutiert, sodass im Folgenden ausschließlich eine Übertragung auf Niedersachsen erfolgt.

Sandige Böden, durch welche Nitrat schnell ausgewaschen werden kann, liegen in Niedersachsen überwiegend in Geestgebieten vor (vgl. Abbildung 21, S. 60). Durch die geringe Aufenthaltsdauer von Nitrat in der durchwurzelten Zone ist die Gefahr des Eintrags in Grundwasser erhöht, da zugeführtes Nitrat gegebenenfalls nicht vollständig durch Pflanzen aufgenommen wird (Renger, 2002). Darüber hinaus fehlt aufgrund großer Flurabstände des Grundwassers in den höher gelegenen Geestlandschaften der Kontakt zwischen Grundwasser und Boden, sodass das Denitrifikationspotenzial nicht aufrechterhalten werden kann. Zudem fördern sandige Böden die Durchlüftung, wodurch sich eine ausgeprägte nitrathaltige, aerobe

Oxidationszone in vielen Grundwasserkörpern im Geestgebiet ausgebildet. In tieferen Bereichen können diese in eine Denitrifikationszone mit variablen Nitratgehalten und in eine nitratfreie Desulfurifikationszone übergehen, in welcher Nitrat vollständig aufgezehrt ist (Wriedt et al., 2019).

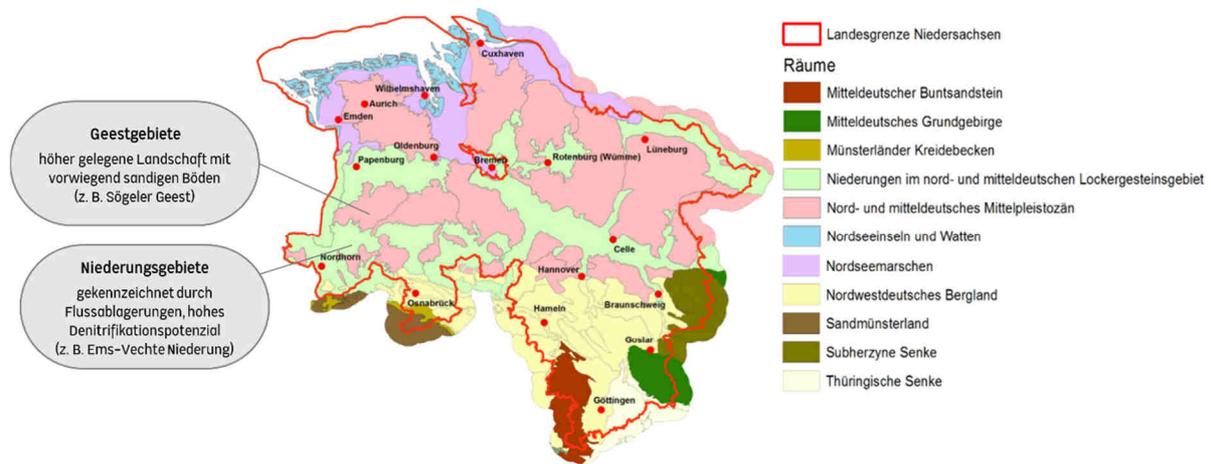


Abbildung 21: Hydrogeologische Raumlagerung von Niedersachsen (Abbildung verändert nach Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [LBEG], 2010, S. 7).

Die Oxidationszone fehlt überwiegend in den Marsch- und Niederungsgebieten Niedersachsens, in denen das Grundwasser geringe Flurabstände und damit Überschneidungen mit dem Boden aufweist (vgl. Abbildung 21). Dadurch sind bereits knapp unterhalb der Grundwasseroberfläche sauerstoff- und nitratfreie Zonen zu finden (Wriedt et al., 2019). In Niedersachsen sind die Messstellen in Niederungsgebieten, Mooren und Marschen aufgrund der Denitrifikation weitestgehend nitratfrei (NLWKN, 2020b).

(b) Jahreszeitliche Einflüsse:

Oberflächengewässer: In Oberflächengewässern wurden bereits in anderen Studien jahreszeitliche Schwankungen in Flüssen, die in die Nordsee fließen, beobachtet (z. B. Johannsen et al., 2008; NLWKN, 2007). In der Ems wurden beispielsweise innerhalb eines Jahres (März 2006 bis März 2007) Nitratkonzentrationen von unter 5 mg/L im August bis über 40 mg/L im Januar gemessen (Johannsen et al., 2008). Die abnehmenden Nitratkonzentrationen im Sommer sind zurückzuführen auf "bakterielle oder phytoplanktonische Nitratassimilation, die in den Flüssen während der biologisch aktiven Jahreszeiten, die mit geringeren Abflüssen zusammenfallen, der wichtigste Nitratabbauvorgang ist" (Johannsen et al., 2008, S. 1687, Übersetzung der Autorin). Im Winter hingegen steigt die Nitratkonzentration infolge der fehlenden Assimilation an. Da die Oxidation von Ammonium zu Nitrat bei Temperaturen unter 12 °C verlangsamt ist, werden die höchsten Nitratbelastungen in warmen Wintern erwartet (NLWKN, 2007).

Grundwasser: In der Regel dauert es abhängig von verschiedenen Umweltfaktoren Monate bis Jahre, bis Nitrat von der Erdoberfläche ins Grundwasser sickert. Jahreszeitliche Einfluss-

faktoren, die auf die Nitratkonzentrationen in oberen Bodenzonen wirken und dort und in flachen Grundwasserkörpern gut zu beobachten sind, liegen daher nicht zwangsläufig in darunter liegenden, tieferen Grundwasserkörpern vor (Bechtel, 2008; Renger, 2002). Dies gilt auch für saisonale Unterschiede in der Stickstoffdüngung oder politisch erwirkte Reduktionsmaßnahmen, die erst mit zeitlichem Abstand im Grundwasser beobachtet werden können. Allerdings werden Grundwasserkörper selbst ebenfalls jahreszeitlich beeinflusst, zum Beispiel durch Erwärmung und Abkühlung oder starke Niederschlagsereignisse. Dies kann verschiedene Prozesse wie die Denitrifikation oder Auswaschungseffekte beeinflussen. Jahreszeitliche Nitratschwankungen beschränken sich in vielen Studien im Durchschnitt auf maximal 10 mg/L (Amt für Wasser und Energie, 2020; Bechtel, 2008; Nakagawa et al., 2021). Nur einzelne Messstellen und Messwerte überschreiten diese Spanne, beispielsweise aufgrund überdurchschnittlicher Niederschläge oder in Abhängigkeit von Sickerwasserperioden. Insbesondere in tieferen Grundwasserkörpern liegen stabile Bedingungen vor (Bechtel, 2008).

Regenwasser: Stickoxidkonzentrationen in der Luft zeigen sowohl jahreszeitliche Schwankungen als auch Fluktuationen im Tagesverlauf. Wetterbedingte Schwankungen und jahreszeiten-spezifische Emissionen, zum Beispiel durch das Heizen, resultieren im Allgemeinen in höheren Konzentrationen im Winter und geringeren im Sommer. Intensive Sonneneinstrahlungen führen im Sommer zudem zum photochemischen Abbau von Stickoxiden und damit einhergehend der Bildung von Ozon. An verkehrsnahen Stationen sind außerdem jeweils in den Morgen- und Abendstunden erhöhte Stickoxidkonzentrationen zu beobachten, die aus dem Berufsverkehr resultieren. Die innerhalb der Projektlaufzeit liegende COVID-19-Pandemie hat zu einem Rückgang des Verkehrs sowie damit einhergehend im Allgemeinen zu einem Rückgang der verkehrsnahen NO₂-Belastungen geführt (Kessinger et al., 2021; Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, 2020). Temperaturschichtungen, räumlich und zeitlich schwankende Windrichtungen und -geschwindigkeiten, atmosphärische Umwandlungsprozesse und weitere Faktoren führen jedoch dazu, dass die Schadstoffkonzentrationen nicht direkt auf die Veränderungen der Verkehrsmenge reagieren. Die Deposition ist darüber hinaus abhängig von der Niederschlagsmenge sowie weiteren Wetterbedingungen, sodass für den Untersuchungszeitraum (September 2019 bis März 2021) aufgrund aller genannten Unsicherheiten keine allgemeine jahreszeitliche Tendenz hinsichtlich der Nitratbelastung des Regenwassers in Niedersachsen abgeleitet werden kann (Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, 2021).

2.2.6. Präventive und reaktive Maßnahmen

Um der in diesem Kapitel dargestellten Nitratbelastung von Gewässern zu begegnen und die Auswirkungen auf die Umwelt und menschliche Gesundheit zu reduzieren, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Diese lassen sich, wie in Abbildung 22 dargestellt, in präventive und reaktive Maßnahmen klassifizieren.

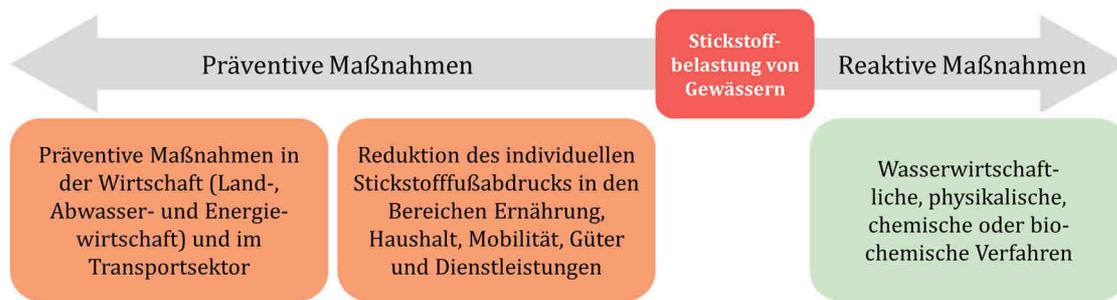


Abbildung 22: Präventive und reaktive Maßnahmen (eigene Abbildung).

Präventive Maßnahmen: Präventive Maßnahmen sind zielgerichtete Maßnahmen, welche den Eintrag von reaktivem Stickstoff in die Umwelt verhindern. Minderungsmaßnahmen aus dem Bereich der Landwirtschaft wurden bereits in mehreren Studien analysiert (eine Auflistung ist zu finden in Häußermann et al., 2019, S. 114). Osterburg et al. (2007) haben 49 Maßnahmen zur Nitratreduktion in der Landwirtschaft umfassend untersucht, entsprechend der Kostenwirksamkeit in Bezug auf das N-Minderungspotenzial und einer Eignungsbewertung gerankt und zu Maßnahmenpaketen mit kombinierbaren Maßnahmen geclustert. Ein verbessertes Düngemanagement (z. B. eine schlagbezogene Düngelplanung und Pflanzenanalysen zur Unterstützung der Düngelplanung) kann ebenso wie verbesserte Ausbringungsmethoden und verlängerte Sperrfristen für Wirtschaftsdünger zu einer Reduktion der N-Überschüsse und der N-Auswaschung beitragen. Weitere Minderungen können durch eine optimierte Fruchtfolge und Begrünung sowie durch eine Wiedervernässung von Auen und Mooren erreicht werden (Osterburg et al., 2007). Gewässerrandstreifen können zudem genutzt werden, um den Stickstoffeintrag in Oberflächengewässer zu verringern, wirken jedoch nur begrenzt dem Nährstoffeintrag durch Starkregen und daraus resultierenden Erosionsereignissen entgegen (Kofalk, 1998).

Verbesserte Klärwerke mit höheren Filterleistungen und der Einbau verbesserter Filteranlagen in industriellen Anlagen und im Transportsektor haben ebenfalls bereits zu reduzierten Emissionen reaktiven Stickstoffs in die Umwelt geführt (Geupel et al., 2021). Eine effektive Filtertechnik, die unter anderem im Verkehr und in der Industrie Anwendung findet, ist die selektive katalytische Reduktion (SCR), bei welcher Stickoxide in Abgasen mit Ammoniak zu molekularem Stickstoff und Wasser reagieren. Weitere chemische Hintergründe zur SCR sowie ein Experimentalsetting für den Chemieunterricht sind in Brockhage et al. (2022) zu finden.

Durch politische Entschlüsse und Verordnungen wurden bereits einige der genannten Minderungsmaßnahmen gesetzlich festgelegt. Diese beziehen sich jedoch im Wesentlichen auf den Produktionssektor und nicht auf den Verbraucher (Shibata et al., 2017). Für den individuellen Stickstofffußabdruck ist jede:r Einzelne verantwortlich, sodass in diesem Bereich besonderer Aufklärungsbedarf besteht. Als ein Tool zur Aufklärung wurde der N-Calculator entwickelt, mit welchem der individuelle Stickstofffußabdruck berechnet werden kann, der dem potentiellen Verlust von reaktivem Stickstoff in die Umwelt entspricht (Galloway et al., 2011). Der

Stickstofffußabdruck wird über den Ressourcenverbrauch aus den Bereichen Ernährung, Haushalt, Mobilität sowie Güter und Dienstleistungen ermittelt. Im Bereich „Ernährung“ werden die Nahrungsmittelaufnahme und daraus berechnete, länderspezifische Verluste von reaktivem Stickstoff während der Herstellung der entsprechenden Lebensmittel und Lebensmittelabfälle berücksichtigt. Der Stickstofffußabdruck aus diesem Bereich überwiegt in allen untersuchten Regionen deutlich dem Eintrag reaktiven Stickstoffs aus anderen Bereichen. In Deutschland werden pro Person beispielsweise rund 19 kg Stickstoff/Jahr als reaktiver Stickstoff durch den Bereich „Ernährung“ in die Umwelt eingetragen. Weitere 1,6 kg Stickstoff sind dem Bereich „Wohnen“, 1,8 kg dem „Transport“ sowie 0,7 kg dem Bereich „Güter und Dienstleistungen“ zuzuordnen (Shibata et al., 2017). Auf Seiten der Verbraucher:innen werden von Shibata et al. (2017) daher insbesondere hinsichtlich der Ernährung verschiedene Maßnahmen diskutiert, die sich positiv auf den Stickstofffußabdruck auswirken. In Europa, Nordamerika und weiteren Industrieländern trägt die Lebensmittelverschwendung durch Verbraucher:innen maßgeblich zum Eintrag reaktiven Stickstoffs in die Umwelt bei. 59 % der Lebensmittelabfälle entstehen in Deutschland durch private Haushalte, wobei etwa 78 kg Lebensmittel pro Jahr pro Person weggeworfen werden (Statistisches Bundesamt, 2022b). Durch bedarfsgerechten Einkauf, den Verbrauch der gesamten Lebensmittel und Aufklärungsangebote zu den negativen Auswirkungen von verschwendeten Lebensmitteln kann nicht nur die Lebensmittelverschwendung selbst, sondern auch der Stickstoffverlust in die Umwelt und der Ressourcenverbrauch von Boden, Energie, Wasser und Phosphat reduziert werden (Schmidt & Wellbrock, 2021). Der durch vermeidbare Lebensmittelabfälle produzierte N-Fußabdruck beträgt nach Vanham et al. (2015) 2,74 kg/Person pro Jahr. Neben der Vermeidung von Lebensmittelabfällen führt auch eine Veränderung des Konsums von Lebensmitteln zu einer Reduktion des Stickstofffußabdrucks. Der ernährungsbedingte Stickstofffußabdruck ist wesentlich bedingt durch kulturelle Ernährungsgewohnheiten und länderspezifische Stickstoffeffizienzen in der Lebensmittelproduktion. Dennoch lässt sich allgemein zusammenfassen, dass eine Ernährungsweise mit weniger tierischen Eiweißen in einem geringeren N-Fußabdruck resultiert und sich gleichzeitig positiv auf die Treibhausgasemissionen auswirkt (Shibata et al., 2017). Außerhalb des Bereichs Ernährung tragen die Nutzung von kraftstoffsparenden Autos, die Vermeidung von Langstreckenreisen, die Nutzung von alternativen Verkehrsmitteln, die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen und der sparsame Umgang mit Energie in Haushalten zu einer Reduktion der Stickstoffemissionen bei (Shibata et al., 2017).

Neben der Verminderung der Stickstoffemissionen kann darüber hinaus der bewusste Umgang mit Wasser dazu beitragen, dass weiterhin ausreichend sauberes Wasser und Trinkwasser für die Versorgung der Menschheit zur Verfügung gestellt werden kann. Übergeordnet können Konzepte wie der Wasserfußabdruck und virtuelles Wasser herangezogen werden (Bunsen et al., 2022; Keil, 2013), auf privater Ebene spielt vielmehr der Wasserverbrauch von Haushalten eine Rolle. Der private Trinkwasserkonsum in Deutschland beträgt rund 98 m³/Jahr pro

Haushalt und wird unter anderem durch die Gartenbewässerung, die Häufigkeit von Spül- und Waschgängen und die Verwendung wassersparender Geräte beeinflusst. Der Preis von Wasser wird von Verbraucher:innen häufig deutlich überschätzt und der eigene Wasserverbrauch unterschätzt. Daher ist zu vermuten, dass erhöhte Preise oder ein verbessertes Preisbewusstsein der Verbraucher:innen nicht zwangsläufig zu geringeren Wasserverbräuchen führen. Umso mehr Bedeutung erlangt die Aufklärung der Verbraucher:innen, um ein stärkeres Bewusstsein für den Umgang mit Wasser und den Wasserverbrauch einzelner Aktivitäten zu schaffen (Fron-del et al., 2021).

Auch eine Aufklärung der Produzenten, beispielsweise in Form einer Beratung von Landwirt:innen zur Reduzierung des Stickstoffeintrags durch Düngemittel, und der Erwerb und die anschließende Verpachtung unter Auflagen zur stickstoffreduzierten Bewirtschaftung oder die direkte Pachtung von landwirtschaftlich genutzten Flächen durch Wasserversorger lassen sich den präventiven Maßnahmen zuordnen (Oelmann et al., 2017).

Reaktive Maßnahmen: Wenn bereits zu viel reaktiver Stickstoff in Form von Nitrat in die Umwelt gelangt ist, sind kostenaufwändige, reaktive Maßnahmen zu ergreifen, um unter anderem die Trinkwasserversorgung sicherzustellen (Oelmann et al., 2019). Zur Reduktion der Nitratkonzentration in Trinkwasser werden bevorzugt wasserwirtschaftliche Maßnahmen wie die Erschließung neuer Brunnen in nitratärmeren Grundwasservorkommen, die Tieferlegung bereits bestehender Brunnen oder die Vermischung von belastetem und unbelastetem Wasser herangezogen (Oelmann et al., 2017). Weitere physikalische Verfahren wie die Umkehrosmose oder Elektrodialyse bewirken eine Reduktion der Nitratkonzentration, sind jedoch nicht nitrationenspezifisch und unter Umständen kosten- und materialaufwändig. Ebenfalls nicht ionenspezifisch ist das chemische Verfahren des Anionenaustauschs, bei welchem durch stark basische Anionenaustauschharze Anionen wie Nitrat beispielsweise gegen Chlorid- oder Hydrogencarbonationen ausgetauscht werden, wobei die Rohwasserzusammensetzung auch hinsichtlich weiterer Ionen stark beeinflusst wird. Eine aufwändige Nachbereitung des Wassers und ein hoher Verbrauch von Regenerierchemikalien führen zu einer geringen Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens. Unter den technisch biochemischen Verfahren finden sich nitrationenspezifische Verfahren, bei denen Stoffwechselprozesse von Mikroorganismen genutzt werden, um durch Denitrifikation die Nitratkonzentration in Wasser zu verringern. Das Wasser muss im Anschluss durch Filtration und Desinfektion gereinigt werden, um die Mikroorganismen zu entfernen. Darüber hinaus können bei der Denitrifikation entstehende Produkte pH-Wert-Änderungen hervorrufen, die durch nachgeschaltete Verfahren korrigiert werden müssen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2013; Wilhelm, 2008). Die dargestellten Verfahren stellen zwar sicher, dass weiterhin Trinkwasser mit geringen Nitratkonzentrationen zur Verfügung gestellt werden kann, jedoch nur unter erheblichem Energie-, Kosten- oder Materialaufwand.

Oelmann et al. (2019) haben die durch die Nitratbelastung verursachten Kosten für Wasserversorger bei einem Zielwert von 37,5 mg/L Nitrat im Sickerwasser bundesweit auf insgesamt 580 bis 684 Millionen Euro pro Jahr geschätzt, werden geringere Nitratkonzentrationen von 10 mg/L im Sickerwasser angestrebt, erhöhen sich diese Kosten auf 651 bis 767 Millionen Euro. Die meisten Kosten entstehen durch die Pacht der relevanten landwirtschaftlichen Fläche, gefolgt von Kosten für die Durchführung präventiver Maßnahmen und für die technische Aufbereitung.

Die Stickstoffbelastung von Gewässern betrifft damit nicht nur Wissenschaft, Wirtschaft und Politik, sondern auch die Gesellschaft, unter anderem durch die resultierenden Kosten für die Aufbereitung von Trinkwasser. Langfristig ist die Gesellschaft auch von den negativen Auswirkungen auf unseren Lebensraum und das System Erde sowie erforderlichen Maßnahmen wie zum Beispiel einer Umstellung der Ernährung betroffen. Der Citizen Science-Ansatz, der im folgenden Kapitel vorgestellt wird, kann dazu beitragen, partizipativ diese gesellschaftsrelevante Problematik zu erforschen und für den Gewässerschutz zu sensibilisieren.

2.3. Der Citizen Science-Ansatz

Der Citizen Science-Ansatz ist eine Möglichkeit, Wissenschaft und Gesellschaft zusammenzuführen und gemeinsam an verschiedenen Themen zu forschen. Dabei verspricht Citizen Science nicht nur einen Beitrag zur fachwissenschaftlichen Forschung, sondern auch zur Sensibilisierung der Gesellschaft, zum Beispiel für verschiedene Problemfelder aus dem Bereich der Nachhaltigkeit. Die WWQA (World Water Quality Alliance) schlägt explizit vor, den Citizen Science-Ansatz einzusetzen, um die Qualität des Grundwassers, insbesondere in Regionen mit großen Datenlücken, zu überwachen. Leicht messbare Wasserqualitätsindikatoren können dabei als Ausgangspunkt dienen, um die Auswirkungen einer Verschlechterung der Wasserqualität auf die Gesundheit und Umwelt zu thematisieren und damit das Interesse von Wissenschaftler:innen und Bürger:innen für Citizen Science und den Gewässerschutz zu wecken. Darüber hinaus kann Citizen Science angewendet werden, um Böden, Flüsse, Quellen, Feucht- und Küstengebiete zu untersuchen und erste Hinweise für potenzielle Umwelt- oder Gesundheitsrisiken zu erhalten (WWQA, 2021).

Um diesen Vorschlag und damit das Potenzial von Citizen Science für ein Gewässermonitoring und die Gewässerforschung, fokussiert auf die Stickstoffbelastung von Gewässern, zu evaluieren, wurde der Citizen Science-Ansatz für ein Nitrat-Monitoring in dem dieser Promotion zugrunde liegenden Projekt herangezogen. Darüber hinaus werden die Wirkungen von Citizen Science auf verschiedene Bildungsziele anhand des Projektes untersucht, um zu bewerten, inwieweit der Citizen Science-Ansatz beispielsweise einen Beitrag zur Umweltbildung leisten kann. Im Folgenden werden der Citizen Science-Ansatz und der aktuelle Stand der Forschung in Bezug auf die genannten Ziele dargestellt.

2.3.1. Definitionen und Klassifikationen von Citizen Science

Citizen Science, im deutschen Sprachraum auch Bürgerwissenschaften genannt, hat in den letzten 25 Jahren an außerordentlicher Bedeutung gewonnen – zahlreiche Citizen Science-Projekte wurden initiiert, in denen Millionen von Teilnehmer:innen bei der Erhebung oder Auswertung von wissenschaftlichen Daten einbezogen wurden (Bonney et al., 2016; Hartmann & Mietzner, 2018). Das Citizen Science-Konzept beschränkt sich jedoch nicht nur auf die Beteiligung von Bürger:innen an der Datenerhebung oder -auswertung, sondern kann in verschiedenen Phasen des wissenschaftlichen Forschungsprozesses verschiedener Disziplinen Anwendung finden. Damit ergibt sich ein breites Anwendungsfeld von Citizen Science, welches sich in ebenso lebhaften Diskussionen zu einer allgemeingültigen Definition widerspiegelt. Diese bewegen sich zwischen den Polen zu weit gefasster und einengender Definition sowie der Fokussierung auf die Wissenschaft und dem Einbezug weiterer Ziele (z. B. Bildungsziele) (z. B. Auerbach et al., 2019; Heigl et al., 2019). Verschiedene Definitionen aus verschiedenen Kontexten werden von Vohland et al. (2021) diskutiert. Im Folgenden wird eine Übersicht über

ausgewählte, unterschiedlich umfangreiche Definitionen gegeben, die einen ersten Eindruck über die Vielfaltigkeit von Citizen Science vermitteln (vgl. Abbildung 23).

Die Definition des Oxford English Dictionary für Citizen Science leitet sich aus dem Verständnis von Bonney et al. (2016) aus der bürgerwissenschaftlichen Beteiligung im Cornell Lab for Ornithology ab und fokussiert zunächst die Beteiligung der Öffentlichkeit an der wissenschaftlichen Forschung durch die Zusammenarbeit von Bürger:innen und professionellen Wissenschaftler:innen, um große Datenmengen zu sammeln, zu übermitteln oder auszuwerten. Die Definition der OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2017) bezieht weitere Dimensionen des Engagements mit ein, so die Information der Teilnehmenden über wissenschaftliche Prozesse, die Beteiligung an wissenschaftlichen Prozessen sowie die Zusammenarbeit zwischen Öffentlichkeit und Forscher:innen, aber auch mit Regierungen und Fördereinrichtungen. Es bleibt bei dieser Definition jedoch offen, ob allein die Information über Wissenschaft schon als Bürgerwissenschaft angesehen werden kann. Im deutschsprachigen Raum wird der Begriff Citizen Science im Grünbuch „Citizen Science Strategie 2020 für Deutschland“ definiert, wobei verschiedene Partizipationsgrade ebenso wie wissenschaftliche Standards der Beteiligung von Personen an wissenschaftlichen Forschungsprozessen ergänzt werden (Bonn et al., 2016). Trotz der umfangreichen Definition wird die Zusammenarbeit mit anderen Institutionen, zum Beispiel der Politik, außer Acht gelassen.

Definitionen von Citizen Science

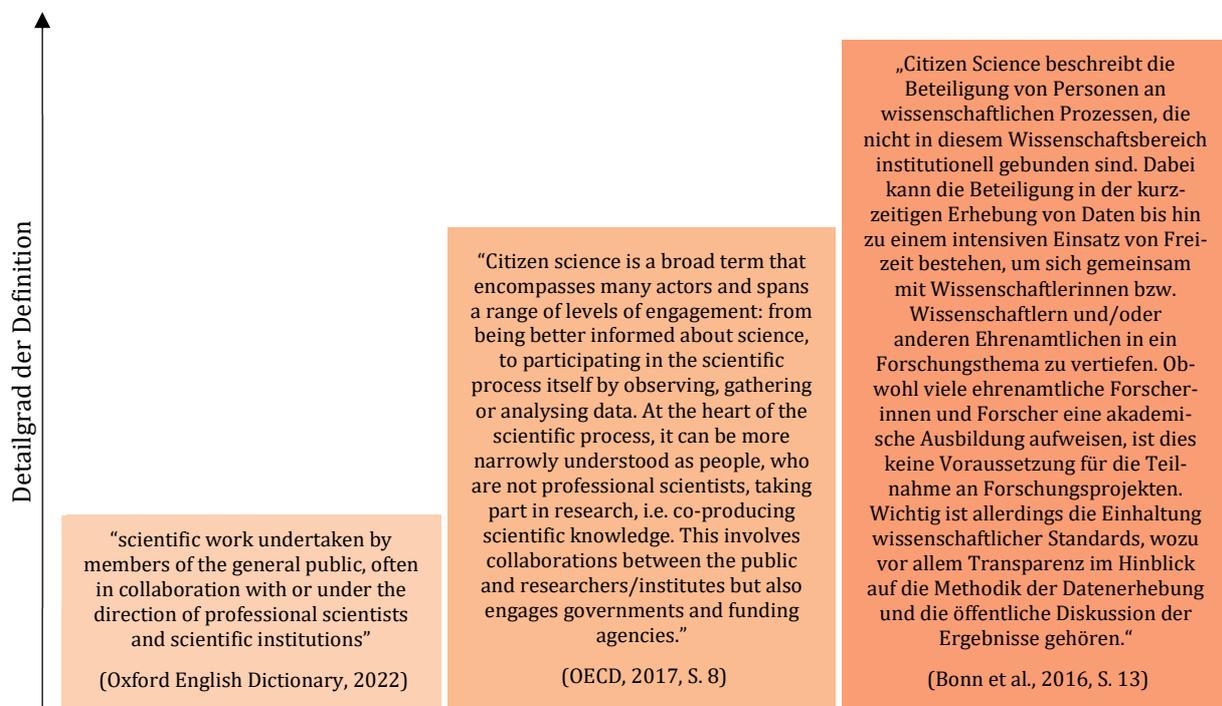


Abbildung 23: Definitionen von Citizen Science
(eigene Abbildung, Zitate aus den angegebenen Quellen).

Citizen Science scheint sich einer erschöpfenden Definition, welche alle Ziele, Ansätze und Kontexte berücksichtigt, zu entziehen. Dennoch weisen alle Definitionen eine Gemeinsamkeit auf: Eine Öffentlichkeit, die sich an wissenschaftlicher Forschung beteiligt (Vohland et al., 2021).

Die European Citizen Science Association (ECSA) hat aufbauend auf Beiträgen vieler ihrer Vereinsmitglieder zehn Prinzipien entwickelt, die als gute Praxis in Citizen Science gesehen werden können. Sie beantwortet damit weniger die Frage nach einer Definition, sondern vielmehr, wie Citizen Science disziplinübergreifend erfolgreich umgesetzt werden kann:

- „1. Citizen Science Projekte binden Bürgerinnen und Bürger aktiv in wissenschaftliche Unternehmungen ein, die zu neuem Wissen und Verstehen führen. Bürgerinnen und Bürger können dabei als Beitragende, Mitarbeitende, Projektleitende oder in anderen relevanten Rollen agieren.
2. Citizen Science Projekte führen zu echten wissenschaftlichen Ergebnissen. Dazu gehören die Beantwortung rein wissenschaftlicher Fragen sowie Beiträge zu angewandten Fragen beispielsweise im Bereich Naturschutz und -management oder der Umweltpolitik.
3. Alle Teilnehmenden profitieren von der Teilnahme, sowohl die institutionell beschäftigten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler als auch die ehrenamtlich Beteiligten. Dazu können Publikationen, Fortbildungen, persönliches Vergnügen oder soziale Interaktionen zählen, aber auch die Befriedigung, wissenschaftlich zu einem größeren Ganzen beigetragen zu haben, auf lokaler, nationaler oder internationaler Ebene, und damit Einfluss auf Politik zu nehmen.
4. Wenn sie möchten, können die Bürgerwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sich an verschiedenen Phasen im wissenschaftlichen Prozess beteiligen. Das kann die Entwicklung der Forschungsfrage, Ausgestaltung der Methoden, Erhebung und Analyse der Daten sowie die Kommunikation der Ergebnisse umfassen.
5. Bürgerwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler erhalten eine Rückmeldung (Feedback) vom Projekt. Beispielsweise, wie die Daten genutzt werden und welche wissenschaftlichen, politischen oder gesellschaftlichen Ergebnisse das Projekt hat.
6. Citizen Science ist ein Forschungsansatz, der wie andere auch Limitationen und Vorannahmen hat, die berücksichtigt und kontrolliert werden müssen. Im Gegensatz zu mehr traditionellen Forschungsansätzen bietet Citizen Science die Möglichkeit für die Einbindung einer breiteren Öffentlichkeit und eine Demokratisierung von Wissen(schaft).
7. Die Daten und Metadaten aus Citizen Science Projekten werden öffentlich zugänglich gemacht und die Ergebnisse soweit möglich in einem open-access Format publiziert. Das Teilen von Daten kann während oder nach dem Projekt erfolgen, wenn keine Sicherheits- oder Datenschutzaspekte dagegen sprechen.
8. Bürgerwissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern wird Dank und Wertschätzung in den Projektergebnissen und -publikationen ausgesprochen.

9. Die Evaluierung von Citizen Science Programmen erfolgt auf Grundlage der wissenschaftlichen Ergebnisse, der Qualität der Daten, des Mehrwerts für die Beteiligten sowie der breiteren gesellschaftlichen Wirkung.
10. Die Projektverantwortlichen berücksichtigen bei sämtlichen Aktivitäten legale und ethische Aspekte, die Urheberrechte, Rechte des geistigen Eigentums, Datenprotokolle, Vertraulichkeit, Verantwortlichkeiten oder Auswirkungen auf die Umwelt betreffen.“

(European Citizen Science Association [ECSA], 2015)

Aus dem Versuch, die Vielfältigkeit von Citizen Science zu greifen, sind weitere theoretische Ansätze zu diesem recht jungen Forschungsansatz hervorgegangen, so unter anderem zur Kategorisierung von Citizen Science-Projekten.

Der Grad der Partizipation ist einer der häufigsten Kategorisierungsvorschläge, der unter anderem von Shirk et al. (2012) ausdifferenziert wurde (vgl. Abbildung 24). Von links nach rechts verschieben sich die Aufgaben in verschiedenen Phasen des Forschungsprozesses von der Seite der Wissenschaftler:innen zu den beteiligten Bürger:innen. Obgleich ein hohes Maß an Beteiligung Vorteile hinsichtlich des Engagements und der Beteiligung der Teilnehmenden an dem Projekt verspricht, sollte das Erreichen der höchstmöglichen Stufe entsprechend dieser Kategorisierung nicht als maßgebliches Bewertungskriterium für die Güte eines Citizen Science-Projektes herangezogen werden (Haklay, 2018).

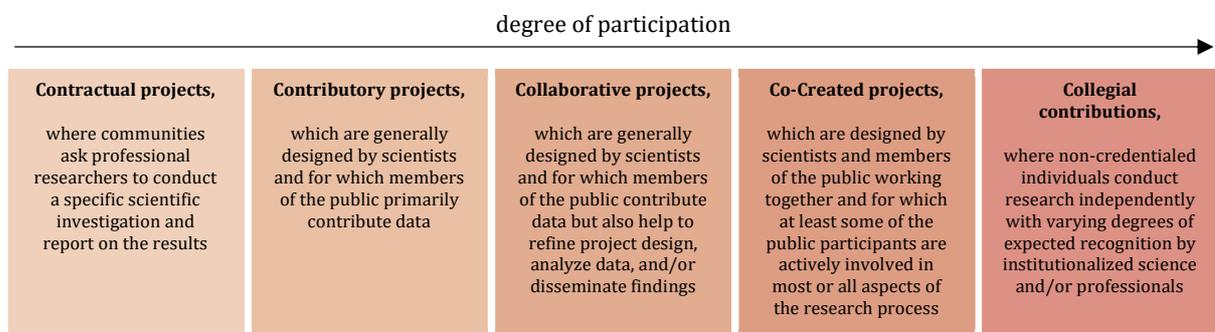


Abbildung 24: Grad der Partizipation der Öffentlichkeit an wissenschaftlicher Forschung (eigene Abbildung, übersetzt nach Shirk et al., 2012, S. 4).

Ein Vergleich verschiedener Studien zeigte, dass mit zunehmender Aufgabenkomplexität in verschiedenen Citizen Science-Projekten auch die Beteiligung von Personen mit höherem Bildungsniveau zunimmt. Hierdurch können zwar das Wissen, die Fähigkeiten und die Fertigkeiten von Menschen mit hoher Bildung für gesellschaftsrelevante Forschung genutzt werden, zeitgleich werden jedoch viele Menschen nicht durch die entsprechenden Citizen Science-Projekte angesprochen (Haklay, 2018).

Eine zweite Klassifizierung von Citizen Science-Projekten unterscheidet in Bezug hierauf zweidimensional die Höhe des Engagements und das erforderliche Wissen der Teilnehmenden sowie daraus abgeleitete Potenziale und Aufgabenbereiche, die von den Teilnehmenden

übernommen werden können (vgl. Abbildung 25, Haklay, 2018). Ein hohes Wissensniveau und gleichzeitig hohes Engagement wird beispielsweise in dem Projekt „Transcribe Bentham“ erwartet, in dem Teilnehmer:innen nicht nur Benthams Handschrift lesen können, sondern auch die Bedienung eines Transkriptionssystems erlernen müssen (Causer et al., 2018). Dem gegenüber stehen Projekte wie beispielsweise OPAL (Open Air Laboratories), in denen Teilnehmende ohne Vorkenntnisse mithilfe einfacher Anleitungen verschiedene Feld- und Schreibtischaktivitäten (beispielsweise Zählen und Klassifizieren wirbelloser Tiere) durchführen können, die für alle Altersgruppen und Fähigkeiten geeignet sind (Tweddle et al., 2015).

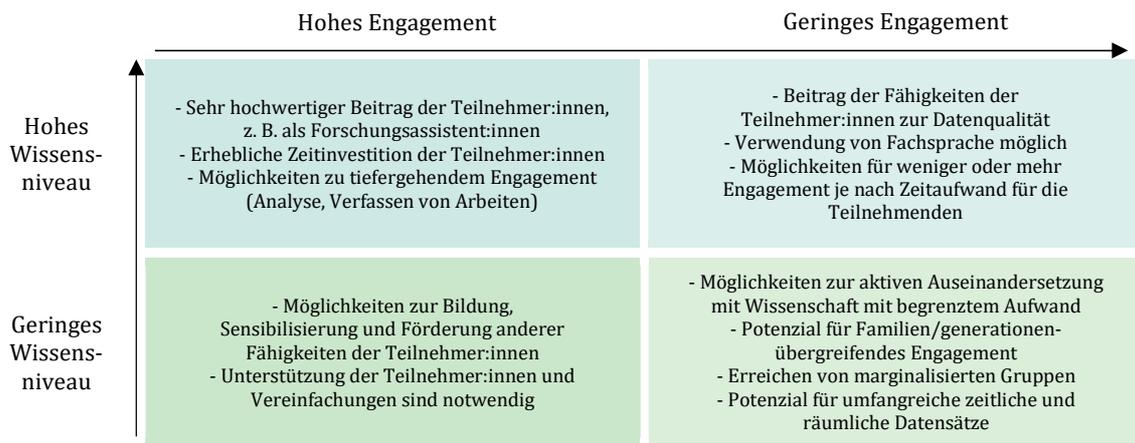


Abbildung 25: Grad des Engagements und Wissensniveaus in Citizen Science-Projekten (eigene Abbildung nach Haklay, 2018, S. 59).

An dieser Klassifizierung wird deutlich, dass nicht nur Citizen Science-Projekte mit einem hohen Grad an Beteiligung einen Mehrwert mit sich bringen, sondern jede Art von Teilnahme in Abhängigkeit von der Projektgestaltung und dem Projekttyp einen Beitrag für gesellschaftliche oder wissenschaftliche Ziele leisten kann (Haklay, 2018).

2.3.1. Participation Inequality – Die Ungleichheit der Beteiligung

Auch innerhalb vieler Projekte zeigt sich ein unterschiedlicher Grad der Beteiligung der teilnehmenden Bürger:innen. Sowohl bei Online- als auch bei Offline-Projekten konnte festgestellt werden, dass nur ein kleiner Anteil der Teilnehmer:innen von Citizen Science-Projekten einen Großteil zum Output des Projektes beigetragen hat (Haklay, 2016). In Citizen Science-Projekten variiert dabei oftmals nicht nur die Anzahl der Daten, die von den einzelnen Teilnehmer:innen übermittelt wird, sondern auch die Dauer der aktiven Beteiligung. Eine Analyse des OpenStreetMap-Projektes ergab beispielsweise, dass fast alle Teilnehmer:innen, die nur wenige Daten beisteuern (max. 10 erstellte Knoten in der OpenStreetMap), weniger als drei Monate aktiv an dem Projekt teilgenommen haben, während sehr aktive Teilnehmer:innen (über 1000 erstellte Knoten) zu 48 % drei bis zwölf Monate und 38 % sogar mehr als zwölf Monate aktiv waren (Neis & Zipf, 2012).

Eine ungleiche Verteilung ergibt sich auch hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Skalierung von Citizen Science-Daten, abhängig von dem jeweiligen Konzept. Daten zur Verkehrssituation sind zum Beispiel überwiegend dort vorhanden, wo viele Menschen täglich unterwegs sind, sowie vor allem zu Hauptverkehrszeiten (Haklay, 2016). Zudem konnte beim OpenStreetMap-Projekt festgestellt werden, dass Sonntags und in den Nachmittags- und Abendstunden mehr Werte eingetragen wurden als an den übrigen Wochentagen und Tageszeiten (Neis & Zipf, 2012). Darüber hinaus ist die Beteiligung der Teilnehmer:innen unabhängig voneinander, sodass gleiche Beobachtungen von verschiedenen Teilnehmer:innen mehrfach eingetragen werden können. Dies kann zum Beispiel bei Vogelzählaktionen dazu führen, dass derselbe Vogel von verschiedenen Teilnehmer:innen mehrfach erfasst wird.

Die räumliche und zeitliche Heterogenität der Daten ist damit ebenso wie unterschiedliche akademische und soziale Voraussetzungen der Teilnehmer:innen in der Konzeption, Durchführung und Auswertung eines Citizen Science-Projektes zu berücksichtigen.

2.3.2. Rahmenwerk für die Beteiligung der Öffentlichkeit an der Wissenschaft

Zur Entwicklung von wissenschaftlichen Projekten mit Bürger:innenbeteiligung haben Shirk et al. (2012) ein Framework konzipiert, welches wissenschaftliche und öffentliche Interessen sowie verschiedene Wirkungen berücksichtigt und den Zusammenhang dieser mit dem gesamten Prozess von Citizen Science-Projekt abbildet (vgl. Abbildung 26). Im Folgenden werden die verschiedenen Phasen des Frameworks dargestellt mit Bezug auf die in Shirk et al. (2012) herangezogenen Beispielprojekte.

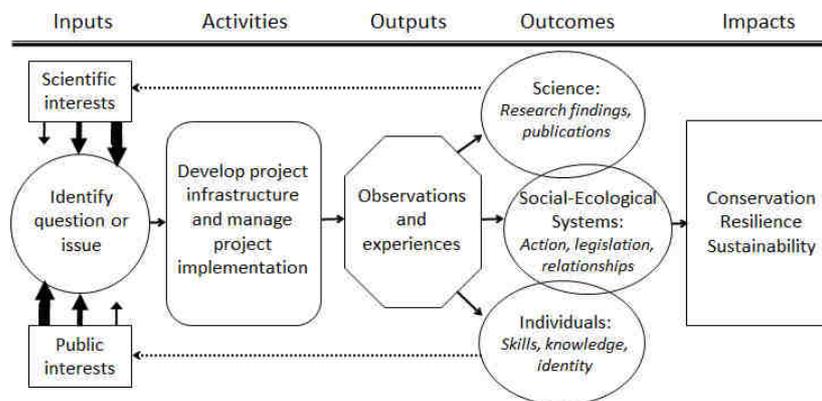


Abbildung 26: PPSR (Public Participation in Scientific Research) Framework (Abbildung aus Shirk et al., 2012).

Vor der Konzeption eines partizipativen Forschungsprojektes sind bei der Formulierung des Forschungsgegenstandes und der Forschungsfragen sowohl wissenschaftliche als auch öffentliche Interessen zu berücksichtigen. Teilnehmende können beispielsweise Interesse an einem Beitrag zur wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung, an eigenen wissenschaftlichen Entdeckungen oder an bestimmten Themen wie zum Beispiel dem Naturschutz mitbringen (z. B. Evans et al., 2005; Raddick et al., 2010; Weston et al., 2003). Wissenschaftliche Interessen

können nicht nur die Verarbeitung von Beobachtungsdaten oder die Generierung neuer wissenschaftlicher Ergebnisse betreffen, sondern auch die Bildung (z. B. Firehock & West, 1995; Wood et al., 2011). Im Anschluss an die Konkretisierung des Untersuchungsgegenstandes erfolgt die Entwicklung des Projektes, ausgerichtet auf die zuvor formulierten Ziele. Hierzu zählt die Entwicklung der Methodik, zum Beispiel in Form von Richtlinien zur Probenahme, die Konzeption von Begleitmaterialien zur Schulung der Teilnehmenden und Protokollierung der Daten, der Aufbau von Datenübermittlungstechnologien und Kommunikationsplattformen sowie verschiedene weitere Verwaltungsaspekte (Shirk et al., 2012).

In der sich anschließenden Erhebungsphase werden als Outputs erste Produkte oder Ergebnisse von Aktivitäten gesammelt. Hierunter fallen sowohl Beobachtungen und Daten als auch Erfahrungen, die während der Erhebung oder Analyse der Daten gemacht werden. In den Outputs spiegeln sich auch Entscheidungen wider, die während der Entwicklung des Projektes getroffen wurden, zum Beispiel in der Genauigkeit der Messdaten (z. B. Vaughan et al., 2003). Die Form der Datenauswertung, der Visualisierung der Daten und der Veröffentlichung der Ergebnisse sowie der Einfluss auf politische Entscheidungsträger und die Reflexion des Projektes beeinflussen letztendlich die Outcomes des Projektes (Shirk et al., 2012).

Als Outcomes werden messbare Größen wie Kompetenzen, Fähigkeiten und Wissen bezeichnet, die aus den zuvor gesammelten Outputs resultieren. Outcomes für die Wissenschaft sind unter anderem ein neues Verständnis für bestimmte Sachverhalte, zum Beispiel die Verbreitung von bestimmten Arten oder neue Technologien zur Sammlung, Analyse und Verwaltung von Daten (z. B. Fink et al., 2010; Senko et al., 2010). Teilnehmer:innen des Projektes erlangen beispielsweise neue Kompetenzen oder ein besseres Verständnis von der Wissenschaft (z. B. S. Bell et al., 2008; Trumbull et al., 2000). Diese Outcomes können sich wiederum auf neue Projekte auswirken, indem sie die Inputs der Wissenschaftler:innen und Teilnehmer:innen beeinflussen. Darüber hinaus können Outcomes auf Ebene der sozioökonomischen Systeme erreicht werden, beispielsweise in Form von verbesserten Beziehungen zwischen unterschiedlichen Institutionen oder einer gesteigerten Bereitschaft von Teilnehmer:innen, sich in politischen Prozessen zu engagieren (z. B. Overdeest et al., 2004; Tudor & Dvornich, 2001). Bestenfalls werden in Form der Outcomes die Ziele erreicht, die als Inputs in die Konzeption des Projektes eingeflossen sind (Shirk et al., 2012).

Nachhaltige, langfristige Veränderungen werden als Impacts bezeichnet, die erst nach 10 oder mehr Jahren nach Etablierung des Projektes auftreten (Shirk et al., 2012). Aufgrund des langen Zeitraums werden Impacts selten in Projekten gemessen, jedoch können ein starkes Verantwortungsbewusstsein und eine handlungsfähige Bürgerschaft zu erwünschten Impacts gezählt werden (z. B. Middleton, 2001; Pattengill-Semmens & Semmens, 2003).

2.3.3. Von der globalen zur deutschen Citizen Science-Landschaft

Citizen Science bringt, wie im vorherigen Kapitel gezeigt, ein großes Potenzial hinsichtlich verschiedener Aspekte mit, wodurch Citizen Science in den letzten Jahren eine immer größere Bedeutung in der Wissenschaft erlangt hat. Bautista-Puig et al. (2019) haben anhand einer Analyse des WoS (Web of Science) global die Präsenz von Citizen Science in der Wissenschaft analysiert mit dem Ergebnis, dass seit 2006 ein starker Anstieg der Anzahl an Publikationen zu Citizen Science zu verzeichnen ist, der sich auch in dem Anteil der Citizen Science-Publikationen in Relation zur Gesamtanzahl veröffentlichter Dokumente im WoS wiederfindet (2006: 0,0069 % und 2017: 0,0207 %). Insgesamt wurden von 2006 bis 2017 3962 Dokumente zu Citizen Science aus 171 Ländern publiziert, wobei die USA mit 1624 Publikationen, England mit 511 Publikationen und Kanada mit 463 Publikationen die höchsten absoluten Anzahlen aufweisen. Deutschland findet sich hier auf Platz 5 mit 247 Publikationen. Zusätzlich zur absoluten Anzahl haben die Wissenschaftler:innen einen Aktivitätsindex (AI) berechnet, der den Anteil an Publikationen zu Citizen Science in dem jeweiligen Land in Relation zum Anteil der Publikationen des Landes an der Gesamtanzahl der Publikationen setzt ($\% \text{ Citizen Science Dokumente} / \% \text{ WoS Dokumente}$). Folgende Abbildung veranschaulicht die Citizen Science-Aktivitäten in den jeweiligen Ländern anhand der Gesamtanzahl und des Aktivitätsindexes.

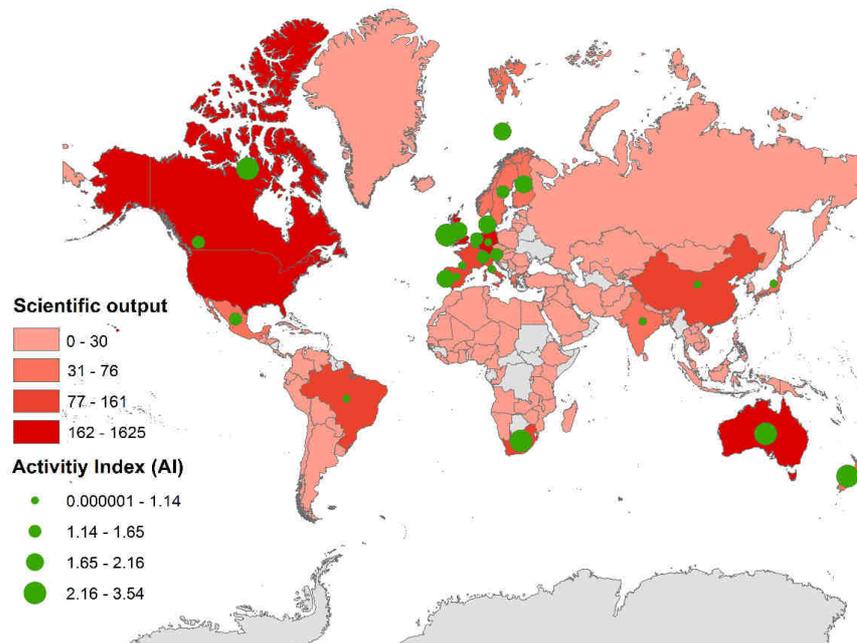


Abbildung 27: Gesamtanzahl und Aktivitätsindex der Publikationen zu Citizen Science (Abbildung aus Bautista-Puig et al., 2019, S. 9).

Die höchsten Aktivitätsindizes liegen jeweils für die Länder Südafrika (3,54), Neuseeland (3,21), Australien (2,80), Kanada (2,77) und Irland (2,53) vor (Bautista-Puig et al., 2019). In einer Studie von Makarovs und Achterberg (2018) konnte anhand der Analyse von Daten aus einer Eurobarometer-Umfrage aus 2010 festgestellt werden, dass das Engagement der Öffentlichkeit für die Wissenschaft wesentlich von dem Demokratisierungsgrad des Landes abhängt.

Länder mit einem hohen Demokratisierungsindex wie beispielsweise Norwegen, Island, Dänemark und Schweden weisen gleichzeitig ein hohes öffentliches Engagement in der Wissenschaft auf.

Mithilfe einer Online-Umfrage haben Hecker et al. (2018) die Citizen Science-Aktivitäten in Europa unter anderem hinsichtlich der thematischen Ausrichtung und dem Partizipationsgrad anhand der Daten von 174 Projektkoordinator:innen untersucht. Ein Großteil der Projekte aus der europäischen Citizen Science-Landschaft ist thematisch auf die Ökologie (27,2 %), die Umweltwissenschaften (22,5 %) und die Biologie (6,4 %) ausgerichtet, weitere Projekte finden sich zum Beispiel in den Sozial- und Sprachwissenschaften, der Geschichte oder den Ingenieurwissenschaften. Nur 0,6 % der Projektkoordinator:innen gaben Chemie als Hauptdisziplin ihres Projektes an. 50,3 % der Projekte sind als contributory projects mit einem geringen Grad an Partizipation eingeteilt und nur 5,8 % der Projekte als collegiate oder contractual projects (vgl. Abbildung 24, S. 69).

Mit Fokus auf Deutschland spiegelt sich die thematische Fokussierung in einer aktuellen Studie mit Daten von 78 Projekten der Plattform www.buergerschaffenwissen.de aus dem Jahr 2020 wider, wobei deutlich wird, dass innerhalb der Naturwissenschaften überwiegend Bezüge der Citizen Science-Projekte zur Biologie vorliegen, während sich nur wenige Projekte thematisch der Physik oder Chemie zuordnen. Es besteht damit Aufholbedarf von Citizen Science-Projekten mit chemischen Bezügen, dem mit dem dieser Promotion zugrunde liegenden Projekt begegnet wird. Weitere Projekte weisen Bezüge zu Sozial- und Humanwissenschaften, zu Kultur- und Geisteswissenschaften sowie Ingenieur- und Planungswissenschaften auf. Ebenso wie die thematische Ausrichtung variiert auch die Größe der Projekte. 38,2 % der Projekte hatten bis zu 89 teilnehmende Bürger:innen, weitere 35,3 % bis 300 Teilnehmer:innen und 26,8 % über 300 Teilnehmer:innen (Moczek, Hecker & Voigt-Heucke, 2021).

2.3.4. Das Bildungspotenzial von Citizen Science

Citizen Science erlangt nicht nur hinsichtlich der fachwissenschaftlichen Forschung eine steigende Aufmerksamkeit, sondern ist auch in der Bildung ein schnell wachsender Sektor (Kermish-Allen et al., 2019). Der Citizen Science-Ansatz kann sowohl als Ergänzung zu bestehenden Konzepten wie beispielsweise der Bildung für nachhaltige Entwicklung als auch als eigenes Konzept mit entsprechenden Bildungszielen sowie in der formellen und informellen Bildung genutzt werden (Pettibone et al., 2016; Roche et al., 2020). Phillips et al. (2018) haben anhand eines Reviews von 327 Citizen Science-Projekten und eines Online-Fragebogens ein Framework zu den intendierten Lernergebnissen von Citizen Science-Projekten und der Evaluation ebendieser erarbeitet. Anhand eines darüberhinausgehenden Literatur-Reviews wurden sechs Lernziele definiert und spezifiziert (vgl. Abbildung 28, S. 75). Im Folgenden werden diese Lernziele dargestellt und hinsichtlich ihres Potenzials für die schulische Bildung, abgeleitet aus Lüsse et al. (2022a), diskutiert. Es werden Beispielprojekte aus den genannten Review-Studien

herangezogen sowie aktuelle Projekte ergänzt, um einen umfassenden Einblick in den aktuellen Stand der Forschung zu geben.



Abbildung 28: Learning Outcomes von Citizen Science (eigene Abbildung, verändert und übersetzt nach Phillips et al., 2018, S. 7).

Interesse an Naturwissenschaften und Umwelt: Als Interesse definieren Phillips et al. „den Grad, mit dem eine Person einem wissenschaftlichen oder umweltbezogenen Thema oder Unterfangen persönliche Bedeutung beimisst“ (2018, S. 7, übersetzt durch die Autorin). Dabei werden insbesondere spätere Phasen der Interessensentwicklung nach Hidi & Renninger (2006) mit Citizen Science verbunden, bei welchen individuelles Interesse aus positiven Gefühlen beziehungsweise einer wachsenden Bereitschaft, sich mit einem bestimmten Thema zu beschäftigen, resultiert. Insbesondere Citizen Science-Projekte mit sich wiederholenden Aktionen oder Erfahrungen haben das Potenzial, zu einem tieferen und nachhaltigen Interesse an den Naturwissenschaften und der Umwelt beizutragen. Trotz dieses Potenzials wurden die Wirkungen von Citizen Science auf das Interesse nur in wenigen Studien untersucht (Phillips et al., 2018). Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes Coastal Observation and Seabird Survey Team (COASST) haben ihr Interesse im Laufe der Zeit beispielsweise direkter an dem Programm angepasst und die Bedeutung der wissenschaftlichen Aktivität anstelle des persönlichen Interesses hervorgehoben (He et al., 2019).

In einer Review-Studie wurde von Lüsse et al. (2022a) das Potenzial von Citizen Science für den formalen wissenschaftlichen Unterricht herausgearbeitet und anhand verschiedener Studien gezeigt, dass die Teilnahme an Citizen Science-Projekten das Interesse der Schüler:innen an den Projektinhalten oder wissenschaftlichen Themen steigern kann (u. A. Hiller & Kitsantas,

2015; Kelemen-Finan et al., 2018; Ruiz-Mallén et al., 2016; Silva et al., 2016). Dies wird unter anderem auf die Partizipation an authentischer Forschung zurückgeführt (Aivelo & Huovelin, 2020; Gardner et al., 2015). Interesse an den Naturwissenschaften gilt darüber hinaus als relevanter Faktor für Jugendliche, eine wissenschaftliche Laufbahn zu verfolgen und kann zu einem anhaltenden Engagement und Motivation führen (P. Bell et al., 2009; Phillips et al., 2018; Tai et al., 2006).

Selbstwirksamkeit: Die Selbstwirksamkeitserwartung beschreibt das Vertrauen einer Person in ihre eigenen Fähigkeiten, bestimmte Handlungen auch in schwierigen Situationen erfolgreich auszuführen (Bandura, 1997). Sie wird als wesentliche Komponente des bürgerlichen Engagements für die Umwelt betrachtet, welches von der Überzeugung einer Person abhängt, mithilfe ihrer Fähigkeiten und Kenntnisse eine positive Veränderung herbeizuführen (Berko-witz et al., 2005). Für Citizen Science lässt sich Selbstwirksamkeit konkretisieren als Vertrauen einer Person in ihre Fähigkeit, an einer wissenschaftlichen Aktivität zu partizipieren (Phillips et al., 2018). Bisherige Studien in Bezug auf die Entwicklung der Selbstwirksamkeit in Citizen Science-Projekten zeigen differente Ergebnisse. Während Teilnehmer:innen eines Citizen Science-Projektes zu Pfeilschwanzkrebsen (Hiller & Kitsantas, 2014) eine höhere Selbstwirksamkeit für wissenschaftliche Beobachtungsaufgaben als eine Kontrollgruppe zeigten, beobachteten Forscher:innen eines Online-Astronomieprojektes einen Rückgang der Selbstwirksamkeit der Teilnehmer:innen, gegebenenfalls zurückzuführen darauf, dass den Teilnehmer:innen bewusst geworden ist, wie wenig sie über das Thema wissen (Price & Lee, 2013).

Auch im schulischen Kontext können Citizen Science-Projekte positive und negative Wirkungen hinsichtlich der akademischen Selbstwirksamkeit hervorrufen. Misserfolge aufgrund zu hoher Herausforderungen bei den Citizen Science-Aktivitäten stehen der Möglichkeit zur aktiven Mitgestaltung bei der Zusammenarbeit mit Wissenschaftler:innen gegenüber (Aivelo & Huovelin, 2020; Spicer et al., 2020). Eine Steigerung der Selbstwirksamkeit wurde bereits in einigen Studien gezeigt, wobei sich insbesondere für leistungsschwache Schüler:innen ein hohes Potenzial ergibt, neue, positive Erfahrungen außerhalb des üblichen Unterrichts zu sammeln (Lüsse et al., 2022a; Silva et al., 2016).

Die akademische Selbstwirksamkeitserwartung weist viele Gemeinsamkeiten mit dem Konstrukt des schulischen Selbstkonzeptes auf. Letzteres umfasst die Selbsteinschätzung einer Person in Bezug auf schulische Fähigkeiten resultierend aus den Beobachtungen der eigenen Person und dem Vergleich mit sozialen Bezugsgruppen. Es ist damit breiter angelegt als die Selbstwirksamkeit und hängt stärker von sozialen Vergleichsinformationen ab (Möller & Trautwein, 2009). Da das fachspezifische Selbstkonzept in vielen Studien einen positiven Zusammenhang mit der Leistung beziehungsweise Leistungsentwicklung und dem Interesse zeigt, gilt „die Förderung eines adäquaten und positiven Selbstkonzepts als zentrales Ziel pädagogischer Bemühungen“ (Möller & Trautwein, 2009, S. 201). In außerschulischen Lernorten wie beispielsweise Schülerlaboren wurden bereits positive kurz- bis längerfristige Wirkungen

auf das Selbstkonzept festgestellt (z. B. Weßnigk, 2013). Die Wirkungen von Citizen Science auf das fachspezifische Selbstkonzept sind bisher noch nicht untersucht worden. Quellen eines positiven Selbstkonzeptes finden sich unter anderem in positiven Lernerfahrungen, sodass auch Citizen Science-Projekte durch die Teilhabe an authentischer Forschung ein Potenzial zur Steigerung des Selbstkonzeptes mit sich bringen. Erleben die Teilnehmer:innen durch eine Überforderung durch die Citizen Science-Aktivität jedoch Misserfolge, welche sie internal-stabil auf ihre mangelnde Begabung zurückführen, ist eine Verschlechterung des Selbstkonzeptes möglich. Ein geringes fachspezifisches Selbstkonzept kann sich darüber hinaus ungünstig auf die Motivation auswirken, welches ebenfalls als Learning Outcome von Citizen Science betrachtet wird (Möller & Trautwein, 2009; Phillips et al., 2018).

Motivation: Das Konstrukt „Motivation“ ist vieldimensional und komplex, beschreibt jedoch nach Phillips et al. (2018) im Wesentlichen eine Form der Zielsetzung, um ein Verhalten oder Ergebnis zu erreichen. Wright et al. (2015) leiteten in einer Studie zu dem Citizen Science-Projekt SABAP2 fünf für Teilnehmer:innen relevante motivationale Faktoren ab, im Folgenden sortiert nach ihrer durch die Studie abgeleiteten Wichtigkeit:

- (1) recreation=nature-based (der Wunsch, sich in der Freizeit für das Kartieren zu engagieren/Zeit mit der Natur zu verbringen)
- (2) personal values (der Wunsch, persönliche Werte zum Ausdruck zu bringen oder danach zu handeln)
- (3) personal growth (der Wunsch nach persönlichem Wachstum und Entwicklung, einschließlich Lernen)
- (4) social interactions (der Wunsch, soziale Beziehungen zu stärken oder aufzubauen)
- (5) project organization (die Beteiligung an einem gut laufenden Projekt oder die persönliche berufliche Entwicklung durch die Freiwilligenarbeit)

Eine zweite Grundlage zur Untersuchung der Motivation ist die Selbstbestimmungstheorie von Deci und Ryan (1993), nach welcher sich Motivation von intrinsisch bis extrinsisch einordnen lässt, wobei „intrinsisch motivierte Verhaltensweisen [...] als interessenbestimmte Handlungen definiert werden, deren Aufrechterhaltung keine vom Handlungsgeschehen „separierbaren“ Konsequenzen erfordert, d. h. keine externen oder intrapsychischen Anstöße, Versprechungen oder Drohungen“ (Deci & Ryan, 1993, S. 225). Intrinsische Motivation kann beispielsweise durch Neugier oder Interesse hervorgerufen werden. Extrinsische Motivation liegt hingegen vor, wenn externe Beweggründe für eine Handlung dominieren, zum Beispiel in Form von negativen oder positiven Konsequenzen. Obgleich die Selbstbestimmungstheorie dazu beitragen kann, die Motivation der Teilnehmenden in Citizen Science-Projekten zu verstehen und die Beteiligungsbereitschaft der Teilnehmenden zu steigern, wurde die Selbstbestimmungstheorie erst in wenigen Studien im Kontext der Bürgerwissenschaften herangezogen. Eine empirische Studie zu drei Citizen Science-Projekten zeigte, dass die Quantität der Beteiligung

durch intrinsische Motive bestimmt wird, welche jedoch keinen Einfluss auf die Qualität der Beteiligung hat (Nov et al., 2014).

Im schulischen Kontext sind der Beitrag zum Umweltschutz und Projekte mit hoher Authentizität wichtige Aspekte zur Motivationssteigerung der Schüler:innen, während sich hingegen die verpflichtende Teilnahme an einem Projekt oder Misserfolge bei der Durchführung der Projektaufgaben negativ auf die Motivation auswirken können. Eine Unterstützung der Schüler:innen durch Lehrer:innen oder Mentor:innen ist daher notwendig, um letzteres zu vermeiden (Aivelo & Huovelin, 2020; Lüsse et al., 2022a; Silva et al., 2016).

Kenntnisse über Inhalte, Abläufe und die Natur der Naturwissenschaften: Dieses vierte Lernziel umfasst das Wissen und Verstehen von wissenschaftlichen Inhalten (z. B. Faktenwissen), der wissenschaftlichen Arbeitsweisen, zum Beispiel in Bezug auf die von Wissenschaftler:innen verwendeten Methoden und Kenntnisse über die Natur der Naturwissenschaften.

In mehreren Citizen Science-Projekten wurde die Entwicklung des Wissens der Teilnehmenden zu projektspezifischen Inhalten untersucht, jedoch ebenfalls mit unterschiedlichen Ergebnissen (Phillips et al., 2018). Ein Wissenszuwachs zu projektspezifischen Inhalten wurde unter anderem in einem Citizen Science-Projekt mit der Fragestellung „What is happening to bees?“ (Baptista et al., 2018) festgestellt. Im Gegensatz dazu verfügten erfahrene Teilnehmer:innen des Projektes „Water Action Volunteer“ (Overdeest et al., 2004) in einer Wissensabfrage nicht über mehr Faktenwissen als unerfahrene Teilnehmer:innen, was darauf zurückgeführt wird, dass wahrscheinlich überwiegend bereits interessierte Personen mit entsprechendem Vorwissen an dem Projekt teilgenommen haben.

Auch hinsichtlich der Wirkung von Citizen Science auf das Wissen und Verstehen wissenschaftlicher Arbeitsweisen sind die Ergebnisse verschiedener Studien unterschiedlich (Phillips et al., 2018). In dem Projekt „The Birdhouse Network“ (Brossard et al., 2005) wurde zwar eine positive Wirkung hinsichtlich des Wissens der Teilnehmer:innen zur Biologie von Vögeln festgestellt, jedoch nicht auf ihr Verständnis von wissenschaftlichen Arbeitsweisen oder ihre Einstellungen zur Wissenschaft und Umwelt. Ballard et al. (2008) haben hingegen anhand von Interviews abgeleitet, dass Teilnehmer:innen von partizipativen Forstwirtschaftsprojekten ein höheres Verständnis von wissenschaftlichen Prozessen entwickelt haben.

Die Natur der Naturwissenschaften beinhaltet als Teilaspekt von Scientific Literacy mehrere Kerndimensionen, die von Urhahne et al. (2008) auf Basis einer Literaturanalyse identifiziert wurden. Folgende Dimensionen konnten empirisch nachgewiesen werden (vgl. Tabelle 6, S. 79).

Tabelle 6: Empirisch nachweisbare Kerndimensionen der Natur der Naturwissenschaften (Urhahne et al., 2008), beschrieben durch Kremer & Mayer (2013, S. 82).

Dimension	Beschreibung
Herkunft des Wissens	„Das naturwissenschaftliche Wissen wird nicht allein von Autoritäten an die Lernenden weitergegeben, sondern kann auch von den Lernenden selbst entdeckt und erarbeitet werden. Menschen aller Kulturen können mit ihren Ideen etwas zum naturwissenschaftlichen Wissensfundus beitragen [...]“.
Sicherheit des Wissens	„Unser heutiges naturwissenschaftliches Wissen ist zwar relativ verlässlich und dauerhaft, aber nie vollkommen sicher. Bestehende Theorien und Konzepte sind immer als vorläufig zu betrachten. Es kann stets neues Wissen zu bereits intensiv beforschten Gebieten hinzukommen. Auch können zwei Theorien, die das gleiche Phänomen erklären [sic] nebeneinander gültig sein, so lange keine dagegen sprechenden Beweise vorliegen [...]“.
Rechtfertigung des Wissens	„Das naturwissenschaftliche Wissen beruht auf Beobachtungen, Experimenten, rationalen Begründungen und Skepsis. Experimente stellen einen geeigneten Weg dar, das naturwissenschaftliche Wissen zu rechtfertigen. Experimentelle Daten können die eigenen Vorstellungen unterstützen und zeigen, ob eine Behauptung sich als glaubhaft erweist. Ein einzelnes Experiment, so überzeugend es auch sein mag, kann jedoch noch keine naturwissenschaftliche Theorie beweisen [...]“.
Entwicklung des Wissens	„Das naturwissenschaftliche Wissen unterliegt einem fortwährenden Entwicklungs- und Veränderungsprozess. Der Wissenswandel wird z.B. durch neue Technologien und verbesserte Forschungsmöglichkeiten unterstützt. Die Veränderungen des naturwissenschaftlichen Wissens gehen jedoch nicht mit einer Annäherung an eine absolute Wahrheit einher. Die Geschichte der Naturwissenschaften verdeutlicht den evolutionären und revolutionären Charakter des Faches [...]“.
Einfachheit des Wissens	„Naturwissenschaftliches Wissen wird mit einer Tendenz zur Einfachheit formuliert, ohne die Komplexität natürlicher Phänomene außer Acht zu lassen. In den Naturwissenschaften herrscht das Bestreben [sic] mit einer möglichst kleinen Anzahl von Konzepten eine möglichst große Anzahl von Beobachtungen erklären zu können. Naturwissenschaftliche Theorien werden eher allgemein und umfassend als spezifisch und detailliert formuliert [...]“.
Zweck der Naturwissenschaften	„Die Naturwissenschaften sind auch der Versuch, natürliche Phänomene zu beschreiben, zu erklären und vorherzusagen. Eine Zielsetzung von Naturwissenschaften ist es, Erfahrungen des Menschen mit der belebten und unbelebten Natur in eine rational nachvollziehbare Ordnung zu bringen [...]“.
Kreativität von Naturwissenschaftler:innen	„Die Gewinnung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse ist kein vollkommen rationaler Prozess. Die Entwicklung naturwissenschaftlichen Wissens erfordert die Kreativität und den Einfallsreichtum des Naturwissenschaftlers. Naturwissenschaftliche Konzepte beruhen auf enormen intellektuellen Leistungen, die ohne die Inspiration und Vorstellungskraft der Wissenschaftler nicht möglich gewesen wären [...]“.

Lorke und Schmid-Loertzer (2021) haben die Wirkung von Citizen Science-Projekten auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, ausgehend von einer Scopus- und Google-Scholar-Literaturrecherche, anhand verschiedener Studien untersucht. Von insgesamt vier einbezogenen Projekten, in denen Citizen Science zumindest anteilig praktiziert wurde, konnte in drei Projekten ein positiver Einfluss von Citizen Science auf die Ansichten beziehungsweise das Verständnis der Teilnehmer:innen zur Natur der Naturwissenschaften festgestellt werden (Jones et al., 2018; Peters-Burton, 2015; Straub, 2020). In dem Projekt „Dem Plastikmüll auf der Spur“ (Kruse et al., 2020) hat sich das Verständnis der teilnehmenden Schüler:innen hinsichtlich einiger Dimensionen der Natur der Naturwissenschaften zwar signifikant verbessert (10 – 13 Jährige: Herkunft, Sicherheit, Entwicklung, Rechtfertigung, 14 – 16 Jährige: Herkunft,

Rechtfertigung), jedoch hinsichtlich der Dimension „Zweck der Naturwissenschaften“ signifikant verschlechtert. Letzteres führen Kruse et al. (2020) auf Diskrepanzen zwischen dem Monitoringdesign und dem von Urhahne et al. (2008) entwickelten Fragebogen zu den oben dargestellten Dimensionen zurück.

Wissenschaftsmethodische Kompetenzen: Unter wissenschaftsmethodischen Kompetenzen fassen Phillips et al. (2018) praktische Tätigkeiten wie das Stellen und Beantworten von Fragen, das Sammeln, Analysieren und Interpretieren von Daten, die Beweisführung oder das Kommunizieren von Ergebnissen zusammen. Citizen Science-Projekte bringen aufgrund des praktischen Charakters ein hohes Potenzial mit, entsprechende wissenschaftliche Fähigkeiten zu fördern. Aus wissenschaftlicher Perspektive liegt der Fokus häufig darauf, dass Teilnehmer:innen befähigt werden, Daten in ausreichender Qualität zu sammeln und zu protokollieren, wobei verschiedene Methoden der Datensammlung, beispielsweise GPS-Geräte, Thermometer oder Regenmesser eingesetzt werden können. Mehrere in dem Review einbezogene Studien zeigten eine positive Wirkung der Teilnahme auf wissenschaftsmethodische Fähigkeiten, zum Beispiel in Bezug auf die Datenerhebung, die Formulierung von Forschungsfragen oder die Entwicklung von Hypothesen (Becker et al., 2013; Crall et al., 2012; Meyer et al., 2014). In weiteren Studien wurde die Qualität der erhobenen Citizen Science-Daten mit von Expert:innen gesammelten Daten verglichen, um die Fähigkeiten der Teilnehmer:innen und das Potenzial von Citizen Science zu bewerten (Phillips et al., 2018). Beispielsweise wurde aus den Daten des Citizen Science-Projektes „Stunde der Gartenvögel“ für 86,5 % der untersuchten Vogelarten ein gleicher Bestandstrend abgeleitet wie aus den Daten des offiziellen Monitoringprogramms (NABU-Bundesverband, 2019).

Auch im schulischen Kontext wurden in einigen Studien bereits signifikante Lernerfolge beobachtet, insbesondere wenn die Teilnehmer:innen in die Interpretation, Präsentation oder Bewertung der Ergebnisse einbezogen wurden (Lüsse et al., 2022a). Aufgrund der geringen Anzahl an vorhandenen Studien zu jeweils nur einzelnen Aspekten der wissenschaftsmethodischen Kompetenzen ist im Allgemeinen weiterer Forschungsbedarf vorhanden (Phillips et al., 2018).

Verhalten und Verantwortungsbewusstsein: Neben den bereits erläuterten Bildungszielen bringt Citizen Science durch das Engagement der Teilnehmer:innen das Potenzial zu Verhaltensänderungen oder einer Entwicklung des Verantwortungsbewusstseins für die Umwelt mit. Phillips et al. (2018) definieren unter „Behavior and Stewardship“ messbare Handlungen der Teilnehmer:innen, beispielsweise eine Verringerung des Wasserverbrauchs, die über die eigentliche Projektaktivität hinaus gehen. Bisher sind nur wenige Studien zu den Wirkungen von Citizen Science auf Verhalten und Verantwortungsbewusstsein zu finden, die darüber hinaus differente Ergebnisse aufweisen (Phillips et al., 2018). So konnte in einigen Projekten ein gesteigertes lokales oder politisches Engagement, beispielsweise zum Schutz von Meeresschildkröten, festgestellt werden, während in anderen Projekten keine oder nur geringe

Verhaltensänderungen, zum Beispiel in Bezug auf invasive Pflanzen, beobachtet wurden (Cornwell & Campbell, 2012; Jordan et al., 2011; Toomey & Domroese, 2013).

Im schulischen Kontext können Citizen Science-Projekte Schüler:innen bei der Entwicklung eines kritischen Urteilsvermögens, der Berufswahl und der Reflexion ihrer Bedeutung als Bürger:in unterstützen. Auch direkte Verhaltensänderungen können durch Citizen Science-Projekte bewirkt werden, wie das Citizen Science-Projekt „ForskarFredags massexperiment 2020“ zeigte, in dem die Lebensmittelverschwendung der am Projekt teilnehmenden Klassen um 16 % zurückgegangen ist (Lüsse et al., 2022a; Vetenskap & Allmänhet, 2021).

Kompetenzförderung einer naturwissenschaftlichen Bildung: Weitere Potenziale von Citizen Science in der Schule werden im Beitrag „Citizen Science & Schule - Wie Schülerprojekte die Forschung zu Themen der Nachhaltigkeit vorantreiben können“ (Brockhage et al., 2021a) diskutiert, in welchem das Zusammenspiel von Citizen Science mit curricular eingebundenen Kompetenzbereichen und der Bildung für nachhaltige Entwicklung dargestellt wird (vgl. Abbildung 29, S. 82). Citizen Science ermöglicht durch die Teilhabe an echten Forschungsprojekten eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit verschiedenen Themen der Nachhaltigkeit und eine multiperspektivische Betrachtung umweltrelevanter Fragestellungen. Anhand der Ergebnisse eines Citizen Science-Projektes können darüber hinaus fundierte Lösungsstrategien abgeleitet und der eigene Einfluss auf die Umwelt reflektiert werden, sodass Citizen Science viele Schlüsselkompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung (vgl. Tabelle 2, S. 29) einbeziehen kann (Rieckmann, 2018a). Darüber hinaus werden neben inhaltsbezogenen, projektspezifischen Kompetenzbereichen auch prozessbezogene Kompetenzen der Schüler:innen durch die Teilnahme an Citizen Science-Projekten gefördert, indem diese durch die direkte Auseinandersetzung mit und Partizipation an der Erforschung von naturwissenschaftlichen Fragestellungen Einblicke in den naturwissenschaftlichen Erkenntnisprozess erhalten. Dabei lernen sie fachspezifische Denk- und Arbeitsweisen kennen, erarbeiten wissenschaftliche Literatur und kommunizieren und nutzen die Ergebnisse, um fachlich fundierte Lösungsstrategien zu entwickeln. In Bezug auf Umweltthemen bieten Citizen Science-Projekte einen konkreten Kontext, in dem das eigene Handeln und die Rolle als Teil der Gesellschaft reflektiert werden können (Niedersächsisches Kultusministerium, 2015). Besonders erfolgsversprechend zur Erreichung der Bildungsziele sind Projekte, in denen die Lernenden in möglichst viele Phasen des wissenschaftlichen Forschungsprozesses einbezogen werden (Lüsse et al., 2022a).

Ausgehend von dem dargestellten Potenzial von Citizen Science für den schulischen Unterricht fordert die AG Citizen Science in Schulen in Deutschland: „Jede Schulklasse sollte einmal bei einem Citizen-Science-Projekt mitmachen“ (Bürger schaffen Wissen, o. J.).

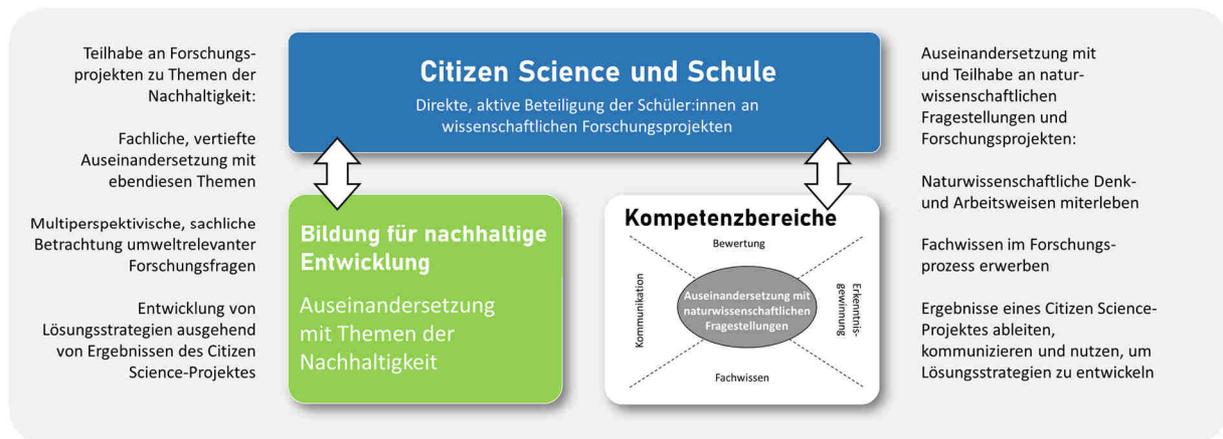


Abbildung 29: Zusammenführung von Citizen Science, BNE und naturwissenschaftlichem Unterricht (eigene Abbildung unter Verwendung von Niedersächsisches Kultusministerium, 2015, S. 7)

Mit dem Beitrag zu einer Bildung für nachhaltige Entwicklung unterstützt Citizen Science auch die Umsetzung der SDGs, konkret des Unterziels 4.7 („Bis 2030 sicherstellen, dass alle Lernenden die notwendigen Kenntnisse und Qualifikationen zur Förderung nachhaltiger Entwicklung erwerben [...]“ (A/RES/70/1, 2015)) und des Unterziels 12.8 („Bis 2030 sicherstellen, dass die Menschen überall über einschlägige Informationen und das Bewusstsein für nachhaltige Entwicklung und eine Lebensweise in Harmonie mit der Natur verfügen“ (A/RES/70/1, 2015)).

2.3.5. Der Citizen Science-Ansatz im Bereich der Nachhaltigkeit

Bereits bevor die SDGs der Vereinten Nationen und entsprechende Indikatorenrahmen in Kraft getreten sind, wurde die Bedeutung von Citizen Science für Monitoringprogramme für verschiedene Umweltproblemstellungen erkannt (Conrad & Hilchey, 2011). Vorteile des Citizen Science-Ansatzes gegenüber traditionellen Ansätzen sehen die Autor:innen in der Demokratisierung der Umwelt mit dem Ziel, Umweltwissen(-schaft) für die Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Weitere Vorteile sind ein höheres Verständnis der Bevölkerung für ihren Einfluss auf die lokale Umwelt und die Berücksichtigung verschiedener Stakeholder und der Öffentlichkeit bei lokalen Umweltfragen wie beispielsweise dem Umgang mit lokalen Ökosystemen. Darüber hinaus sind Monitoringprogramme mithilfe des Citizen Science-Ansatzes oftmals günstiger zu realisieren als staatliche Programme und können in größeren Gebieten zu flexiblen Zeitpunkten durch die Teilnehmer:innen durchgeführt werden.

Mit Inkrafttreten der SDGs stellt sich die Frage, inwieweit Citizen Science auch als Methode zur Erreichung und zum Indikatorrahmenwerk der Nachhaltigkeitsziele beitragen kann. West & Pateman (2017) haben für 42 der 169 Unterziele Vorschläge abgeleitet, wie Citizen Science bei der Definition von nationalen und regionalen Zielen und Indikatoren, bei dem Monitoring oder bei der Implementierung der SDGs unterstützen kann. Mit 26 von den Autor:innen identifizierten Unterzielen liegt ein Fokus des Potenzials von Citizen Science auf der Unterstützung des Monitorings der Indikatoren zu verschiedenen SDGs, beispielsweise durch ein Monitoring der

Verteilung von Arten und Lebensräumen, um die Erhaltung, Wiederherstellung oder nachhaltige Nutzung verschiedener Ökosysteme zu überwachen (Ziel 15, Unterziel 15.1).

Die Implementierung von Citizen Science in das SDG-Indikatorrahmenwerk wird von Fraisl et al. (2020) anhand eines systematischen Reviews der SDG Indikatoren sowie bereits durchgeführter und laufender Citizen Science-Projekte konkretisiert. Obgleich für 32 % der umweltbezogenen SDG-Indikatoren unzureichende Daten für eine globale Überwachung des Fortschritts der SDGs vorliegen und traditionelle Ansätze zur Datenerhebung insbesondere für Entwicklungsländer eine große finanzielle Belastung darstellen, wird der Citizen Science-Ansatz im Allgemeinen noch nicht als Datenquelle berücksichtigt. Dabei könnten durch den Citizen Science-Ansatz, so Fraisl et al. (2020), zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Daten gesammelt und dadurch bestehende Datenlücken geschlossen werden. Zu fünf SDG-Indikatoren wurde von den Autor:innen jeweils mindestens ein Citizen Science-Projekt gefunden, das bereits direkt zur Berichterstattung des Indikators auf nationaler oder globaler Ebene als primäre Datenquelle oder als Ergänzung für zeitliche oder räumliche Datenlücken im regulären Monitoringprogramm genutzt wird. Beispielsweise wird anhand der Daten aus dem OpenStreetMap-Projekt der Anteil der ländlichen Bevölkerung mit maximalem Abstand von 2 km zu einer ganzjährig befahrbaren Straße bestimmt (Indikator 9.1.1.), um eine „hochwertige, verlässliche, nachhaltige und widerstandsfähige Infrastruktur auf[zu]bauen“ (A/RES/70/1, 2015; Vincent & Civil Design Solutions, 2018). Auch hinsichtlich der Meeresverschmutzung durch Plastik (Indikator 14.1.1.) werden bereits Projekte entwickelt und durchgeführt, die in die Berichterstattung einzelner Länder eingehen. Anhand der Beobachtungsdaten von Citizen Science-Projekten werden darüber hinaus für die biologische Vielfalt relevante Schutzgebiete identifiziert, wodurch diese einen direkten Beitrag zu den Indikatoren 15.4.1 und 15.1.2 liefern. BirdLife International nutzt zudem Vogelbeobachtungen aus Citizen Science-Projekten, um Informationen über bedrohte Vogelarten zusammenzustellen, welche wiederum für den Indikator 15.5.1 herangezogen werden (Fraisl et al., 2020). Das Potenzial von Citizen Science für die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele wird durch die genannten Projekte bereits deutlich, obgleich noch weitere Studien fehlen, um die Eignung von Citizen Science für verschiedene SDG-Indikatoren zu evaluieren. Fraisl et al. (2020) haben in ihrem Review darüber hinaus zu jedem SDG mindestens ein Citizen Science-Projekt gefunden, das entweder direkt zur Bestimmung von einem der entsprechenden SDG-Indikatoren oder als unterstützende Datenquelle für weitere Informationen, die mit einem Indikator zusammenhängen, herangezogen werden könnte. Inwieweit der Beitrag von Citizen Science zu den konkret 76 benannten SDG-Indikatoren gelingen kann, bleibt vorerst unbeantwortet.

Entsprechend einer Selbsteinschätzung von 125 Citizen Science-Protagonisten aus einer Umfrage von Moczek et al. (2021) tragen Citizen Science-Projekte besonders häufig zu den SDGs 3 „Gesundheit und Wohlergehen“, 4 „Hochwertige Bildung“ und 15 „Leben an Land“ bei. Weiteres Potenzial für einen Beitrag zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele wird von den

Befragten für die SDGs 11 „Nachhaltige Städte und Gemeinden“ und 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“ gesehen. Die Beiträge wurden nach Angabe der Befragten überwiegend durch die Handlungsfelder „Monitoring“ (Sammlung, Aufbereitung und Bereitstellung von Daten) und „Bewusstseinsbildung“ (Erkennen von Problemen, Informieren und Veröffentlichen, Sensibilisieren) geleistet. Trotz der zahlreichen Citizen Science-Projekte, in denen ein Monitoring durchgeführt wird, gaben nur 29,5 % der Befragten an, ihre Daten an Behörden weiterzugeben, immerhin 38,6 % der Projekte haben ihren Datensatz öffentlich zugänglich veröffentlicht. Diese Divergenz zwischen der von den Befragten erkannten Relevanz von Monitoring-Daten und der fehlenden Datenweitergabe spiegelt sich darin wider, dass sich 49,5 % der Citizen Science-Akteure Unterstützung zur Meldung von Daten an Behörden oder die Vereinten Nationen wünschen und eine entsprechende, einfache Infrastruktur zum Datenaustausch aktuell fehlt (Moczek, Voigt-Heucke et al., 2021). Eine Möglichkeit, Citizen Science-Daten effektiver über die Projekte hinaus für eine nachhaltige Entwicklung zu nutzen, ist die strukturelle Verankerung und Etablierung eines verbesserten Datenmanagements für Citizen Science auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene, zum Beispiel durch Behörden, Bundesämter oder internationale Institutionen. Erste Konzepte und strategische Rahmenwerke zur Implementierung von Citizen Science wurden bereits in verschiedenen Ländern entwickelt, beispielsweise für das Umweltbundesamt in Deutschland (Rückert-John et al., 2017) oder die schottische Umweltschutzbehörde SEPA (Pocock et al., 2014).

Die World Water Quality Alliance (2021) und das European Marine Board (Garcia-Soto et al., 2017) empfehlen den Citizen Science-Ansatz konkret für die Untersuchung von Meeres-, Küsten- und Oberflächengewässern und Grundwasser vor dem Hintergrund, dass Citizen Science als potenziell leistungsfähiges Instrument zur Generierung großer, räumlich und zeitlich hoch aufgelöster Datenmengen genutzt werden kann. Auf diese Weise kann die Wasserqualität in noch nicht oder unzureichend beprobten Gebieten untersucht und gleichzeitig ein Bewusstsein für den Gewässerschutz geschaffen werden. Bereits in zahlreichen Projekten wurde dieses Potenzial von Citizen Science genutzt und die Bedeutung in der Wissenschaft wächst weiter (Thornhill et al., 2019). Einige dieser Projekte haben sich bereits der Stickstoffproblematik von Gewässern gewidmet, wie in Tabelle 7 (S. 85) dargestellt wird. Die Vielfältigkeit von Citizen Science zum Thema Gewässerschutz ist jedoch weitaus größer. Anhang C gibt einen Überblick über weitere Citizen Science-Aktivitäten, in denen Gewässer hinsichtlich unterschiedlicher Untersuchungsparameter (z. B. Plastikmüllverschmutzung, Wasserfarbe, Plankton) untersucht werden. Die Auflistungen spiegeln die Vielfältigkeit verschiedener Ansätze wider und geben einen Überblick über aktuelle Forschungsprojekte und -ergebnisse, beanspruchen jedoch jeweils keine Vollständigkeit.

Tabelle 7: Übersicht verschiedener aktueller und bereits abgeschlossener Citizen Science-Projekte zur Untersuchung von Meeres-, Küsten- und Oberflächengewässern sowie Trink- und Grundwasser, welche den Parameter Nitrat oder Gesamtstickstoff berücksichtigen (Ausschnitt aus Anhang C).

Citizen Science-Projekte	Aktivitäten	(Teil-)Ergebnisse	Quellen/Literatur
Citizen Science-Projekte am Bronx River	<p>Wöchentliche Untersuchung der Wasserqualität am Bronx River von Freiwilligengruppen anhand der folgenden Parameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wassertemperatur - pH-Wert - Gelöster Sauerstoff - Indikatorkeime für Fäkalien - Salzgehalt, Leitfähigkeit und gelöste Feststoffe - Transparenz - Nährstoffe - Algenblüte 	<p>Beurteilung der Wasserqualität entlang des Flusses und Beobachtung zeitlicher Schwankungen und langjähriger Entwicklungen für viele der angegebenen Parameter, Hinweise auf illegale Einleitung von Fäkalien und Algenblüten;</p> <p>Daten zu Nitrat, Nitrit und Gesamtstickstoff ließen sich nicht verwenden, da die Nachweisgrenze zu hoch war, um Unterschiede zwischen den Messstationen zu erkennen</p>	<p>Projektbeschreibung: https://bronxriver.org/re-source/p-citizen-science-on-the-bronx-river-an-analysis-of-water-quality-data¹</p> <p>Ergebnisse: Bronx River Alliance, 2015</p>
Citizen Science-Projekt am Fluss Amanalco in Mexiko	<p>Untersuchung von 18 Probenahmestellen am Fluss Amanalco und in der Umgebung durch die Teilnehmenden vor Ort hinsichtlich verschiedener Parameter (Wassertemperatur, pH, Alkalinität, Härte, gelöster Sauerstoff, Trübung, Wasserdurchfluss).</p> <p>Probenahme zur Einsendung in Labore, in denen bakteriologische Parameter und der Nährstoffgehalt (Ammonium, Nitrit, Nitrat, gelöster reaktiver Phosphor) bestimmt wurden</p>	<p>Ermittlung der Wasserqualität entlang des Flusses;</p> <p>Korrelation verschiedener Parameter mit dem Flächenanteil städtischer Siedlungen (z. B. partikelförmiger organischer Phosphor und Stickstoff, Gesamtstickstoff) und dem landwirtschaftlichen Flächenanteil für verschiedene Nutzungsarten (z. B. Korrelation der Flächenanteile für den Anbau von Mais, Hafer und Kartoffeln mit der Nitratkonzentration)</p>	<p>Projektbeschreibung und Ergebnisse: Calderón Cendejas et al., 2021</p>
Hydro-Crowd	<p>Beprobung von Fließgewässern in Deutschland von Interessierten an einem Stichtag, Analyse der 280 eingesendeten Proben durch Wissenschaftler:innen hinsichtlich des gelösten Stickstoffs (Nitrat, Ammonium und gelöster, organischer Stickstoff)</p>	<p>Korrelationen zwischen der Nitratkonzentration und Anteil der Ackerflächen, dem Humusgehalt des Bodens und der Bevölkerungsdichte</p>	<p>Projektbeschreibung: https://www.uni-giessen.de/fbz/fb09/institute/ilr/wasser/projekte/hydrocrowd¹</p> <p>Ergebnisse: Breuer et al., 2015</p>
FLOW	<p>Untersuchung des ökologischen Zustands von Gewässern gemeinsam mit interessierten Bürger:innen und Expert:innen in Messkampagnen anhand verschiedener Parameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gewässerstrukturgüte - Nährstoffbelastung - Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft wirbelloser Zeigerarten 	<p>Bewertung von zahlreichen Gewässern entsprechend des SPEAR-Indexes anhand von 85 Beprobungen</p>	<p>Projektbeschreibung: http://www.flow-projekt.de/index.php/projekt¹</p> <p>Ergebnisse: https://home.uni-leipzig.de/idiv/flow/map/¹</p>

<p>Fresh-Water Watch</p>	<p>Selbstständige Untersuchung von folgenden Parametern in Süßwasser durch geschulte Teilnehmer:innen mithilfe eines Testkits:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nitratkonzentration - Phosphatkonzentration - Trübung <p>Die Messungen werden regelmäßig von lokalen Gruppen oder zu bestimmten Stichtagen in sogenannten „WaterBlitz“ Events von allen Interessierten durchgeführt</p>	<p>Überwachung von lokalen Problemfeldern und Aktivitäten, zum Beispiel der Effizienz von Fluss- und Feuchtgebietsanierungen in Großbritannien oder der Verringerung der Auswirkungen von landwirtschaftlichen Aktivitäten; Ermittlung der Ursachen von Verschmutzungsproblemen auf Süßwasserressourcen; u. A. in China, Malaysia, Indonesien, Italien, dem Vereinigten Königreich, Sambia, Tansania, Brasilien, Argentinien und Hongkong</p> <p>Ableitung globaler Trends, zum Beispiel in Bezug auf die Nitrat- und Phosphatproblematik und die Einflüsse hierauf (z. B. Bevölkerungszahl, Abwasser)</p> <p>Untersuchung des Beitrags der Citizen Science-Daten zur Berichterstattung zu SDG-Indikator 6.3.2 in England und Sambia: 80 % Übereinstimmung der aus den Citizen Science-Daten abgeleiteten SDG-Scores mit aus staatlichen Messungen abgeleiteten SDG-Scores in England, Erhöhung der insgesamt untersuchten Wasserkörper in Sambia durch den Citizen Science-Ansatz um 36 %</p>	<p>Projektbeschreibung: https://www.freshwater-watch.org/¹</p> <p>Ergebnisse: https://www.freshwater-watch.org/pages/local-issues/¹</p> <p>Bishop et al., 2020</p>
<p>seen transparent</p>	<p>Bestimmung der Sichttiefe und Sauerstoffsättigung durch Teilnehmer:innen in über 40 Seen im Kreis Plön und Entnahme von Wasserproben, die im Anschluss von Expert:innen chemisch-physikalisch untersucht werden</p>	<p>Beobachtung und Bewertung der Wasserqualität von über 40 Seen sowie jahreszeitlicher und langjähriger Verläufe der Parameter</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sichttiefe - Sauerstoffsättigung - Gesamt-Phosphor - Nitratstickstoff - pH-Wert - gelöster organischer Kohlenstoff - Leitfähigkeit <p>Bewertung des Nährstoffgehalts der Seen anhand der Sichttiefen, wobei die Sommer-Sichttiefen signifikant mit der mittleren Tiefe der Seen sowie dem Gehalt an Gesamt-Phosphor korrelieren</p>	<p>Projektbeschreibung: http://www.seen-transparent.de/¹</p> <p>Ergebnisse: http://www.seen-transparent.de/files/downloads/ergebnisbericht_bd_3_zusammenfassung/¹</p>
<p>Aqua Check</p>	<p>Probenahme an verschiedenen Stellen der Saale durch Teilnehmer:innen, die gemeinschaftlich hinsichtlich chemischer, biologischer und physikalischer Parameter untersucht werden</p>	<p>Noch keine (Zwischen-)Ergebnisse veröffentlicht, das Projekt läuft bis September 2022</p>	<p>Projektbeschreibung: https://ms-halle.science/flussaktivitaeten/aqua-check/¹</p>

CS:iDrop®	Untersuchung der Unterschiede verschiedener chemischer Parameter von Trinkwasser (z. B. Kupfer, Eisen und Nitrat) zwischen der Hausübergabestelle und dem Wasserhahn mittels eines Analysekooffers und im Messlokal des Alfred-Krupp-Schülerlabors gemeinsam durch Teilnehmer:innen und Wissenschaftler:innen	Noch keine (Zwischen-) Ergebnisse veröffentlicht, die Haupterhebung beginnt Ende August 2022	Projektbeschreibung: https://www.ruhr-uni-bochum.de/didachem/CSiDrop.htm ¹
-----------	---	--	---

¹ Alle Webseiten zuletzt aufgerufen am 23.12.2022

Obgleich der Citizen Science-Ansatz für die Erforschung der Wasserqualität immer mehr Bedeutung erhält, ist weiterhin Forschungsbedarf vorhanden, um das Potenzial von Citizen Science für die Gewässerforschung und als Unterstützung der bereits vorhandenen Monitoringprogramme zu evaluieren (Garcia-Soto et al., 2017; WWQA, 2021). Anhand der dargestellten Projekte und in Kombination mit dem Forschungsbedarf der Wirkungen von Citizen Science für die Bildung wurde konkret folgende Forschungslücke identifiziert, die in der vorliegenden Arbeit fokussiert wird.

2.4. Identifizierte Forschungslücke

Citizen Science ist ein junges Forschungsfeld mit vielversprechendem Potenzial in Bezug auf Bildung und Forschung. Um eine wissenschaftlich fundierte Begründung zur Etablierung dieses Ansatzes in der Forschung und Bildung zu schaffen oder weitere Forschungslücken und Weiterentwicklungsbedarfe zu identifizieren, gilt es, dieses Potenzial weiter zu erforschen. Abgeleitet aus der Theorie und dem aktuellen Stand der Forschung ergibt sich zusammengefasst folgender konkreter Forschungsbedarf zum Citizen Science-Ansatz, klassifiziert in den Beitrag von Citizen Science zur fachwissenschaftlichen Forschung, zur naturwissenschaftlichen Schulbildung und zur Umweltbildung (vgl. Abbildung 30), dem mit dieser Dissertation begegnet werden soll.



Abbildung 30: Identifizierter Forschungsbedarf im Bereich Citizen Science (eigene Abbildung).

In Bezug auf die fachwissenschaftliche Forschung gilt es, den Vorschlag der World Water Quality Alliance (2021) und des European Marine Board (Garcia-Soto et al., 2017), Citizen Science als Ansatz für die Gewässerüberwachung verschiedener Gewässertypen zu nutzen, zu evaluieren. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt dabei auf der Stickstoffbelastung von Gewässern, die in einigen Citizen Science-Projekten bereits untersucht wurde. In Citizen Science-Projekten am Bronx River konnten erhobene Nitrat-Daten aufgrund einer zu ungenauen Messmethode jedoch nicht ausgewertet werden (Bronx River Alliance, 2015). Das Projekt HydroCrowd und die partizipative Seen-Beobachtung im Kreis Plön zeigen hingegen, dass die Stickstoffbelastung von Gewässern grundsätzlich erfolgsversprechend mit dem Citizen Science-Ansatz untersucht werden kann, wobei die Öffentlichkeit in diesen Ansätzen lediglich in die Probenahme eingeschlossen wurde. Die Proben wurden anschließend von Expert:innen untersucht, was einen großen Zeit- und Kostenaufwand für diese mit sich bringt (Breuer et al., 2015; Hofmann, o. J.). Das Projekt FreshWater Watch bezieht Teilnehmende intensiver in die Forschung ein, indem die Analyse der Wasserproben vor Ort mit einem Analysekit von den Teilnehmenden durchgeführt werden kann (Thornhill et al., 2019). In den Projekten FLOW und Aqua Check werden Wasserproben gemeinsam von Wissenschaftler:innen und Bürger:innen analysiert (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, 2022; science2public, 2021). Verschiedene Parameter wie beispielsweise den pH-Wert konnten Teilnehmer:innen eines Citizen Science-Projektes in

Mexiko zwar vor Ort bestimmen, für die Nährstoffbelastung wurden jedoch ebenfalls Proben in ein Labor gesendet (Calderón Cendejas et al., 2021). Die dargestellten Ansätze berücksichtigen jeweils nur Oberflächengewässer. Trinkwasser wird als Forschungsgegenstand von dem Projekt CS:iDrop® einbezogen, in welchem partizipativ die Beeinflussung der Trinkwasserqualität auf den letzten Metern in den Haus-internen Leitungen untersucht wird (Ruhr-Universität Bochum, 2022). Regenwasser ist Forschungsgegenstand eines Citizen Science-Projektes in Nordamerika, in welchem die Funktionalität von Regenwasserinfrastrukturen untersucht wird, wobei die Stickstoffbelastung keine Rolle spielt (Meixner et al., 2021).

Im Allgemeinen zeigen verschiedene Projekte, dass Citizen Science als Ansatz für die Forschung zu verschiedenen Gewässertypen herangezogen werden kann und qualitativ hochwertige Daten und Ergebnisse liefert. Ein ganzheitliches Citizen Science-Konzept, mit welchem verschiedene Gewässertypen (z. B. Grundwasser, Oberflächengewässer und Regenwasser) über einen längeren Zeitraum von den Teilnehmer:innen untersucht werden, wurde jedoch noch nicht durchgeführt. Es stellt sich unter anderem die Frage, inwieweit Einflüsse auf die Nitratbelastung von verschiedenen Gewässertypen anhand eines solchen Citizen Science-Ansatzes, in dem die Teilnehmer:innen eigenständig die Nitratbelastung verschiedener Gewässertypen mit kostengünstigen und einfachen Messmethoden bestimmen, untersucht werden können.

In Bezug auf die Bildung ergibt sich als zweite Forschungsfrage, inwieweit Citizen Science-Projekte Wirkungen auf das allgemeine oder themenspezifische Umweltbewusstsein (Einstellungen, Verhalten und Kenntnisse zum Thema Gewässerschutz) zeigen und somit einen Beitrag zur Umweltbildung leisten können. Darüber hinaus bringt Citizen Science Möglichkeiten zur Förderung verschiedener naturwissenschaftlicher Bildungsziele mit, die in Kapitel 2.3.4 dargestellt wurden. Auch hier liegen nur einzelne Studienergebnisse vor, die durch die vorliegende Dissertation ergänzt werden sollen.

Um diesem Forschungsbedarf zu begegnen, wurde das im folgenden dargestellte Citizen Science-Projekt zur Nitratbelastung verschiedener Gewässer im Nordwesten Deutschlands konzipiert. Auf diesem aufbauend wurden die in Kapitel 4 und 5 dargestellten Studien durchgeführt, die sich in eine Hauptstudie zum fachwissenschaftlichen Beitrag von Citizen Science und eine Begleitstudie zum Bildungsbeitrag von Citizen Science gliedern.

3. Konzeption des Citizen Science-Projektes

3.1. Zielsetzung

Um die identifizierte Forschungslücke zu schließen, wird dem Citizen Science-Projekt die folgende Zielsetzung zugrunde gelegt, differenziert in die Bereiche der fachwissenschaftlichen Forschung und Bildung:

1. Beitrag zur fachwissenschaftlichen Forschung: Es wird mithilfe des Citizen Science-Ansatzes ein Monitoring der Nitratbelastung verschiedener Gewässertypen in einem definierten Beprobungsgebiet über einen definierten Zeitraum durchgeführt.
2. Beitrag zur Umweltbildung: Bürger:innen und Schüler:innen werden durch die Teilnahme am Citizen Science-Projekt oder durch öffentliche Projektangebote für die Stickstoffbelastung von Gewässern sensibilisiert.

Diese übergeordnete Zielsetzung richtet sich an verschiedene Zielgruppen, die in der folgenden Tabelle 8 erläutert und auf unterschiedliche Weise in das Projekt eingebunden werden.

Tabelle 8: Zielgruppen des Projektes, differenziert nach aktiv und passiv in das Citizen Science-Forschungsvorhaben eingebundenen Personen.

Zielgruppe (ZG)	Erläuterung
ZG1: Aktiv teilnehmende Bürger:innen	Bürger:innen, die als Citizen Scientists aktiv am Citizen Science-Projekt teilnehmen, indem sie die Nitratkonzentration von Gewässern in ihrer Region messen und an weiteren Angeboten des Projektes (z. B. Begleitbroschüren, interaktive Ausstellung, Diskussionsveranstaltungen/Ergebnispräsentationen) teilnehmen.
ZG2: Aktiv teilnehmende Schüler:innen	Schüler:innen, die als Forschungspat:innen aktiv am Citizen Science-Projekt teilnehmen, indem sie die teilnehmenden Bürger:innen bei dem Nitrat-Monitoring unterstützen, ggfs. freiwillig eigene Nitratmessungen durchführen und an weiteren Angeboten des Projektes (z. B. Begleitbroschüren, interaktive Ausstellung, Diskussionsveranstaltungen/Ergebnispräsentationen, Schülerlabore, digitale Seminare) teilnehmen. Die Schüler:innen erarbeiten in projektbegleitenden Seminarfächern zudem vertieft die Stickstoffproblematik und erforschen selbstständig ein Thema aus dem Bereich Nachhaltigkeit in einer Facharbeit, ggfs. mit Fokus auf die Stickstoffproblematik.
ZG3: Aktiv teilnehmende Lehrer:innen	Lehrer:innen, die aktiv am Citizen Science-Projekt teilnehmen, indem sie ein Seminarfach zum Thema „Stickstoffbelastung von Gewässern“ oder einem verwandten Thema anbieten und die Schüler:innen in ihrer Arbeit als Forschungspat:innen unterstützen.
ZG4: Aktiv teilnehmende Wissenschaftler:innen	Wissenschaftler:innen, die aktiv am Citizen Science-Projekt teilnehmen, indem sie die Forschungsfragen formulieren und das Forschungsdesign festlegen, das Projekt koordinieren sowie die im Projekt generierten Daten auswerten und entsprechende Ergebnisse kommunizieren.
ZG5: Passiv eingebundene Bürger:innen	Bürger:innen, die nicht am Citizen Science-Projekt teilnehmen, jedoch die darüberhinausgehenden Angebote des Projektes nutzen, z. B., indem sie die interaktive Ausstellung zur Stickstoffproblematik besuchen oder an den öffentlichen Ergebnispräsentationen teilnehmen.
ZG6: Passiv eingebundene Schüler:innen	Schüler:innen, die nicht am Citizen Science-Projekt teilnehmen, jedoch die darüberhinausgehenden Angebote des Projektes nutzen, z. B., indem sie ein Schülerlabor zur Stickstoffproblematik besuchen oder an öffentlichen Ergebnispräsentationen teilnehmen.
ZG7: Passiv eingebundene Lehrer:innen	Lehrer:innen, die nicht am Citizen Science-Projekt teilnehmen, jedoch die darüberhinausgehenden Angebote des Projektes nutzen, z. B., indem sie eine Lehrerfortbildung zum Thema Stickstoffbelastung besuchen oder an öffentlichen Ergebnispräsentationen teilnehmen.

Zur Erreichung der übergeordneten Zielsetzung wurden konkretisierte Feinziele formuliert, die in Anhang D zu finden sind und dort den Zielgruppen zugeordnet werden. Entsprechend der dargestellten Zielgruppen lassen sich drei übergeordnete Gruppen herausarbeiten, die aktiv an dem Citizen Science-Projekt partizipieren: Die Universitäten (Universität Osnabrück und Carl von Ossietzky Universität Oldenburg) mit den eingebundenen Wissenschaftler:innen, am Projekt teilnehmende Schulen, die wiederum Lehrer:innen und Schüler:innen als Zielgruppe beinhalten, und die teilnehmende Öffentlichkeit, welche aus den Bürger:innen als Citizen Scientists gebildet wird. Das im folgenden dargestellte Konzept orientiert sich an dieser Klassifizierung der Projektbeteiligten.

3.2. Konzeption und Aufbau

3.2.1. Allgemeines Konzept

Im Allgemeinen gliedert sich das Citizen Science-Projekt „Schüler und Bürger forschen zusammen mit Wissenschaftlern zum Thema Stickstoffbelastung von Gewässern“ in zwei Teilprojekte, die an den Universitäten Osnabrück und Oldenburg konzipiert, koordiniert und evaluiert wurden (vgl. Abbildung 31). Das Gesamtprojekt, bestehend aus beiden Teilprojekten, wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert (Aktenzeichen: 34540).



Abbildung 31: Gliederung des Projektes „Schüler und Bürger forschen zusammen mit Wissenschaftlern zum Thema Stickstoffbelastung von Gewässern“ (eigene Abbildung, in Anlehnung an Pietzner & Beeken, 2019, S. 23).

Teilprojekt 1: Das dieser Promotion zugrunde liegende Teilprojekt 1 wurde an der Universität Osnabrück durchgeführt und umfasst insbesondere das Nitrat-Monitoring sowie entsprechende begleitende fachwissenschaftliche Arbeitsbereiche und Bildungskonzepte. Über 18 Monate (Anfang September 2019 bis Anfang März 2021) haben etwa 600 Bürger:innen und 200 Schüler:innen gemeinsam mit den Wissenschaftler:innen der Universität Osnabrück die Nitratbelastung von Gewässern in den Landkreisen Osnabrück, Cloppenburg, Vechta, Emsland und der Stadt Osnabrück regelmäßig mit Nitrat-Teststäbchen untersucht. Die Schüler:innen haben dabei als sogenannte Forschungspat:innen agiert und die Bürger:innen bei den

Nitratmessungen unterstützt. Als Vorbereitung auf diese Aufgabe haben die Schüler:innen ein Seminarfach an einer der teilnehmenden Projektschulen und ein Schülerlabor an der Universität Osnabrück oder Oldenburg besucht. Das Schülerlabor und weitere Begleitmaterialien wurden zuvor (März 2019 bis August 2019) von den Wissenschaftler:innen beider Universitäten konzipiert. Die Messdaten wurden von den Bürger:innen und Schüler:innen vorrangig über eine Webseite an die Universität Osnabrück übermittelt und im Anschluss (April 2021 bis Februar 2022) von den Wissenschaftler:innen entsprechend der in Kapitel 3.3 folgenden Forschungsfragen ausgewertet und interpretiert. Innerhalb der Erhebungs- und Auswertungsphase haben die Bürger:innen weitere Informationsmaterialien erhalten, beispielsweise in Form einer digitalen, interaktiven Ausstellung zur Stickstoffproblematik. Ab März 2022 wurden die Ergebnisse des Nitrat-Monitorings von den Wissenschaftler:innen in verschiedenen Formaten veröffentlicht und gemeinsam mit den Teilnehmer:innen des Projektes und weiteren Projektpartner:innen diskutiert. Zudem wurde in einer Begleitstudie die Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes hinsichtlich der bereits dargestellten Bildungsziele mithilfe einer quantitativen Studie im Pre-/Postformat untersucht.

Das übergeordnete Konzept des Citizen Science-Projektes lässt sich anhand der folgenden Abbildung 32 zusammenfassen.



Abbildung 32: Konzeption des Citizen Science-Projektes „Schüler und Bürger forschen zusammen mit Wissenschaftlern zum Thema Stickstoffbelastung von Gewässern“ (eigene Abbildung).

Teilprojekt 2: An der Universität Oldenburg wurde eine das Projekt ergänzende Heim-Experimentierbox für die Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes entwickelt sowie die Nutzbarkeit und Wirksamkeit dieser Stickstoff-Box im Kontext des Citizen Science-Ansatzes untersucht (Lüsse, 2022). Mithilfe der Stickstoff-Box konnten etwa 100 interessierte Teilnehmer:innen verschiedene Aspekte der Stickstoffproblematik anhand von 15 Heim-Experimenten und einer Begleitbroschüre inhaltlich und experimentell erarbeiten. Die Stickstoff-Boxen wurden während der Erhebungsphase des Nitrat-Monitorings im August und September 2020

verteilt. Weitere Ausführungen zu Teilprojekt 2 zur Stickstoff-Box sind in Lüsse (2022) zu finden.

Gemeinsam wurden darüber hinaus weitere Bildungsmaterialien konzipiert und veröffentlicht, die in Kapitel 3.2.6 dargestellt werden. Eine Auflistung aller erstellten Materialien und der entsprechenden Urheber:innen ist in Anhang E zu finden.

Die Partizipation der Wissenschaftler:innen, Schüler:innen und Bürger:innen wird im Folgenden konkretisiert, angelehnt an das PPSR-Framework und die mit Citizen Science intendierten wissenschaftlichen und individuellen Outcomes (vgl. Kapitel 2.3.2 und 2.3.4, Phillips et al., 2018; Shirk et al., 2012). In Anhang F wird der Projektablauf mit der Aufgabenverteilung auf die verschiedenen Teilnehmer:innen schematisch dargestellt.

3.2.2. Partizipation der Wissenschaftler:innen

Vier Wissenschaftler:innen der Universitäten Oldenburg und Osnabrück haben das Citizen Science-Projekt entsprechend der im vorherigen Kapitel dargestellten Aufteilung in zwei Teilprojekte initiiert und koordiniert. Vor Beginn des Projektes (ab März 2019) wurden der Forschungsgegenstand definiert und entsprechende, übergeordnete Forschungsfragen abgeleitet (vgl. Kapitel 2.4 und 3.3). Als Input wurde neben dem wissenschaftlichen Interesse zum Potenzial und den Wirkungen von Citizen Science auch das öffentliche Interesse in der Projektplanung berücksichtigt. So nimmt die Nitratproblematik einen großen Stellenwert in der gesellschaftlichen Diskussion ein, die sich unter anderem in der hohen Medienwirksamkeit zeigt (vgl. Kapitel 2.1.5).

Aufbauend auf dem Untersuchungsgegenstand wurde das Konzept des Citizen Science-Projektes von den Wissenschaftler:innen herausgearbeitet und das Untersuchungsdesign für das Nitrat-Monitoring festgelegt, welches das Beprobungsgebiet, den Erhebungszeitraum, die Häufigkeit der Messungen, die Probenahme-Methodik, die Messmethode und die Datenübertragung umfasst. Details zum Untersuchungsdesign sind in Kapitel 4.3 zu finden. Der Ablauf und die Methodik des Nitrat-Monitorings wurden in einer Begleitbroschüre übersichtlich für die Teilnehmer:innen dargestellt und durch grundlegende Informationen zur Stickstoffproblematik ergänzt, sodass die Teilnehmenden ohne entsprechende Vorkenntnisse an dem Projekt teilnehmen konnten (vgl. Abbildung 33, S. 94, links und mittig, veröffentlicht in Brockhage, Lüsse, Pietzner & Beeken, 2022d). Vertiefende Begleitmaterialien wurden im Laufe des Projektes entwickelt, sodass eine differenzierte, nach Interesse und Engagement der Teilnehmenden orientierte Auseinandersetzung mit der Stickstoffproblematik erfolgen konnte (eine Übersicht dieser Materialien und der Urheber:innen ist in Anhang E zu finden). Damit wurden keine Voraussetzungen an die Teilnehmer:innen hinsichtlich des für das Projekt benötigten Wissens gestellt. Das dargestellte Projekt bietet damit nicht nur einen Beitrag der Teilnehmer:innen zur wissenschaftlichen Forschung, sondern auch eine Möglichkeit zur Bildung und Sensibilisierung der Teilnehmenden für den Gewässerschutz auf einem selbstgewählten Niveau (Haklay, 2018).

In einem weiteren, vorbereitenden Schritt wurde ein Messprotokoll gestaltet, auf dem der Ablauf der Nitrat-Messung übersichtlich zusammengefasst wurde (vgl. Abbildung 33, rechts). Das Messprotokoll wurde durch die Teilnehmenden genutzt, um die gemessenen Daten zu protokollieren und mit dem verwendeten Teststäbchen zu fotografieren. Es dient damit nicht nur der Datensicherung, sondern gibt den Wissenschaftler:innen die Möglichkeit, bei Auffälligkeiten einzelne Messungen nochmals zu kontrollieren. Darüber hinaus wurde es als psychologische Unterstützung verwendet, um die absichtliche Eintragung falscher Werte über die Webseite zu verhindern, welche als Hauptdatenübertragungsmedium für das Citizen Science-Projekt genutzt wurde.

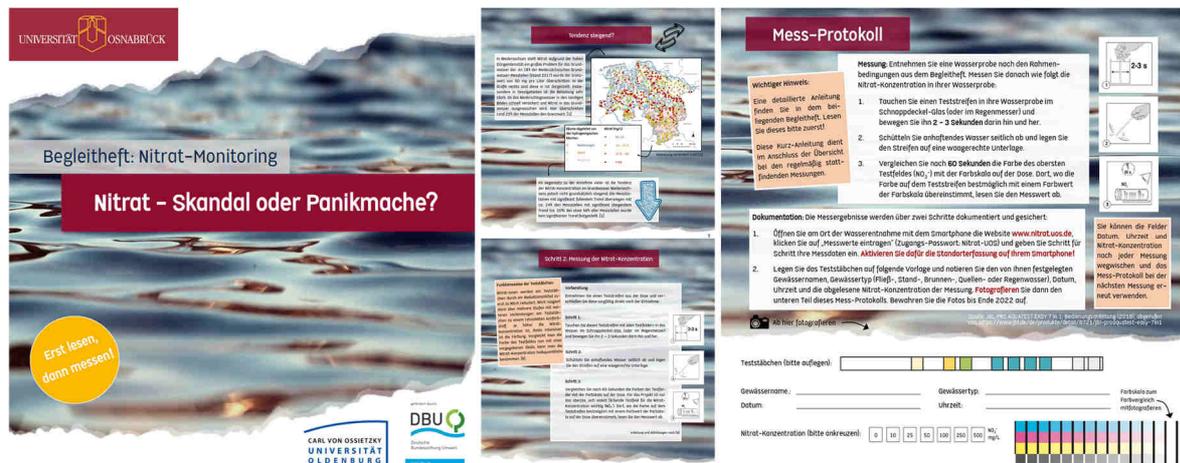


Abbildung 33: Begleitmaterialien für das Nitrat-Monitoring. Links und Mitte: Begleitheft 1; Rechts: Messprotokoll (eigene Abbildung mit Abschnitten aus Brockhage, Lüsse, Pietzner & Beeken, 2022d).

Diese Webseite mit entsprechender Datenbankstruktur, mit welcher die Messergebnisse von den Teilnehmer:innen an die Universität Osnabrück übertragen und von den Wissenschaftler:innen für die Auswertung in geeigneter Form abgerufen werden konnten, wurde in Zusammenarbeit mit der Geoinformatik der Universität Osnabrück entwickelt. Darüber hinaus wurden Fragebögen auf der Webseite eingefügt, mit denen die Teilnehmer:innen die von ihnen beprobten Gewässer hinsichtlich verschiedener Parameter (z. B. Brunntiefe) klassifizieren konnten. Über die Webseite konnten die Teilnehmenden außerdem Fotos der Gewässer übermitteln und die von ihnen gemessenen Werte abrufen.

Die dargestellten Begleitmaterialien (Begleitbroschüre, Messprotokoll inkl. Folienstift) und die benötigten Messutensilien (Teststäbchen, Schnappdeckelglas zur Probenahme, ggfs. Niederschlagsmesser) wurden im Anschluss an diese vorbereitenden Schritte von einem Team der Universität Osnabrück in Monitoring-Boxen verpackt, die von den Teilnehmer:innen leicht und wettergeschützt transportiert werden konnten.

Neben dem Material für das Nitrat-Monitoring wurden Materialien für die Seminarfächer vorbereitet. In zwei Projekttreffen mit den am Projekt teilnehmenden Lehrer:innen wurden vor Beginn der Seminarfächer (Sommer 2019) Bedarfe der Schulen identifiziert, verschiedene

Schwerpunkte für die Seminarfächer präsentiert und das Schülerlabor „Nitrat – Skandal oder Panikmache“ gemeinsam mit den Lehrkräften erprobt. Als wesentlicher Bestandteil dieser Projekttreffen wurde eine Probe-Nitratmessung an einem stehenden Gewässer von den Lehrer:innen gemeinsam mit den Wissenschaftler:innen durchgeführt, sodass die Lehrer:innen im Anschluss die Schüler:innen in die Methode einweisen konnten. Des Weiteren wurden die vorbereiteten Monitoring-Boxen an die Lehrer:innen überreicht, sodass diese die Boxen an die Schüler:innen übergeben konnten, welche die Boxen als Forschungspat:innen schlussendlich an die Bürger:innen verteilt haben.

Als letzter Schritt der projektvorbereitenden Aktivitäten wurde vor Beginn des Projekts eine Begleitstudie zur Untersuchung der Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes entwickelt, welche in Kapitel 5 dargestellt wird.

Im Anschluss an diese vorbereitenden Arbeitsschritte wurde das Citizen Science-Projekt von den Wissenschaftler:innen ab Sommer 2019 über verschiedene Medien beworben, wobei durch die Nutzung von Fernsehen, Radio, Social-Media und Zeitungen verschiedene Zielgruppen angesprochen wurden. Die angemeldeten Bürger:innen wurden von den Wissenschaftler:innen entsprechend der räumlichen Distanz auf die teilnehmenden Schulen verteilt, mit dem Ziel, eine optimale Betreuung der Teilnehmer:innen durch die Forschungspat:innen zu gewährleisten. Bürger:innen, die eine zu weite Entfernung zu den teilnehmenden Schulen aufwiesen, wurden direkt durch die Wissenschaftler:innen betreut.

Mit Beginn der Seminarfächer (ab September 2019) wurde das Schülerlabor „Nitrat – Skandal oder Panikmache“ an den Universitäten Osnabrück und Oldenburg angeboten, in dem verschiedene Eintragspfade reaktiven Stickstoffs, Messmethoden und Reduktionsmaßnahmen experimentell von den Schüler:innen erarbeitet wurden. So wurden die Schüler:innen von den Wissenschaftler:innen und durch die vertiefte Erarbeitung im Seminarfach von den Lehrer:innen zu „Expert:innen“ auf dem Gebiet der Stickstoffbelastung von Gewässern ausgebildet und konnten den Bürger:innen während der Erhebungsphase unterstützend zur Seite stehen.

Während der Erhebungsphase (September 2019 bis März 2021) wurde der Output in Form der eingehenden Daten und des Feedbacks von den Teilnehmer:innen durch die Wissenschaftler:innen überprüft. Darüber hinaus wurden Rückfragen der Schüler:innen, Lehrer:innen oder Bürger:innen beantwortet und weitere Begleitmaterialien, zum Beispiel in Form weiterer Begleithefte oder einer digitalen Ausstellung, konzipiert und veröffentlicht. Im Frühjahr 2021 wurden Seminare für die teilnehmenden Seminarfächern von den Wissenschaftler:innen angeboten, um den Schüler:innen einen Einblick in den Stand des Projektes zu geben.

In einem für die Güte der Daten relevanten Validierungsschritt wurde die Messmethode parallel hinsichtlich der Messgenauigkeit von den Wissenschaftler:innen gemeinsam mit Proband:innen untersucht und eine Kategorisierung der gemessenen Nitrat-Werte entsprechend geltender Ziel- und Grenzwerte abgeleitet (vgl. Kapitel 4.4.1).

Als Outcomes haben die Wissenschaftler:innen anhand der eingegangenen Nitrat-Messdaten ab Frühjahr 2021 die Nitratbelastung der Gewässer im Beprobungsgebiet bewertet, das Potenzial des Citizen Science-Ansatzes zur Gewässerforschung evaluiert und die Wirkung des Citizen Science-Ansatzes untersucht. Die Ergebnisse des Nitrat-Monitorings haben die Wissenschaftler:innen im Frühjahr 2022 in zwei öffentlichen Abendveranstaltungen präsentiert und das Potenzial von Citizen Science gemeinsam mit den teilnehmenden Bürger:innen und der interessierten Öffentlichkeit diskutiert. Darüber hinaus haben die Wissenschaftler:innen eine Online-Karte mit den Probenahmestellen und Ergebnissen der Nitratmessungen, eine Ergebnisbrochure und ein wissenschaftliches Paper publiziert (Brockhage, Lüsse, Klasmeier et al., 2022), sodass die Ergebnisse von der Wissenschaft, den teilnehmenden Bürger:innen und Schüler:innen und der interessierten Öffentlichkeit nachverfolgt werden konnten.

3.2.3. Partizipation der Schüler:innen: Der Forschungspatenansatz

Etwa 200 Schüler:innen der folgenden 12 teilnehmenden Projektschulen sowie einer weiteren Schule, die im Rahmen einer Projektwoche teilgenommen hat, haben als sogenannte Forschungspat:innen an dem Citizen Science-Projekt teilgenommen:

- Albertus-Magnus Gymnasium Friesoythe
- Clemens-August Gymnasium Cloppenburg
- Gymnasium Liebfrauenschule Cloppenburg
- Copernicuseum Löningen
- Gymnasium Damme
- Gymnasium Bersenbrück
- Angelaschule Osnabrück
- Windthorst-Gymnasium Meppen
- Gymnasium Papenburg
- BBS am Museumsdorf, Cloppenburg
- Gymnasium Marianum Meppen
- Gesamtschule Schinkel
- Im Rahmen einer Projektwoche: Gymnasium Antonianum Vechta

Die Schüler:innen haben die Wissenschaftler:innen bei der Realisierung des Citizen Science-Projektes in hohem Maße unterstützt, indem sie im Durchschnitt drei Bürger:innen als Mentor:innen bei den Nitratmessungen betreut haben. Dabei haben die Schüler:innen die Monitoring-Boxen vor der Datenerhebung an die teilnehmenden Bürger:innen überreicht, die Messmethode erklärt und gegebenenfalls weitere Fragen beantwortet oder an die Lehrer:innen oder Wissenschaftler:innen weitergeleitet. Darüber hinaus haben die Schüler:innen gegebenenfalls bei der Datenübertragung geholfen oder an die Messungen erinnert. Wenn die Schüler:innen eigene Probenahmestellen untersuchen wollten, haben sie hierfür ebenfalls eine Monitoring-Box erhalten.

Um sicherzustellen, dass die als Forschungspat:innen teilnehmenden Schüler:innen eigenständig verschiedene Orte in der Region erreichen können (zum Beispiel zur Kontaktaufnahme mit den Bürger:innen oder für Nitratmessungen), wurden die Jahrgänge 11 bis 13 in das Projekt einbezogen. An den jeweiligen Gymnasien oder Berufsschulen haben die Schüler:innen über 18 Monate ein Seminarfach oder einen Projektkurs in der Oberstufe gewählt und im Rahmen dieses Kurses an dem Citizen Science-Projekt teilgenommen. Die Schüler:innen haben zu Anfang der Erhebungsphase (ab September 2019) mit ihrem Seminarfach das bereits genannte Schülerlabor besucht und dadurch Einblicke in das komplexe Themenfeld der Nitratproblematik gewonnen. Darüber hinaus haben sie in den Seminarfächern verschiedene Aspekte der Nitratproblematik vertieft erarbeitet und eine Forschungsfrage aus dem Bereich der Nachhaltigkeit in einer Facharbeit eigenständig untersucht. So wurden sie im Laufe der Zeit zu „Expert:innen“ zur Stickstoffbelastung von Gewässern und konnten ihre Kompetenzen als Forschungspat:innen an die Bürger:innen weitergeben. In Abbildung 34 wird die Forschungsarbeit einer Schülerin exemplarisch abgebildet.

Schülerteilprojekt des Nitrat-Monitorings (Gymnasium Damme)



Abbildung 34: Ablauf eines Schülerforschungsprojektes zu Nitrat in Lebensmitteln (Abbildung aus Brockhage et al., 2021a, S. 11, zusammengestellt mit Abbildungen der Schülerin J. Westendorf).

In fakultativen digitalen Seminaren, die von der Universität Osnabrück angeboten wurden, konnten die Schüler:innen außerdem Forschungsfragen für die Datenauswertung formulieren, Veranstaltungen zur Veröffentlichung der Ergebnisse planen und Ideen für die Konzeption der Ausstellung zur Stickstoffproblematik einbringen. Bei Interesse konnten sich die Schüler:innen auf diese Weise in mehrere Phasen des wissenschaftlichen Prozesses einbringen, sodass ein hoher Partizipationsgrad entsprechend der Kategorisierung von Shirk et al. (2012) angestrebt wurde. Der tatsächliche Grad der Partizipation wurde jedoch stark durch die COVID-19-Pandemie beeinflusst, wie in Kapitel 5.4.3 dargestellt wird.

Durch den angestrebten Partizipationsgrad verspricht das dargestellte Citizen Science-Projekt für die Schüler:innen als Outcome ein hohes Bildungspotenzial, dass sich anhand der in Kapitel

2.3.4 dargestellten Bildungsziele diskutieren lässt und im Paper „Gemeinsam für unsere Zukunft – Potenzial eines umweltrelevanten Citizen Science-Projektes für den Chemieunterricht“ (Lüsse et al., 2022c) bereits dargestellt wurde. Durch die direkte Teilhabe an dem wissenschaftlichen Forschungsprozess haben die Schüler:innen nicht nur Einblicke in das Thema Gewässerschutz als Teilproblematik im Kontext der nachhaltigen Entwicklung, sondern auch in wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen erhalten. Dies kann sich positiv auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften und die wissenschaftsmethodischen Kompetenzen auswirken. Die Wirkungen sind jedoch auch stark abhängig von dem Engagement, mit dem sich die jeweiligen Schüler:innen an dem Projekt beteiligt und den wissenschaftlichen Forschungsprozess verfolgt haben. Als Forschungspat:innen können die Schüler:innen durch eine anhaltende Auseinandersetzung mit dem Thema Gewässerschutz in einem authentischen Forschungsprojekt und die Relevanz der Problematik in ihrem persönlichen Umfeld ein erhöhtes Interesse für die Naturwissenschaften entwickeln, jedoch ist auch dies abhängig von dem Grad an Engagement der Schüler:innen für das Projekt. Ein gesteigertes Interesse und Neugierde kann wiederum in einer intrinsischen Motivation resultieren, jedoch nur, wenn die Schüler:innen sich mit den Projektaufgaben und -zielen identifizieren. Wenn die Schüler:innen als Forschungspat:innen Erfolgserlebnisse sammeln und Kompetenz erleben, kann dies in einer gesteigerten fachbezogenen Selbstwirksamkeit resultieren. Durch die Rolle als „Expert:innen“ und entsprechende Erfolgserlebnisse kann auch das Selbstkonzept gesteigert werden. Fühlen sich die Schüler:innen in ihrer Rolle als Forschungspat:innen jedoch unwohl und erhalten keine Unterstützung, so sind auch Verschlechterungen der Selbstwirksamkeit und des Selbstkonzeptes möglich. Nicht zuletzt ist eine Steigerung des Umweltbewusstseins und der Einstellungen und Kenntnisse zum Gewässerschutz durch eine Sensibilisierung für diese Thematik möglich und kann so zu einem erhöhten Verantwortungsbewusstsein der Schüler:innen führen (Outcomes angelehnt an Phillips et al., 2018). In Kapitel 5.2 werden die Bildungspotenziale des dargestellten Konzeptes weiter diskutiert und Hypothesen zur Wirksamkeit der Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt abgeleitet.

Der Forschungspatenansatz bringt neben den dargestellten Bildungszielen weitere Vorteile, jedoch auch potenzielle Risiken mit sich. Durch den Forschungspatenansatz wurde eine flächendeckende Betreuung der Bürger:innen vor Ort anvisiert, sodass das vergleichsweise aufwändige Citizen Science-Projekt unter Mithilfe der Schüler:innen und Lehrer:innen mit einem geringen personellen Bedarf an Wissenschaftler:innen durchgeführt werden konnte. Durch die regionale Bewerbung des Projektes durch die Schüler:innen wurde zudem eine höhere Teilnehmendenzahl angestrebt. Jedoch bestand das Risiko, dass die Kommunikation zwischen den Teilnehmer:innen und Wissenschaftler:innen durch den Forschungspatenansatz reduziert wird, da viele Fragen direkt von den Schüler:innen oder Lehrer:innen beantwortet wurden, sodass die Wissenschaftler:innen gegebenenfalls Probleme nicht erkennen und das Projekt entsprechend anpassen konnten. Darüber hinaus konnte von den Wissenschaftler:innen nicht

kontrolliert werden, ob die Einweisung der Bürger:innen in die Messmethode durch die Schüler:innen korrekt erfolgte, die Probenahmestellen korrekt über die Webseite angelegt wurden und die Beprobungen regelmäßig stattfanden. Daher wurde die Messmethode in der Begleitbroschüre nochmals detailliert dargestellt, sodass sich die Bürger:innen jederzeit über das Begleitmaterial informieren konnten.

Neben den potenziellen Risiken bezüglich der Datengüte und der reduzierten Kommunikation mussten weitere, organisatorische Schwierigkeiten berücksichtigt werden. So fanden die Seminarfächer zwar über 18 Monate parallel zur Erhebungsphase des Nitrat-Monitorings statt, in der die Schüler:innen in höherem Maße partizipieren konnten, endeten jedoch auch entsprechend der schulischen Rahmenbedingungen vor dem Abitur der Schüler:innen im Februar 2021. Daher konnten die Schüler:innen nicht in die Endauswertung der Daten und Ergebnisveröffentlichung einbezogen werden, die von den Wissenschaftler:innen durchgeführt wurde. Einige Schüler:innen haben sich dennoch über die Seminarfachzeit hinaus für das Projekt engagiert und beispielsweise die öffentlichen Ergebnispräsentationen besucht. Aufgrund des auch hier vorliegenden variierenden Partizipationsgrades sind unterschiedlich starke Wirkungen hinsichtlich der dargestellten Bildungsziele zu erwarten.

Letztendlich stellt sich auch die Frage, ob die Bürger:innen die Betreuung durch Schüler:innen als Mentor:innen präferieren oder den direkten Kontakt zu den Wissenschaftler:innen bevorzugen. Da der Forschungspatenansatz als eine Form des Mentorings in Citizen Science-Projekten noch nicht erprobt wurde, bleibt zu untersuchen, ob die Schüler:innen sich in ihrer Rolle wohl fühlen und gerne als Forschungspat:innen agieren. Die Wirksamkeit des Forschungspatenansatzes und die Akzeptanz durch die Schüler:innen und Bürger:innen wurden daher in einer Begleitstudie untersucht, die in Kapitel 5 dargestellt wird.

3.2.4. Partizipation der Bürger:innen: Der Citizen Science-Ansatz

Als größte Gruppe haben Bürger:innen aus den Landkreisen Osnabrück, Cloppenburg, Vechta und Emsland sowie der Stadt Osnabrück und umliegenden Regionen als Citizen Scientists an dem Projekt teilgenommen. Über eine Online-Plattform haben sich insgesamt 547 Bürger:innen angemeldet, von denen 21 Personen aufgrund einer zu weiten Entfernung zu dem geplanten Beprobungsgebiet nicht an dem Projekt teilnehmen konnten, weitere 5 Personen haben sich vor oder zu Beginn des Projektes abgemeldet. 28 Nachmeldungen wurden über die Universität Osnabrück sowie mindestens 67 Nachmeldungen über die teilnehmenden Schulen aufgenommen. Somit haben sich mindestens 616 Bürger:innen zu dem Projekt angemeldet und wurden von den teilnehmenden Schulen oder von Wissenschaftler:innen der Universität Osnabrück betreut. Weitere Nachmeldungen über die Schulen waren zu Beginn des Projektes möglich und wurden gegebenenfalls nicht an die Universität weitergeleitet, sodass die exakte Teilnehmendenzahl leicht von der hier dargestellten abweichen kann. Die Anmeldungen wurden hinsichtlich verschiedener demografischer Angaben analysiert. 358 männliche und 184

weibliche Personen haben sich für das Citizen Science-Projekt angemeldet, die restlichen Personen haben ihr Geschlecht nicht angegeben. Damit überwiegt der Anteil an männlichen Teilnehmer:innen deutlich dem der weiblichen. Die Altersklasse 50-59 Jahre war unter den Teilnehmenden am häufigsten vertreten, jedoch variiert das Alter der Teilnehmenden von unter 9 Jahre bis über 69 Jahre (vgl. Abbildung 35). Durch die Bewerbung des Projektes über verschiedene Plattformen konnte damit eine breite Zielgruppe erreicht werden.

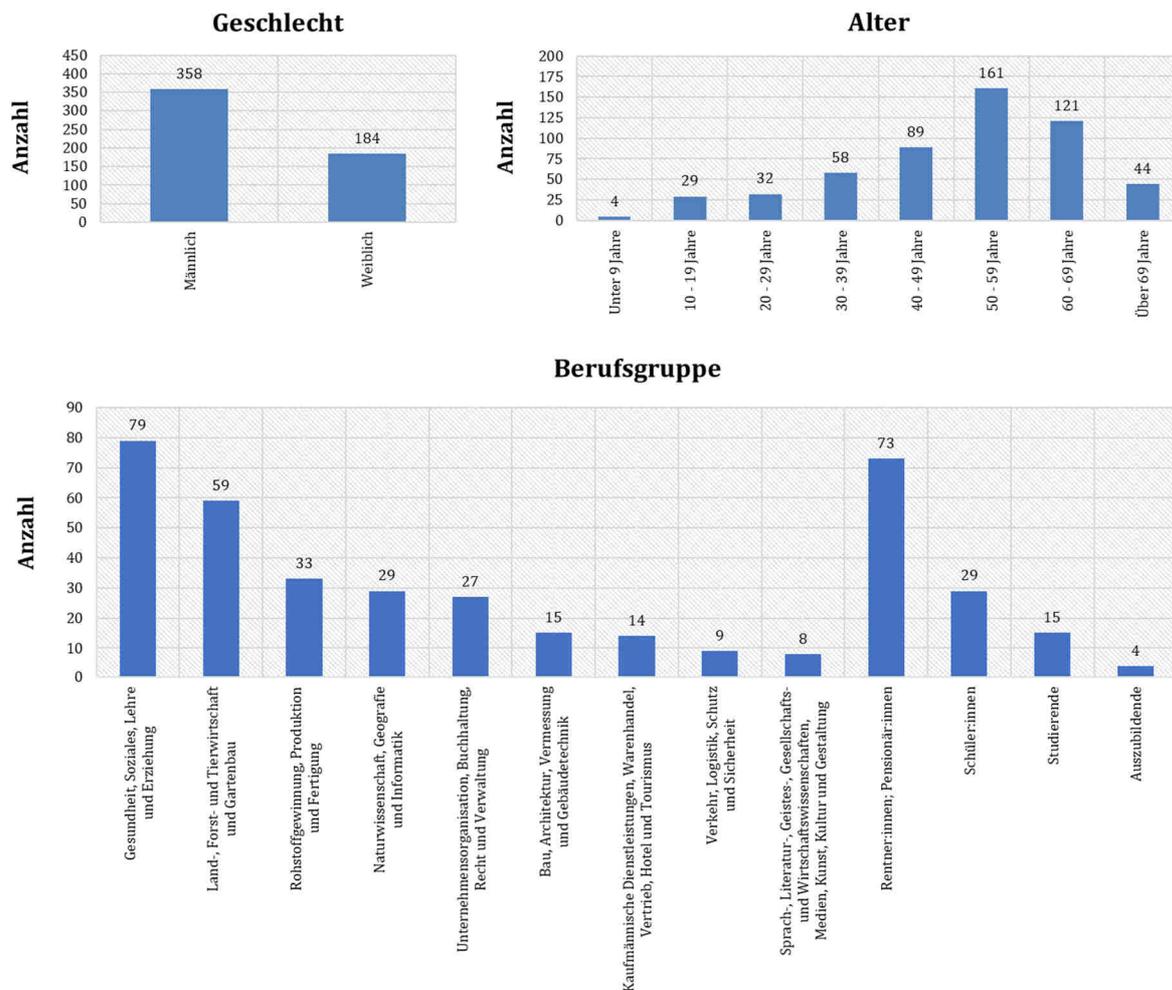


Abbildung 35: Demographische Informationen über die Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes (eigene Abbildung).

Auch hinsichtlich der Berufsfelder ist eine hohe Heterogenität gegeben, wobei besonders viele Teilnehmer:innen Berufe aus den Bereichen „Gesundheit, Soziales, Lehre und Erziehung“ ($N = 79$) und „Land-, Forst- und Tierwirtschaft und Gartenbau“ ($N = 59$) vorweisen (vgl. Abbildung 35). Diese Häufung lässt sich durch den inhaltlichen Zusammenhang des Nitrat-Monitorings mit dem Berufsfeld „Land-, Forst- und Tierwirtschaft und Gartenbau“, unter anderem in Bezug auf die Güte von Böden und Gewässern, beziehungsweise dem Interesse am Citizen Science-Ansatz mit seinem Bildungspotenzial für den Bereich „Gesundheit, Soziales, Lehre und Erziehung“ begründen. Darüber hinaus haben viele Rentner:innen/Pensionär:innen ($N = 73$) sowie Studierende, Schüler:innen und Auszubildende ($N = 48$) am Projekt teilgenommen. Die

von den Teilnehmer:innen bei der Anmeldung angegebenen Berufe wurden für diese Analyse mithilfe der „Klassifikation der Berufe 2010“ (KldB 2010) der Bundesagentur für Arbeit entsprechend verschiedener Berufsbereiche (Ebene 1), ergänzt durch die Kategorien „Rentner:innen“, „Schüler:innen“, „Studierende“ und „Auszubildende“, kategorisiert (Bundesagentur für Arbeit, 2011).

145 Anmeldungen kamen aus dem Landkreis Cloppenburg, weitere 103 Anmeldungen aus dem Emsland, 102 Anmeldungen aus der Stadt, 86 Anmeldungen aus dem Landkreis Osnabrück und 64 Anmeldungen aus dem Landkreis Vechta. Aufgrund der räumlichen Inhomogenität der angemeldeten Teilnehmer:innen ist auch hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Probenahmestellen über das Beprobungsgebiet eine unregelmäßige Dichte zu erwarten, die in der Datenauswertung berücksichtigt werden muss.

Die teilnehmenden Bürger:innen wurden vor Beginn der Erhebungsphase von den Wissenschaftler:innen oder Schüler:innen in die Messmethode eingewiesen. Im Anschluss haben sie ein oder mehrere Gewässer ausgewählt und als Messstandort über die Webseite angelegt, optimalerweise zweiwöchentlich Nitratmessungen in diesen Gewässern durchgeführt und die Ergebnisse über die Webseite an die Universität Osnabrück übermittelt. Die Regelmäßigkeit der Messungen variierte stark, was hinsichtlich der bereits in weiteren Citizen Science-Projekten beobachteten Ungleichheit der Beteiligung erwartet werden konnte (Haklay, 2016). Auswirkungen hiervon auf die Auswertung der Messdaten werden in Kapitel 4.4 dargestellt.

Über E-Mails, Newsletter, Begleitbroschüren und eine digitale, interaktive Ausstellung konnten sich die Teilnehmer:innen während und nach der Datenerhebungsphase über den Stand des Nitrat-Monitorings, die Stickstoffproblematik und weitere Angebote des Projektes wie beispielsweise die Stickstoff-Box informieren (vgl. Abbildung 36).



Abbildung 36: Projektbegleitende Materialien zur Informationen über die Stickstoffproblematik.
Links und Mitte: Begleitheft 2; Rechts: Digitale Ausstellung (eigene Abbildung mit Abschnitten aus Brockhage, Lüsse, Pietzner & Beeken, 2022b).

Darüber hinaus konnten die Teilnehmer:innen inhaltliche oder organisatorische Fragen direkt an die Schüler:innen und Lehrer:innen beziehungsweise telefonisch oder per E-Mail an die Wissenschaftler:innen stellen. Das Angebot, eigene Forschungsfragen für die Auswertung der

Messdaten aufzustellen und an die Wissenschaftler:innen zu leiten, wurde von den Teilnehmer:innen nicht wahrgenommen, sodass nur die Forschungsfragen der Schüler:innen und Wissenschaftler:innen in die Datenauswertung einbezogen wurden.

Aufgrund der Komplexität der Datenauswertung wurden die Bürger:innen nicht in diesen Prozess eingebunden, jedoch wurden der Ablauf, die Methodik und die Ergebnisse transparent über verschiedene Formate veröffentlicht. Zunächst wurden die Ergebnisse in zwei öffentlichen Abendveranstaltungen digital und in Präsenz von den Wissenschaftler:innen präsentiert sowie mögliche Reduktionsmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.2.6) von den Wissenschaftler:innen und Projektpartner:innen dargestellt (vgl. Abbildung 37, rechts). In diesen Abendveranstaltungen und weiteren Begleitmaterialien wurde auch der individuelle Stickstoff-Fußabdruck thematisiert, sodass die Teilnehmer:innen ein Verständnis für die Bedeutung ihres Verhaltens entwickeln konnten. Daher wird eine positive Wirkung der Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt auf das Umweltverhalten und die Kenntnisse zum Thema Gewässerschutz als Outcome erwartet (Phillips et al., 2018; Shirk et al., 2012). Im Anschluss an die Projekt- und Ergebnispräsentation wurden die Potenziale des Citizen Science-Ansatzes sowie mögliche Reduktionsmaßnahmen des Eintrags reaktiven Stickstoffs mit den Teilnehmer:innen diskutiert.

Für Teilnehmer:innen, die nicht an diesen Veranstaltungen teilnehmen konnten, wurden die Ergebnisse in einer dritten Begleitbroschüre zusammengefasst, wobei auch hier die Methodik der Datenauswertung und Möglichkeiten und Grenzen des Citizen Science-Ansatzes dargestellt wurden (vgl. Abbildung 37, links und mittig).



Abbildung 37: Projektbegleitende Materialien zu den Ergebnissen des Nitrat-Monitorings. Links und Mitte: Begleitheft 3; Rechts: Ausschnitt aus der Präsentation der öffentlichen Abendveranstaltungen (eigene Abbildung mit Abschnitten aus Brockhage, Lüsse, Pietzner & Beeken, 2022c).

Die wissenschaftliche Publikation zu den Ergebnissen des Projektes wurde open-access publiziert, sodass die Teilnehmer:innen auf diese zugreifen können (Brockhage, Lüsse, Klasmeier et al., 2022). In einer Online-Karte konnten die Teilnehmer:innen zudem alle Probenahmestellen und Ergebnisse der Nitratmessungen einsehen und so Informationen über ihren eigenen Messstandort und alle weiteren, beprobten Messstandorte erhalten (vgl. Abbildung 38).

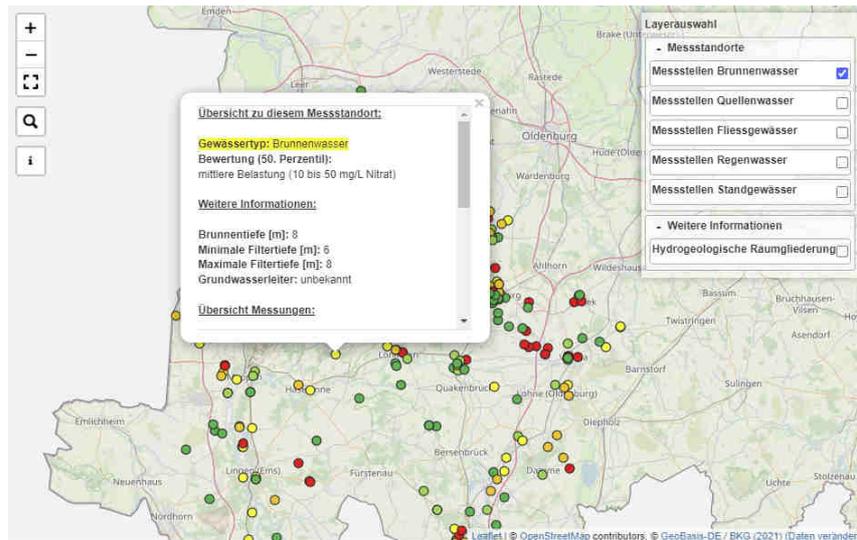


Abbildung 38: Darstellung der Ergebnisse in einer Online-Karte am Beispiel eines untersuchten Brunnens (Screenshot der Webseite <https://www.home.uni-osnabrueck.de/fbrockhage/nitratmonitoring/map.html>).

3.2.5. Partizipation weiterer Projektpartner:innen

Während des gesamten Projektes wurden die projektkoordinierenden Wissenschaftler:innen von einem Projektbeirat unterstützt, zu dem neben Wissenschaftler:innen anderer Arbeitsgruppen auch der Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (kurz NLWKN) und der Kreislandvolkverband Cloppenburg e.V. gehörten. Der NLWKN hat insbesondere bei der Datenauswertung unterstützt, indem ein Team des NLWKN die Methodik und die Ergebnisse des Nitrat-Monitorings gemeinsam mit den Wissenschaftler:innen diskutiert hat. In diesen Prozess wurde auch die Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück mit entsprechender Expertise einbezogen. Darüber hinaus hat der NLWKN seine eigenen Messdaten für einen Abgleich mit den Messergebnissen des Nitrat-Monitorings zur Verfügung gestellt, sodass die Wissenschaftler:innen die Güte des Citizen Science-Datensatzes bewerten konnten.

Durch die Zusammenarbeit mit dem Kreislandvolkverband Cloppenburg e.V. konnten die Perspektive der Landwirtschaft in das Projekt integriert und die Akzeptanz des Projektes durch die Landwirtschaft erhöht werden. Als authentischer Vertreter der Landwirtschaft hat der Kreislandvolkverband in den öffentlichen Abendveranstaltungen bereits von der Landwirtschaft ergriffene Maßnahmen präsentiert und Probleme hinsichtlich der aktuellen Verordnungen aus ihrer Perspektive dargestellt. Darüber hinaus wurden Bedenken der Landwirtschaft hinsichtlich des Projektes durch den Kreislandvolkverband kommuniziert und von den Wissenschaftler:innen in der Projektplanung und Öffentlichkeitsarbeit berücksichtigt. Durch die transparente und wissenschaftliche Betrachtung der Messergebnisse und die evidenzbasierte Datenauswertung wurde den Bedenken der Landwirtschaft hinsichtlich einer eindimensionalen Betrachtung der Nitratproblematik entgegengewirkt.

Vor der Veröffentlichung wurden alle Ergebnisse mit dem NLWKN, dem Kreislandvolkverband, den Wissenschaftler:innen des Projektbeirates und der Umweltsystemforschung diskutiert, um sicherzustellen, dass die verwendeten Methoden den wissenschaftlichen Maßstäben genügen, die Ergebnisse verständlich sind und alle Dimensionen der Stickstoffproblematik beleuchtet wurden. Darüber hinaus wurden gemeinsam Potenziale von Citizen Science hinsichtlich der Forschung zur Gewässergüte und Sensibilisierung der Gesellschaft diskutiert.

3.2.6. Ergänzende Bildungsangebote zur Stickstoffproblematik

Um die Stickstoffproblematik langfristig, auch außerhalb des Citizen Science-Projektes, in der schulischen und außerschulischen Bildung zu verankern, wurden in projektbegleitenden Abschlussarbeiten weitere Bildungsangebote konzipiert. Zum einen wurde eine Lerneinheit zum Thema „Nitrat – Skandal oder Panikmache“ gestaltet, die sich im Doppeljahrgang 9/10 an verschiedene Basiskonzepte anknüpfen lässt. In einem Lernzirkel und einer anschließenden Podiumsdiskussion werden der Stickstoffkreislauf, anthropogene Eintragspfade, Transportwege in der Umwelt, die Aufnahme von Nitrat durch Nahrung und Reduktionsmaßnahmen experimentell und inhaltlich erarbeitet (Bischoff, 2021). Darüber hinaus wurde ein sogenanntes CitizenLab konzipiert, in dem die interessierte Öffentlichkeit in Abendkursen, angelehnt an das Konzept von Kochkursen in Volkshochschulen, experimentell verschiedene Aspekte der Stickstoffproblematik untersuchen kann (Walessa, 2022). Das Schülerlabor „Nitrat – Skandal oder Panikmache“ wurde zudem mit dem Schülerlabor „Stickoxide im Straßenverkehr“ (Schulze, 2018) kombiniert, um innerhalb eines Schülerlaborsettings verschiedene Aspekte der Stickstoffproblematik multiperspektivisch experimentell zu erarbeiten. Ein Begleitheft zum Schülerlaborsetting „Der Stickstoffproblematik auf der Spur“ wurde open-access veröffentlicht (Brockhage, Lüsse, Pietzner & Beeken, 2022a), sodass es nicht nur von außerschulischen Bildungsinstitutionen, sondern auch von Schulen, beispielsweise durch die Nutzung einzelner Experimente im Chemieunterricht, verwendet werden kann. Diese Bildungsangebote sind zur Anwendung außerhalb des Projektes vorgesehen und finden damit keine Berücksichtigung in den Begleitstudien zu den im folgenden dargestellten Forschungsfragen.

3.3. Übergeordnete Forschungsfragen

Aus dem identifizierten Forschungsbedarf wurden die folgenden übergeordneten Forschungsfragen abgeleitet, die sich anhand des dargestellten Konzeptes untersuchen lassen, klassifiziert nach dem Beitrag von Citizen Science zur fachwissenschaftlichen Forschung und Bildung. Letzteres umfasst die Umweltbildung und weitere Bildungsziele im Kontext der naturwissenschaftlichen Schulbildung.

Beiträge des Citizen Science-Ansatzes zur fachwissenschaftlichen Forschung:

1. Inwieweit kann der Citizen Science-Ansatz einen Beitrag zur Untersuchung der Stickstoffbelastung von Gewässern leisten?

Beiträge des Citizen Science-Ansatzes zur Bildung:

2. Inwiefern kann das Citizen Science-Projekt das allgemeine Umweltbewusstsein und das themenspezifische Umweltbewusstsein (Einstellungen, Verhalten und Kenntnisse zum Thema Gewässerschutz) der Projektteilnehmer:innen positiv beeinflussen?
3. Inwieweit hat die Teilnahme der Schüler:innen als Forschungspat:innen an einem Citizen Science-Projekt eine Wirkung auf Interesse und Motivation, Selbstwirksamkeitserwartung und Selbstkonzept sowie das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften im naturwissenschaftlichen Unterricht?

Forschungsfrage 1 wird in Kapitel 4.1 in weitere Subforschungsfragen konkretisiert, sodass das Potenzial von Citizen Science für die fachwissenschaftliche Gewässerforschung differenziert bewertet werden kann. In den folgenden Kapiteln 4 und 5 werden die Studien zur Untersuchung dieser Forschungsfragen dargestellt.

4. Beiträge des Citizen Science-Projektes zur fachwissenschaftlichen Forschung

4.1. Konkretisierung der Forschungsfragen

Anhand des dargestellten Konzeptes soll die Forschungslücke zum Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Untersuchung der Stickstoffbelastung von Gewässern geschlossen werden.



Abbildung 39: Beiträge des Citizen Science-Ansatzes zur fachwissenschaftlichen Forschung (eigene Abbildung).

Die im vorherigen Kapitel dargelegte Forschungsfrage 1 „Inwieweit kann der Citizen Science-Ansatz einen Beitrag zur Untersuchung der Stickstoffbelastung von Gewässern leisten?“ wird hierzu in folgende Subforschungsfragen konkretisiert:

- 1.1. Welche Messmethoden sind geeignet, um mithilfe des Citizen Science-Ansatzes die Nitratkonzentration verschiedener Gewässertypen zu untersuchen?
- 1.2. Inwieweit kann ein flächendeckendes, längerfristiges Nitrat-Monitoring verschiedener Gewässertypen in einem definierten Gebiet mit dem Citizen Science-Ansatz realisiert werden?
- 1.3. Inwieweit lassen sich mit den Citizen Science-Daten Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung untersuchen und inwieweit stimmen die Ergebnisse mit den aus der Theorie abgeleiteten Hypothesen überein?
- 1.4. Inwieweit sind die Ergebnisse des Citizen Science-Projektes konsistent mit oder komplementär zu den Datensätzen anderer Messinitiativen?

Um Forschungsfrage 1.1 zu beantworten, werden zunächst verschiedene Messmethoden präsentiert sowie ihre Eignung für den Citizen Science-Ansatz diskutiert. Im Anschluss werden die Ergebnisse einer begleitenden Laborstudie zur Genauigkeit der verwendeten Messmethode dargestellt. Nach dieser vorbereitenden Analyse werden die von den Bürger:innen und Schüler:innen gemessenen Daten herangezogen, um zu untersuchen, inwieweit mit dem Citizen Science-Ansatz ein flächendeckendes Nitrat-Monitoring über einen längeren Beprobungszeitraum realisiert werden konnte. Anhand der Messergebnisse werden im Anschluss die

Nitratbelastungen verschiedener Gewässertypen im Beprobungsgebiet bewertet und verschiedene Einflussfaktoren untersucht. Zuletzt werden die Ergebnisse des Citizen Science-Projektes mit den Messdaten anderer Messinitiativen verglichen, um zu beurteilen, inwieweit die Daten übereinstimmen oder die Ergebnisse des Citizen Science-Projektes bisherige Messinitiativen ergänzen können. Anhand der Ergebnisse dieser Subforschungsfragen wird schlussendlich die Eignung des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung übergeordnet bewertet.

4.2. Hypothesenbildung

Um Forschungsfrage 1.3 zu beantworten, werden anhand der in Kapitel 2.2 dargestellten Theorie zunächst Hypothesen zu Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung abgeleitet. Neben Einflüssen der Gewässermerkmale werden räumliche und zeitliche Einflussfaktoren betrachtet.

(a) Einflüsse der Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung:

Kurzzeitig hohe Nitrateinträge, zum Beispiel durch Starkregenereignisse mit unkontrolliertem Oberflächen- und Zwischenabfluss, werden in Fließgewässern (FG) mit einer hohen Durchflussmenge schneller verdünnt als in kleineren Gewässern mit einem geringen Wasserdurchfluss (Osterburg & Runge, 2007). Auch punktuelle, längerfristige Nitrateinträge, zum Beispiel durch Kläranlagen, führen in Gewässern mit einem geringen Durchfluss aufgrund eines geringeren Verdünnungsfaktors zu höheren Nitratkonzentrationen. Daher wird für Fließgewässer die folgende Hypothese abgeleitet:

FG-H1: „Je kleiner der Durchfluss des beprobten Fließgewässers ist, desto höher ist die Nitratbelastung an der Probenahmestelle.“

Die Durchflussmenge eines Fließgewässers ist abhängig von der Fließgeschwindigkeit und der Querschnittsfläche, welche über das Querprofil des Gewässers und den Wasserstand berechnet wird. Annäherungen über die Form eines Rechtecks vereinfachen die Bestimmung der Querschnittsfläche, da lediglich Breite und Tiefe des Gewässerprofils bekannt sein müssen. Da die Fließgeschwindigkeit eines Gewässers und die Tiefe insbesondere bei großen Flüssen nicht mittels einfacher Messmethoden ermittelt werden können, wird für das Citizen Science-Projekt die Breite des Gewässers an der Wasseroberfläche anstelle des Durchflusses vereinfacht herangezogen und Hypothese FG-H1 entsprechend adaptiert:

FG-H1 (Adaption): „Je schmaler das beprobte Fließgewässer an der Probenahmestelle ist, desto höher ist die Nitratbelastung.“

Die Beprobung des Grundwassers erfolgt überwiegend über Brunnen (Brunnenwasser = BW), die in verschiedenen Tiefen verfiltert sind. Insbesondere in tieferen Bereichen sind Denitrifikationszonen mit variablen Nitratgehalten sowie nitratfreie Desulfurifikationszonen vorzu-

finden, sofern das Denitrifikationspotenzial nicht erschöpft ist (Wriedt et al., 2019). Daraus wird folgende Hypothese abgeleitet:

BW-H1: „Je tiefer der beprobte Brunnen verfiltert ist, desto geringer ist die Nitratbelastung.“

Da in tieferen Grundwasserkörpern zudem stabilere Bedingungen vorliegen (Bechtel, 2008), sind mit geringeren Schwankungen der Nitratbelastung zu rechnen:

BW-H2: „Je tiefer der beprobte Brunnen verfiltert ist, desto geringer sind die Schwankungen der Nitratbelastung.“

Bei der Beprobung von Quellen, bei denen Grundwasser auf natürliche Weise aus der Oberfläche austritt, lässt sich die Tiefe des Grundwasservorkommens, aus dem das Wasser stammt, nicht mit einfachen Messmethoden bestimmen und ist meist unbekannt, sofern kein Längsschnitt des Grundwassersystems von der Region vorliegt. Daher können BW-H1 und BW-H2 im Rahmen des Citizen Science-Projektes nicht für Quellwasser (QW) überprüft werden.

(b) Räumliche Einflüsse auf die Nitratbelastung:

Des Weiteren wird die Nitratbelastung verschiedener Gewässertypen von unterschiedlichen räumlichen Einflüssen beeinflusst, die bereits in verschiedenen Studien nachgewiesen wurden (vgl. Kapitel 2.2.5 (a)). Mithilfe des dargestellten Projektes soll untersucht werden, inwieweit der Citizen Science-Ansatz geeignet ist, um räumliche Einflussfaktoren zu identifizieren. Hierfür werden Einflüsse der Landbedeckung und -nutzung und hydrogeologische Einflüsse auf die Belastung verschiedener Gewässertypen betrachtet.

Einflüsse der Landbedeckung und -nutzung:

67 % der anthropogenen Einträge reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt werden durch die Landwirtschaft verursacht, weitere Einträge sind auf die Industrie- und Energiewirtschaft (16 %), den Verkehrsbereich (11 %) und auf Haushalte, die Abwasserwirtschaft und den Oberflächenablauf in urbanen Flächen (6 %) zurückzuführen (vgl. Kapitel 2.2.2) (Bach et al., 2020). Über verschiedene Transportwege gelangt reaktiver Stickstoff in Regenwasser, Oberflächengewässer und Grundwasser.

Eine landesweite Nährstoffmodellierung ergab, dass rund 70 % der Stickstoffeinträge in Niedersachsen über landwirtschaftliche Dräne und Zwischenabfluss in oberirdische Gewässer gelangen sowie 7 % über urbane Quellen aus Siedlungsgebieten und über punktuelle Einleitungen (vgl. Kapitel 2.2.5 (a)) (NLWKN, 2020d). Nitrat verbleibt im Gewässer jedoch nicht am Eintragsort, sondern wird mit der Strömung flussabwärts transportiert. Dadurch können zum Beispiel erhöhte Nitratbelastungen in Wäldern gemessen werden, deren Ursprung auf andere Eintragspfade zurückzuführen ist. Dennoch ist an den Eintragsorten mit den höchsten

Konzentrationen zu rechnen, weshalb für Fließgewässer und stehende Gewässer folgende Hypothesen formuliert werden.

FG-H2: "Die Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer ist in landwirtschaftlichen und bebauten Flächen höher als in Wäldern und naturnahen Flächen."

SG-H1: "Die Nitratbelastung der beprobten stehenden Gewässer ist in landwirtschaftlichen und bebauten Flächen höher als in Wäldern und naturnahen Flächen."

Unter Berücksichtigung der Zustromgebiete der Probenahmestellen kann diese Hypothese auch auf Grundwasserbeprobungen übertragen werden (vgl. Kapitel 2.2.5 (a)). So weisen Grundwasser-Probenahmestellen mit landwirtschaftlich geprägten Zustromgebieten in Niedersachsen häufiger Überschreitungen des Grenzwertes von 50 mg/L Nitrat auf als übrige Grundwasser-Probenahmestellen (NLWKN, 2020b). Im Gegensatz dazu haben Grundwässer in bewaldeten Gebieten in der Regel geringere Nitratbelastungen (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [LAWA], 1993). Da Zustromgebiete für Grundwasser-Probenahmestellen anhand verschiedener Parameter berechnet werden (u. A. Filtertiefe, Flurabstand, Strömungsrichtung des Grundwassers, vgl. Abbildung 20, S. 59), die nicht mit einfachen Messmethoden bestimmt werden können, lässt sich diese Hypothese nicht mit dem dargestellten Citizen Science-Ansatz überprüfen. Gleiches gilt für die Beprobung von Quellen.

Stickstoffeinträge in das Regenwasser sind auf die Deposition reaktiver Stickstoffverbindungen aus der Atmosphäre zurückzuführen. Die Deposition oxidiertes Stickstoffverbindungen resultiert insbesondere in der Nähe stärker befahrener Straßen und industrieller Verbrennungsanlagen in erhöhten Nitratkonzentrationen im Regenwasser (vgl. Kapitel 2.2.3 (a)). Daraus wird folgende Hypothese abgeleitet.

RW-H1: "Die Nitratbelastung des beprobten Regenwassers ist in städtisch geprägten Flächen sowie in Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen höher als in Flächen mit anderen Nutzungsarten."

Hydrogeologische Einflüsse:

Über die Versickerung im Boden gelangt Wasser von der Oberfläche in das Grundwasser. Damit unterliegt die Stickstoffbelastung des Grundwassers hydrogeologischen Einflüssen, die in Kapitel 2.2.3 (a) und 2.2.5 (a) bereits dargestellt wurden. Hohe Nitratkonzentrationen liegen in Niedersachsen insbesondere in Geestgebieten vor, in denen Nitrat schnell ausgewaschen wird. Eine geringe Aufenthaltsdauer von Nitrat in der durchwurzelten Zone des Bodens und das geringe Potenzial, die Denitrifikation aufrecht zu erhalten, begünstigen den Eintrag von Nitrat in das Grundwasser. In Marsch- und Niederungsgebieten kann das Denitrifikationspotenzial durch geringe Flurabstände und gelöste organische Bodensubstanzen aufrecht erhalten

werden, sodass bereits knapp unter der Grundwasseroberfläche nitratfreies Grundwasser auftreten kann (Renger, 2002; Wriedt et al., 2019). Daraus leitet sich folgende Hypothese ab.

BW-H3: „Die Nitratbelastung der beprobten Brunnen in Geestgebieten ist höher als die Nitratbelastung der beprobten Brunnen in Niederungsgebieten.“

(c) Zeitliche Einflüsse auf die Nitratbelastung:

Neben räumlichen Einflüssen liegen auch jahreszeitliche Einflüsse auf die Nitratbelastung vor, die insbesondere in Oberflächengewässern zu starken jahreszeitlichen Schwankungen führen (vgl. Kapitel 2.2.5 (b)). Durch die Assimilation von Nitrat und geringere Abflüsse von anliegenden Flächen sind die Nitratkonzentrationen in Oberflächengewässern im Sommer im Allgemeinen geringer als im Winter, in dem die Nitratkonzentrationen infolge der fehlenden Assimilation ansteigt (Johannsen et al., 2008; NLWKN, 2007). Daraus ergeben sich die folgenden Hypothesen.

FG-H3: „Die Nitratbelastungen der beprobten Fließgewässer sind in den Wintermonaten höher als in den Sommermonaten.“

SG-H2: „Die Nitratbelastungen der beprobten stehenden Gewässer sind in den Wintermonaten höher als in den Sommermonaten.“

Aufgrund langer Sicker- und Fließzeiten von Nitrat und stabilerer Bedingungen, insbesondere in tieferen Grundwasserkörpern, wirken sich jahreszeitliche Einflüsse weniger stark auf die Nitratbelastung des Grundwassers aus (vgl. Kapitel 2.2.5 (b)). Mehrere Untersuchungen bestätigen, dass die Schwankungen der Nitratkonzentrationen des Grundwassers deutlich geringer sind als die in Oberflächengewässern beobachteten Schwankungen (Amt für Wasser und Energie, 2020; Bechtel, 2008; Nakagawa et al., 2021). Es ist nicht zu erwarten, dass diese geringen Schwankungen der Nitratkonzentration mithilfe einfacher und kostengünstiger Messmethoden, die innerhalb des Citizen Science-Projektes verwendet werden können (vgl. Kapitel 4.3.4), nachweisbar sind. Daher werden folgende Hypothesen für die beprobten Brunnen und Quellen abgeleitet:

BW-H4: „Die Nitratbelastungen der beprobten Brunnen unterscheiden sich nicht nachweisbar zwischen den Jahreszeiten im Beprobungszeitraum.“

QW-H1: „Die Nitratbelastungen der beprobten Quellen unterscheiden sich nicht nachweisbar zwischen den Jahreszeiten im Beprobungszeitraum.“

Aufgrund der in Kapitel 2.2.5 (b) dargestellten komplexen Einflüsse und Unsicherheiten in Bezug auf jahreszeitliche Schwankungen der Stickstoffbelastung des Regenwassers wird keine Hypothese für diesen Gewässertyp abgeleitet.

4.3. Forschungsdesign

4.3.1. Auswahl des Beprobungsgebietes

Um die dargestellten Forschungsfragen und Hypothesen zu untersuchen, wurden die Landkreise Osnabrück, Cloppenburg, Vechta und Emsland sowie die kreisfreie Stadt Osnabrück in Niedersachsen als Beprobungsgebiet ausgewählt. Aufgrund intensiver Landwirtschaft ist diese Region durch einen hohen Düngemiteleinsatz gekennzeichnet (vgl. Abbildung 18, S. 57), so dass die Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie nicht flächendeckend erreicht werden können (Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2022). Dies resultiert in der Überschreitung der Nitrat-Ziel- und Grenzwerte für Grundwasser und Oberflächengewässer an zahlreichen Probenahmestellen (NLWKN, 2020b, 2020d). Dadurch sind nicht nur kostenintensive Maßnahmen zur Trinkwasseraufbereitung erforderlich, Niedersachsen nimmt aufgrund der direkten Lage an der Nordsee auch eine unmittelbare Bedeutung zum Schutz der marinen Gewässer ein (Ständiger Ausschuss „Oberirdische Gewässer und Küstengewässer“ LAWA-AO, 2017). Daher ist es in dieser Region umso bedeutsamer, Lösungen für die Nitratproblematik zu finden und die Gesellschaft für die Thematik zu sensibilisieren.

Das hohe öffentliche Interesse in den betroffenen Regionen wirkt sich zudem positiv auf die Akquirierung von Teilnehmenden für das Nitrat-Monitoring aus. In Deutschland besteht darüber hinaus generell ein hohes Interesse der Gesellschaft an der Teilnahme an aktuellen Forschungsprojekten, was das Erreichen einer hohen Teilnehmendenzahl für das Citizen Science-Projekt zusätzlich fördern kann (Wissenschaft im Dialog/Kantar Emnid, 2019). Im genannten Einzugsgebiet stoßen zudem verschiedene Interessensgruppen und Sichtweisen hinsichtlich der Nitratproblematik aufeinander, die auch in den Medien kontrovers dargestellt werden (vgl. Kapitel 2.1.5). Das Citizen Science-Projekt bietet die Möglichkeit, die Problematik zu versachlichen und eine Gesprächsplattform für verschiedene Beteiligte anzubieten, in der anhand wissenschaftlicher Ergebnisse verschiedene Lösungsvorschläge diskutiert werden können. Auch die Verantwortung der Bürger:innen kann in begleitenden Bildungsangeboten des Citizen Science-Projektes thematisiert werden.

Aus fachwissenschaftlicher Perspektive ist das Beprobungsgebiet ebenfalls für das Nitrat-Monitoring geeignet, da verschiedene Umweltbedingungen vorliegen, die sich auf die Nitratbelastung der Gewässer auswirken können. So weist das Beprobungsgebiet verschiedene Landbedeckungs- und -nutzungsklassen (insbesondere bebaute Flächen, landwirtschaftliche Flächen, Wälder und naturnahe Flächen, klassifiziert nach *CORINE Land Cover 5 Ha (2018)*, 2021) und verschiedene hydrogeologische Bedingungen (Niederung, Bergland, Geest, klassifiziert nach

Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (HYRAUM), 2015) auf. Dadurch lässt sich evaluieren, inwieweit verschiedene räumliche Einflüsse auf die Nitratbelastung mit dem Citizen Science-Ansatz nachgewiesen werden können. Durch räumlich stark variierende Nitratgehalte, die in Niedersachsen unter anderem im Grundwasser auftreten, kann zudem eine große Spanne verschiedener Nitratkonzentrationen in dem Monitoring untersucht werden (NLWKN, 2020b). Dies nimmt hinsichtlich der Beurteilung der Eignung der Messmethode eine bedeutende Rolle ein. Nicht zuletzt ist das Probenahmegebiet für die Evaluation des Citizen Science-Ansatzes geeignet, da der NLWKN in diesem Gebiet bereits ein flächendeckendes und langfristiges Nitrat-Monitoring verschiedener Gewässertypen durchführt, sodass Vergleichsdatensätze vorliegen, mit denen die Güte des Citizen Science-Datensatzes bewertet werden kann (NLWKN, 2014, 2017b).

Nach einer positiven Evaluation des Citizen Science-Konzeptes wäre es möglich, das Konzept in Regionen anzuwenden, in denen die Nitratbelastung verschiedener Gewässer noch nicht oder nicht ausreichend beprobt wird. Der Citizen Science-Ansatz soll dabei ganzheitlich verschiedene Gewässertypen einbeziehen, deren Auswahl im Folgenden legitimiert wird.

4.3.2. Auswahl der Gewässertypen

Saubere Grundwasservorkommen und Oberflächengewässer sind nicht nur für die Trinkwasserversorgung von hoher Relevanz, sondern nehmen auch eine bedeutende ökologische Funktion ein. Die Belastung dieser Gewässertypen durch Nitrat wurde bereits in mehreren Untersuchungen gezeigt (vgl. Kapitel 2.2). Um Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung und mögliche Hotspots im Beprobungsgebiet zu identifizieren, werden Grundwasser und Oberflächengewässer in dem Citizen Science-Projekt berücksichtigt. Grundwasser lässt sich nochmals differenzieren in Brunnenwasser, das durch künstlich errichtete Brunnen gefördert wird, und Quellwasser, das auf natürliche Weise aus der Geländeoberfläche austritt. Als Oberflächengewässer werden in dem Citizen Science-Projekt Binnengewässer untersucht, die sich wiederum in Fließgewässer und stehende Gewässer einteilen lassen (Schwoerbel & Brendelberger, 2022).

Neben Grundwasser und Oberflächengewässern wird auch Regenwasser in dem Citizen Science-Projekt beprobt, um die Deposition als eine mögliche Eintragsquelle von reaktivem Stickstoff in Gewässer zu untersuchen (vgl. Kapitel 2.2.3, Abbildung 9).

Damit lassen sich die Hypothesen, die Methoden zur Probenahme, Ziel- und Grenzwerte sowie die Ergebnisse hinsichtlich der folgenden Gewässertypen klassifizieren:

- Fließgewässer
- Stehende Gewässer
- Regenwasser
- Brunnenwasser
- Quellwasser

Sofern Messmethoden eingesetzt werden, die auch für Salzwasser angewendet werden können, kann das dargestellte Citizen Science-Konzept auch auf Übergangs-, Küsten- und Meeresgewässer übertragen werden, in denen ein erhöhter Stickstoffeintrag ebenfalls zu weitreichenden negativen Auswirkungen, unter anderem in Form von sogenannten Todeszonen, führt (vgl. Kapitel 2.2.3, Abbildung 12, S. 48). Da sich der Salzgehalt jedoch auf verschiedene Messmethoden auswirkt, beschränkt sich das Citizen Science-Projekt zunächst auf Süßwasser (z. B. MACHERY-NAGEL GmbH & Co. KG, 2016).

4.3.3. Häufigkeit und Dauer der Beprobungen

Die Probenahmestellen wurden von den Bürger:innen und Schüler:innen über 18 Monate von Anfang September 2019 bis Anfang März 2021 beprobt. Durch diesen längeren Zeitraum lassen sich jahreszeitliche Schwankungen mit den Citizen Science-Messdaten untersuchen.

Die Teilnehmer:innen wurden instruiert, in diesem Messzeitraum zweiwöchentlich Nitratmessungen durchzuführen. Temporäre Ereignisse, die sich zwar kurzfristig auf die Nitratbelastung der Gewässer auswirken, langfristig jedoch nur einen geringen Effekt haben, können durch die regelmäßige Probenahme erkannt und durch die Menge an Einzelmessungen relativiert werden.

4.3.4. Auswahl und Validierung der Messmethode

Auswahl der Messmethode:

Verschiedene Messmethoden zur Bestimmung der Nitratbelastung von Gewässerproben wurden bereits in der Antragsstellung des Projektes diskutiert und werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst (Pietzner & Beeken, 2019).

Tabelle 9: Methoden zur Bestimmung der Nitrat-Konzentration einer Gewässerprobe (angelehnt an Pietzner & Beeken, 2019, S. 13).

Messmethode	Vorgehensweise	Vorteile	Nachteile
1. Photometrische nasschemische Bestimmung der Nitratkonzentration	Die Nitratkonzentration kann photometrisch bestimmt werden, indem Nitrat in einer Säuremischung zuerst zu Nitrit reduziert und mit 2,6-Dimethylphenol zu 4-Nitro-2,6-dimethylphenol umgesetzt wird.	<ul style="list-style-type: none"> - Entspricht dem deutschen Einheitsverfahren zur Bestimmung von Nitrat in Wasser nach DIN 38405-9:2011-09 (2011) - Sehr genaue Bestimmung der Nitratkonzentration - Küvetten-Tests zur einfachen Durchführung erhältlich 	<ul style="list-style-type: none"> - Kosten- und zeitaufwendige Messmethode - Gefährdungspotenzial der verwendeten Reagenzien - Fachgerechte Entsorgung der Reagenzien notwendig - Eine Trübung oder Eigenfarbe der zu untersuchenden Lösung stört die Messung
2. Direkte photometrische Bestimmung der Nitratkonzentration	Im UV-Bereich (ca. 200 nm) lässt sich die Nitratkonzentration direkt photometrisch bestimmen.	<ul style="list-style-type: none"> - Keine nasschemische Aufbereitung der Probe notwendig - Sehr genaue Bestimmung der Nitratkonzentration 	<ul style="list-style-type: none"> - Kostenaufwendige Anschaffung eines UV-Photometers, welches daher oftmals nur in professionellen Laboren vorhanden ist

<p>3. Bestimmung der Nitratkonzentration mittels Ionen-selektiver Elektrode</p>	<p>Über die Messung der Spannung zwischen einer Ionen-selektiven Elektrode mit einer Ionen-selektiven Membran und einer Bezugselektrode lässt sich die Nitratkonzentration einer Lösung bestimmen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Schnelle und genaue Messungen möglich - Deckt einen sehr großen Messbereich ab 	<ul style="list-style-type: none"> - Ebenfalls kostenaufwendige Messmethode, gegebenenfalls mit teurem Membranaustausch nach wenigen Monaten
<p>4. Nasschemische Bestimmung der Nitratkonzentration mit einem Komparatorsystems</p>	<p>Durch den gelb-roten Farbumschlag einer Nitratlösung nach Versatz mit Sulfanilsäure, L-Weinsäure, Zinkpulver und m-Phenylendiamindihydrochlorid kann die Nitratkonzentration halbquantitativ durch den Vergleich mit einer Farbskala bestimmt werden. Ein Prüfglas mit Probewasser, dass nicht mit den Reagenzien versetzt wurde, dient als Referenz (JBL GmbH & Co KG, 2015).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Einfache und schnelle Bestimmung der Nitratkonzentration möglich - Kostengünstige Messmethode - Kann direkt an der Probenahmestelle eingesetzt werden - Ist relativ unempfindlich gegenüber Fremdstoffen und Temperaturschwankungen der Probe 	<ul style="list-style-type: none"> - Gefährdungspotenzial der verwendeten Reagenzien - Darf nach Herstellerangabe nicht in die Hände von Kindern gelangen - Nur halbquantitative Messungen möglich - Subjektiver Einfluss durch den visuellen Vergleich des Testfeldes mit der Farbskala - Reagenzien dürfen nicht unverdünnt bzw. in größeren Mengen in die Kanalisation oder Gewässer gelangen - größere Mengen sind gemäß örtlicher behördlicher Vorschriften zu entsorgen (JBL GmbH & Co KG, 2015)
<p>5. Bestimmung der Nitratkonzentration mit Nitrat-Teststäbchen, zum Beispiel: JBL PROAQUA-TEST EASY 7in1</p>	<p>Die Nitratkonzentration kann halbquantitativ durch den visuellen Abgleich eines Testfeldes mit einer Farbskala bestimmt werden. Nitrat-Ionen werden dabei zunächst auf dem Testfeld zu Nitrit reduziert. Anschließend wird die Probe auf dem Testfeld mit Sulfanilamid diazotiert, das durch Kopplung mit N-(1-Naphthyl)-ethylen-diamin einen rosa-violetten Farbstoff bildet (Hach, 2022).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Einfache, sichere und schnelle Bestimmung der Nitratkonzentration möglich - Kostengünstige Messmethode - Kann direkt an der Probenahmestelle eingesetzt werden - Ist relativ unempfindlich gegenüber Fremdstoffen und Temperaturschwankungen der Probe - Deckt einen ausreichenden Messbereich ab (zum Beispiel 0 – 500 mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nur halbquantitative Messungen möglich - Subjektiver Einfluss durch den visuellen Vergleich des Testfeldes mit der Farbskala

Messmethoden 1 bis 3 sind für ein großflächiges Nitrat-Monitoring mit dem Citizen Science-Ansatz mit der Zielsetzung, dass die Teilnehmer:innen die Messungen selbstständig durchführen können, aufgrund der hohen Kosten der erforderlichen Messgeräte ungeeignet. Messmethode 1 und 4 sind darüber hinaus nicht einsetzbar aufgrund des Gefährdungspotenzials der verwendeten Chemikalien für die menschliche Gesundheit und der Umweltgefährdung, wenn die Reagenzien in die Umwelt gelangen. Darüber hinaus sind diese Messmethoden nicht von Kindern durchführbar, welche als Zielgruppe ebenfalls in dem Citizen Science-Projekt berücksichtigt werden. Messmethode 5 (Nitrat-Teststäbchen) ist zwar vergleichsweise ungenau, da

nur eine halbquantitative Bestimmung der Nitratkonzentration erfolgen kann, jedoch ist diese Messmethode ungefährlich, kostengünstig, einfach und schnell durchzuführen. Die halbquantitative Bestimmung der Nitrat-Konzentration ist dabei in einem Konzentrationsbereich möglich (zum Beispiel 0 mg/L bis 500 mg/L), der den Grenzwert von 50 mg/L Nitrat für Grund- und Trinkwasser abdeckt und auch Rückschlüsse auf die Gewässergüte von Oberflächengewässern ermöglicht. Aufgrund der genannten Vorteile wird diese Messmethode für das Nitrat-Monitoring gewählt. Um ein möglichst flächendeckendes, längerfristiges Nitrat-Monitoring mit vielen Einzelmessungen zu realisieren, wurden die folgenden kostengünstigen Nitrat-Teststäbchen verwendet:

- JBL PROAQUATEST EASY 7in1, Artikelnummer: 2414400, 50 Tests pro Packung (JBL GmbH & Co KG, o. J.)

Neben der Nitratkonzentration können weitere Parameter (Karbonathärte, pH-Wert, Gesamthärte, Nitrit, Kohlenstoffdioxid, Chlor) mithilfe der Teststäbchen bestimmt werden, sodass diese auch für weitere Citizen Science-Projekte verwendet werden könnten. Die Vorgehensweise zur halbquantitativen Messung der Nitratkonzentration wird vom Hersteller wie folgt beschrieben und kann von den teilnehmenden Schüler:innen und Bürger:innen nach kurzer Einweisung selbstständig und an der Probenahmestelle erfolgen:

1. „Tauchen Sie einen Teststreifen mit allen Testfeldern in das zu untersuchende Wasser und bewegen Sie ihn 2 – 3 Sekunden darin hin- und her.“ (JBL GmbH & Co KG, 2018, S. 1)
2. „Schütteln Sie anhaftendes Wasser seitlich ab und legen Sie den Streifen auf eine waagerechte Unterlage.“ (ebd.)
3. „Vergleichen Sie nach 60 Sekunden die Farbe [...] [des Nitrat-Testfeldes] mit der Farbskala auf der Dose. Dort, wo die Farbe auf dem Teststreifen bestmöglich mit einem Farbwert der Farbskala übereinstimmt, lesen Sie den Messwert ab.“ (ebd.)

Aufgrund von Zuordnungsschwierigkeiten der Verfärbung des Testfeldes zu einem bestimmten Farbfeld der Referenzskala konnten die Teilnehmer:innen bei Unsicherheiten auch Zwischenkategorien wie beispielsweise 10 bis 25 mg/L Nitrat angeben.

Validierung der Messmethode:

Da die Messung mit den Teststäbchen durch die subjektive Farbwahrnehmung der Teilnehmer:innen beeinflusst wird, wurde diese Fehlerquelle neben weiteren Störeinflüssen im Rahmen einer Masterarbeit an der Universität Osnabrück in Kooperation mit der Umweltsystemforschung untersucht (Rolf, 2021). Der experimentelle Teil dieser Begleituntersuchung mit entsprechenden Messergebnissen wird für die vorliegende Doktorarbeit herangezogen, um die Messmethode zu validieren.

In der Begleituntersuchung wurde zunächst die Verfärbung des Testfeldes mithilfe eines photometrischen Versuchsaufbaus (vgl. Abbildung 40, S. 116) untersucht, um nachzuweisen, ob

unterschiedliche Nitratkonzentrationen zu einer messbaren, unterschiedlichen Verfärbung des Testfeldes führen. Weitere Details zur Methodik sind in Rolf (2021, S. 17 ff.) zu finden.

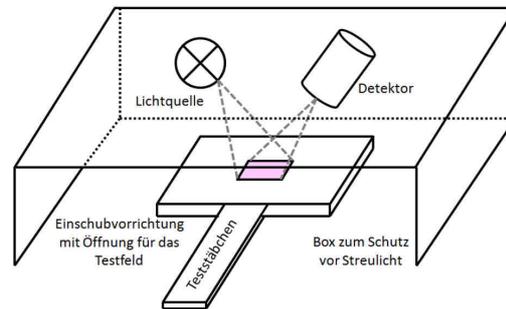


Abbildung 40: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Verfärbung des Testfeldes der Nitrat-Teststäbchen (Abbildung aus Rolf, 2021, S. 19).

Im Anschluss wurde der subjektive Ablesefehler bei der Bestimmung der Nitratkonzentration untersucht. Dazu haben 19 Proband:innen die Nitratkonzentrationen von 20 Nitratlösungen mit definierten Konzentrationen von 0 bis 500 mg/L mit den Nitrat-Teststäbchen gemessen (Rolf, 2021). Die gemessenen Werte wurden anschließend den tatsächlich vorliegenden Nitratkonzentrationen der Lösungen zugeordnet. Die in der Masterarbeit erhobenen Daten wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation wie folgt ausgewertet.² Zunächst wurden die beiden niedrigsten und höchsten von den Proband:innen gemessenen Werte für jede Nitratlösung definierter Konzentration als Ausreißer markiert. Anhand der übrigen Messergebnisse wurden Intervalle gebildet, welche die tatsächlichen Nitratkonzentrationen für die mit den Teststäbchen gemessenen Werte abdecken. Diese Intervalle wurden mit Grenz- und Zielwerten für Grund- und Oberflächengewässer verglichen. Aus diesem Vergleich wurde eine fünfstufige Kategorisierung der Messwerte der Teilnehmer:innen abgeleitet, mithilfe derer die Messdaten vor der Datenauswertung umcodiert wurden. Die sich daraus ergebenden, kategorisierten Nitratbelastungen weisen somit ein ordinales Skalenniveau auf, was in der weiteren Methodik die Wahl der statistischen Testverfahren beeinflusst (vgl. Kapitel 4.3.5 (e)).

Zuletzt wurden in der Masterarbeit mit einem kostengünstigen Farbsensors und einer 3D-gedruckten Messvorrichtung (vgl. Abbildung 41, S. 117) weitere Störeinflüsse, beispielsweise die Eintauchdauer der Teststäbchen in der Wasserprobe, untersucht. Hierfür wurden Teststäbchen mit Variation verschiedener Randbedingungen für 2-3 Sekunden in eine definierte Nitratlösung getaucht und anschließend in die 3D-gedruckte Messvorrichtung eingeschoben. Nach 60 Sekunden wurde der Farbwert des Testfeldes über den Farbsensor ermittelt. Anhand der Ergebnisse der Teilerperimente dieser Begleituntersuchung wird die Eignung der Teststäbchen für den Citizen Science-Ansatz in Kapitel 4.4.1 und 4.5.2 dargestellt und diskutiert.

² Die hier dargestellte, für das Citizen Science-Projekt herangezogene Auswertung und Interpretation der Daten zur subjektiven Ablesegenauigkeit weicht aus verschiedenen Gründen von den Ergebnissen der vorliegenden Masterarbeit ab (u. A. wegen der fehlenden Berücksichtigung von Zielwerten für Oberflächengewässer).



Abbildung 41: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Störeinflüssen auf die Messung mit den verwendeten Nitrat-Teststäbchen (Abbildung verändert nach Rolf, 2021, S. 22).

4.3.5. Ablauf und Methoden der Datenerhebung und -auswertung

Nach Festlegung des Forschungsdesigns und Vorbereitung aller Materialien haben die Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes im September 2019 mit der Datenerhebung begonnen. Nach Eingang der letzten Daten im März 2021 wurden die Daten in drei Kontrollschritten überprüft und ausgewertet. Abbildung 42 (S. 118) stellt den Ablauf der Datenerhebung und -auswertung schematisch dar.

(a) Auswahl und Anlegen der Probenahmestellen:

Vor der ersten Nitratmessung haben die Teilnehmer:innen eine geeignete Probenahmestelle ausgewählt, wobei öffentlich oder für die Teilnehmenden privat zugängliche Oberflächengewässer, Brunnen, Quellen und selbstgewählte Standorte für Regenwassermessungen beprobt werden konnten. Die Probenahmestellen wurden auf dem Messprotokoll notiert (vgl. Abbildung 33, S. 94) und, wenn notwendig, markiert, sodass die Probenahme während des gesamten Erhebungszeitraums am gleichen Ort von den Teilnehmenden durchgeführt wurde.

Für die Beprobung von Regenwasser wurde ein Niederschlagssammler (vgl. Anhang G), den die Teilnehmenden mit der Monitoring-Box erhalten haben, an einem geeigneten Standort aufgestellt. Zum Sammeln der Regenwasserproben wurde der Niederschlagssammler „TFA Dostmann 47.1008“ (TFA-Dostmann, 2022) verwendet, welcher einen Verdunstungsschutz aufweist und somit eine Verfälschung der Probe durch Aufkonzentration weitestgehend verhindert. Es handelt sich dabei um eine Form des Bulk-Sammlers, mit dem die nasse und trockene Deposition von Stickoxiden aus der Atmosphäre gemessen wird (Selent & Grupe, 2018). Um Verunreinigungen der Probe zu vermeiden, wurde der Niederschlagssammler auf einer freien Fläche alle Gegenstände in der näheren Umgebung überragend platziert, sodass kein Spritzwasser oder ablaufendes Wasser in den Niederschlagssammler gelangen konnte.

Die Probenahmestellen wurden von den Bürger:innen gegebenenfalls mit Unterstützung der Forschungspat:innen unter Angabe des Gewässertyps und eines selbstgewählten Standortnamens (z. B. Hase_Bersenbrück, Alfsee_Nord, Brunnen_Große_Straße) über die Projektwebseite angelegt. Um den Datenschutz der Teilnehmenden zu gewährleisten, wurden keine persönlichen Daten abgefragt. Dopplungen des Standortnamens wurden von der Webseite unterdrückt. Über eine automatische Abfrage wurden zudem die GPS-Koordinaten des Standortes

an die Universität Osnabrück übermittelt. Daher war es erforderlich, den Standort direkt an der Probenahmestelle anzulegen. Die Ergebnisse aller nachfolgenden Nitratmessungen konnten im Anschluss durch die Eingabe des Standortnamens über die Webseite automatisch der richtigen Probenahmestelle zugeordnet werden.

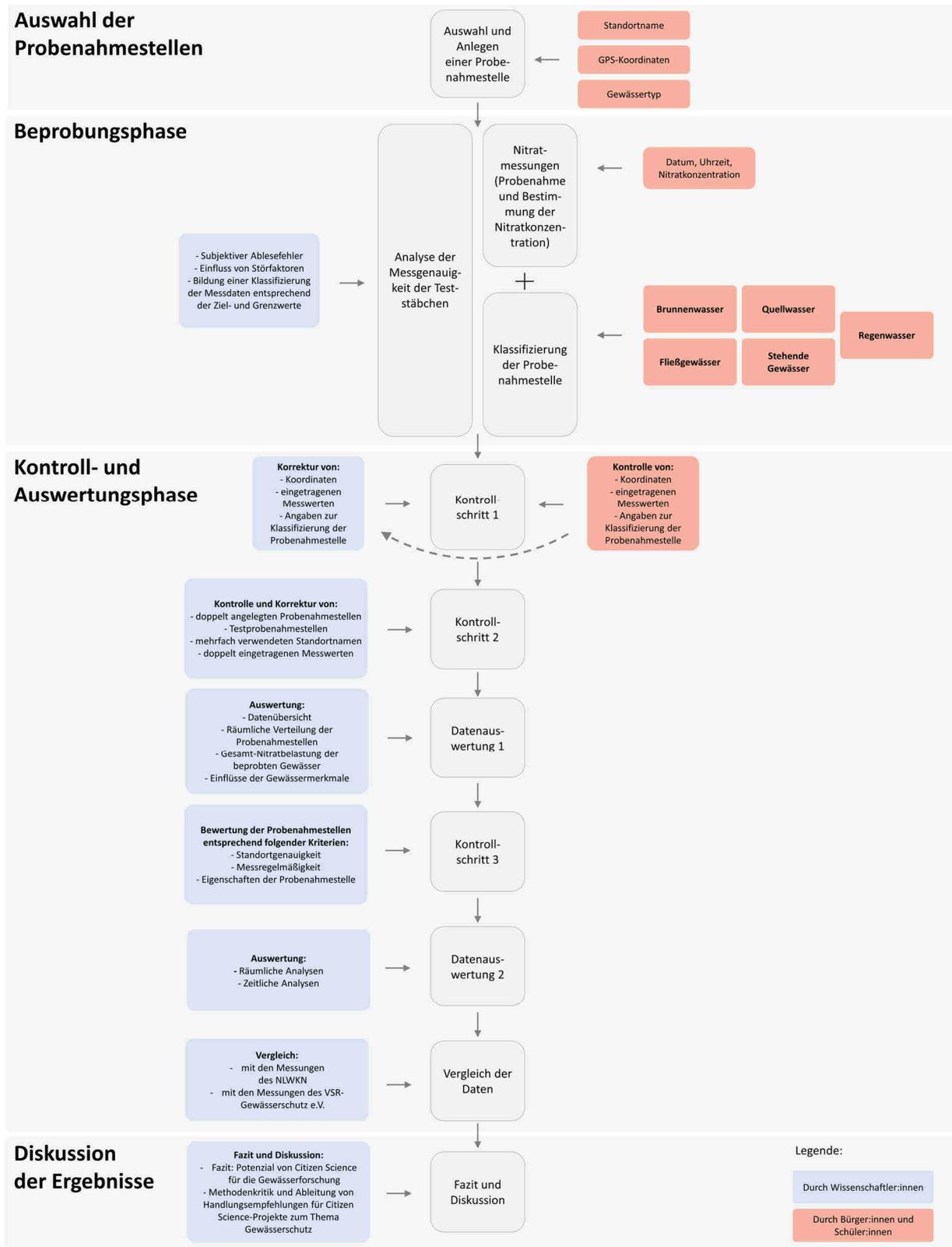


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Datenerhebung und -auswertung (eigene Abbildung).

(b) Durchführung und Protokollierung der Nitratmessungen:

Zur Durchführung einer Nitratmessung haben die Teilnehmer:innen zunächst eine Gewässerprobe entsprechend der für das Citizen Science-Projekt abgeleiteten Vorgaben entnommen. Die Vorgaben wurden ausgehend von den deutschen Normen für die Probenahme von Wasser entwickelt und für das Citizen Science-Projekt vereinfacht (Selent & Grupe, 2018). An allen Gewässern wurde mithilfe eines Schnappdeckelglases als kostengünstige Alternative zu einem Schöpfbecher eine Einzelprobe entnommen, die im Anschluss mit den Nitrat-Teststäbchen untersucht wurde.

Zwar lässt eine Einzelprobe insbesondere bei größeren Fließgewässern keinen Rückschluss auf die Beschaffenheit des gesamten Querschnitts zu. Dennoch wurde darauf verzichtet, eine Mischprobe von mehreren Probenahmestellen herzustellen (z. B. von beiden Ufern sowie aus der Strommitte), da diese für Teilnehmer:innen gegebenenfalls nicht (gefahrenfrei) erreichbar waren und die Herstellung einer Mischprobe mit bekannten Verhältnissen aufwendige Arbeitsschritte und weiteres Equipment erfordert. In stehenden Gewässern bildet sich hinsichtlich verschiedener Parameter (u. A. Temperatur, Sauerstoffsättigung, Sonneneinstrahlung) eine ausgeprägte Zonierung aus, sodass die entnommenen Einzelproben den Zustand des Gewässers ebenfalls nur für Zeit und Ort der Probenahme repräsentieren, jedoch nicht für das gesamte Gewässer. Um Verunreinigungen zu vermeiden, wurden Proben aus Oberflächengewässern mindestens 30 cm vom Ufer entfernt unterhalb der Wasseroberfläche entnommen. Ursachen einer nicht repräsentativen Probenahme wie beispielsweise Abwasserfahnen oder Totzonen können durch die Citizen Science-Probenahme nicht vollständig ausgeschlossen werden (Selent & Grupe, 2018).

Die Probenahme von Grundwasser erfolgte unter anderem über Brunnen. Nach Abpumpen von verunreinigtem Wasser wurde die Probe mit dem Schnappdeckelglas aus dem freien Strahl entnommen. An Quellen sollte die Wasserentnahme am oder möglichst nah am Wasseraustritt erfolgen, um ebenfalls eine Verunreinigung der Grundwasser-Probe zu vermeiden. Die Beprobung von Regenwasser aus dem Bulk-Sammler wurde zeitnah nach Regenereignissen durchgeführt, um eine Veränderung der Probe zu verhindern (Selent & Grupe, 2018).

Im Anschluss an die Probenahme haben die Teilnehmer:innen die Nitratkonzentration der Probe im Schnappdeckelglas direkt an der Probenahmestelle mit den Nitrat-Teststäbchen bestimmt, sodass die Probe nicht konserviert werden musste. Der gemessene Wert wurde anschließend auf der Webseite unter Angabe des Standortnamens eingetragen, wobei Datum und Uhrzeit automatisiert mit dem Messwert an die Universität Osnabrück übermittelt wurden. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der Messung im Messprotokoll (vgl. Abbildung 33, S. 94) notiert, welches zusammen mit dem Teststäbchen fotografiert wurde. Die Probenahme endete mit dem Entleeren und der Reinigung der verwendeten Materialien und der Entsorgung des Teststäbchens.

(c) Klassifikation der Gewässer und Probenahmestellen:

Im Beprobungszeitraum haben die Teilnehmer:innen die von ihnen gewählten Gewässer nicht nur beprobt, sondern auch mithilfe eines Fragebogens klassifiziert, sodass Einflüsse verschiedener Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung untersucht werden konnten. In der folgenden Tabelle 10 werden die abgefragten Merkmale zusammengefasst. In Anhang H sind die entsprechenden Fragebögen zu finden, welche von den Teilnehmer:innen über die Webseite oder mit einer PDF-Datei beantwortet werden konnten.

Tabelle 10: Übersicht der mit dem Fragebogen abgefragten Merkmale des Gewässers, der Probenahmestelle und der Umgebung der Probenahmestelle

Gewässertyp	Klassifizierte Merkmale
Brunnenwasser	<ul style="list-style-type: none"> - Brunnentiefe, minimale und maximale Filtertiefe, Filterrohrstrecke - Speicherung des Wassers - Trockenfallen - Förderung von Grundwasser - Grundwasserleiter - Bauform
Quellwasser	<ul style="list-style-type: none"> - Name der Quelle - Aus der Quelle entspringende Gewässer - Entstehungsweise - Zeitlicher Verlauf des austretenden Wasservolumens - Entfernung der Wasserentnahme zum Austritt des Wassers aus der Erdoberfläche
Fließgewässer	<ul style="list-style-type: none"> - Offizieller Name des Fließgewässers - Mündung in große Flüsse - Entfernung der Wasserentnahme zum Ufer - Wasserentnahme am Ufer oder von einem Steg/einer Brücke - Schwankungen des Wasserstandes - Entstehungsweise - Breite des Fließgewässers an der Probenahmestelle
Stehende Gewässer	<ul style="list-style-type: none"> - Offizieller Name des stehenden Gewässers - Entfernung der Wasserentnahme zum Ufer - Wasserentnahme am Ufer oder von einem Steg/einer Brücke - Schwankungen des Wasserstandes - Gewässertyp - Entstehungsweise - Salinität - Zufluss/Auffüllung
Regenwasser	<ul style="list-style-type: none"> - Umliegender Verkehr - Umliegende Industrie - Umliegende landwirtschaftlich genutzte Flächen

Ergänzend zu den Fragebögen konnten die Teilnehmer:innen Bilder der Probenahmestellen über die Webseite hochladen, welche im Anschluss zur Öffentlichkeitsarbeit genutzt oder in der Datenauswertung herangezogen wurden. Auf diese Weise konnten beispielsweise private Gartenteiche, die überwiegend von der Nutzung des privaten Grundstücks und dem Einfluss der Gartenbesitzer:innen, weniger jedoch von der allgemeinen Flächennutzung in der Umgebung beeinflusst werden, von entsprechenden Analysen ausgeschlossen werden.

(d) Kontrolle der eingegangenen Daten:

Kontrollschritt 1: Die Phase der Datenerhebung wurde Anfang März 2021 nach 18 Monaten beendet und ging fließend in eine Kontrollphase über. In dieser konnten die Teilnehmer:innen ihre gesamten eingegebenen Daten über die Webseite ansehen und fehlende Angaben ergänzen beziehungsweise falsche Angaben korrigieren. Darüber hinaus konnten auch die Standorte der Probenahmestellen präzisiert werden, die zum Beispiel aufgrund schlechter GPS-Empfangsbedingungen von den tatsächlichen Probenahmestellen abweichen konnten. Alle zu ergänzenden beziehungsweise zu ändernden Daten wurden von den Teilnehmenden per E-Mail an die Wissenschaftler:innen gesendet, sodass diese die Änderungen überprüfen und im Datensatz einfügen konnten.

Kontrollschritt 2: Darüber hinaus haben die Wissenschaftler:innen den Datensatz in einem zweiten Kontrollschritt bereinigt, indem Test-Standorte (über den Namen markiert, beispielsweise als „Test_Frauke“) gelöscht und doppelt angelegte Probenahmestellen (z. B. Burgwaldsued und Burgwaldsüd) zusammengelegt wurden. Letztere wurden sowohl über Namensdopplungen als auch über eine geringe Distanz zu nächstgelegenen Standorten identifiziert. Die entsprechenden Datensätze wurden begutachtet und bei logisch aufeinander folgenden Messwerten zu einer Probenahmestelle zusammengefasst. Die Kontrolle des Citizen Science-Datensatzes hat darüber hinaus gezeigt, dass einige uneindeutige Gewässernamen (z. B. „Brunnen“) von mehreren Personen genutzt wurden, also Messwerte von mehreren Probenahmestellen unter diesem Namen über die Webseite eingetragen wurden. Die betroffenen Standorte wurden durch ihre Namensgebung sowie auffällig viele Messwerte und sehr nah aufeinander folgende Messungen identifiziert. Durch Mithilfe der teilnehmenden Bürger:innen konnten einige Probenahmestellen rekonstruiert und als neue Probenahmestellen gespeichert werden. Die Messungen der ursprünglichen, mehrfach verwendeten Standortnamen wurden aus der Auswertung ausgeschlossen, da diese weder zeitlich noch räumlich die Nitratbelastung an einem definierten Ort abbilden. Außerdem wurden Einzelmessungen, die aufgrund von Verbindungsproblemen zum Server der Universität Osnabrück doppelt übertragen wurden, korrigiert. Der auf diese Weise bereinigte Datensatz wurde für eine erste Auswertung der Daten herangezogen. Die Probenahmestellen wurden hierfür zunächst entsprechend der verschiedenen Gewässertypen klassifiziert. Im Anschluss wurde für jeden Gewässertyp ein Vektorlayer mit allen Probenahmestellen in das Geoinformationssystem QGIS eingefügt. Als ein für Niedersachsen geeignetes Koordinatenbezugssystem wurde die UTM-Zone 32N (ETRS89, EPSG:25832) ausgewählt, weitere verwendete Geodaten wurden gegebenenfalls in dieses System überführt.

Kontrollschritt 3: Um zeitliche und räumliche Einflüsse zu analysieren, wurde die Standortgenauigkeit und die Messregelmäßigkeit der einzelnen Probenahmestellen in einem dritten Kontrollschritt bewertet. Zur Bewertung der Standortgenauigkeit der beprobten Oberflächengewässer wurden folgende Geodaten herangezogen:

- Fließgewässer: Gewässernetz aus dem Basis-DLM vom Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (*Gewaessernetz*, 2020)
- Stehende Gewässer: Wasserflächen aus den OpenStreetMap-Daten, bearbeitet und bereitgestellt durch Geofabrik (*Niedersachsen-Latest-Free*, 2022, Layer: Bodies of Water, fclass: water, reservoir)

Entlang der Geometrien (Geometriotyp Fließgewässer: Linien, Geometriotyp Standgewässer: Polygone) wurde ein Punktlayer mit einem Punktabstand von 5 m erzeugt. Anschließend wurde mit dem Verarbeitungswerkzeug „Abstand zum nächsten Knoten (Linie zu Knoten)“ des Geoinformationssystems QGIS jeweils der Abstand der Probenahmestellen zum nächsten Punkt entlang der Geometrien der fließenden beziehungsweise stehenden Gewässer bestimmt (vgl. Abbildung 43, S. 123). Die Namen der Probenahmestellen beziehungsweise die von den Teilnehmenden angegebenen offiziellen Namen der Gewässer wurden nachfolgend mit den zugeordneten Gewässern verglichen, bei Abweichungen wurden die Zuordnungen und der Abstand zum tatsächlich beprobten Gewässer manuell korrigiert. Die Probenahmestellen wurden sodann mithilfe der Ergebnisse dieser Analyse den folgenden Kategorien hinsichtlich ihrer Standortgenauigkeit zugeordnet.

- Kategorie 1: Sehr gut (Maximaler Abstand: 25 m und eindeutige Zuordnung der Probenahmestelle zu dem Gewässer möglich)
- Kategorie 2: Gut (Maximaler Abstand: 50 m)
- Kategorie 3: Akzeptabel (Maximaler Abstand: 250 m)
- Kategorie 4: Schlecht (Maximaler Abstand: 2000 m)
- Kategorie 5: Sehr schlecht (Abstand über 2000 m)

Probenahmestellen in stehenden Gewässern, die sich innerhalb der Polygone und damit innerhalb der Wasserflächen befanden, wurden in Kategorie 1 eingeordnet und der Abstand als 0 m definiert. Für alle weiteren Probenahmestellen in stehenden Gewässern wurde der Abstand zum Ufer des jeweiligen Gewässers, also zu den Seiten der Polygone, bestimmt.

Alle Oberflächengewässer-Probenahmestellen, welche mit Kategorie 1 bis 3 bewertet wurden, wurden bei den räumlichen Analysen berücksichtigt. Bei Probenahmestellen mit einer schlechten oder sehr schlechten Standortgenauigkeit ist davon auszugehen, dass der Standort über die Webseite nicht am Ort der Beprobung angelegt wurde, sondern beispielsweise am Wohnort der Teilnehmenden, oder technische Fehler vorlagen. Sofern die Teilnehmenden die Standorte der beprobten Gewässer im Zuge des ersten Kontrollschrittes kontrolliert und korrigiert haben, wurden die Korrekturen vor der Bewertung der Standortgenauigkeit in den Datensatz eingearbeitet.

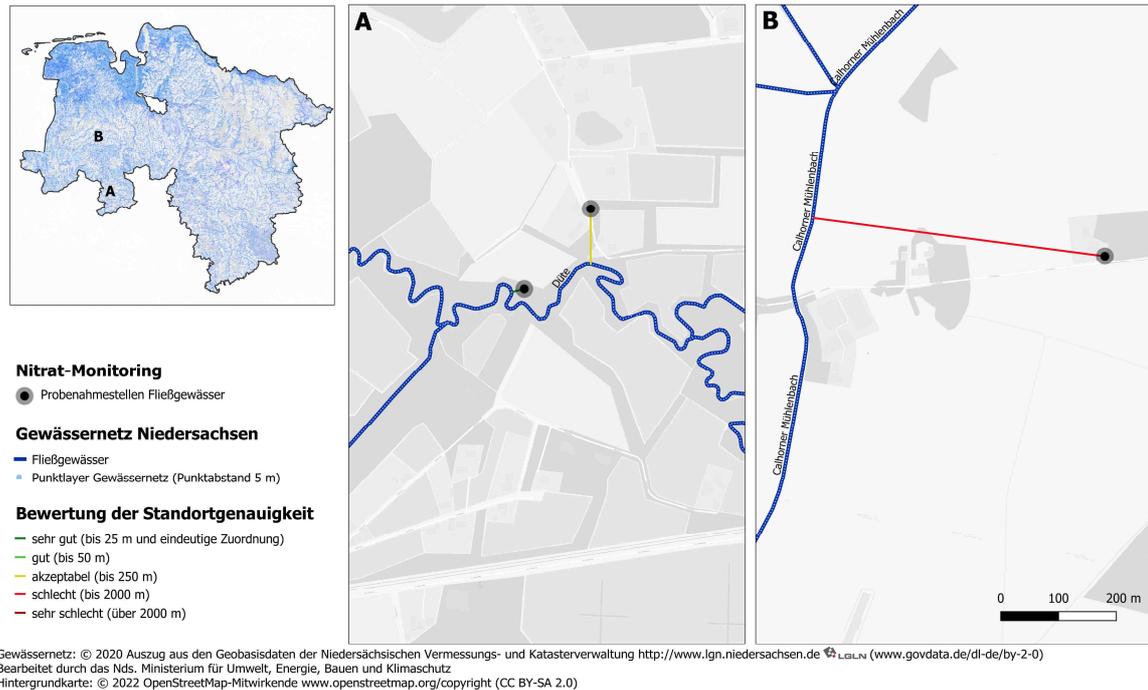


Abbildung 43: Bewertung der Standortgenauigkeit der Fließgewässer-Probenahmestellen an zwei Beispielen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Die Bewertung der Standortgenauigkeit war nur für die Gewässertypen stehende und fließende Gewässer möglich, da für alle weiteren Gewässertypen keine Referenzdaten vorlagen. Für räumliche Analysen der Gewässertypen Brunnenwasser, Quellwasser und Regenwasser wurden daher nur Probenahmestellen aussortiert, die eindeutig außerhalb des Beprobungsgebietes lagen. Die Ergebnisse der Bewertung der Standortgenauigkeit sind in der Online-Karte einsehbar (www.nitrat.uos.de → Interaktive Karte zum Nitrat-Monitoring, Stand 27.11.2022).

Um zeitliche Analysen durchzuführen, wurde darüber hinaus die Messregelmäßigkeit für jede Probenahmestelle bewertet. So wurden für statistische Tests zu jahreszeitlichen Schwankungen nur Probenahmestellen herangezogen, welche in jeder der folgenden sechs meteorologischen Jahreszeiten innerhalb des Beprobungszeitraums mindestens einmal beprobt wurden:

- Herbst 2019: 1. September 2019 – 30. November 2019
- Winter 2019/2020: 1. Dezember 2019 – 29. Februar 2020
- Frühling 2020: 1. März 2020 – 31. Mai 2020
- Sommer 2020: 1. Juni 2020 – 31. August 2020
- Herbst 2020: 1. September 2020 – 30. November 2020
- Winter 2020/2021: 1. Dezember 2020 – 28. Februar 2021

Auf diese Weise konnten saisonale Unterschiede der Nitratbelastungen über den gesamten Beprobungszeitraum abgebildet werden. Zur Analyse des Zusammenhangs zwischen der Brunnentiefe und den Schwankungen der Nitratbelastungen wurden Probenahmestellen herangezogen, die in mindestens vier aufeinander folgenden Jahreszeiten beprobt wurden und so die

Nitratschwankungen über ein Jahr abbilden. Die Teilnehmer:innen haben über die Online-Karte Feedback zur Messregelmäßigkeit erhalten.

(e) Datenauswertung:

Im Anschluss an diese Kontrollschritte wurden die Daten hinsichtlich verschiedener Fragestellungen ausgewertet (vgl. Kapitel 4.1). Der Citizen Science-Datensatz sowie weitere Geodaten wurden hierfür mithilfe der Programme QGIS, SPSS und EXCEL verarbeitet.

Datenübersicht:

Zunächst wurde mithilfe verschiedener deskriptiver Methoden (Häufigkeitsverteilungen, Tabellen und Diagramme) eine Übersicht über die erhobenen Monitoring-Daten erstellt, welche die Gesamtanzahl der Probenahmestellen und der Nitratmessungen sowie den zeitlichen Verlauf der Messwerteintragungen darstellt.

Räumliche Verteilung der Probenahmestellen:

Im Anschluss wurde die räumliche Verteilung der Probenahmestellen untersucht. Hierfür wurde für jeden Probenahmestellen-Layer, differenziert entsprechend der verschiedenen Gewässertypen, eine Heatmap erstellt (QGIS: Verarbeitungswerkzeug Heatmap (Kerndichtenschätzung)), mithilfe derer die Dichte von Punktdaten untersucht werden kann (Graser et al., 2017). Um zu dichte Probenahmestellen zu identifizieren, wurde in Anlehnung an die Empfehlungen des NLWKN für das Grundwassermonitoring ein Maximum von 5 Probenahmestellen pro 250 km² festgelegt. Wird dieser Wert überschritten, so wird die Vorgabe des NLWKN, maximal eine Probenahmestelle für 50 km² zu berücksichtigen, um engständige Messstellennetze zu reduzieren, nicht erfüllt (NLWKN & LBEG, 2006). Daraus abgeleitet wurde für die Heatmap der Brunnenwasser-Probenahmestellen des Nitrat-Monitorings ein Radius von 8,92 km (entspricht einer Kreisfläche von 250 km²) verwendet. Für die Gewässertypen Quellwasser, Fließgewässer, stehende Gewässer und Regenwasser wurden die Heatmaps mit dem gleichen Radius erstellt, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Heatmaps der verschiedenen Gewässertypen zu ermöglichen.

Bewertung der Nitratbelastung der beprobten Gewässer:

Um anhand der Mehrfachmessungen an einer Probenahmestelle eine Gesamtbewertung der Nitratbelastung dieser Probenahmestelle über den gesamten Probenahmezeitraum vorzunehmen, wurden Perzentile herangezogen. Im Gegensatz zum arithmetischen Mittel und zu weiteren Mittelwerten für metrisch skalierte Daten lassen sich Perzentile auch für die vorliegenden, ordinal skalierten Daten zur Nitratbelastung bestimmen. Zur Berechnung der Perzentile wurden die nach Tabelle 12 (S. 136) umcodierten Messwerte herangezogen, welche sich aus der Validierung der Teststäbchen ergeben.

Angelehnt an die Richtlinien für die Grundwasserüberwachung in der Grundwasserverordnung wurde für jede Grundwasser-Probenahmestelle (Brunnen- und Quellwasser) das

50. Perzentil der Mehrfachmessungen aus dem gesamten Untersuchungszeitraum als ordinales Gegenstück zum arithmetischen Mittel ermittelt (GrwV, 2010/04.05.2017). Das 50. Perzentil entspricht dabei der Kategorie der Nitratbelastung, in oder unter der mindestens 50 % der gemessenen Nitratkonzentrationen liegen. Ein Beispiel folgt in Abbildung 44.

Für die Bewertung der Nitratbelastung der Oberflächengewässer-Probenahmestellen (Fließgewässer und stehende Gewässer) wurden die Vorgaben der früheren Empfehlung der LAWA (1998) adaptiert, in welcher die Nitratkonzentration von Oberflächengewässern gesondert betrachtet wird. Im Gegensatz dazu bezieht sich der aktuelle Zielwert aus der Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer auf die Gesamtstickstoffkonzentration, welche anhand der erhobenen Daten aus dem Citizen Science-Projekt nicht bestimmt werden kann (OGewV, 2016/09.12.2020). Entsprechend der LAWA-Empfehlung wurde zur Bewertung der Nitratbelastung das 90. Perzentil der Mehrfachmessungen für jede Probenahmestelle im Oberflächengewässer berechnet (LAWA, 1998). Das 90. Perzentil entspricht dabei der Kategorie der Nitratbelastung, in oder unter der mindestens 90 % der gemessenen Nitratbelastungen liegen. Durch das 90. Perzentil werden im Gegensatz zum 50. Perzentil auch hohe Nitratbelastungen abgebildet, welche nur über einen kürzeren Zeitraum vorliegen, jedoch trotzdem bedeutende Auswirkungen auf die Ökologie von Oberflächengewässern haben und beispielsweise zu einer Eutrophierung der Gewässer führen können. Für Regenwasser-Probenahmestellen wurde ebenfalls das 90. Perzentil berechnet, um eine Vergleichbarkeit zu den Oberflächengewässermessungen zu ermöglichen.

Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel zur Berechnung des 50. und 90. Perzentils der gemessenen und entsprechend der Validierung der Teststäbchen umcodierten Werte.

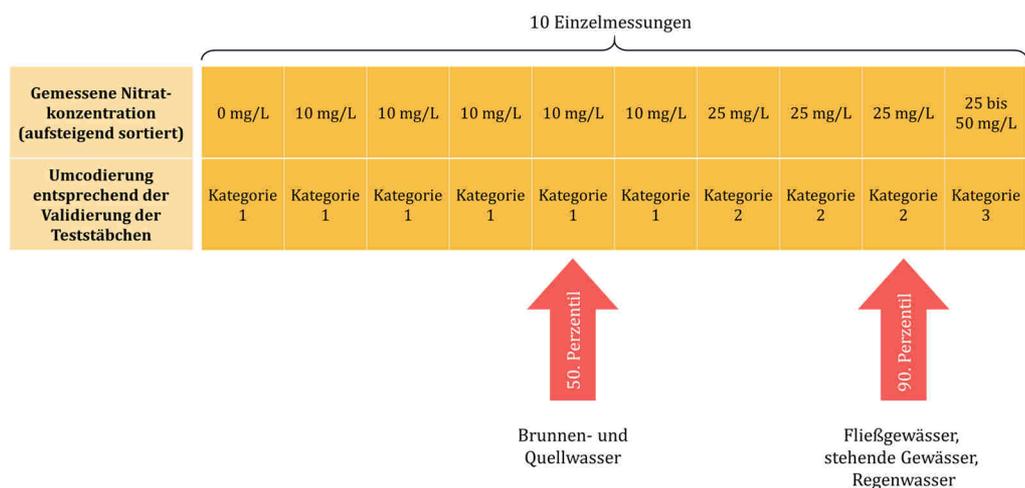


Abbildung 44: Bewertung der Nitratbelastung an einer Probenahmestelle anhand des 50. und 90. Perzentils der Mehrfachmessungen (eigene Abbildung).

Wie in Abbildung 44 dargestellt, unterscheiden sich das 50. und 90. Perzentil bei identischen Messwerten. Daher lassen sich die mit diesen Methoden berechneten Nitratbelastungen von Grundwasser und Oberflächengewässern nicht vergleichen. Die Nitratbelastungen der

Probenahmestellen in Regenwasser, stehenden und fließenden Gewässern beziehungsweise der Probenahmestellen in Quell- und Grundwasser wurden jeweils auf gleiche Weise bestimmt, sodass hier ein Vergleich der Ergebnisse, zum Beispiel mit dem Mann-Whitney-U-Test, möglich ist. Dieser Test und alle weiteren verwendeten statistischen Testverfahren werden im Folgenden dargestellt.

Auswahl der statistischen Testverfahren:

Um die dargestellten Hypothesen zu überprüfen, wurden neben deskriptiven Methoden nichtparametrische Testverfahren zur Untersuchung von Unterschieden der zentralen Tendenzen und Korrelationskoeffizienten zur Untersuchung von Zusammenhängen zweier Variablen herangezogen. Folgende Tabelle 11 (S. 127) gibt einen Überblick über diese Testverfahren. Aufgrund des ordinalen Skalenniveaus der erhobenen Nitratbelastungen können parametrische Testverfahren nicht verwendet werden (Bühl, 2012; Duller, 2018).

Nichtparametrische Testverfahren zur Untersuchung von Unterschieden der zentralen Tendenzen: Die oberen vier Testverfahren in Tabelle 11 sind jeweils nichtparametrische Gegenstücke zum t -Test für abhängige und unabhängige Stichproben und zur einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit und ohne Messwiederholung. Als Pendant zum t -Test für abhängige Stichproben wurde der Vorzeichen-Test dem Wilcoxon-Test vorgezogen, da für letzteren eine intervallskalierte, abhängige Variable vorliegen sollte. Der Wilcoxon-Test berücksichtigt dabei nicht nur die Richtung, sondern auch die Größe der Differenzen zwischen den verbundenen Paaren (Sarabia et al., 2008; Wilcoxon, 1945). Da durch die Teststäbchen nur halbquantitative Nitratkonzentrationen bestimmt werden können, die aufgrund der Messungenauigkeit keinen eindeutig definierten Abstand zueinander haben, wurde der Vorzeichen-Test präferiert.

Die Nullhypothese, also die Gleichheit der zentralen Tendenzen, wurde für die vier dargestellten Testverfahren abgelehnt, wenn der p -Wert unter dem gewählten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ lag. Ist dies der Fall, wurde als Alternativhypothese angenommen, dass mindestens eine der Stichproben nicht die gleiche zentrale Tendenz aufweist. Liegen mehr als zwei Stichproben mit signifikanten Unterschieden vor, wurde ein Dunn-Bonferroni-Test als Post-hoc-Test durchgeführt, um zu bestimmen, zwischen welchen Gruppen die signifikanten Unterschiede auftreten (Dunn, 1964).

Um die Größe und Richtung der Unterschiede zu beurteilen, wurde als Effektstärkemaß die Effektstärke r für ordinale Daten anhand der standardisierten Teststatistik z und der Fallzahl N wie folgt berechnet (Fritz et al., 2012):

$$r = \frac{z}{\sqrt{N}}$$

Die Effektstärke wurde nach Cohen (1988) wie folgt interpretiert:

- $0,1 \leq |r| < 0,3$ kleiner Effekt
- $0,3 \leq |r| < 0,5$ mittlerer Effekt
- $0,5 \leq |r|$ großer Effekt

Tabelle 11: Übersicht über die in der Auswertung verwendeten, statistischen Testverfahren.

Nichtparametrische Testverfahren zur Untersuchung von...	Name	Voraussetzungen	Quellen
...Unterschieden der zentralen Tendenzen einer Variable zwischen Gruppen	Mann-Whitney-U-Test	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Zwei unabhängige Stichproben</u> • Die abhängige Variable ist mindestens ordinalskaliert 	Primärliteratur: Mann & Whitney, 1947 Weitere Erläuterungen und Berechnung mit SPSS: Hart, 2001 Eckstein, 2016
	Vorzeichen-Test	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Zwei abhängige Stichproben</u> • Die abhängige Variable ist mindestens ordinalskaliert 	Primärliteratur: Dixon & Mood, 1946 Weitere Erläuterungen und Berechnung mit SPSS: Bühl, 2012 Duller, 2018
	Kruskal-Wallis-Test	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Mehrere unabhängige Stichproben</u> • Die abhängige Variable ist mindestens ordinalskaliert 	Primärliteratur: Kruskal & Wallis, 1952 Weitere Erläuterungen und Berechnung mit SPSS: Bühl, 2012 Eckstein, 2016
	Friedman-Test	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Mehrere abhängige Stichproben</u> • Die abhängige Variable ist mindestens ordinalskaliert 	Primärliteratur: Friedman, 1937 Weitere Erläuterungen und Berechnung mit SPSS: Bühl, 2012 Duller, 2018
... Zusammenhängen zweier Variablen	Kendall-Tau-b Rangkorrelationskoeffizient	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Zwei ordinal oder metrisch skalierte Variablen</u> • Beide Variablen haben die gleiche Anzahl an Ausprägungen 	Primärliteratur: Kendall, 1938 Weitere Erläuterungen und Berechnung mit SPSS: Eckstein, 2016
	Kendall-Tau-c Rangkorrelationskoeffizient	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Zwei ordinal oder metrisch skalierte Variablen</u> • Beide Variablen haben nicht die gleiche Anzahl an Ausprägungen 	Primärliteratur: Kendall, 1938 Weitere Erläuterungen und Berechnung mit SPSS: Eckstein, 2016

Nichtparametrische Testverfahren zur Untersuchung von Zusammenhängen zweier Variablen:

Um Zusammenhänge zwischen zwei Variablen, zum Beispiel der Filtertiefe und der Nitratbelastung, zu untersuchen, wurden Kendall-Tau Rangkorrelationskoeffizienten berechnet (Kendall, 1938). Der Kendall-Tau-b Rangkorrelationskoeffizient τ_b ist geeignet, wenn beide Variablen die gleiche Anzahl an Ausprägungen haben. Der Kendall-Tau-c Rangkorrelationskoeffizient τ_c beinhaltet Anpassungen für den Fall, dass die Variablen nicht die gleiche Anzahl an Ausprägungen aufweisen (Eckstein, 2016). Die Nullhypothese, die von keinem Zusammenhang ausgeht, wurde bei einer Signifikanz p unter $\alpha = 0,05$ verworfen. Die Alternativhypothese, die in diesem Fall angenommen wurde, geht von einem Zusammenhang zwischen den Variablen aus. Als Effektstärke kann der Korrelationskoeffizient selbst herangezogen werden, der Werte von -1 bis +1 annimmt. Nach Cohen (1988) wurden die Werte analog zur bereits dargestellten Kategorisierung als kleiner, mittlerer oder großer Effekt interpretiert.

Diese statistischen Tests wurden unter anderem herangezogen, um zu beurteilen, inwieweit sich verschiedene Einflüsse auf die Nitratbelastung anhand der Citizen Science-Daten statistisch nachweisen lassen. Dabei wurde wie folgt vorgegangen.

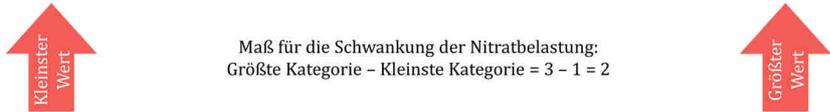
Untersuchung der Einflüsse der Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung:

Anhand der Klassifizierung der Gewässer durch die Teilnehmenden wurden verschiedene Einflüsse der Gewässermerkmale (Breite des Fließgewässers, Filtertiefe des Brunnens) auf die Nitratbelastung untersucht. Hierzu wurde durch Berechnung der Kendall-Tau-b bzw. Kendall-Tau-c Rangkorrelationskoeffizienten überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen der Nitratbelastung der beprobten Gewässer (50. bzw. 90. Perzentil der Mehrfachmessungen) und dem Gewässermerkmal (z. B. Brunntiefe) vorliegt.

Des Weiteren wurde entsprechend der Hypothese BW-H2 untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen den Schwankungen der Nitratbelastungen und der Filtertiefe der beprobten Brunnen vorliegt. Hierfür wurden ausschließlich Probenahmestellen herangezogen, die mindestens jeweils einmal in vier aufeinander folgenden Jahreszeiten beprobt wurden, um die Schwankungen über ein gesamtes Jahr abbilden zu können. Da die halbquantitativ erhobenen Nitratbelastungen ein ordinales Skalenniveau aufweisen, lässt sich die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Nitratkonzentration nicht direkt bestimmen. Als Maß für die Spannweite der Nitratbelastung wurde stattdessen die geringste und höchste gemessene Nitratkonzentration innerhalb des Beprobungszeitraums identifiziert und die Differenz der Kategoriennummerierung entsprechend der Validierung der Teststäbchen und Umcodierung der Messdaten gebildet.

In der folgenden Abbildung 45 (S. 129) wird diese Methode an einem Beispiel dargestellt.

Gemessene Nitratkonzentration (aufsteigend sortiert)	0 mg/L	10 mg/L	10 mg/L	10 mg/L	10 mg/L	10 mg/L	25 mg/L	25 mg/L	25 mg/L	25 bis 50 mg/L
Umcodierung entsprechend der Validierung der Teststäbchen	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 2	Kategorie 3					



 Maß für die Schwankung der Nitratbelastung:
 Größte Kategorie – Kleinste Kategorie = 3 – 1 = 2

Abbildung 45: Beispiel zur Bewertung der Schwankung der Nitratbelastung an einer Probenahmestelle (eigene Abbildung).

Untersuchung räumlicher Einflüsse auf die Nitratbelastung:

Zur Untersuchung räumlicher Einflüsse wurden nur Probenahmestellen mit einer akzeptablen Standortgenauigkeit berücksichtigt (vgl. Kontrollschritt 3, Kapitel 4.3.5 (d)). Diese Probenahmestellen wurden durch räumliche Verbindungen (QGIS Verarbeitungswerkzeug: Attribute nach Position zusammenfügen) verschiedenen Klassen der folgenden Geodaten zugeordnet, um den Einfluss der Landbedeckung und -nutzung beziehungsweise der hydrogeologischen Bedingungen zu analysieren.

- Landbedeckung und -nutzung: *CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021*
- Hydrogeologie: *Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (HYRAUM), 2015*

Einflüsse der Landbedeckung und -nutzung: Die für die Auswertung herangezogenen CORINE Land Cover (CLC)-Daten zur Landbedeckung und -nutzung sind anhand von 3 Leveln hierarchisch strukturiert, die über einen ein- bis dreistelligen Code definiert werden (Kosztra et al., 2019). Zur Überprüfung der Hypothesen FG-H2 für Fließgewässer und SG-H1 für stehende Gewässer wurden die CLC-Klassen auf Level 1 verwendet (z. B. CLC-Code 2: Landwirtschaftliche Flächen), welche der übergeordneten Art der Flächennutzung entsprechen. Ergänzend wurden Unterschiede der Nitratbelastung zwischen den genauer differenzierten CLC-Klassen auf Level 2 untersucht (z. B. CLC-Code 21: Ackerflächen) (vgl. Abbildung 46, S. 130).

Zur Überprüfung der Hypothese RW-H1 für Regenwasser ist von vornherein eine genauere Differenzierung der Landbedeckung und -nutzung notwendig, sodass hier direkt auf die CLC-Klassen auf Level 2 zurückgegriffen wurde. Um die Nitratbelastung des beprobten Regenwassers in städtisch geprägten Flächen (CLC-Code 11) und Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen (CLC-Code 12) mit Flächen anderer Nutzungsarten (CLC-Code 13 bis 52) zu vergleichen, wurden Probenahmestellen in den zuletzt genannten anderen Nutzungsarten zu einer Stichprobe zusammengefasst.

Im Anschluss an die räumliche Verbindung wurden Kruskal-Wallis- und Dunn-Bonferroni-Post-hoc-Tests durchgeführt, um zu prüfen, ob sich die Nitratbelastungen für die verschiedenen räumlich klassifizierten Probenahmestellen signifikant voneinander unterscheiden.

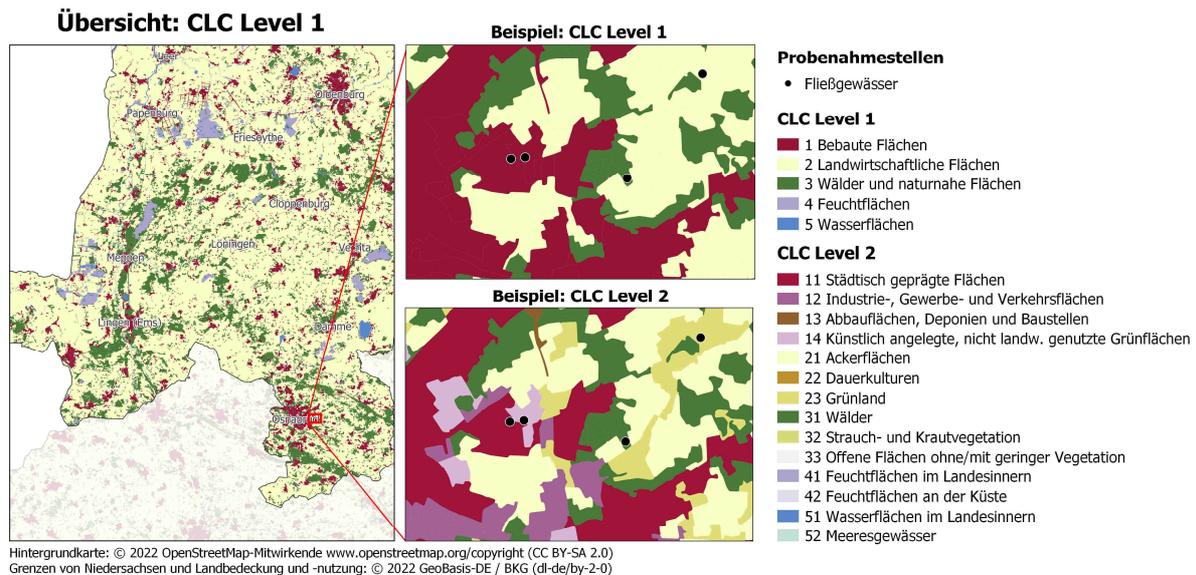


Abbildung 46: Räumliche Verbindung der Probenahmestellen mit den Landbedeckungs- und -nutzungsklassen auf Level 1 und Level 2 (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Hydrogeologische Einflüsse: Durch die hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland werden Gebiete mit gleichen oder sehr ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften voneinander abgegrenzt. Sie ist mit zunehmendem Detailgrad unterteilt in hydrogeologische Großräume, Räume und Teilräume. Zur Untersuchung der Hypothese BW-H3 für Brunnenwasser eignen sich die hydrogeologischen Räume, „deren hydrogeologische Eigenschaften aufgrund ähnlichen Schichtenaufbaues, ähnlicher geologischer Struktur, ähnlicher Morphologie und ähnlicher Grundwasserbeschaffenheit im Rahmen einer festgelegten Bandbreite einheitlich sind“ (*Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (HYRAUM)*, 2015, Dokumentation S. 2). Die hydrogeologischen Räume innerhalb des Beprobungsgebietes wurden zur Untersuchung der Hypothese anhand der Beschreibung vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2010) in die Klassen Niederung, Bergland und Geest eingeteilt (vgl. Anhang I). Nach der räumlichen Verbindung der Probenahmestellen mit diesen Klassen wurden Unterschiede der Nitratbelastung mit einem Kruskal-Wallis- und Post-hoc-Test untersucht.

Untersuchung zeitlicher Einflüsse auf die Nitratbelastung:

Für die Analyse der jahreszeitlichen Schwankungen (Hypothesen FG-H3, SG-H2, BW-H4, QW-H1) wurde als Mittelmaß für die Nitratbelastung zunächst für jede Probenahmestelle das 50. Perzentil der Mehrfachmessungen (nach Umcodierung der Messdaten) innerhalb jeder der sechs meteorologischen Jahreszeiten während des Untersuchungszeitraums berechnet. Mit Hilfe des Friedman-Tests für abhängige Stichproben mit Messwiederholung, Dunn-Bonferroni-Post-hoc-Tests und deskriptiver Statistik wurden die Unterschiede der Nitratbelastung zwischen den einzelnen Jahreszeiten anschließend analysiert.

Für die Friedman- und Dunn-Bonferroni-Post-hoc-Tests wurden nur Probenahmestellen verwendet, die mindestens einmal in jeder der sechs meteorologischen Jahreszeiten untersucht

wurden. Die deskriptive Statistik (Stapeldiagramme) bezieht hingegen für jede Jahreszeit jeweils alle Probenahmestellen ein, die mindestens einmal während der jeweiligen Jahreszeit beprobt wurden. Dadurch kann die deskriptive Statistik ergänzend zu den statistischen Tests herangezogen werden, falls nur wenige Probenahmestellen vorliegen, die über den gesamten Probenahmezeitraum beprobt wurden.

Vergleich mit weiteren Messinitiativen:

Um abschließend die Güte des Citizen Science-Datensatzes zu bewerten, wurde ein Vergleich mit den Datensätzen weiterer Messinitiativen durchgeführt. Exemplarisch wurden hierfür die Gewässertypen Brunnenwasser und Fließgewässer herangezogen, da für diese folgende Daten zum Vergleich verfügbar waren:

- VSR-Gewässerschutz e. V.: Interaktive Nitratkarte - Überblick über die Belastung in den Kreisen (VSR-Gewässerschutz e.V., 2021b)
- NLWKN: Nitratmessungen von September 2019 bis einschließlich März 2021 an allen Probenahmestellen im Beprobungsgebiet (nur projektinterne Datennutzung genehmigt)

Die Citizen Science-Daten wurden wie folgt mit den Datensätzen der beiden genannten Messinitiativen verglichen.

Vergleich mit den Daten des VSR-Gewässerschutzes: Der VSR-Gewässerschutz e.V. ist eine gemeinnützige Umweltschutzorganisation, welche nicht nur über die Relevanz des Gewässerschutzes informiert, sondern auch Gewässer-Untersuchungen durchführt. Da der VSR durch Mithilfe von interessierten Bürger:innen Proben aus privaten Brunnen untersucht, eignen sich die Messungen für einen Vergleich mit den Daten des Citizen Science-Projektes besonders gut (VSR-Gewässerschutz e.V., 2021a). Auf der Webseite des VSR-Gewässerschutzes wurde im Jahr 2021 für jeden Landkreis jeweils der Anteil der bis dahin beprobten Brunnen angegeben, die über dem Grenzwert von 50 mg/L lagen (VSR-Gewässerschutz e.V., 2021b). Um diese Daten mit den Citizen Science-Daten zu vergleichen, wurde für jeden Landkreis anhand der Citizen Science-Daten ebenfalls der Anteil der Brunnenwasser-Probenahmestellen berechnet, bei dem eine Überschreitung des Grenzwertes entsprechendes des 50. Perzentils der Mehrfachmessungen vorlag. Die Messungenaugigkeit der Teststäbchen wird in der Auswertung durch einen entsprechenden Fehlerbereich abgebildet, der den minimalen und maximalen Anteil der den Grenzwert überschreitenden Probenahmestellen umfasst.

Vergleich mit den Daten des NLWKN: Für den Vergleich mit den Daten des NLWKN wurde über eine Nearest Neighbor-Analyse mithilfe des Verarbeitungswerkzeugs „Abstand zum nächsten Knoten (Linie zu Knoten)“ für jede im Citizen Science-Projekt untersuchte Probenahmestelle die nächst gelegene Probenahmestelle des NLWKN bestimmt. Um vertikale Unterschiede der Nitratbelastung des Grundwassers zu berücksichtigen, wurden die Grundwasser- und Brunnenwasser-Probenahmestellen beider Messinitiativen entsprechend ihrer mittleren Filtertiefe

in 10 m-Schritten klassifiziert. Innerhalb jeder dieser Kategorien wurde die Nearest Neighbor-Analyse durchgeführt (vgl. Abbildung 47). Anschließend wurden die Nitratkonzentrationen der zugeordneten Brunnen- und Fließgewässer-Probenahmestellen verglichen. Hierzu wurden jeweils die Gesamt-Nitratbewertungen der einzelnen Probenahmestellen (50. bzw. 90. Perzentil der Mehrfachmessungen) des Citizen Science-Projektes herangezogen. Analog wurde für jede Fließgewässer-Probenahmestelle des NLWKN das 90. Perzentil der Mehrfachmessungen im Probenahmezeitraum (September 2019 bis März 2021) berechnet. Für die Grundwasser-Probenahmestellen des NLWKN wurde anstelle des 50. Perzentils das arithmetische Mittel der Mehrfachmessungen bestimmt, da an diesen überwiegend nur zwei Nitratmessungen innerhalb des Beprobungszeitraums durchgeführt wurden. Anhand dieser Ergebnisse wurden die Probenahmestellen des NLWKN in folgende Kategorien eingeordnet, abgeleitet aus Ziel- und Grenzwerten für Oberflächengewässer und Grundwasser (LAWA, 1998; GrwV, 2010/04.05.2017).

Grundwasser:

Nitratkonzentration (arithmetisches Mittel)...

- ... ≤ 10 mg/L: Geringe Belastung
- ... > 10 und ≤ 50 mg/L: Mittlere Belastung
- ... > 50 mg/L: Hohe Belastung

Fließgewässer

Nitratkonzentration (90. Perzentil)...

- ... ≤ 11,1 mg/L: Geringe bis mäßige Belastung
- ... > 11,1 und ≤ 44,3 mg/L: Erhöhte Belastung
- ... > 44,3 mg/L: Sehr hohe Belastung

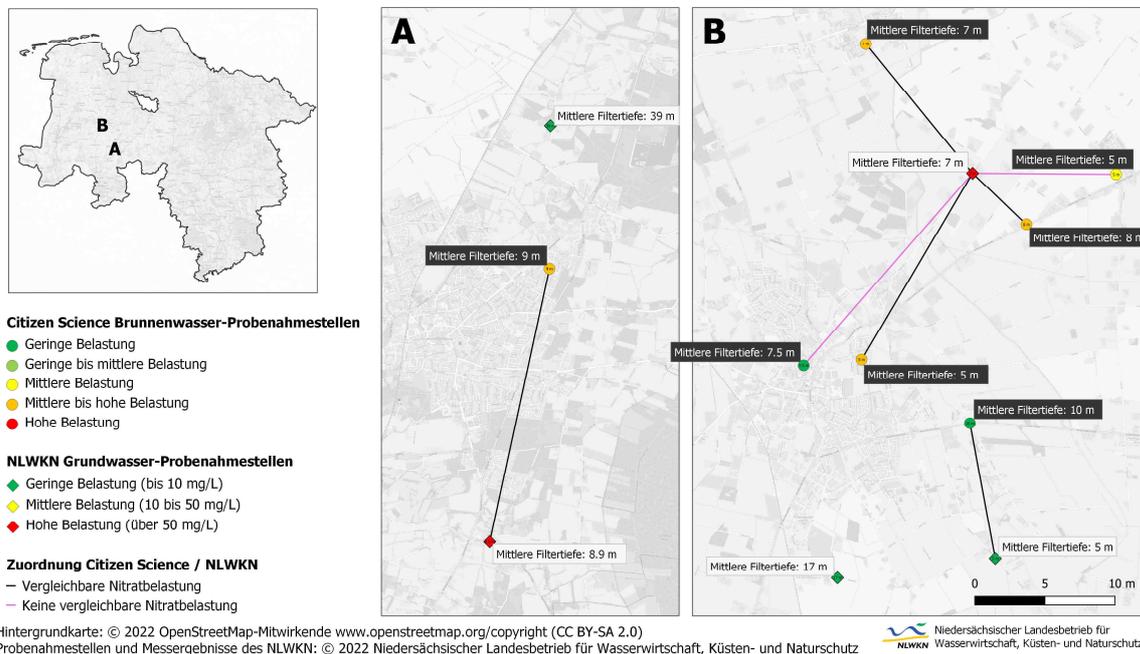


Abbildung 47: Nearest Neighbor-Analyse zum Vergleich der Citizen Science- und NLWKN-Daten am Beispiel von zwei Regionen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Da diese Kategorien auch für die Klassifizierung der von den Citizen Science-Teilnehmer:innen gemessenen Nitratkonzentrationen verwendet wurden, ist ein Vergleich der Ergebnisse der über die Nearest Neighbor-Analyse zugeordneten Probenahmestellen möglich. Aufgrund der

Ungenauigkeit der Teststäbchen wurden für die Citizen Science-Messwerte jedoch Zwischenkategorien ergänzt (z. B. für Grundwasser Kategorie 2: Geringe mit mittlere Belastung, vgl. Tabelle 12, S. 24), bei denen keine eindeutige Einordnung entsprechend der Grenzwerte möglich ist. In diesen Fällen wurde bei dem Vergleich der zugeordneten Probenahmestellen von einer vergleichbaren Nitratbelastung ausgegangen, wenn die Nitratbelastung der NLWKN-Probenahmestelle in einer der beiden Kategorien liegt, in denen sich der im Citizen Science-Projekt gemessene Wert befindet. Die einander zugeordneten, nicht übereinstimmenden Probenahmestellen wurden zur differenzierten Betrachtung der potenziellen Ursachen der Abweichungen zu insgesamt 17 Fokusregionen zusammengefasst.

Gesamtbewertung: Potenzial des Citizen Science-Ansatzes und Methodenkritik

Anhand der Ergebnisse dieser Analysen, die in den folgenden Kapiteln dargestellt werden, werden die Subforschungsfragen beantwortet und resümierend das Potenzial des dargestellten Citizen Science-Konzeptes für die Gewässerforschung bewertet. Hierauf aufbauend werden die verwendeten Methoden reflektiert sowie Handlungsempfehlungen für weitere Citizen Science-Projekte im Bereich der Gewässerforschung abgeleitet.

4.4. Ergebnisse des Nitrat-Monitorings

Die Auswertung der Citizen Science-Daten baut auf folgende Begleituntersuchung auf, in der die Genauigkeit der Teststäbchen untersucht und eine Kategorisierung der gemessenen Werte entsprechend der Ziel- und Grenzwerte abgeleitet wird.

4.4.1. Begleituntersuchung: Validierung der Teststäbchen

Zur Validierung der Teststäbchen wurden im Rahmen einer projektbegleitenden Masterarbeit verschiedene, bereits in der Methodik beschriebene Experimente durchgeführt (Rolf, 2021).

Zunächst wurde untersucht, ob eine objektive Unterscheidung der Verfärbung des Nitrat-Testfeldes bei verschiedenen Nitratkonzentrationen mithilfe eines photometrischen Versuchsaufbaus möglich ist (vgl. Abbildung 48, S. 134). Die photometrische Analyse verschiedener Nitrat-Referenzlösungen ergab, dass sich die Reflexionsspektren des Farbfeldes für die auf der Farbskala angegebenen Konzentrationen (0 mg/L, 10 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 250 mg/L und 500 mg/L) nach 60 Sekunden eindeutig voneinander unterscheiden lassen. Die auf dem Testfeld ablaufende chemische Reaktion führt demnach bei den dargestellten Konzentrationen zu einer zuverlässigen, objektiv differenzierbaren Verfärbung durch die gebildete Azoverbindung.

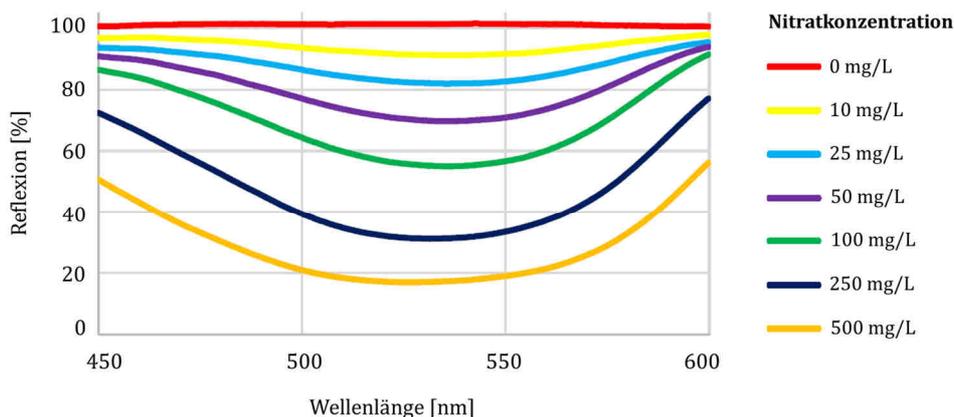


Abbildung 48: Reflexionsspektren des Nitrat-Testfeldes bei verschiedenen Nitrat-Konzentrationen nach 60 Sekunden (Abbildung verändert nach Rolf, 2021, S. 27).

Weitere potenzielle Ursachen für Messunsicherheiten liegen in der begrenzten Fähigkeit des menschlichen Auges, diese kleinen Farbunterschiede wahrzunehmen, und in weiteren Randbedingungen wie beispielsweise der Eintauchdauer des Teststäbchens in die Probe, dem Wartezeitverhalten während der Messung oder der Temperatur der Gewässerprobe.

Um die subjektive Ablesegenauigkeit zu quantifizieren, haben 19 Proband:innen die Nitratkonzentration von 20 Nitrat-Standardlösungen (0 bis 500 mg/L) mithilfe der Nitrat-Teststäbchen bestimmt (Zusammenfassung der Messergebnisse in Anhang J, Daten aus Rolf, 2021). In Abbildung 49 werden als blaue Intervalle die tatsächlich vorliegenden Nitratkonzentrationen der Standardlösungen für alle Werte dargestellt, die von den Teilnehmer:innen mit den Teststäbchen gemessen werden konnten. Als Ausreißer wurden jeweils die zwei höchsten und niedrigsten von den Proband:innen gemessenen Werte für jede untersuchte Standardlösung herausgenommen.

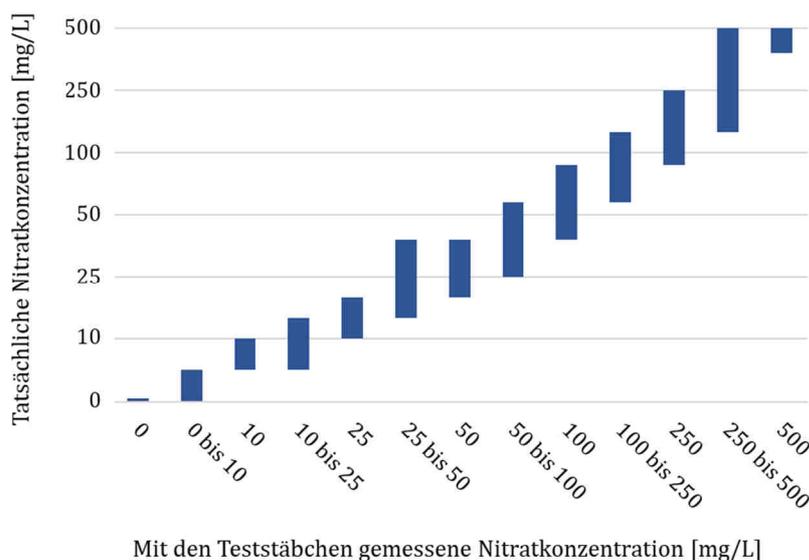


Abbildung 49: Tatsächlich vorliegende Nitratkonzentrationen für mit den Teststäbchen gemessene Werte (eigene Abbildung, abgeleitet aus Messergebnissen von Rolf, 2021, S. X, Anhang, Invertierung der Achsen zum erleichterten Ablesen der tatsächlich vorliegenden Nitratkonzentration für die gemessenen Nitratkonzentrationen).

Abbildung 49 zeigt, dass die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges nicht präzise genug ist, um die Färbung der Nitrat-Teststäbchen eindeutig der Farbskala zuzuordnen. So überschneiden sich die Intervalle benachbarter Konzentrationsklassen deutlich. Hierbei ist es irrelevant, ob bei der Ablesung der Nitratkonzentration Zwischenkategorien (z. B. 10 bis 25 mg/L) erlaubt werden oder nicht. Auch wenn die Teilnehmenden die Verfärbung des Testfeldes eindeutig zu einer der Kategorien (0 mg/L, 10 mg/L, 25 mg/L usw.) zuordnen sollen, überschneiden sich die Intervalle der tatsächlich vorliegenden Konzentrationen (vgl. Rolf, 2021, S. 32).

Anhand der Ergebnisse des Experimentes wird außerdem deutlich, dass die Konzentrationen der Nitrat-Standardlösungen über den gesamten Messbereich durch die Messung mit den Teststäbchen überschätzt werden, die tatsächlichen Nitratkonzentrationen also unter den gemessenen Nitratkonzentrationen liegen. Da diese Überschätzung über den gesamten Messbereich konsistent ist, ist eine Anpassung und Umcodierung der gemessenen Werte möglich. Hierzu wurde mithilfe geltender Ziel- und Grenzwerte eine fünfstufige Kategorisierung abgeleitet.

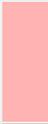
Für Brunnen- und Quellwasser-Messungen wurde der Grenzwert von 50 mg/L Nitrat aus den aktuellen Verordnungen für Grund- und Trinkwasser übernommen (TrinkwV, 2001/10.03.2016; GrwV, 2010/04.05.2017). Nitrat-Konzentrationen über 50 mg/L werden demnach als „Hohe Belastung“ eingestuft. Nitrat-Konzentrationen bis 10 mg/L werden als „Geringe Belastung“ klassifiziert, Konzentrationen zwischen 10 und 50 mg/L als „Mittlere Belastung“. Aufgrund der Ungenauigkeit der Teststäbchen können einige gemessene Konzentrationen (z. B. gemessener Wert: 100 mg/L, tatsächlicher Wert: 40 bis 90 mg/L) nicht eindeutig über oder unter diesen Grenzwerten eingeordnet werden. Daher wurden Zwischenkategorien für die Umcodierung der Messdaten ergänzt, bei denen eine eindeutige Bewertung der Nitratbelastung nicht möglich ist.

Für die Bewertung der chemischen Gewässergüte der Oberflächengewässer wurde die Empfehlung der LAWA verwendet (vgl. Tabelle 5, S. 53), in der die Nitrat-Belastung im Gegensatz zum Zielwert für Gesamt-Stickstoff aus der Oberflächengewässerverordnung gesondert betrachtet wird (LAWA, 1998; OGewV, 2016/09.12.2020). Zur Kategorisierung wurde der Zielwert von 2,5 mg/L Nitratstickstoff (entspricht 11,1 mg/L Nitrat) herangezogen. Nitratkonzentrationen unter diesem Wert werden als gering bis mäßig belastet eingestuft, Konzentrationen über diesem Wert als erhöht belastet. Wird der Zielwert sogar vierfach überschritten, so wird die Nitrat-Belastung der im Citizen Science-Projekt beprobten Oberflächengewässer als sehr hoch bewertet. Aufgrund der Ungenauigkeit der Teststäbchen können weitere Güteklassen der LAWA-Empfehlung nicht differenziert werden, sodass die gebildeten Kategorien jeweils zwei bis drei LAWA-Güteklassen umfassen. Um die Namensgebung der Kategorien übersichtlich zu gestalten, wurde jeweils die Bezeichnung der höchsten LAWA-Güteklasse innerhalb der Kategorie verwendet. Zudem ist erneut eine Ergänzung von Zwischenkategorien für alle gemessenen Werte, die sich nach Umcodierung nicht eindeutig über oder unter den Zielwerten

einordnen lassen, erforderlich. Die für Oberflächengewässer dargestellte Kategorisierung wurde auch für die Regenwasser-Messungen verwendet, um eine Vergleichbarkeit zwischen Regenwasser, fließenden und stehenden Gewässern zu ermöglichen.

In Tabelle 12 werden die mit den Nitrat-Teststäbchen gemessenen Konzentrationen anhand der tatsächlich vorliegenden Konzentrationen entsprechend der genannten Ziel- und Grenzwerte kategorisiert. Mithilfe dieser Kategorisierung wurden die von den Bürger:innen gemessenen Nitratwerte vor der Auswertung umcodiert. Zur Differenzierung der verschiedenen Grenz- und Zielwerte für Grundwasser und Oberflächengewässer wurden zwei unterschiedliche Farbgebungen für die Darstellung der Ergebnisse gewählt.

Tabelle 12: Kategorisierung der Nitratmessungen, angelehnt an Ziel- und Grenzwerte für Grundwasser und Oberflächengewässer, mit der für die Darstellung der Ergebnisse ausgewählten Farbgebung (LAWA, 1998; GrwV, 2010/04.05.2017).

Kategorie	Mit den Teststäbchen gemessene Nitratkonzentration	Klassifizierung für Brunnen- und Quellenwasser		Klassifizierung für fließende/stehende Gewässer und Regenwasser	
1	0 mg/L 0 bis 10 mg/L 10 mg/L	Geringe Belastung (tatsächliche Nitratkonzentration bis 10 mg/L)		Geringe bis mäßige Belastung (tatsächliche Nitratkonzentration bis 11,1 mg/L)	
2	10 bis 25 mg/L 25 mg/L	Geringe bis mittlere Belastung		Mäßige bis erhöhte Belastung	
3	25 bis 50 mg/L 50 mg/L	Mittlere Belastung (tatsächliche Nitratkonzentration 10 bis 50 mg/L)		Erhöhte Belastung (tatsächliche Nitratkonzentration 11,1 bis 44,3 mg/L)	
4	50 bis 100 mg/L 100 mg/L	Mittlere bis hohe Belastung		Erhöhte bis sehr hohe Belastung	
5	100 bis 250 mg/L 250 mg/L 250 bis 500 mg/L 500 mg/L	Hohe Belastung (tatsächliche Nitratkonzentration eindeutig über 50 mg/L)		Sehr hohe Belastung (tatsächliche Nitratkonzentration eindeutig über 44,3 mg/L)	

Obgleich die Nitrat-Teststäbchen im Vergleich zu anderen Messmethoden eine hohe Messgenauigkeit aufweisen, ist eine erste Einschätzung der Nitratbelastung nach Tabelle 12 möglich. Die größte Fehlerquelle der halbquantitativen Nitratmessung mit den Teststäbchen ist die begrenzte Farb-Sensitivität des menschlichen Auges. Die Dauer des Eintauchens, das Wartezeitverhalten (z. B. Schütteln oder Ablegen des Teststäbchens) und die Temperatur der Wasserprobe wirken sich, wie die Ergebnisse der Masterarbeit zeigen, nicht oder nur so gering auf die Verfärbung des Testfeldes aus, dass keine vom Menschen wahrnehmbaren Veränderungen der Verfärbung auftreten (Rolf, 2021).

Die Teststäbchen lassen sich damit zunächst als guter Kompromiss zwischen einer einfachen, kostengünstigen und hinreichend genauen Messmethode für den Citizen Science-Ansatz bewerten.

Die Ergebnisse des Nitrat-Monitorings, die unter Berücksichtigung der dargestellten Kategorisierung der Messwerte abgeleitet wurden, werden im Folgenden präsentiert.

4.4.2. Datenübersicht

Anzahl der Probenahmestellen: Insgesamt wurden 545 Probenahmestellen von den teilnehmenden Bürger:innen und Schüler:innen über die Webseite angelegt (Brunnenwasser: $N = 248$, Quellwasser: $N = 3$, Fließgewässer: $N = 186$, Stehende Gewässern: $N = 73$, Regenwasser: $N = 35$). Zwölf dieser digital angelegten Probenahmestellen wurden nicht in die Auswertung einbezogen, da Messwerte verschiedener Standorte aufgrund eines uneindeutigen Standortnamens unter demselben Namen gespeichert wurden (z. B. Standortname: „Brunnen“, vgl. Kontrollschritt 2, Kapitel 4.3.5 (d)). Die übrigen 533 Probenahmestellen verteilen sich wie folgt auf die verschiedenen Gewässertypen.

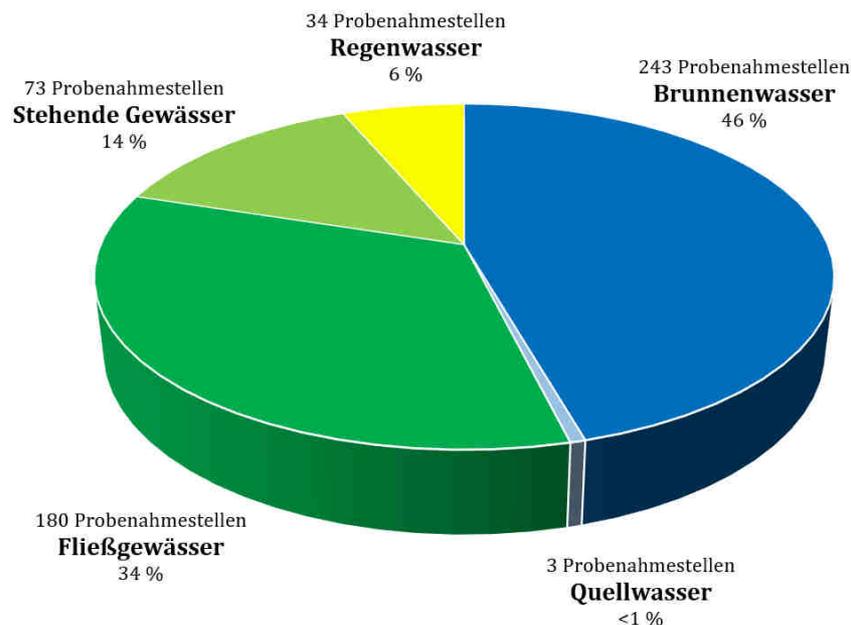
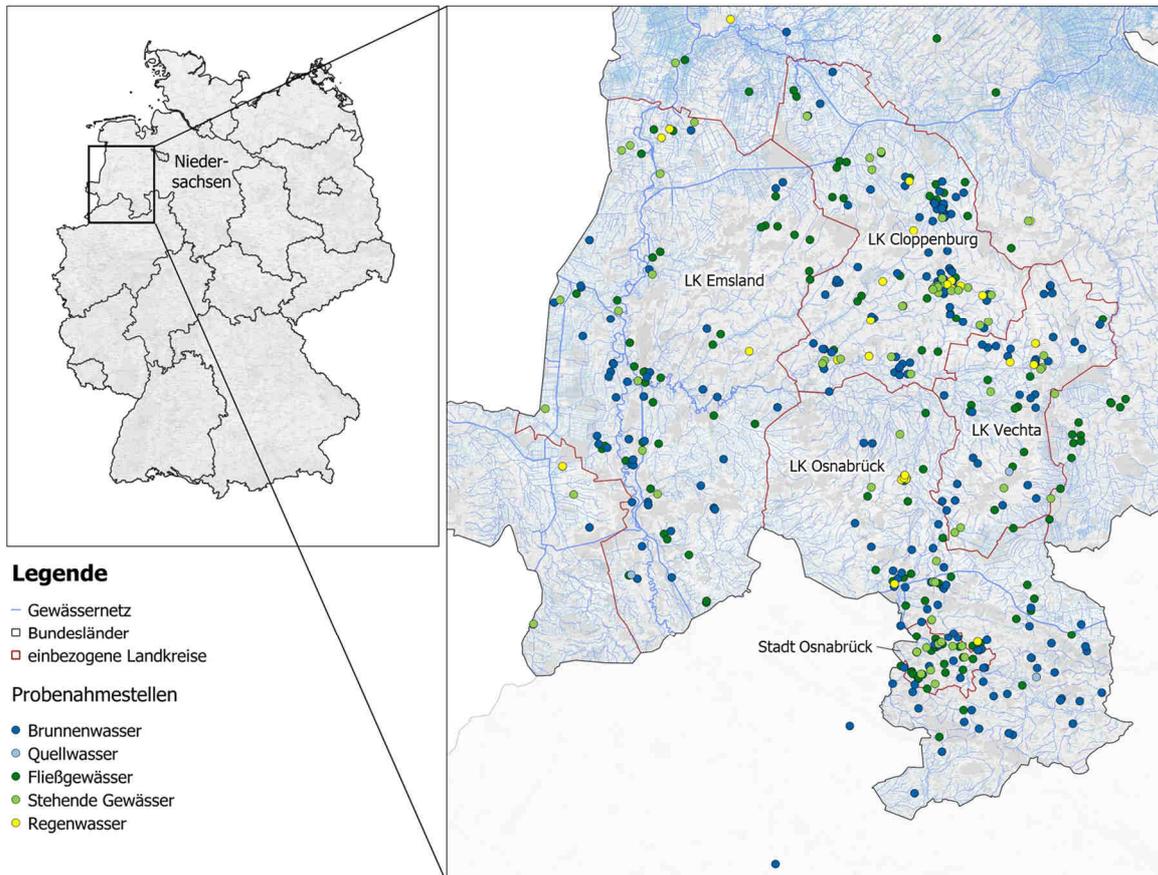


Abbildung 50: Anzahl der in die Auswertung einbezogenen Probenahmestellen (eigene Abbildung).

Am häufigsten wurden Brunnen und Fließgewässer beprobt, aber auch Messungen in stehenden Gewässern und Regenwassermessungen wurden vielerorts durchgeführt. Lediglich für Quellwasser liegen nur drei Probenahmestellen vor.

Lage der Probenahmestellen: 94 % der 533 Probenahmestellen liegen im Beprobungsgebiet in den Landkreisen Osnabrück, Cloppenburg, Vechta, Emsland und der Stadt Osnabrück im Nordwesten Niedersachsens und befinden sich damit in den Flussgebietseinheiten der Weser

und Ems, welche in die Nordsee münden. 29 Probenahmestellen liegen außerhalb des Beprobungsgebietes in den umliegenden Landkreisen in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen, wurden aufgrund ihrer räumlichen Nähe zum Beprobungsgebiet jedoch ebenfalls in die Auswertung einbezogen (vgl. Abbildung 51).



Grenzen: © 2022 GeoBasis-DE / BKG (www.govdata.de/dl-de/by-2-0) Hintergrundkarte: © 2022 OpenStreetMap-Mitwirkende www.openstreetmap.org/copyright (CC BY-SA 2.0)
 Gewässernetz: © 2020 Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung <http://www.lgn.niedersachsen.de>
 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0) Bearbeitet durch das Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

Abbildung 51: Übersicht der Probenahmestellen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Zwei Probenahmestellen liegen entsprechend der über die Webseite übermittelten Koordinaten im Osten Niedersachsens nördlich von Hannover, haben jedoch Standortnamen, die darauf hinweisen, dass die Probenahmestellen im Beprobungsgebiet liegen (z. B. „Hunte_Barkhausen_SLH“). Daher ist von technischen Fehlern bei der Übertragung der GPS-Koordinaten auszugehen. Aufgrund der großen räumlichen Abweichung wurden diese beiden Probenahmestellen nicht in die Analyse räumlicher Einflüsse einbezogen.

Wie Abbildung 51 zeigt, sind die Probenahmestellen aller Gewässertypen nicht gleichmäßig über das gesamte Beprobungsgebiet verteilt. Insbesondere in städtischen Gebieten wurden mehr Gewässer beprobt als im ländlichen Raum. Anhand von Heatmaps wird die räumliche Verteilung der Probenahmestellen in Kapitel 4.4.3 näher untersucht.

Anzahl der Nitratmessungen: Nach Aussortierung der 12 Probenahmestellen, die aufgrund des uneindeutigen Standortnamens von mehreren Personen verwendet wurden, konnten

8045 von insgesamt 8754 Einzelmessungen in die Auswertung einbezogen werden, wobei ein Großteil der Gewässerproben aus Brunnen und fließenden Gewässern entnommen wurde (vgl. Abbildung 52).

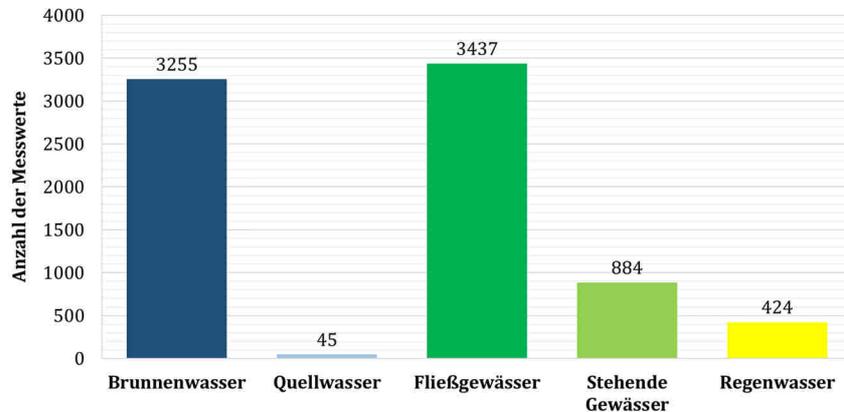


Abbildung 52: Anzahl der in die Auswertung einbezogenen Messwerte (eigene Abbildung).

Im Herbst 2019, also in der ersten innerhalb des Beprobungszeitraums liegenden Jahreszeit, wurden insgesamt 1503 Nitratmessungen durchgeführt. Die Anzahl der Nitratmessungen steigt im Winter 2019/2020 auf 1762 und erreicht in dieser Jahreszeit ihr Maximum (vgl. Abbildung 53). Die zunächst steigende Anzahl an Nitratmessungen lässt sich darauf zurückführen, dass die Übergabe der Monitoring-Boxen von den Schüler:innen im September begonnen und sich aufgrund von zahlreichen Nachmeldungen (vgl. Kapitel 3.2.4) teilweise bis in den Winter 2019/2020 erstreckt hat. Da spätere Nachmeldungen nicht mehr möglich waren, sinkt die Anzahl an Messungen ab diesem Zeitpunkt stetig, bis sie im Winter 2020/2021 einen minimalen Wert von 887 Nitratmessungen erreicht. Insbesondere für den Gewässertyp Brunnenwasser ist ein starker Rückgang der Nitratmessungen bis zum Ende des Beprobungszeitraums zu verzeichnen, der darauf zurückgeführt werden könnte, dass keine starken Schwankungen der Nitratbelastung im Brunnenwasser vorliegen, wodurch die Motivation der Teilnehmenden für weitere Messungen mit vermutlich gleichem Messergebnis sinkt. Trotz der langen Dauer des Projektes wurden auch im Winter 2020/2021 noch 38,8 % aller Probenahmestellen beprobt.

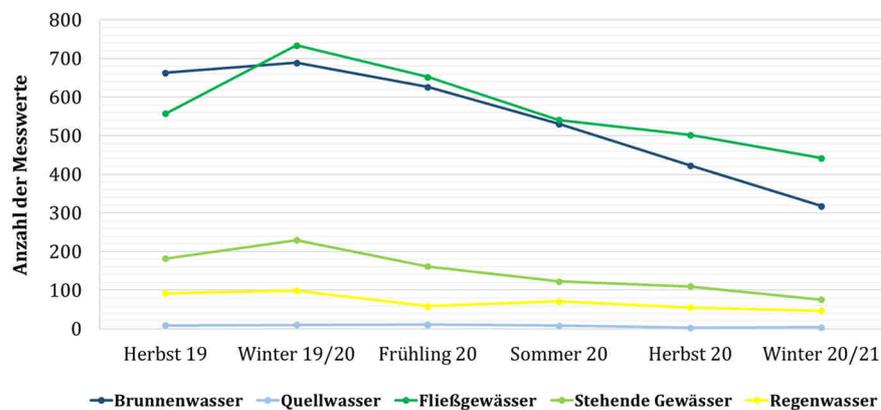
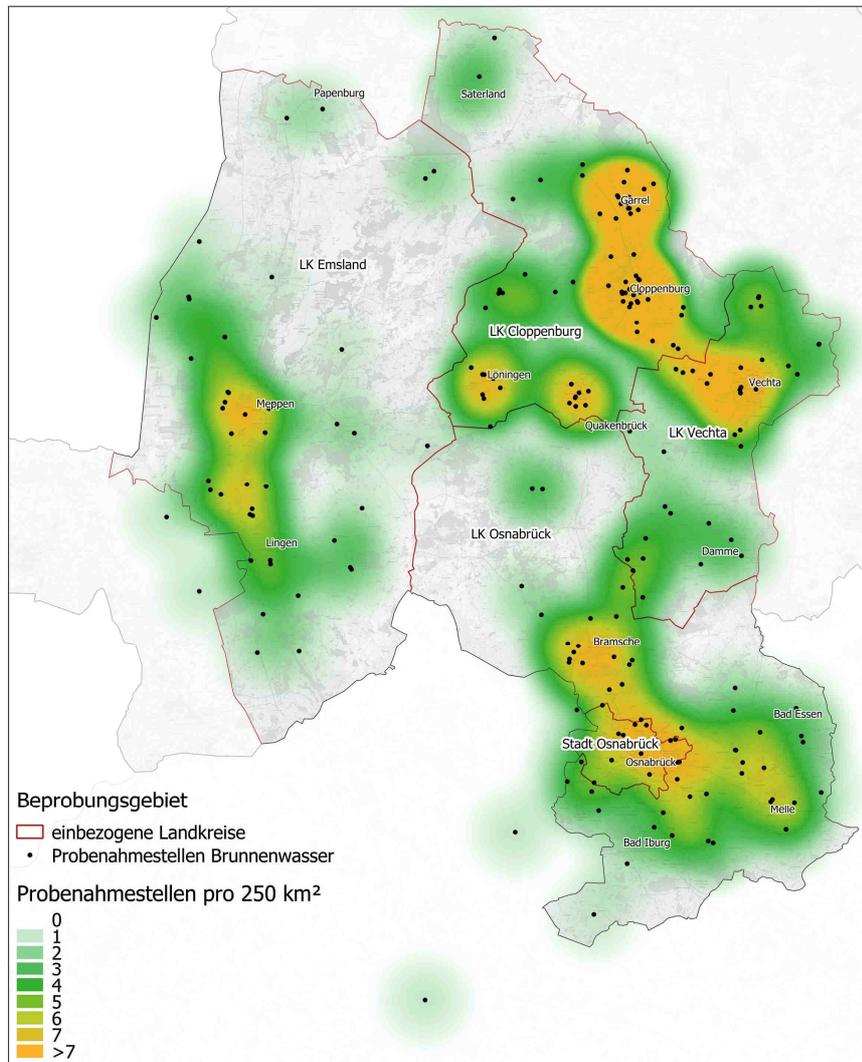


Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf der Messwerteintragungen (eigene Abbildung).

4.4.3. Räumliche Verteilung der Probenahmestellen

Neben der zeitlichen Skalierung der Messungen ist auch die räumliche Verteilung der Probenahmestellen in der Datenauswertung zu berücksichtigen. Die Abdeckung des Beprobungsgebietes und die räumliche Verteilung der Probenahmestellen werden im Folgenden zunächst am Beispiel der Heatmap der beprobten Brunnen dargestellt (vgl. Abbildung 54).



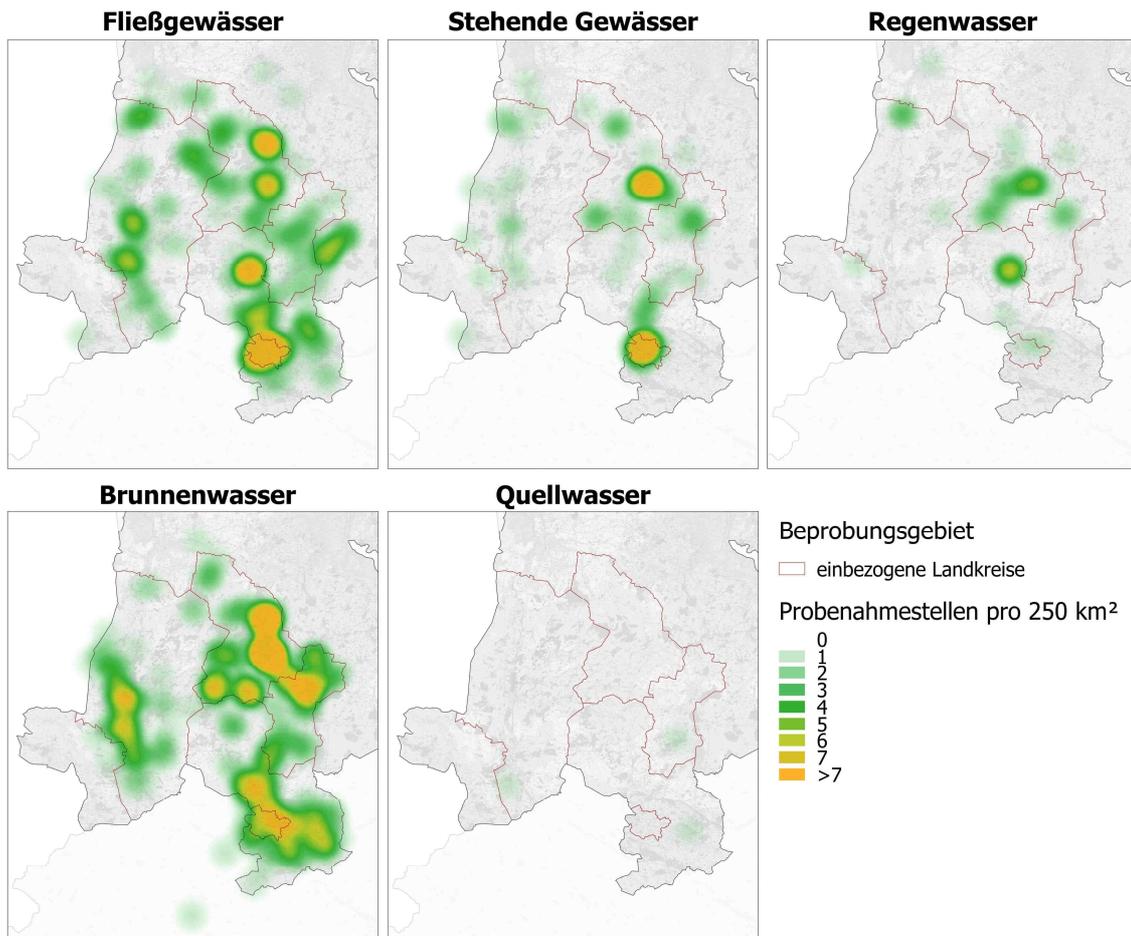
© Grenzen: 2022 GeoBasis-DE / BKG (www.govdata.de/dl-de/by-2-0)
 © Hintergrundkarte: 2022 OpenStreetMap-Mitwirkende www.openstreetmap.org/copyright (CC BY-SA 2.0)

Abbildung 54: Heatmap der Brunnenwasser-Probenahmestellen, Kernel shape: bi-quadratisch, Radius: 8,92 km (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Die Heatmap zeigt, dass ein großer Bereich des Beprobungsgebietes in das Nitrat-Monitoring eingeschlossen werden konnte. So liegen insbesondere in größeren Städten sowie im städtischen Umland zahlreiche Probenahmestellen vor. Auch im Umkreis der teilnehmenden Schulen ist eine höhere Dichte an Probenahmestellen zu verzeichnen. In ländlichen Gegenden hingegen ist die Dichte der Probenahmestellen deutlich geringer, sodass teilweise Probenahmestellen für eine flächendeckende Abdeckung des Beprobungsgebietes fehlen. Zu wenige Probe-

nahmestellen liegen insbesondere im Norden des Landkreises Osnabrück und im Nordosten des Landkreises Emsland vor.

Aufgrund der inhomogenen Verteilung und der teilweise fehlenden Probenahmestellen im ländlichen Raum kann das durch die Citizen Science-Daten gebildete Brunnenwasser-Messnetz nicht als repräsentativ bewertet werden. Dennoch ist es anhand der beprobten Daten über eine weitläufige Fläche möglich, besonders hoch mit Nitrat belastete Gebiete zu identifizieren und räumliche Einflüsse auf die Nitratbelastung des Grundwassers zu untersuchen.



© Grenzen: 2022 GeoBasis-DE / BKG (www.govdata.de/dl-de/by-2-0)
 © Hintergrundkarte: 2022 OpenStreetMap-Mitwirkende www.openstreetmap.org/copyright (CC BY-SA 2.0)

Abbildung 55: Heatmaps der Probenahmestellen aller Gewässertypen, Kernel shape: bi-quadratisch, Radius: 8,92 km (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Ähnliche Schlussfolgerungen lassen sich für das Fließgewässer-Messnetz ableiten (vgl. Abbildung 55). Während in städtischen Gebieten viele Probenahmestellen in dem Citizen Science-Projekt beprobt wurden, fehlen auch für diesen Gewässertyp im Norden des Landkreises Osnabrück und in einigen Bereichen des Landkreises Emsland Probenahmestellen, um das gesamte Beprobungsgebiet in die Auswertung einzuschließen. Dennoch wird ein Großteil des Beprobungsgebietes durch Probenahmestellen abgedeckt, sodass ein weitläufiges Messnetz durch den Citizen Science-Datensatz gebildet werden konnte. Aufgrund der höheren Dichte der

Probenahmestellen in städtischen Gebieten spiegelt die Nitratbelastung der Fließgewässer-Probenahmestellen nicht repräsentativ die Nitratbelastung der Fließgewässer im gesamten Beprobungsgebiet wider.

In Anbetracht der deutlich geringeren Anzahl an Probenahmestellen der Gewässertypen „Stehende Gewässer“ und „Regenwasser“ sind die entsprechenden Messnetze weder flächendeckend noch repräsentativ. Da insgesamt nur 3 Quellen beprobt wurden, kann für diesen Gewässertyp anhand der Citizen Science-Daten ebenfalls weder eine repräsentative Bewertung der Belastung von Quellwasser im Beprobungsgebiet abgeleitet werden, noch sind flächendeckende, räumliche oder zeitliche Analysen möglich.

Die im folgenden dargestellten Analysen beziehen sich aufgrund der genannten Einschränkungen des Messnetzes auf die beprobten Gewässer an den Probenahmestellen und können nicht auf das gesamte Beprobungsgebiet verallgemeinert werden. Demnach spiegelt auch die im folgenden dargestellte Nitratbelastung der Gewässer nur die Belastung der Probenahmestellen wider und lässt sich nicht auf die gesamte Region übertragen.

4.4.4. Bewertung der Nitratbelastung der beprobten Gewässer

Die durch die Bürger:innen und Schüler:innen durchgeführten Nitratmessungen zeigen, dass Grenz- und Zielwerte an vielen der 533 Probenahmestellen im Beprobungsgebiet überschritten werden und bestätigen damit bereits bekannte Ergebnisse weiterer Messinitiativen.

Fließgewässer (180 Probenahmestellen)

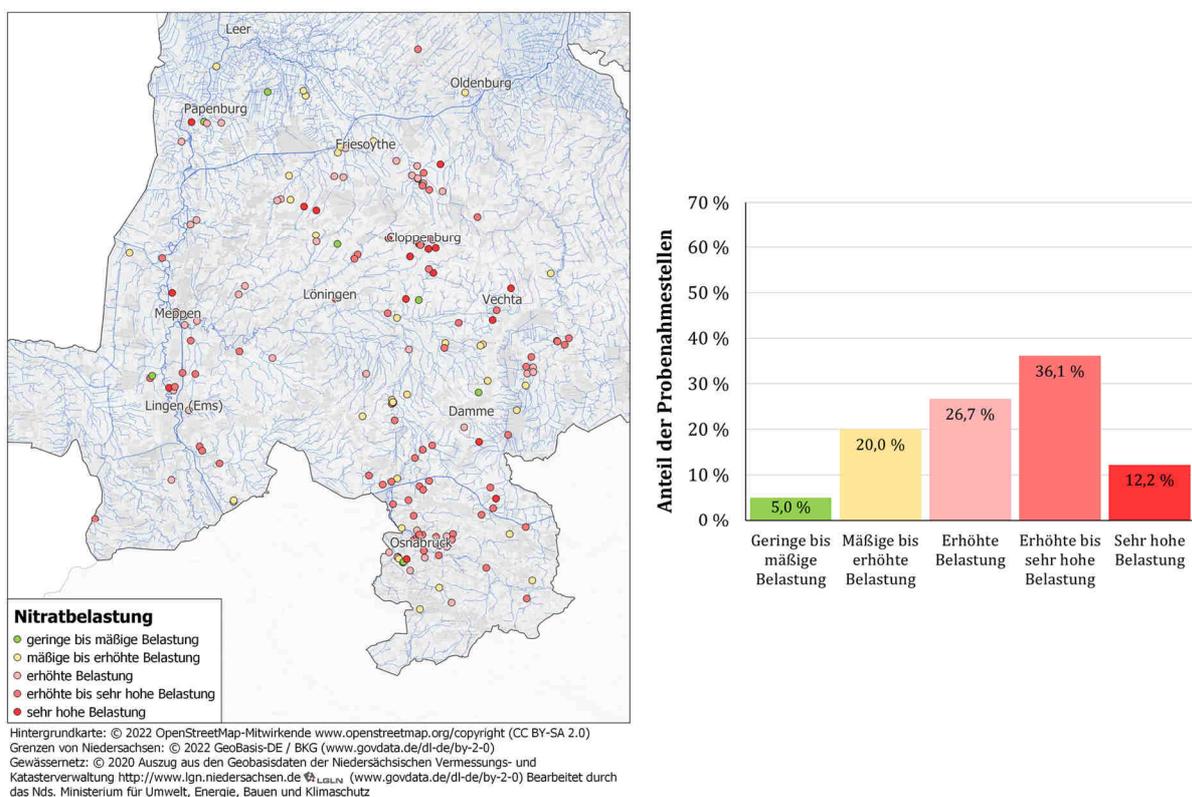


Abbildung 56: Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Dies spiegelt sich unter anderem in der Nitratbelastung der Probenahmestellen in Fließgewässern wider (vgl. Abbildung 56, S. 142). Nur 5 % der Fließgewässer-Probenahmestellen können als gering bis mäßig belastet eingestuft werden (Kategorie 1), 75 % überschritten entsprechend der Bewertung über das 90. Perzentil der Mehrfachmessungen im Messzeitraum den Zielwert von 11,1 mg/L Nitrat (Kategorie 3 bis 5). Für 20 % der Probenahmestellen lässt sich aufgrund der Messungenauigkeit der Teststäbchen nicht eindeutig feststellen, ob eine Überschreitung des Zielwertes im Beprobungszeitraum vorlag (Kategorie 2).

Die Probenahmestellen mit mindestens erhöhter Belastung verteilen sich über das gesamte Beprobungsgebiet (vgl. Abbildung 56, S. 142). Sehr hohe Nitratbelastungen treten unter anderem in und im Umland von Cloppenburg und Veghta auf, geringere Nitratbelastungen nördlich von Friesoythe und Papenburg.

Die Nitratbelastung der beprobten stehenden Gewässer (vgl. Abbildung 57) ist signifikant geringer als die der Fließgewässer (Mann-Whitney-U-Test: $N = 253$, $U = 2527,500$, $p < 0,001$).

Stehende Gewässer (73 Probenahmestellen)

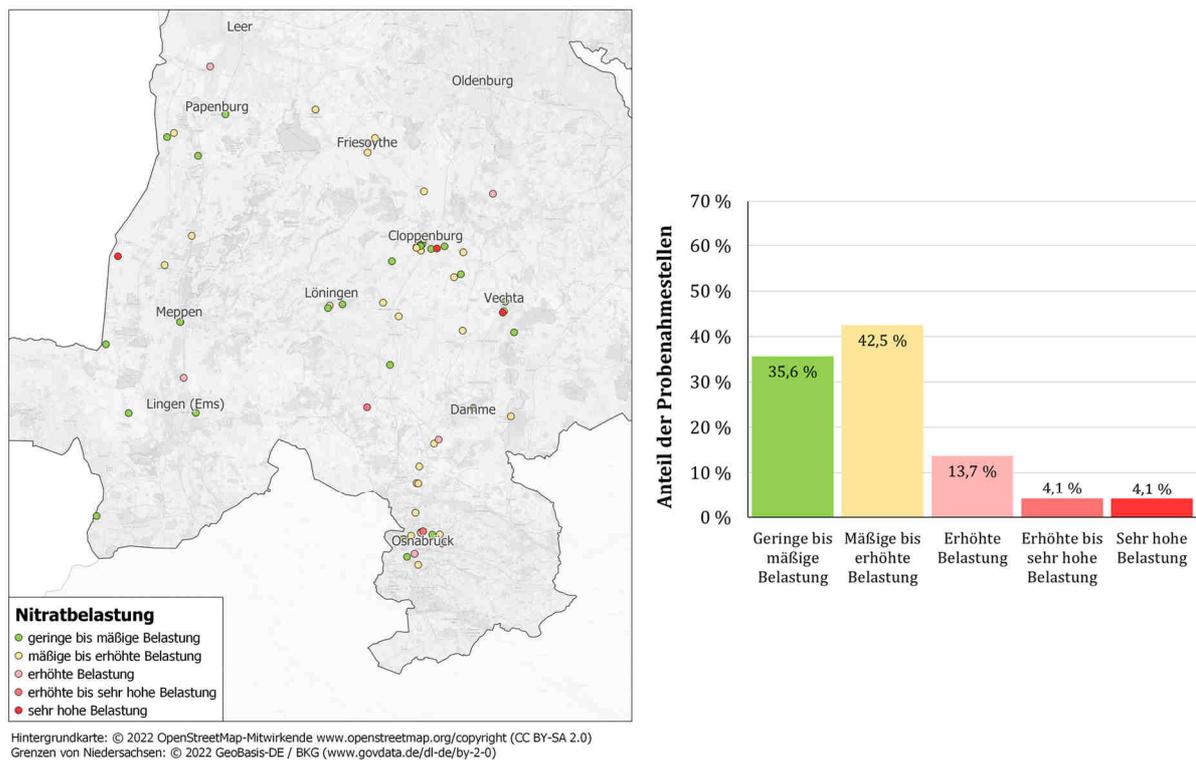


Abbildung 57: Nitratbelastung der beprobten stehenden Gewässer (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Mögliche Ursachen hierfür liegen in internen Stoffwechselprozessen. Stehende Gewässer weisen dabei in der Regel, auch bei Speisung und Entwässerung durch Fließgewässer, geringe Zu- und Abflussmengen im Vergleich zur Gesamtwassermenge auf (Wittig & Niekisch, 2014). Dies führt zu langen Verweilzeiten, insbesondere in großen Seen. Die Einflüsse der internen Stoffwechselprozesse eines Sees überwiegen dadurch den anthropogenen Einflüssen auf den Stoff-

haushalt. Durch die natürliche Denitrifikation und die Aufnahme von Nitrat durch autotrophe Organismen wirken stehende Gewässer als natürliche Senken (Wagenschein, 2006). Trotz dieser nitratreduzierenden Funktion überschritten 21,9 % der Probenahmestellen in stehenden Gewässern, verteilt über das gesamte Probenahmegebiet, im Beprobungszeitraum den Zielwert von 11,1 mg/L Nitrat (Kategorie 3 bis 5, vgl. Abbildung 57, S. 143).

Die Nitratbelastung des beprobten Regenwassers ist ebenfalls signifikant geringer als die der Fließgewässer (Mann-Whitney-U-Test: $N = 214$, $U = 908,000$, $p < 0,001$).

Regenwasser (34 Probenahmestellen)

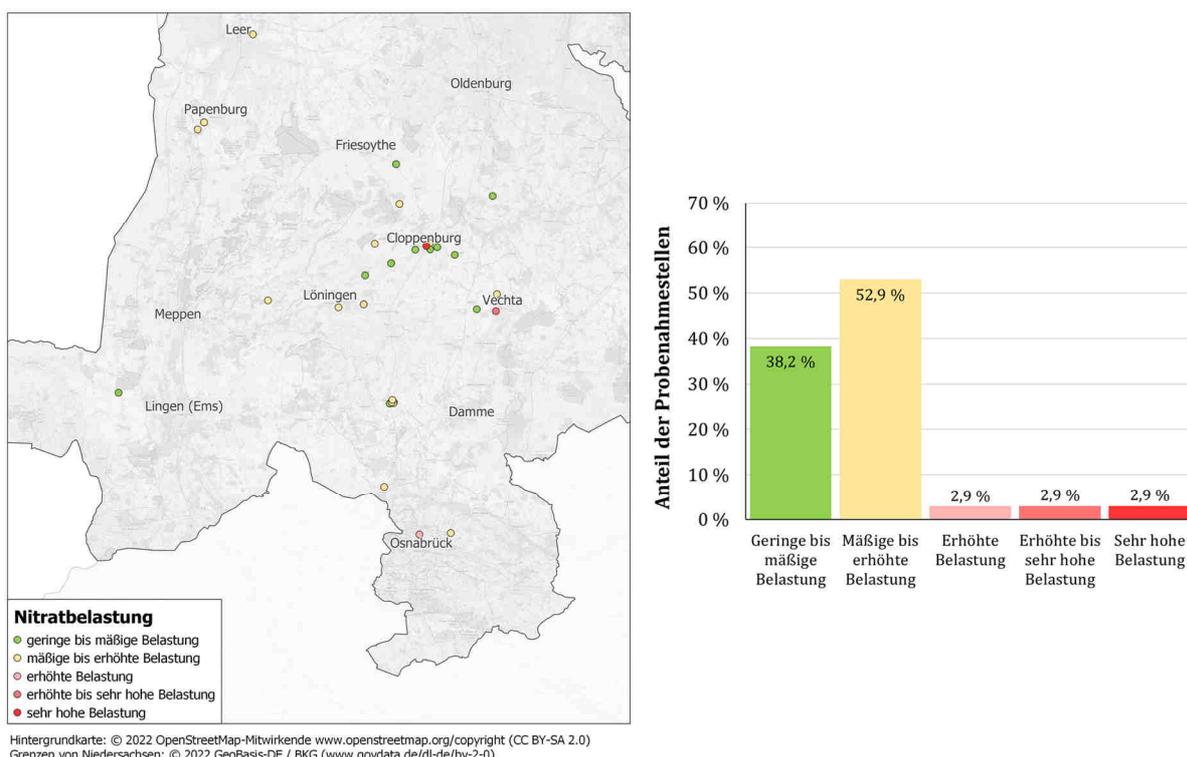


Abbildung 58: Nitratbelastung des beprobten Regenwassers (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Nur an drei Regenwasser-Probenahmestellen in Cloppenburg, Vechta und Osnabrück waren zeitweise erhöhte bis sehr hohe Nitratbelastungen festzustellen (Kategorie 3 bis 5, vgl. Abbildung 58). Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Deposition von oxidierten Stickstoffverbindungen im Einflussgebiet einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Nitratbelastung von Gewässern hat.

Dennoch konnte Nitrat bei 61,8 % der Regenwasser-Probenahmestellen zumindest in geringen Konzentrationen (über 5 mg/L) nachgewiesen werden (Kategorie 2 bis 5). Nach der Klassifikation von Jansen (1987) gelten Nitratkonzentrationen über 4 mg/L bereits als schwach erhöht, sodass weiterhin eine Verringerung der Stickoxidbelastung der Luft angestrebt werden sollte, um die Deposition oxidierten Stickstoffverbindungen zu verringern.

Über verschiedene Pfade gelangt Nitrat von der Oberfläche in das Grundwasser und wurde dort über die Beprobung von Brunnen (vgl. Abbildung 59) und Quellen (vgl. Abbildung 60, S. 146) im Rahmen des Citizen Science-Projektes untersucht.

Brunnenwasser (243 Probenahmestellen)

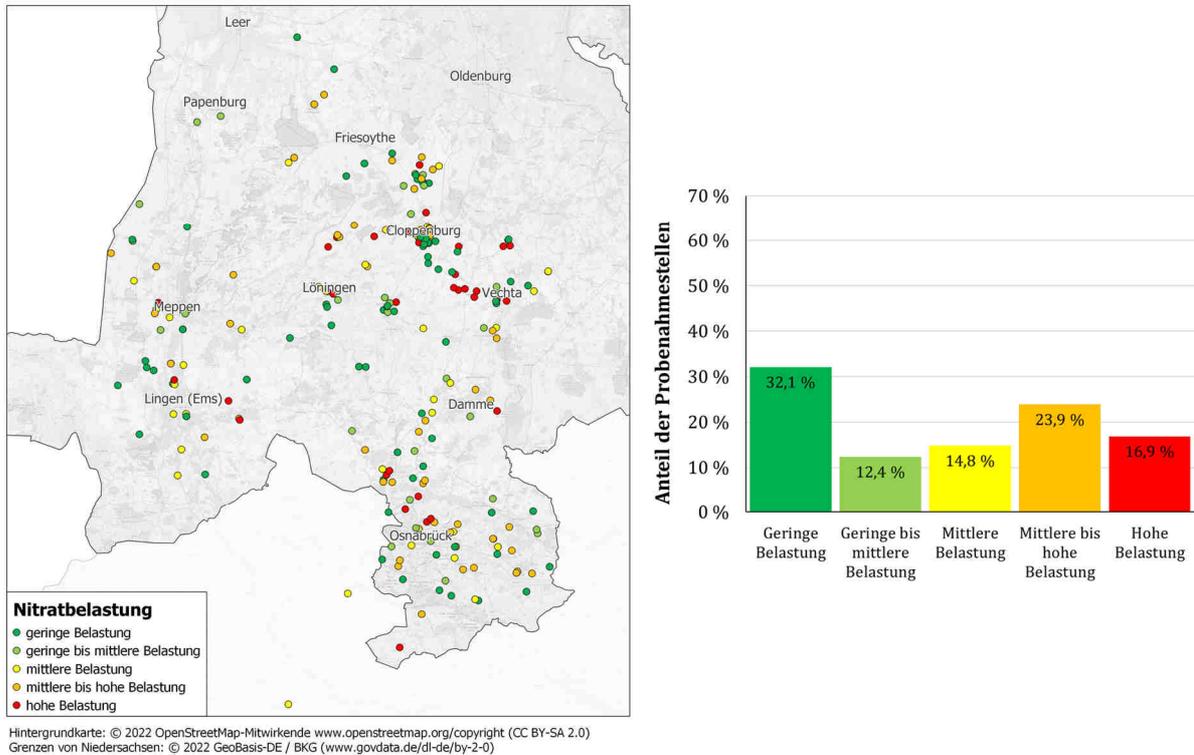


Abbildung 59: Nitratbelastung der beprobten Brunnen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

An 16,9 % der durch die Teilnehmer:innen beprobten Brunnen wurde der chemische Grenzwert von 50 mg/L Nitrat eindeutig überschritten (Kategorie 5, bewertet über das 50. Perzentil der Mehrfachmessungen). Diese Brunnen sollten entsprechend der Trinkwasserverordnung nicht mehr zur Trinkwassergewinnung verwendet werden (TrinkwV, 2001/10.03.2016).

An 38,7 % liegen mittlere bis hohe Nitratbelastungen über 10 mg/L vor (Kategorie 3 und 4). Rund ein Drittel der beprobten Brunnen lässt sich mit Nitratkonzentrationen unter 10 mg/L als gering belastet bewerten. Die Brunnen, an denen Überschreitungen des Grenzwertes festgestellt wurden, liegen überwiegend in und im Umland von Cloppenburg und Vechta (vgl. Abbildung 59). Vereinzelt sind auch hoch belastete Brunnen im Umland von Osnabrück, Lingen, Meppen, Lönningen und Damme zu finden.

Die Ergebnisse des Citizen Science-Projektes bestätigen damit die durch den NLWKN gemessene, hohe Nitratbelastung des Grundwassers im Beprobungsgebiet, sodass weiterhin Gegenmaßnahmen ergriffen und vorliegende Nährstoffüberschüsse in den betroffenen Landkreisen, insbesondere in Cloppenburg und Vechta, reduziert werden sollten (vgl. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2022; NLWKN, 2020b).

Quellwasser (3 Probenahmestellen)

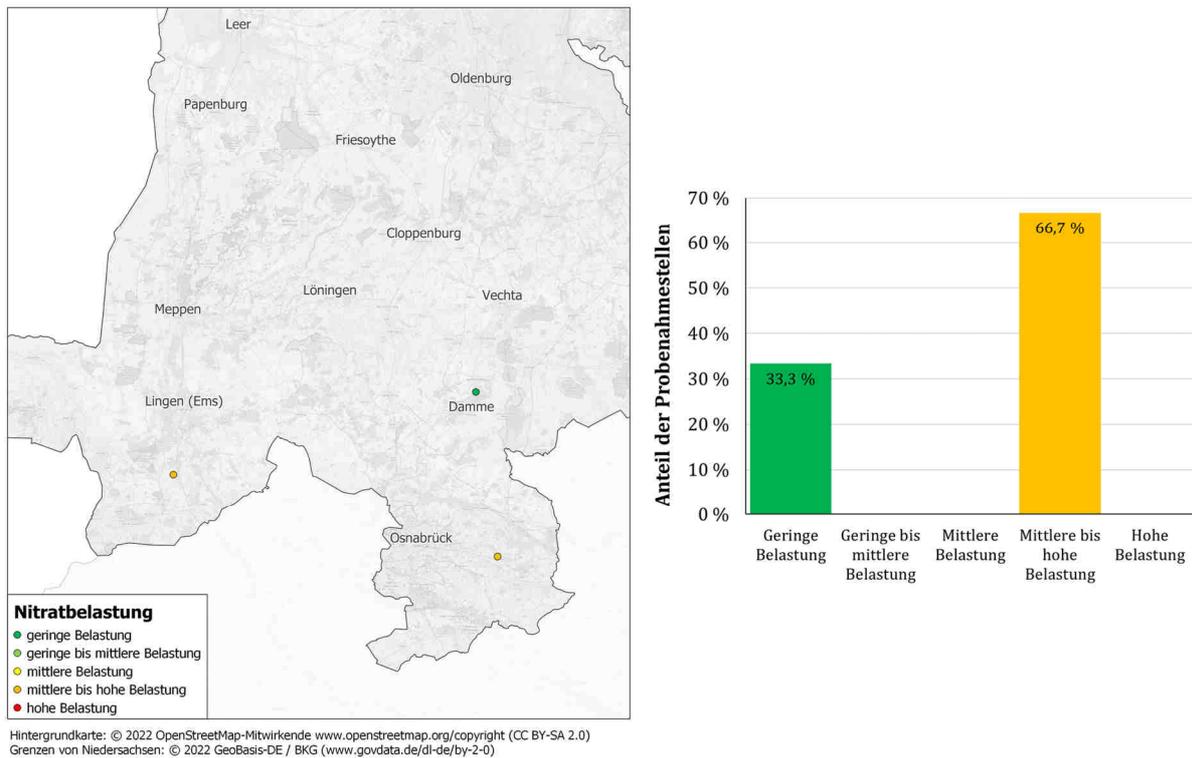


Abbildung 60: Nitratbelastung der beprobten Quellen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Die Belastung des Grundwassers spiegelt sich auch in den Messergebnissen der Quellwasser-Probenahmestellen wider, bei denen zwei von drei Probenahmestellen als mittel bis hoch durch Nitrat belastet eingestuft werden (vgl. Abbildung 60). Aufgrund der geringen Anzahl an Probenahmestellen lässt sich diese Bewertung jedoch nicht repräsentativ auf das Probenahmegebiet übertragen.

4.4.5. Einflüsse der Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung

Die Nitratbelastung der beprobten Gewässertypen unterliegt verschiedenen Einflüssen. Anhand des Citizen Science-Datensatzes wird untersucht, inwieweit sich diese Einflüsse mit dem Citizen Science-Ansatz nachweisen lassen.

Dabei wurden zunächst Einflüsse der Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung untersucht, um die Hypothesen FG-H1, BW-H1 und BW-H2 für die beprobten Fließgewässer und Brunnen zu überprüfen.

Fließgewässer:

FG-H1 (Adaption): „Je schmaler das beprobte Fließgewässer an der Probenahmestelle ist, desto höher ist die Nitratbelastung.“

Um den Zusammenhang zwischen der Breite der beprobten Fließgewässer als vereinfachte Kenngröße für die Durchflussmenge und der Nitratbelastung zu untersuchen, wurde der Kendall-Tau-b Rangkorrelationskoeffizient berechnet. Die Breite der beprobten Fließgewässer wurde von den Teilnehmenden wie folgt klassifiziert: unter 1 m ($N = 20$), 1 m bis 3 m ($N = 51$), 3 m bis 5 m ($N = 15$), 5 m bis 10 m ($N = 15$), über 10 m ($N = 6$). Als Maß für die Nitratbelastung wurde das 90. Perzentil der Mehrfachmessungen herangezogen. Die Breite der beprobten Fließgewässer und die Nitratbelastung korrelieren schwach negativ ($N = 107$, $\tau_b = -0,149$, $p = 0,036$), sodass Hypothese FG-H1 bestätigt werden kann. Von den beprobten Fließgewässern weisen außerdem ausschließlich diejenigen mit einer Breite unter 3 m sehr hohe Nitratbelastungen auf (vgl. Abbildung 61).

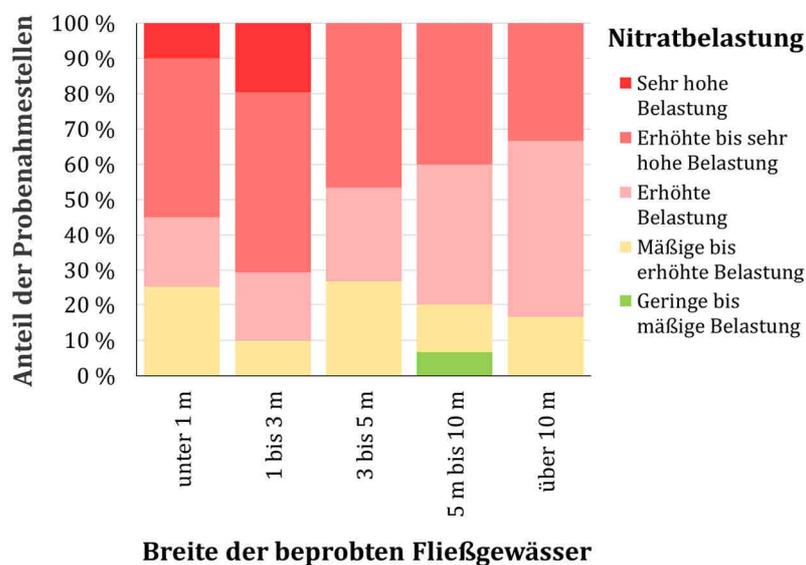


Abbildung 61: Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer in Abhängigkeit von der Breite (eigene Abbildung).

Eine höhere Nitratbelastung in schmalen Fließgewässern beziehungsweise Fließgewässern mit geringem Wasserdurchfluss kann dabei nicht nur auf eine stärkere Verdünnung von Nitraten zurückgeführt werden, sondern hängt auch von der Nutzung der das Gewässer umgebenden Fläche ab. So können insbesondere in kleinen Fließgewässern, die zwischen landwirtschaftlich genutzten Flächen liegen und der Entwässerung dienen, hohe Nitratkonzentrationen auftreten.

Brunnenwasser:

Für Grundwasser-Messungen spielt die Filtertiefe der Probenahmestelle eine bedeutende Rolle, die anhand der folgenden Hypothese geprüft wird.

BW-H1: „Je tiefer der beprobte Brunnen verfiltert ist, desto geringer ist die Nitratbelastung.“

Die Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes haben für insgesamt 38 Brunnenwasser-Probenahmestellen die maximale und minimale Filtertiefe angegeben, sodass die mittlere Filtertiefe über das arithmetische Mittel berechnet werden konnte. Mit dem Kendall-Tau-c Korrelationskoeffizienten wurde auf einen Zusammenhang zwischen der mittleren Filtertiefe und der Nitratbelastung (50. Perzentil der Mehrfachmessungen) geprüft. Es liegt keine signifikante Korrelation zwischen der mittleren Filtertiefe und der Nitratbelastung vor ($N = 38$, $\tau_c = -0,052$, $p = 0,682$).

Sehr hohe Nitratbelastung (Kategorie 5) treten jedoch ausschließlich bei beprobten Brunnen mit einer mittleren Filtertiefe von maximal 24 m auf (vgl. Abbildung 62), mittlere bis hohe Belastungen (Kategorie 4) bis zu einer mittleren Filtertiefe von 19 m. Die Daten des Citizen Science-Projektes geben damit erste Hinweise auf Korrektheit der Hypothese BW-H1, jedoch reichen die Informationen nicht zur abschließenden Verifizierung der Hypothese aus.

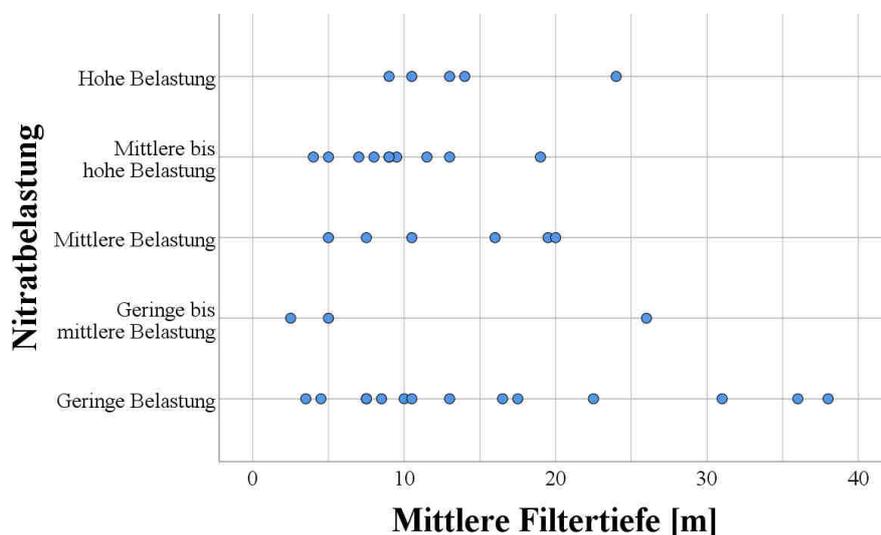


Abbildung 62: Zusammenhang zwischen der Nitratbelastung und der mittleren Filtertiefe der beprobten Brunnen (eigene Abbildung).

Neben der Brunnentiefe unterliegt die Nitratbelastung des Brunnenwassers weiteren Einflüssen (z. B. unterschiedlichen hydrogeologischen Bedingungen), welche nicht in die Analyse einbezogen wurden. Eine Optimierung zur Untersuchung der oben dargestellten Hypothese besteht dementsprechend darin, die Unterschiede der Nitratbelastung nah aneinander liegender Probenahmestellen mit unterschiedlichen Filtertiefen zu prüfen. Alternativ können die Probenahmestellen auf mehrere Stichproben mit ähnlichen Bedingungen aufgeteilt werden, innerhalb derer auf einen Zusammenhang zwischen Filtertiefe und Nitratbelastung geprüft wird. Hierfür ließe sich beispielsweise die in Kapitel 4.3.5 (e) dargestellte Zuordnung der Probenahmestellen zu Niederung, Geest und Bergland heranziehen. Die Berechnung des Kendall-Tau-c Rangkorrelationskoeffizienten zeigt innerhalb dieser Klassen ebenfalls keine signifikanten Korrelationen (Niederung: $N = 20$, $\tau_c = -0,131$, $p = 0,450$, Geest: $N = 12$, $\tau_c = -0,185$, $p = 0,447$,

Bergland: $N = 6$, $\tau_c = -0,083$, $p = 0,798$). Aufgrund der geringen Stichprobengrößen innerhalb dieser Kategorien kann die aufgestellte Hypothese anhand dieser Ergebnisse weder verifiziert noch falsifiziert werden.

In tieferen Grundwasserkörpern liegen entsprechend der theoretischen Herleitung nicht nur geringere Nitratkonzentrationen, sondern auch stabile Bedingungen vor (vgl. Kapitel 2.2.5). Hieraus wurde Hypothese BW-H2 abgeleitet.

BW-H2: „Je tiefer der beprobte Brunnen verfiltert ist, desto geringer sind die Schwankungen der Nitratbelastung.“

Um den Zusammenhang zwischen der mittleren Filtertiefe und den Schwankungen der Nitratbelastung zu überprüfen, wurde der Kendall-Tau-c Korrelationskoeffizient berechnet. Es liegt eine signifikant negative Korrelation mit mittlerer Effektstärke zwischen der mittleren Filtertiefe und den Schwankungen der Nitratbelastung vor ($N = 36$, $\tau_c = -0,367$, $p = 0,001$), sodass Hypothese BW-H2 bestätigt werden kann.

Ogleich nicht alle Hypothesen zu den Einflüssen der Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung verifiziert oder falsifiziert werden konnten, da zur Überprüfung von Hypothese BW-H1 eine zu geringe Anzahl an Probenahmestellen vorlag, zeigt sich, dass es im Allgemeinen möglich ist, mit dem Citizen Science-Ansatz Einflüsse der Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung zu identifizieren. Optimierungen des Citizen Science-Konzeptes, die gegebenenfalls aussagekräftigere Ergebnisse liefern, werden in Kapitel 4.5.2 diskutiert.

4.4.6. Räumliche Einflüsse auf die Nitratbelastung

Weitere Einflüsse auf die Nitratbelastung verschiedener Gewässertypen resultieren aus räumlichen Bedingungen wie beispielsweise der Landbedeckung und -nutzung. Im Folgenden wird analysiert, inwieweit sich räumliche Einflüsse auf die Nitratbelastung von Gewässern mit den Citizen Science-Daten nachweisen lassen. Hierzu werden die Hypothesen FG-H2, SG-H1, RW-H1 und BW-H3 betrachtet.

Einflüsse der Landbedeckung und -nutzung:

FG-H2: "Die Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer ist in landwirtschaftlichen und bebauten Flächen höher als in Wäldern und naturnahen Flächen."

Zur Untersuchung räumlicher Einflüsse auf die Nitratbelastung der Fließgewässer wurden ausschließlich Probenahmestellen mit einer akzeptablen Standortgenauigkeit, also einer maximalen Entfernung von 250 m vom nächsten/beprobten Gewässer, ausgewählt ($N = 130$) (vgl. Kapitel 4.3.5 (d)). Nach räumlicher Verbindung der Fließgewässer-Probenahmestellen ergibt sich folgende Verteilung auf die CORINE-Land Cover Klassen auf Level 1 (*CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021*).

Tabelle 13: Anzahl der Fließgewässer-Probenahmestellen in den CORINE-Land Cover Klassen auf Level 1 (CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021).

Probenahme- stellen des Gewässertyps	CORINE-Land Cover Klasse Level 1		
	Bebaute Flächen	Landwirtschaftliche Flächen	Wälder und naturnahe Flächen
Fließgewässer	N = 63	N = 58	N = 9

Die Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer unterscheidet sich signifikant zwischen landwirtschaftlichen Flächen, bebauten Flächen und Wäldern und naturnahen Flächen, mit einem mittleren Rang von 31,39 für Wälder und naturnahe Flächen, 63,20 für bebauten Flächen und 73,29 für landwirtschaftliche Flächen (Kruskal-Wallis-Test: $N = 130$, $H = 11,048$, $p = 0,004$). Ein Dunn-Bonferroni-Post-hoc-Test ergibt, dass die Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer in landwirtschaftlichen Flächen ($N = 67$, $z = 3,248$, $p = 0,003$, $r = 0,397$) und in bebauten Flächen ($N = 72$, $z = 2,479$, $p = 0,040$, $r = 0,292$) jeweils signifikant höher ist als die der beprobten Fließgewässer in Wäldern und naturnahen Flächen. Damit wird Hypothese FG-H2 bestätigt. Nach Cohen (1988) handelt es sich bei den Unterschieden zwischen Wäldern und naturnahen Flächen und landwirtschaftlichen Flächen um einen Effekt mittlerer Stärke. Die Unterschiede zwischen Wäldern und naturnahen Flächen und bebauten Flächen sind lediglich als kleiner Effekt einzuordnen.

Die Unterschiede der Nitratbelastungen zeigen sich auch in Abbildung 63. Der Anteil der sehr hoch belasteten Fließgewässer (Kategorie 5) ist in landwirtschaftlich genutzten Flächen mit 17,2 % deutlich höher als in bebauten Flächen (7,9 %), während in Wäldern und naturnahen Flächen kein beprobtes Fließgewässer sehr hohe Nitratbelastungen aufwies.

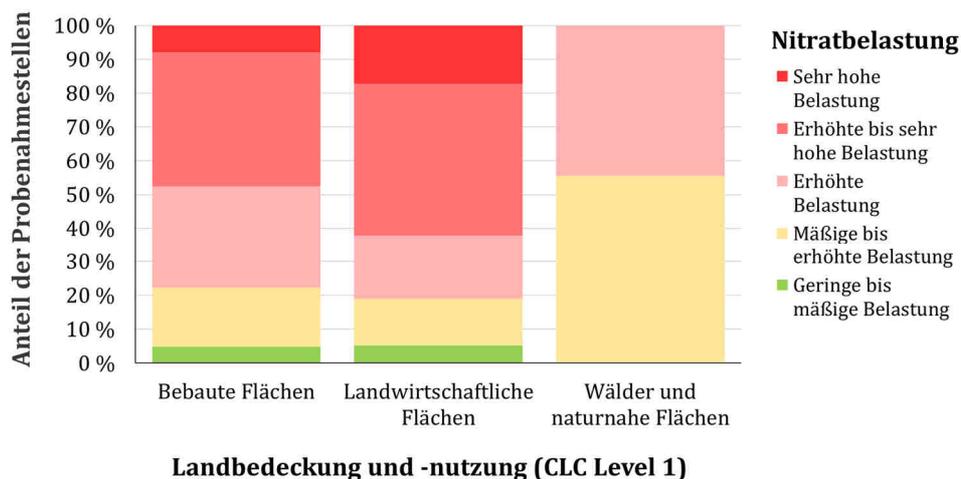


Abbildung 63: Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer in Abhängigkeit von der Landbedeckung und -nutzung (eigene Abbildung).

Um die Einflüsse der Landbedeckung und -nutzung differenzierter zu untersuchen, wurden die CORINE-Land Cover Klassen auf Level 2 herangezogen, auf welche sich die Fließgewässer-Probenahmestellen wie folgt verteilen.

Tabelle 14: Anzahl der Fließgewässer-Probenahmestellen in den Level 2 CORINE-Land Cover Klassen (CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021).

Probenahmestellen des Gewässertyps	CORINE-Land Cover Klasse Level 1 und 2						
	Bebaute Flächen				Landwirtschaftliche Flächen		Wälder/ naturnahe Flächen
	Städtisch geprägte Flächen	Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen	Abbauflächen, Deponien und Baustellen	Grünflächen	Ackerflächen	Grünland	Wälder
Fließgewässer	$N = 46$	$N = 12$	$N = 1$	$N = 4$	$N = 33$	$N = 25$	$N = 9$

Die Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer unterscheidet sich auf Level 2 zwischen den dargestellten Klassen der Landbedeckung und -nutzung ebenfalls signifikant (Kruskal-Wallis-Test: $N = 130$, $H = 23,825$, $p = 0,001$). Ein Dunn-Bonferroni-Post-hoc-Test ergibt, dass die Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer in Ackerflächen signifikant höher ist als in Wäldern ($N = 42$, $z = 4,102$, $p = 0,001$, $r = 0,292$). Jedoch lässt sich nicht verallgemeinernd schlussfolgern, dass die beprobten Fließgewässer in landwirtschaftlichen Flächen hohe Nitratbelastungen aufweisen, da auch zwischen den Probenahmestellen in Ackerflächen und im Grünland ein signifikanter Unterschied auftritt ($N = 58$, $z = 3,316$, $p = 0,019$, $r = 0,435$). Während 27,3 % der Probenahmestellen in Ackerflächen sehr hohe Nitratbelastungen aufweisen, ist nur eine von insgesamt 25 Probenahmestellen im Grünland sehr hoch durch Nitrat belastet.

Die Ergebnisse unterstreichen, dass eine differenzierte Betrachtung der Nitratbelastung von Fließgewässern erforderlich und eine pauschale Verurteilung der Landwirtschaft nicht zielführend ist. Die dargestellten Ergebnisse bilden dabei jedoch nur den Ist-Stand der Nitratbelastung der Gewässer an den Probenahmestellen in den verschiedenen Landbedeckungs- und -nutzungsklassen ab, während über die Quellen der Nitratbelastung anhand des Citizen Science-Datensatzes keine Aussagen betroffen werden können. Hierfür geeignete Optimierungen des dargestellten Konzeptes werden in Kapitel 4.5.2 diskutiert.

Dennoch zeigt sich, dass der dargestellte Citizen Science-Ansatz im Allgemeinen eine Analyse der räumlichen Einflüsse auf die Nitratbelastung ermöglicht, sofern von den Teilnehmer:innen eine ausreichende Anzahl an Probenahmestellen in Gebieten mit unterschiedlicher Landbedeckung- und -nutzung untersucht werden.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl an Probenahmestellen für stehende Gewässer ist eine Validierung der folgenden Hypothese SG-H1 jedoch nicht möglich.

SG-H1: "Die Nitratbelastung der beprobten stehenden Gewässer ist in landwirtschaftlichen und bebauten Flächen höher als in Wäldern und naturnahen Flächen."

Nach Aussortierung der privaten stehenden Gewässer sowie der Gewässer mit ungenügender Standortgenauigkeit verbleiben folgende Probenahmestellen in den CORINE-Land Cover Klassen auf Level 1 (2021).

Tabelle 15: Anzahl der Probenahmestellen in stehenden Gewässern in den CORINE-Land Cover Klassen auf Level 1 (CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021).

Probenahmestellen des Gewässertyps	CORINE-Land Cover Klasse Level 1			
	Bebaute Flächen	Landwirtschaftliche Flächen	Wälder und naturnahe Flächen	Feuchtflächen
Stehende Gewässer	N = 27	N = 4	N = 4	N = 1

Es treten keine signifikanten Unterschiede der Nitratbelastung zwischen Probenahmestellen in den Level 1 CORINE-Land Cover Klassen auf ($N = 36, H = 6,165, p = 0,104$). Hypothese SG-H1 kann aufgrund der geringen Anzahl an Probenahmestellen weder verifiziert noch falsifiziert werden.

Im Gegensatz zu Oberflächengewässern ist die Nitratbelastung des Regenwassers nicht vom Oberflächen- und Zwischenabfluss, sondern lediglich von der Deposition oxidierter Stickstoffverbindungen abhängig (vgl. Kapitel 2.2.3). Daher wurde folgende Hypothese abgeleitet.

RW-H1: "Die Nitratbelastung des beprobten Regenwassers ist in städtisch geprägten Flächen sowie in Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen höher als in Flächen mit anderen Nutzungsarten."

Nach der räumlichen Verbindung der Regenwasser-Probenahmestellen mit den CORINE-Land Cover Klassen auf Level 2, klassifiziert nach städtisch geprägten Flächen (CLC-Code 11), Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen (CLC-Code 12) und Flächen mit anderen Nutzungsarten (CLC-Code 13 bis 52), ergibt sich folgende Verteilung.

Tabelle 16: Anzahl der Regenwasser-Probenahmestellen in den CORINE-Land Cover Klassen auf Level 2 (CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021).

Probenahmestellen des Gewässertyps	CORINE-Land Cover Klasse Level 2		
	Städtisch geprägte Flächen	Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen	Übrige Flächen
Regenwasser	N = 21	N = 5	N = 8

Ein Kruskal-Wallis-Test wurde berechnet, um zu prüfen, ob die Landbedeckung und -nutzung einen Einfluss auf die Nitratbelastung des Regenwassers hat. Der Test ergibt keine signifikanten Unterschiede ($N = 34$, $H = 3,425$, $p = 0,180$).

Die deskriptive Statistik (vgl. Abbildung 64) zeigt jedoch, dass alle erhöht bis sehr hoch belasteten Regenwasser-Probenahmestellen (Kategorie 3 bis 5) in Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen und in städtisch geprägten Flächen liegen, in denen im Vergleich zum ländlichen Raum höhere Stickoxidkonzentrationen in der Luft auftreten (Kessinger et al., 2021).

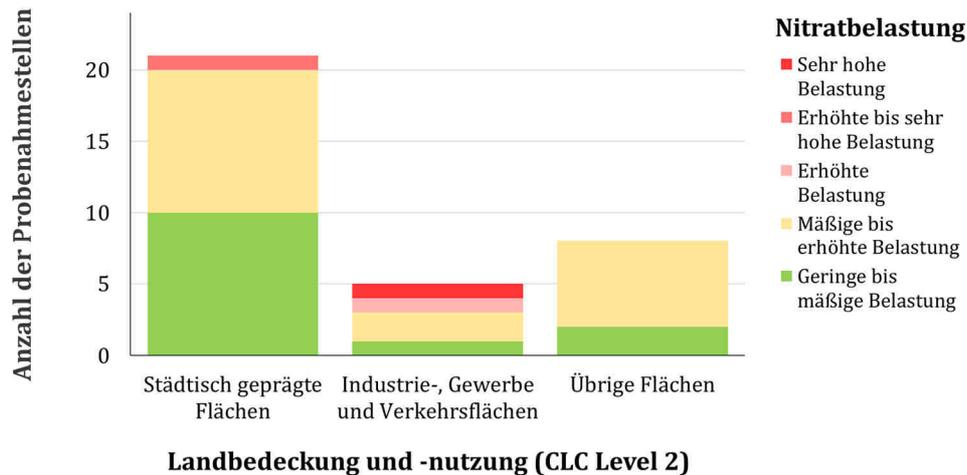


Abbildung 64: Nitratbelastung des beprobten Regenwassers in Abhängigkeit von der Landbedeckung und -nutzung (eigene Abbildung).

In allen übrigen Flächen sind keine erhöhten Belastungen festzustellen. Aufgrund der geringen Anzahl an Probenahmestellen mit höheren Nitratbelastungen kann Hypothese RW-H1 nicht abschließend verifiziert oder falsifiziert werden. Neben einer größeren Stichprobe sind auch genauere Messmethoden für die Untersuchung von Regenwasser zu empfehlen, da diese insgesamt eine geringe Nitratbelastung aufweisen.

Hydrogeologische Einflüsse:

Zuletzt wurden räumliche Einflüsse auf die Nitratbelastung des Grundwassers untersucht. Diese ist nicht nur von der Landbedeckung und -nutzung im Zustromgebiet der Probenahmestelle abhängig, was anhand des dargestellten Citizen Science-Konzeptes nicht untersucht werden kann, sondern auch von hydrogeologischen Einflüssen, die sich auf die Schnelligkeit der Nitratauswaschung, die Assimilation durch Pflanzen und das Denitrifikationspotenzial auswirken (vgl. Kapitel 2.2.5). Für die niedersächsischen hydrogeologischen Räume wurde folgende Hypothese abgeleitet.

BW-H3: „Die Nitratbelastung der beprobten Brunnen in Geestgebieten ist höher als die Nitratbelastung der beprobten Brunnen in Niederungsgebieten.“

Nach räumlicher Verbindung der Brunnenwasser-Probenahmestellen mit den hydrogeologischen Räumen, klassifiziert nach Niederung, Geest und Bergland, können folgende Daten zur Untersuchung von Hypothese BW-H3 herangezogen werden.

Tabelle 17: Anzahl der Brunnen-Probenahmestellen in Niederung, Geest und Bergland (klassifiziert nach *Hydrogeologische Raumgliederung Von Deutschland (HYRAUM)*, 2015; LBEG, 2010).

Probenahmestellen des Gewässertyps	Hydrogeologische Raumgliederung		
	Niederung	Geest	Bergland
Brunnenwasser	N = 97	N = 87	N = 58

Mit einem Kruskal-Wallis-Test wurde überprüft, ob die hydrogeologischen Bedingungen einen Einfluss auf die Nitratbelastung haben. Der Test ergibt signifikante Unterschiede der Nitratbelastung zwischen den Klassen Niederung, Geest und Bergland ($N = 242, H = 20,056, p < 0,001$). Ein Post-hoc-Test zeigt, dass die Nitratbelastung der beprobten Brunnen in Niederungsgebieten signifikant geringer ist als in Geestgebieten ($N = 184, z = -4,467, p < 0,001, r = 0,329$), was Hypothese BW-H3 bestätigt.

Auch ein Blick in die deskriptive Statistik (vgl. Abbildung 65) stützt die Verifizierung der Hypothese. Der Anteil der Probenahmestellen, die eindeutig den chemischen Grenzwert von 50 mg/L Nitrat überschreiten (Kategorie 5), ist in der Geest mit 31,0 % deutlich höher als in der Niederung (7,2 %) und im Bergland (10,3 %).

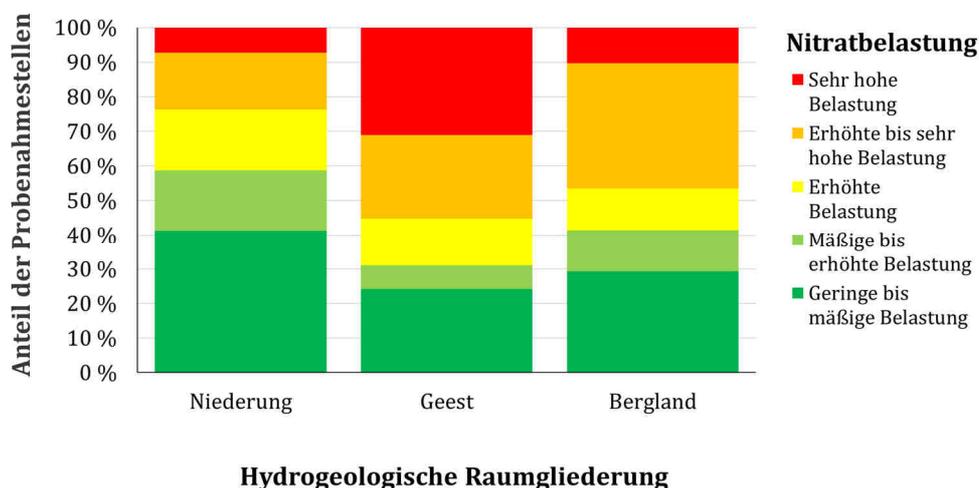


Abbildung 65: Nitratbelastung des beprobten Brunnenwassers in Abhängigkeit von hydrogeologischen Bedingungen (eigene Abbildung).

4.4.7. Zeitliche Einflüsse auf die Nitratbelastung

Hinsichtlich der Nitratbelastung von Oberflächengewässern und Grundwasser liegen nicht nur räumliche, sondern auch zeitliche Einflussfaktoren vor. Im Folgenden wird analysiert, inwieweit zeitliche Einflüsse auf die Nitratbelastung anhand der durch das Citizen Science-Projekt

erhobenen Daten ebenfalls nachgewiesen werden können. Zur Überprüfung der Hypothesen können folgende Probenahmestellen herangezogen werden.

Tabelle 18: Anzahl der mindestens einmal beprobten Probenahmestellen innerhalb der meteorologischen Jahreszeiten.

Probenahmestellen des Gewässertyps	Mindestens einmal beprobte Probenahmestellen im/in						
	Herbst 2019	Winter 2019/2020	Frühling 2020	Sommer 2020	Herbst 2020	Winter 2020/2021	jeder Jahreszeit
Fließgewässer	N = 165	N = 142	N = 125	N = 115	N = 107	N = 95	N = 83
Stehende Gewässer	N = 52	N = 46	N = 30	N = 21	N = 22	N = 18	N = 13
Brunnenwasser	N = 226	N = 151	N = 152	N = 126	N = 99	N = 78	N = 65
Quellwasser	N = 3	N = 2	N = 2	N = 2	N = 2	N = 1	N = 1

Die Probenahmestellen mit mindestens einem Messwert in der jeweiligen Jahreszeit (vgl. Tabelle 18, Spalte 2 bis 7) werden jeweils in die deskriptiven Statistik einbezogen (vgl. Abbildung 66, Abbildung 67 und Abbildung 68, S. 156 f.). Durch Friedman-Tests wurde statistisch auf Unterschiede der Nitratbelastungen über den gesamten Beprobungszeitraum getestet. In diese Tests wurden daher nur Probenahmestellen eingeschlossen, die in allen Jahreszeiten mindestens einmal beprobt wurden (vgl. Tabelle 18, Spalte 8).

Da für den Gewässertyp Quellwasser nur eine Probenahmestelle über den gesamten Probezeitraum beprobt wurde, kann Hypothese QW-H1 nicht untersucht werden.

QW-H1: „Die Nitratbelastungen der beprobten Quellen unterscheiden sich nicht nachweisbar zwischen den Jahreszeiten im Beprobungszeitraum.“

Für alle weiteren Gewässertypen lassen sich die Hypothesen bestätigen, wie im Folgenden gezeigt wird.

Fließgewässer:

FG-H3: „Die Nitratbelastungen der beprobten Fließgewässer sind in den Wintermonaten höher als in den Sommermonaten.“

Die jahreszeitlichen Schwankungen der beprobten Fließgewässer lassen sich in Abbildung 66 (S. 156) deutlich beobachten. Der Anteil der Probenahmestellen, die erhöhte bis sehr hohe Nitratbelastungen aufweisen (Kategorie 3 bis 5), ist im Winter 2019/2020 sowie im Winter 2020/2021 jeweils deutlich höher als im Sommer 2020.

Durch einen Friedman- und anschließenden Dunn-Bonferroni-Post-hoc-Test wird Hypothese FG-H3 ebenfalls bestätigt. Die Nitratbelastungen der beprobten Fließgewässer unterscheiden

sich signifikant zwischen den einzelnen Jahreszeiten ($N = 83$, $Chi\text{-}Quadrat = 107,639$, $p < 0,001$). Dabei ist die Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer im Winter 2019/2020 und im Winter 2020/2021 jeweils signifikant höher als im Sommer 2020. Es handelt sich dabei um einen großen bzw. mittleren Effekt (Dunn-Bonferroni-Post-hoc-Test: Winter 2019/2020 und Sommer 2020: $N = 83$, $z = 6,119$, $p < 0,001$, $r = 0,672$, Winter 2020/2021 und Sommer 2020: $N = 83$, $z = 3,423$, $p = 0,009$, $r = 0,376$).

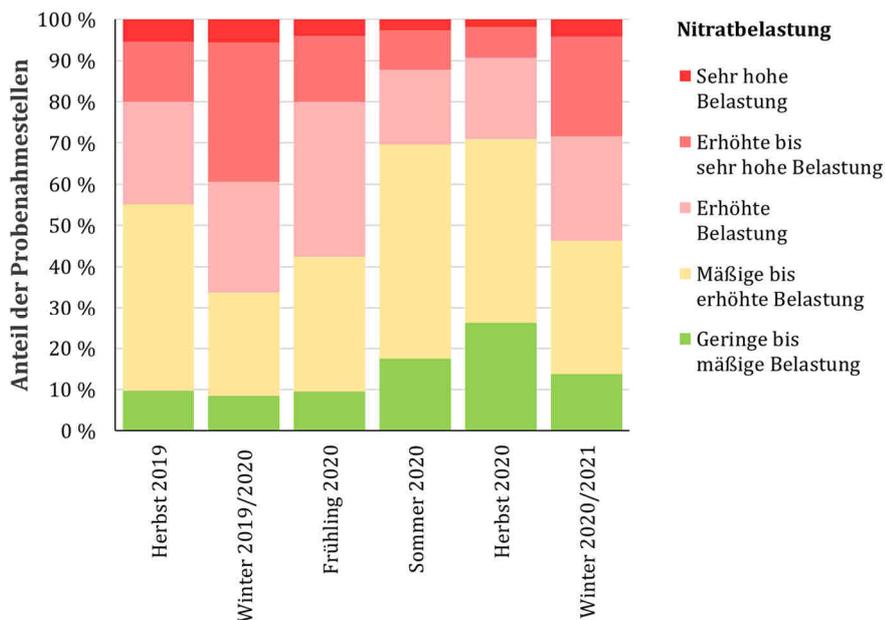


Abbildung 66: Jahreszeitlicher Verlauf der Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer (eigene Abbildung).

Stehende Gewässer:

SG-H2: „Die Nitratbelastungen der beprobten stehenden Gewässer sind in den Wintermonaten höher als in den Sommermonaten.“

Auch bei den beprobten stehenden Gewässern lassen sich Unterschiede der Nitratbelastungen zwischen den verschiedenen Jahreszeiten eindeutig im Citizen Science-Datensatz beobachten (vgl. Abbildung 67, S. 157) sowie statistisch mit einem Friedman-Test nachweisen ($N = 13$, $Chi\text{-}Quadrat = 16,216$, $p = 0,006$).

Der Post-hoc-Test zeigt nach Bonferroni-Korrektur der Signifikanzwerte jedoch keine signifikanten Unterschiede bei einem paarweisen Vergleich der Nitratbelastungen zwischen den Jahreszeiten, was gegebenenfalls auf die geringe Anzahl an über den gesamten Probenahmezeitraum beprobten Standorte zurückzuführen ist. Aufgrund der in der deskriptiven Statistik eindeutig erkennbaren saisonalen Unterschiede gilt Hypothese SG-H2 dennoch als verifiziert.

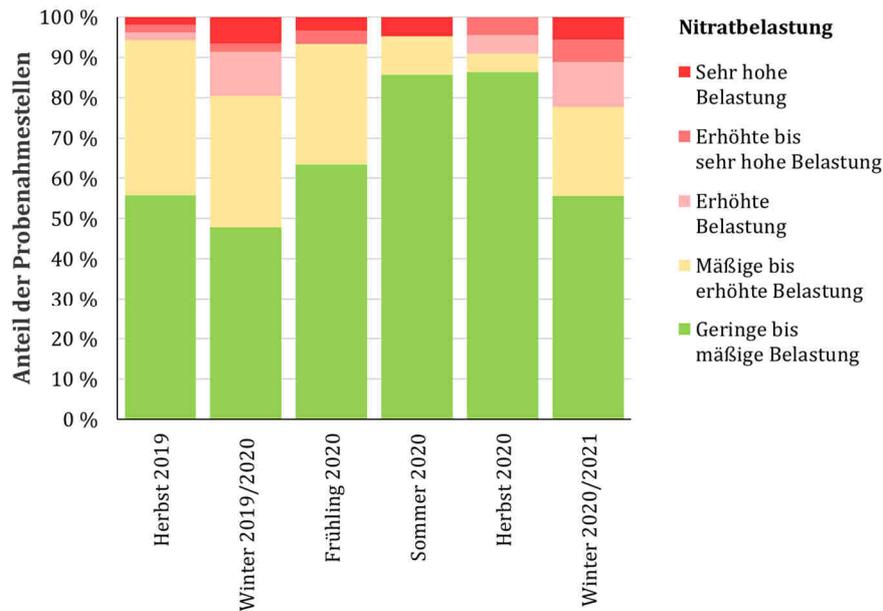


Abbildung 67: Jahreszeitlicher Verlauf der Nitratbelastung der beprobten stehenden Gewässer (eigene Abbildung).

Brunnenwasser:

Während für Oberflächengewässer jahreszeitliche Schwankungen erwartet und bestätigt wurden, weist Grundwasser in der Regel, insbesondere in tieferen Grundwasserleitern, keine oder nur sehr geringe Schwankungen der Nitratbelastung auf, sodass folgende Hypothese angenommen wurde (vgl. Kapitel 2.2.5).

BW-H4: „Die Nitratbelastungen der beprobten Brunnen unterscheiden sich nicht nachweisbar zwischen den Jahreszeiten im Beprobungszeitraum.“

Über den Probenahmezeitraum liegen, wie Abbildung 68 (S. 158) zeigt, deutlich geringere saisonale Schwankungen der Nitratbelastungen der Brunnenwasser-Probenahmestellen vor. Durch einen Friedman-Test wurden ebenfalls keine signifikanten Unterschiede der Nitratbelastung zwischen den Jahreszeiten festgestellt ($N = 65$, $Chi\text{-Quadrat} = 8,850$, $p = 0,115$).

Ergänzend zum Friedman-Test wurden Vorzeichen-Tests mit Bonferroni-Holm Korrektur der Signifikanzwerte zum paarweisen Vergleich der Nitratbelastungen zwischen den einzelnen Jahreszeiten durchgeführt (Holm, 1979). Die Bonferroni-Holm Korrektur ist weniger konservativ als die Bonferroni-Korrektur, da die Alphaniveaus der Mehrfachtestungen in einem absteigendem Mehrschritt-Verfahren schrittweise weniger stark korrigiert werden. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit, Fehler 2. Art zu begehen, also die Nullhypothese anzunehmen, obwohl sie falsch ist (Rüger, 2002). Die Mehrfachtestung durch den Vorzeichen-Test mit anschließender Bonferroni-Holm Korrektur zeigt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede der Nitratbelastung zwischen den Jahreszeiten.

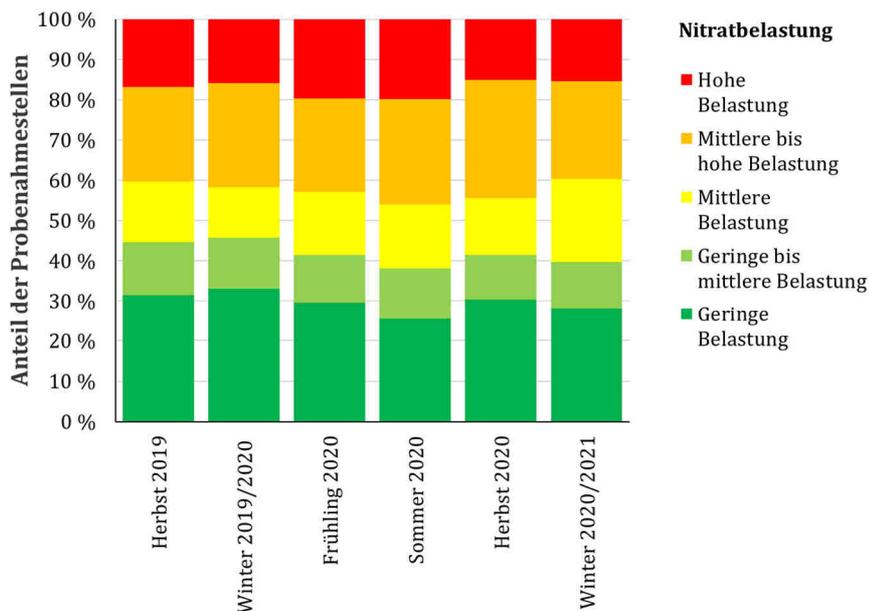


Abbildung 68: Jahreszeitlicher Verlauf der Nitratbelastung der beprobten Brunnen (eigene Abbildung).

Auf Grundlage der Citizen Science-Daten können die Hypothesen FG-H3, SG-H2 und BW-H4 damit bestätigt werden. Der durch das Citizen Science-Projekt generierte Datensatz ist demnach geeignet, um jahreszeitliche Entwicklungen der Nitratbelastung zu untersuchen.

4.4.8. Vergleich der Ergebnisse mit weiteren Messinitiativen

Die mit dem Citizen Science-Projekt erhobenen Daten sind, wie sich in den vorangegangenen Kapiteln zeigte, geeignet, um räumliche und zeitliche Einflüsse auf die Nitratbelastung zu untersuchen. Für die dargestellte Zielsetzung können der Citizen Science-Ansatz und die Teststäbchen als verwendete Messmethode damit zunächst als geeignet bewertet werden. Um die Güte der Daten in einem zweiten Schritt zu bewerten, wird der Citizen Science-Datensatz im Folgenden mit den Ergebnissen weiterer Messinitiativen verglichen.

Vergleich mit den Daten des VSR-Gewässerschutzes:

Zum Vergleich der Brunnenwasser-Messungen des Citizen Science-Projektes mit den Daten des VSR-Gewässerschutzes wurde für die Landkreise Osnabrück, Cloppenburg, Vechta und Emsland jeweils der Anteil der Probenahmestellen berechnet, bei dem eine Überschreitung des Grenzwertes von 50 mg/L Nitrat vorlag (bewertet über das 50. Perzentil der Mehrfachmessungen). Für die Stadt Osnabrück sind aufgrund zu geringer Anzahl an beprobten Brunnen keine Vergleichsdaten im Beprobungszeitraum vom VSR-Gewässerschutz vorhanden (VSR-Gewässerschutz e.V., 2021b).

Wird die Nitratbelastung der im Citizen Science-Projekt beprobten Brunnen als hoch bewertet (Kategorie 5, vgl. Tabelle 12, S. 136), liegt eine eindeutige Überschreitung des Grenzwertes von 50 mg/L vor, sodass der entsprechende Anteil der Probenahmestellen dem unteren Ende des Fehlerbereichs in Abbildung 69 entspricht. Bei Probenahmestellen mit einer mittleren bis

hohen Nitratbelastung (Kategorie 4) ist aufgrund der Messungenauigkeit der verwendeten Teststäbchen nicht eindeutig, ob der Grenzwert überschritten wird. Der maximal mögliche Anteil der Probenahmestellen mit Grenzwertüberschreitung berechnet sich damit über die Summe der Probenahmestellen in Kategorie 4 und 5 (oberes Ende des Fehlerbereichs). Der mittlere Anteil der Probenahmestellen mit Grenzwertüberschreitung wurde über das arithmetische Mittel der maximal und minimal möglichen Anteile der Probenahmestellen mit Grenzwertüberschreitung gebildet und in Abbildung 69 als blauer Balken dargestellt.

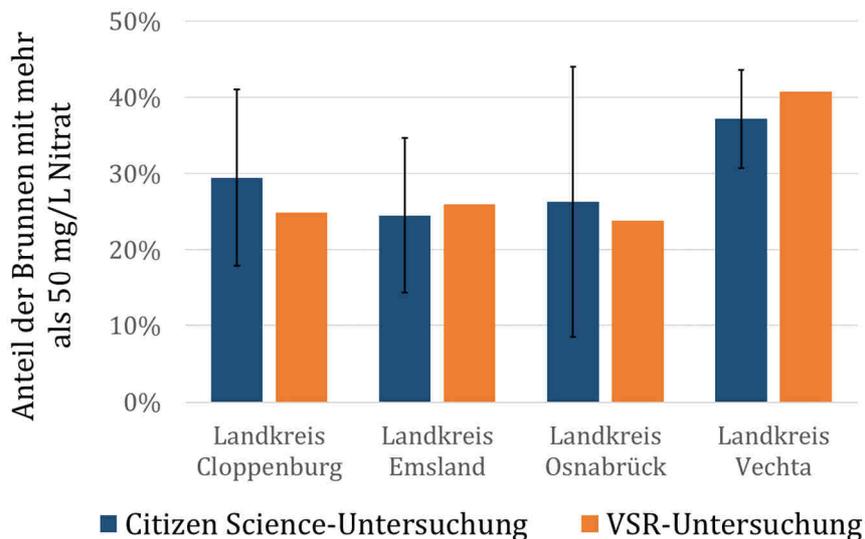


Abbildung 69: Vergleich der Citizen Science- und VSR-Daten
(eigene Abbildung unter Verwendung der Daten aus VSR-Gewässerschutz e.V., 2021b).

Unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Teststäbchen sind die Ergebnisse des Citizen Science-Projektes mit denen des VSR-Gewässerschutzes vergleichbar. Insbesondere im Landkreis Vechta ist das Grundwasser entsprechend beider Datensätze stark nitratbelastet, sodass Überschreitungen des chemischen Grenzwertes von 50 mg/L an $37,2 \pm 6,4$ % der Citizen Science-Probenahmestellen bzw. 40,8 % der VSR-Brunnenbeprobungen vorlagen.

Der Vergleich mit den Daten des VSR-Gewässerschutzes offenbart jedoch nicht nur die hohe Nitratbelastung in Teilen des Probenahmegebiets, sondern ist auch ein Indiz für die Güte des Citizen Science-Datensatzes. Die vergleichbaren Nitratbelastungen in den vier betrachteten Landkreisen weisen auf die Richtigkeit der Citizen Science-Daten hin. Die Messungenauigkeit der Nitrat-Teststäbchen führt jedoch zu großen Fehlerbereichen, da eine eindeutige Bewertung der Nitratbelastung entsprechend der Ziel- und Grenzwerte für viele Probenahmestellen, insbesondere im Landkreis Osnabrück, nicht möglich war. Die Genauigkeit der Messmethode ist damit zwar ausreichend, um eine erste Einschätzung über die Nitratbelastung zu erhalten, nicht jedoch, um den genauen Anteil an Probenahmestellen, die definierte Grenzwerte über- oder unterschreiten, zu ermitteln. Optimierungen der Messmethode werden in Kapitel 4.5.2 dargestellt. Für einen weiteren Vergleich werden Daten des NLWKN herangezogen.

Vergleich mit den Daten des NLWKN:

Für den Vergleich mit den Daten des NLWKN können 114 Fließgewässer-Probenahmestellen mit ausreichender Standortgenauigkeit (vgl. Kapitel 4.3.5 (d)) und 37 Brunnen mit bekannter mittlerer Filtertiefe aus dem Citizen Science-Datensatz herangezogen werden. Die Nearest Neighbor-Analyse dieser Probenahmestellen mit denen des NLWKN und der anschließende Vergleich der Nitratbelastungen (vgl. Kapitel 4.3.5 (e)) ergibt eine Übereinstimmung von 87,7 % für die einander zugeordneten Fließgewässer-Probenahmestellen und eine Übereinstimmung von 59,5 % für die einander zugeordneten Brunnenwasser- bzw. Grundwasser-Probenahmestellen (vgl. Abbildung 70).

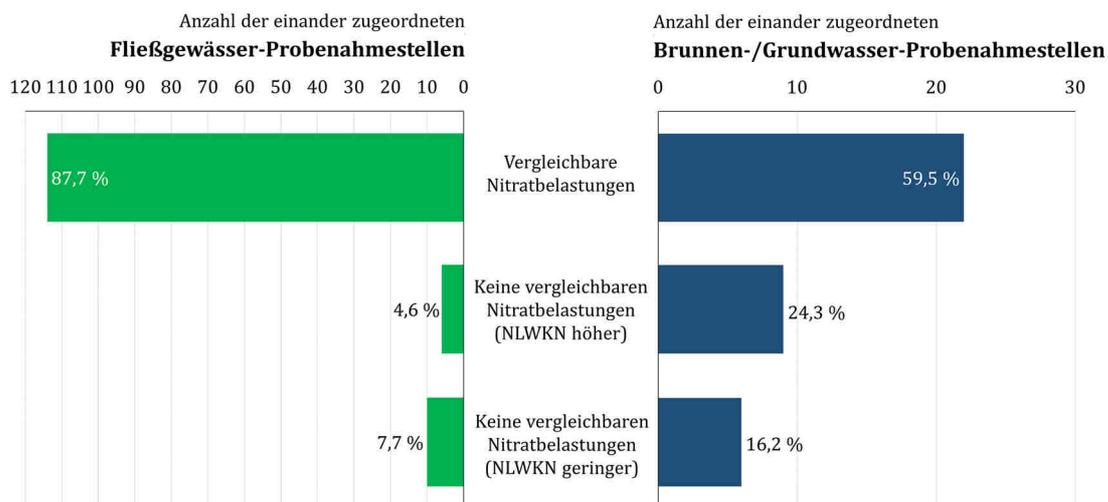


Abbildung 70: Vergleich der Citizen Science- und NLWKN-Daten (eigene Abbildung).

Die Übereinstimmung der Nitratbelastungen an 87,7 % der Fließgewässer-Probenahmestellen ist damit sehr hoch und weist auf die Richtigkeit der erhobenen Daten hin. Die Übereinstimmung der Grundwasser- bzw. Brunnenwasser-Probenahmestellen ist hingegen deutlich geringer und erfordert eine genauere Betrachtung der voneinander abweichenden Probenahmestellen, um die Ursachen der Abweichungen zu ergründen.

Für eine differenzierte Ursachenanalyse wurden die Citizen Science-Probenahmestellen mit vom NLWKN abweichenden Ergebnissen zu insgesamt 9 Fokusregionen für Grund- und Brunnenwasser-Probenahmestellen (vgl. Abbildung 71, S. 161) und 8 Fokusregionen für Fließgewässer-Probenahmestellen (vgl. Abbildung 72, S. 162) zusammengefasst. Anhand der Fokusregionen wurde für jede Probenahmestelle analysiert, ob potenzielle Ursachen für die abweichenden Nitratbelastungen abgeleitet werden können. Die detaillierten Ergebnisse dieser Analyse sind in Anhang K zu finden.

Für 14 der insgesamt 15 durch die Bürger:innen und Schüler:innen untersuchten Brunnenwasser-Probenahmestellen, bei denen die Nitratbelastungen von den zugeordneten NLWKN-

Probenahmestellen abweichen (vgl. Abbildung 71), konnten unter anderem folgende potenzielle Ursachen für die Abweichungen identifiziert werden:

- Die Citizen Science-Probenahmestelle liegt zwischen zwei oder mehreren NLWKN-Probenahmestellen mit vergleichbaren Filtertiefen und sich deutlich voneinander unterscheidenden Nitratbelastungen (Hinweis auf räumlich stark variierende Nitratkonzentrationen).
- Die mittleren Filtertiefen der einander zugeordneten Brunnen unterscheiden sich deutlich voneinander.
- Es liegen große Abstände zwischen den einander zugeordneten Probenahmestellen vor.

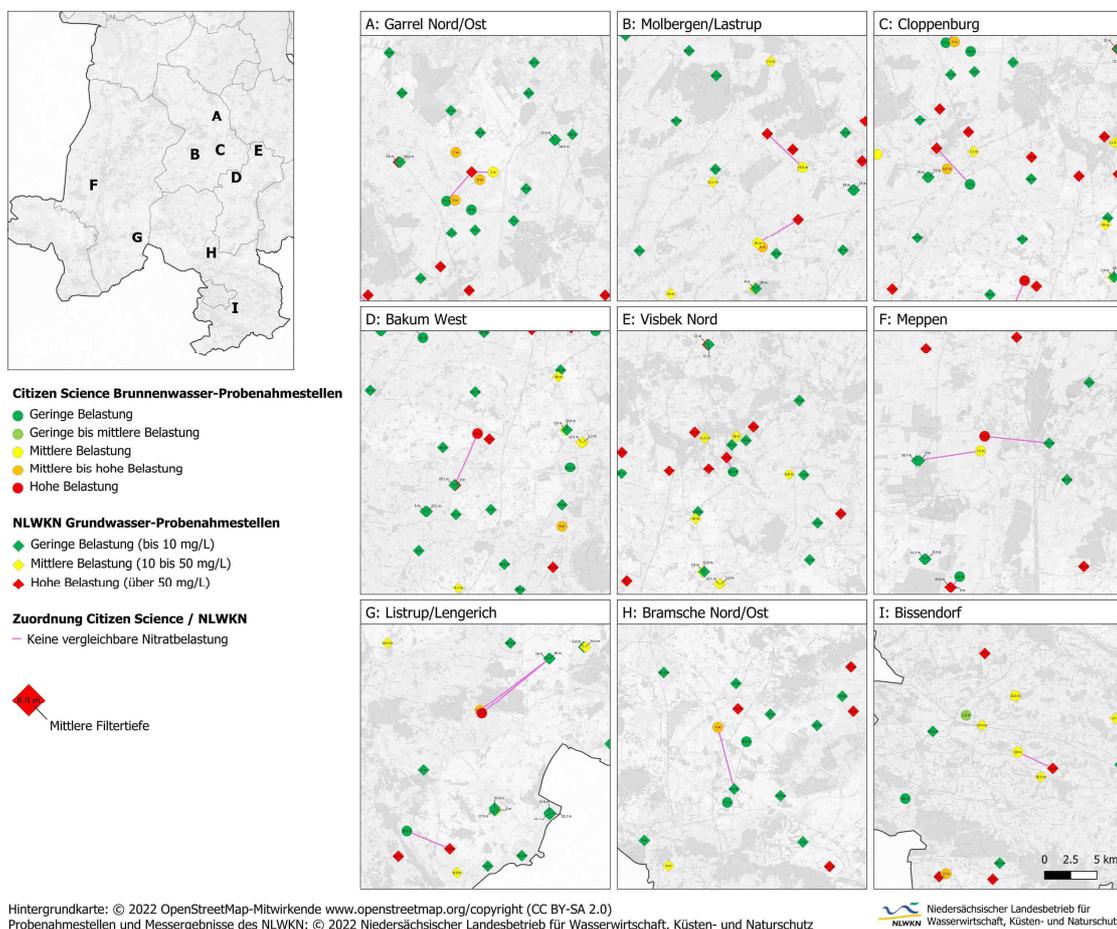


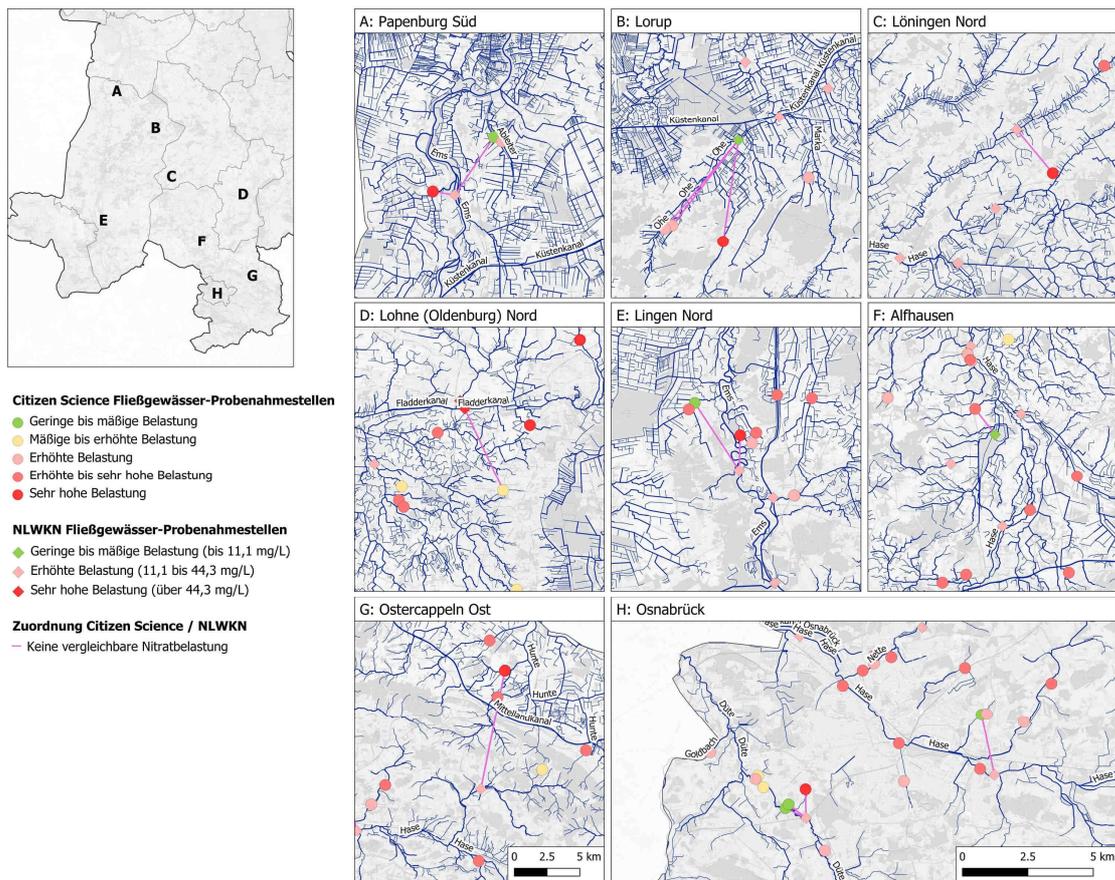
Abbildung 71: Fokusregionen der voneinander abweichenden Brunnenwasser- und Grundwasser-Probenahmestellen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegeben Daten).

Aufgrund dieser Ursachen sind die durch die Nearest Neighbor-Analyse zugeordneten NLWKN-Probenahmestellen nicht als Referenzwert zur Beurteilung der Datengüte geeignet. Vielmehr können die Citizen Science-Daten in den entsprechenden Fokusregionen Hinweise auf horizontal oder vertikal stark variierende Nitratbelastungen des Grundwassers liefern, welche anhand des bestehenden Messnetzes des NLWKN noch nicht erfasst werden. Auf diese Weise kann der Citizen Science-Datensatz als Unterstützung zur Verbesserung bestehender

Messnetze genutzt werden und Hinweise liefern, in welchen Gebieten offizielle Probenahmestellen bis dato fehlen, um die tatsächlich vorliegende Nitratbelastung des Grundwassers abzubilden. In Anhang K werden vier Regionen dargestellt, in denen die Citizen Science-Daten auf noch nicht erfasste Nitrat-Hotspots oder eine zu geringe Messstellendichte im NLWKN-Messnetz hindeuten. Um Messfehler auszuschließen, wird eine erneute Beprobung der entsprechenden Citizen Science-Brunnen durch die Wissenschaftler:innen oder den NLWKN empfohlen, bevor die Errichtung neuer Grundwasser-Probenahmestellen diskutiert wird.

Für Fließgewässer-Probenahmestellen wurden unter anderem folgende Ursachen für abweichende Nitratbelastungen der einander zugeordneten Probenahmestellen identifiziert:

- Es liegen große Abstände zwischen den zugeordneten Probenahmestellen vor.
- Einander zugeordnete Probenahmestellen liegen nicht im gleichen Flusssystem.
- Das durch das Citizen Science-Projekt beprobte Fließgewässer mündet unterhalb der NLWKN-Probenahmestelle in das vom NLWKN beprobte Fließgewässer.
- Weitere Zuflüsse zwischen der NLWKN- und Citizen Science-Probenahmestelle können die Nitratbelastung beeinflussen.



Hintergrundkarte: © 2022 OpenStreetMap-Mitwirkende www.openstreetmap.org/copyright (CC BY-SA 2.0)
 Probenahmestellen und Messergebnisse des NLWKN: © 2022 Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
 Gewässernetz: © 2020 Auszug aus den Geobasisdaten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung <http://www.lgn.niedersachsen.de>
 LGLN (www.govdata.de/dl-de/by-2-0) Bearbeitet durch das Nds. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

Niedersächsischer Landesbetrieb für
 wknk Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

Abbildung 72: Fokusregionen der voneinander abweichenden Fließgewässer-Probenahmestellen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).

Bei 13 der 16 einander zugeordneten Fließgewässer-Probenahmestellen mit abweichenden Nitratbelastungen (vgl. Abbildung 72, S. 162) wurden eine oder mehrere potenzielle Ursachen festgestellt, welche dazu führen, dass die NLWKN-Probenahmestelle nicht als Referenz für die Citizen Science-Probenahmestelle geeignet ist. Lediglich für drei Fließgewässer-Probenahmestellen in der Fokusregion Osnabrück liegen Abweichungen vor, für welche keine potenziellen Ursachen identifiziert werden konnten (vgl. Anhang K).

Neben den identifizierten Ursachen können auch Messfehler durch die Teilnehmenden vorliegen, die dazu führen, dass die Nitratbelastung der durch das Citizen Science-Projekt beprobten Fließgewässer falsch bewertet wurde. Diese können nicht ausgeschlossen werden, da keine Referenzmessungen an den Probenahmestellen von den Wissenschaftler:innen durchgeführt wurden. Letzteres wird für zukünftige Projekte zur Beurteilung der Datengüte empfohlen.

Darüber hinaus kann eine zu geringe Anzahl an Nitratmessungen an den Probenahmestellen in Oberflächengewässern aufgrund der ausgeprägten jahreszeitlichen Schwankungen ebenfalls in einer Falschbewertung der Nitratbelastung einer Probenahmestelle resultieren, ist aus folgendem Grund jedoch unwahrscheinlich. Aufgrund der erhöhten Nitratkonzentrationen in Oberflächengewässern im Winter bildet das 90. Perzentil in der Regel einen Wintermesswert ab. Da nahezu alle Probenahmestellen im Winter 2019/2020 beprobt wurden (vgl. Abbildung 53, S. 139), welcher gleichzeitig die höchsten Nitratbelastungen aufwies (vgl. Abbildung 66, S. 156), ist davon auszugehen, dass das 90. Perzentil auch bei einer geringen Anzahl an Messwerten eine korrekte Bewertung der Nitratbelastung wiedergibt. Lediglich kurzzeitige Ereignisse, welche temporär zu hohen Nitratbelastungen führen, langfristig jedoch keine Auswirkung auf die Nitratbelastung des Gewässers haben, werden bei unter 9 Messwerten nicht durch das 90. Perzentil aussortiert. Bei 5 der 16 Fließgewässer-Probenahmestellen kann eine geringe Anzahl an Messwerten Ursache der Abweichungen von den Ergebnissen des NLWKN sein. Optimierungen des Citizen Science-Konzeptes zur Motivationssteigerungen der Teilnehmenden, häufiger oder länger Nitratmessungen durchzuführen, werden in Kapitel 4.5.2 dargestellt.

Werden die dargestellten Ursachen berücksichtigt, nach denen einige Probenahmestellen des NLWKN nicht als Referenz für das Citizen Science-Projekt geeignet sind, so liegt insgesamt eine hohe Übereinstimmung der miteinander vergleichbaren Probenahmestellen vor, was auf die Richtigkeit der Citizen Science-Daten hindeutet. Die Datenbasis für den Vergleich der Messergebnisse ist insgesamt jedoch eher gering. Der Vergleich mit den Daten des NLWKN lässt daher keine endgültige Beurteilung der Richtigkeit der Daten zu. Für eine aussagekräftigere Gütebewertung der Citizen Science-Daten sind verschiedene Optimierungen des Konzeptes möglich, die in Kapitel 4.5.2 diskutiert werden.

4.5. Diskussion und Fazit: Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung

4.5.1. Realisierung der Projektziele

Das Ziel, ein längerfristiges, flächendeckendes Monitoring der Nitratbelastung verschiedener Gewässertypen in einem definierten Beprobungsgebiet mit dem Citizen Science-Ansatz durchzuführen, wurde durch das vorgestellte und durchgeführte Konzept erreicht.

Insgesamt 545 Probenahmestellen wurden durch die am Projekt beteiligten Schüler:innen und Bürger:innen über 18 Monate von September 2019 bis März 2021 regelmäßig beprobt. Die Ergebnisse der Beprobungen von 73 Probenahmestellen in stehenden Gewässern, 180 Probenahmestellen in Fließgewässern, 34 Regenwasser-Probenahmestellen, 243 Brunnen und 3 Quellen konnten in die Auswertung einbezogen werden. Zwölf weitere über die Webseite angelegte Probenahmestellen wurden von der Auswertung ausgeschlossen, da Messwerte verschiedener Standorte aufgrund eines uneindeutigen Standortnamens unter demselben Namen gespeichert wurden. In 18 Monaten wurden von den Teilnehmer:innen insgesamt 8754 Einzelmessungen durchgeführt, von denen nach Aussortierung der zwölf Probenahmestellen 8045 Einzelmessungen in die Auswertung einbezogen werden konnten. Optimierungen des Konzeptes, um diesen Datenverlust zu vermeiden, werden in Kapitel 4.5.2 dargestellt.

Mit über 500 Probenahmestellen, über 8000 Messwerten und insgesamt etwa 800 Teilnehmer:innen (ca. 200 Schüler:innen und 600 Bürger:innen) ordnet sich das durchgeführte Citizen Science-Projekt im Vergleich zu anderen Bürgerforschungsprojekten im Bereich der Gewässerforschung in das Feld der regionalen Citizen Science-Projekte mittlerer Größe ein. Beispielsweise wurden durch ein Citizen Science-Projekt am Bronx River von 1990 bis 2013 nur 19 Probenahmestellen anhand von etwa 1000 Wasserproben untersucht (Bronx River Alliance, 2015). Eine ähnlich kleine Datenbasis wies ein Citizen Science-Projekt am Fluss Amanalco auf, bei dem von 165 Freiwilligen 18 Probenahmestellen über 18 Monate erforscht wurden (Calderón Cendejas et al., 2021). Neben Nitrat beziehungsweise Gesamtstickstoff wurden in beiden Projekten jedoch auch weitere Güteparameter überprüft (vgl. Tabelle 7, S. 85), sodass die Zielsetzung dieser Projekte eher in einer differenzierten Untersuchung kleinerer Gebiete als in einer großflächigen Untersuchung eines Parameters lag. Hierbei fokussierten sich beide Projekte auf einzelne Flusssysteme. Großflächiger angelegte Citizen Science-Projekte wie beispielsweise HydroCrowd mit 280 an einem Stichtag beprobten Fließgewässern in Deutschland weisen eine größere Anzahl an Probenahmestellen auf (Breuer et al., 2015), die mit dem dargestellten Citizen Science-Projekt vergleichbarer ist. Als deutlich größer skaliertes Projekt wird FreshWater Watch weltweit durchgeführt und hat inzwischen zehntausende Menschen animiert, als Bürgerwissenschaftler:innen teilzunehmen und Süßwasser mit einem Testkit hinsichtlich verschiedener Parameter zu untersuchen. Über 30.000 Daten wurden bereits gesammelt und hinsichtlich verschiedener Fragestellungen ausgewertet (Earthwatch

Institute, 2022, Stand 13.10.2022). In Deutschland wurden durch das Projekt FreshWater Watch bis dato nur wenige Messungen durchgeführt, im Beprobungsgebiet des Nitrat-Monitorings (Landkreise Osnabrück, Cloppenburg, Vechta, Emsland, Stadt Osnabrück) liegen keine Probenahmestellen. Daher ist kein direkter Vergleich der Ergebnisse beider Citizen Science-Projekte möglich.

Das Engagement und Durchhaltevermögen der Projektteilnehmer:innen des dieser Arbeit zugrunde liegenden Citizen Science-Projektes kann im Vergleich zu anderen Citizen Science-Projekten als hoch bewertet werden. Auch am Ende der Erhebungsphase (Winter 2020/2021) nach über 15 Monaten wurden noch 38,8 % aller Probenahmestellen durch die Bürger:innen und Schüler:innen beprobt. Eine ähnliche aktive Beteiligungsquote von 38 % nach über 12 Monaten konnte im Citizen Science-Projekt OpenStreetMap nur unter den 5 % der Mitglieder erreicht werden, die sehr aktiv am Projekt teilgenommen und viele Daten beigesteuert haben. Die deutlich größere Gruppe der weniger aktiven Mitglieder des OpenStreetMap-Projektes hat maximal 3 Monate an dem Projekt teilgenommen (Neis & Zipf, 2012). In dem Projekt „Wildkatzensprung“ waren die Teilnehmenden durchschnittlich 9 Monate aktiv, der Anteil der maximal zwölf Monate aktiven Teilnehmer:innen betrug 83 % (Moczek, 2018).

Analog zu weiteren Projekten wie beispielsweise „FreshWater-Watch“ oder „FLOW“ haben die Teilnehmenden des dargestellten Citizen Science-Projektes die Probenahmestellen nicht nur hinsichtlich ihrer Nitratbelastung untersucht, sondern auch verschiedene Gewässermerkmale des beprobten Gewässers mithilfe eines Fragebogens bestimmt (Christian Langer, o. J.; Earthwatch Institute, 2022). Hierdurch wurden parallel zur Erhebungsphase insgesamt 236 Probenahmestellen mithilfe der zur Verfügung gestellten Fragebögen, beispielsweise durch Angabe der Filtertiefe des beprobten Brunnens, klassifiziert (Klassifizierungsquote Fließgewässer: 60 %, stehende Gewässer: 32,9 %, Regenwasser: 26,5 %, Quellwasser: 66,7 %, Brunnenwasser: 38,3 %). Optimierungen zur Verbesserung dieser Quote werden in Kapitel 4.5.2 dargestellt.

Im Anschluss an die Datenerhebung wurden die Monitoring-Daten in dieser Dissertation hinsichtlich der Fragestellung ausgewertet, inwieweit der Citizen Science-Ansatz einen Beitrag zur Gewässerforschung, konkret zur Untersuchung der Stickstoffbelastung von Gewässern, leisten kann. Hierbei wurden folgende Forschungsfragen fokussiert:

- 1.1. Welche Messmethoden sind geeignet, um mithilfe des Citizen Science-Ansatzes die Nitratkonzentration verschiedener Gewässertypen zu untersuchen?
- 1.2. Inwieweit kann ein flächendeckendes, längerfristiges Nitrat-Monitoring verschiedener Gewässertypen in einem definierten Gebiet mit dem Citizen Science-Ansatz realisiert werden?

- 1.3. Inwieweit lassen sich mit den Citizen Science-Daten Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung untersuchen und inwieweit stimmen die Ergebnisse mit den aus der Theorie abgeleiteten Hypothesen überein?
- 1.4. Inwieweit sind die Ergebnisse des Citizen Science-Projektes konsistent mit oder komplementär zu den Datensätzen anderer Messinitiativen?

In Forschungsfrage 1.3 wurden Ideen und Fragestellungen der Schüler:innen zu verschiedenen Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung, zum Beispiel zu jahreszeitlichen Einflüssen, aufgegriffen. Von den Bürger:innen wurde die Möglichkeit, Forschungsfragen zu formulieren und einzusenden, nicht wahrgenommen. Das fakultative Ziel „Die aktiven Teilnehmer:innen (Bürger:innen und Schüler:innen) formulieren Forschungsfragen, die anhand der gemessenen Daten untersucht werden können“ (vgl. Anhang D) wurde damit nur in Teilen erreicht. Um auch Bürger:innen in weitere Phasen des Forschungsprozesses einzubeziehen, könnten in zukünftigen Projekten beispielsweise Workshops oder sogenannte CitizenLabs von den Wissenschaftler:innen angeboten werden, in denen die Bürger:innen nicht nur verschiedene Experimente zur vertieften Erarbeitung eines Themas durchführen, sondern auch lernen können, Forschungsfragen und Hypothesen zu formulieren (Kreienhop & Beeken, 2022). Weitere Optimierungen werden im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

Anhand der Untersuchung der Hypothesen und der Ergebnisse zu den Subforschungsfragen werden im folgenden Kapitel 4.5.2 Potenziale und Grenzen des Citizen Science-Ansatzes diskutiert. Damit werden alle für das Projekt formulierten, obligatorischen Ziele erreicht. Inwieweit der Citizen Science-Ansatz für weitere Zielsetzungen adaptiert werden kann, wird in Kapitel 4.5.3 dargestellt.

4.5.2. Potenziale, Grenzen und Optimierungen des dargestellten Citizen Science-Konzeptes für die Gewässerforschung

Im Folgenden werden Potenziale und Grenzen des dargestellten Citizen Science-Konzeptes für die Gewässerforschung aufbauend auf den in Kapitel 4.4 dargestellten Ergebnissen diskutiert. Basierend hierauf werden die Forschungsfragen beantwortet und Optimierungen des dargestellten Citizen Science-Konzeptes abgeleitet.

Zunächst wird die Eignung der verwendeten Messmethode dargestellt. Ergänzend werden alternative Messmethoden diskutiert, welche teilweise bereits in weiteren Citizen Science-Projekten zum Einsatz kamen. Im Anschluss werden die Ergebnisse des Nitrat-Monitorings hinsichtlich der Forschungsfragen 1.2 bis 1.4 interpretiert und mit den Ergebnissen weiterer Citizen Science-Projekte verglichen. Neben der räumlichen und zeitlichen Skalierung der Messdaten werden dabei Ergebnisse der Analysen verschiedener Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung diskutiert. Anhand des Vergleichs des Citizen Science-Datensatzes mit anderen Messinitiativen wird zudem die Güte des Citizen Science-Datensatzes beurteilt. Abschließend wird das

Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung übergeordnet unter Berücksichtigung des dargestellten Konzeptes sowie weiterer Citizen Science-Projekte bewertet.

Eignung verschiedener Messmethoden für den Citizen Science-Ansatz:

Vor Durchführung des Citizen Science-Projektes wurden verschiedene Messmethoden zur Untersuchung der Nitratbelastung von Gewässerproben recherchiert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile diskutiert (vgl. Tabelle 9, S. 113). Gängige analytische Messverfahren wie beispielsweise die direkte oder nasschemische photometrische Bestimmung der Nitratkonzentration oder die Messung mithilfe einer Ionenselektiven Elektrode weisen zwar eine hohe Messgenauigkeit auf, können aufgrund ihrer Komplexität jedoch nicht von den Teilnehmer:innen des Projektes ohne zeitaufwändige Einführung durchgeführt werden und erfordern teures Equipment, welches über ein großes Einzugsgebiet nicht zur Verfügung gestellt werden kann.

Als kostengünstige Alternative stehen Nitrat-Teststäbchen oder Komparator-Testsätze zur Verfügung, mit denen sich die Nitratkonzentration durch einen visuellen Farbabgleich der Probe beziehungsweise des Testfeldes mit einer vorgegebenen Farbskala halbquantitativ bestimmen lässt. Da die verwendeten Reagenzien für die Aufbereitung der Gewässerprobe zur Messung mit dem Komparatorsystem mit langfristiger Wirkung schädlich für Wasserorganismen sind, wenn sie in die Umwelt gelangen, wurden Nitrat-Teststäbchen als Messmethode für das Citizen Science-Projekt ausgewählt. Nach Eintauchen des Teststäbchens in die Wasserprobe kann die Nitrat-Konzentration nach 60 Sekunden über den Vergleich des Testfeldes mit einer Referenz-Farbskala abgelesen werden, sodass die Dauer einer Messung vergleichsweise kurz ist (JBL GmbH & Co KG, o. J.).

Die Messgenauigkeit der verwendeten, kostengünstigen Teststäbchen (JBL PROAQUATEST EASY 7in1) wurde in einer projektbegleitenden Masterarbeit untersucht. Diese ergab, dass die Nitratkonzentrationen mit den Teststäbchen über den gesamten Messbereich konsistent überschätzt werden, sodass eine Anpassung der gemessenen Werte erforderlich ist (Rolf, 2021). In der vorliegenden Dissertation wurde aufbauend auf den Messergebnissen der Masterarbeit anhand geltender Ziel- und Grenzwerte eine fünfstufige Kategorisierung abgeleitet, anhand welcher die Messwerte der Teilnehmer:innen vor der Auswertung umcodiert wurden (vgl. Tabelle 12, S. 136). 73 % der Brunnen- und Quellwasser-Messungen konnten auf diese Weise eindeutig über oder unter dem chemischen Grenzwert von 50 mg/L Nitrat eingeordnet werden (GrwV, 2010/04.05.2017). 67 % der Messungen von Fließgewässern, stehenden Gewässern und Regenwasser lagen nach der Umcodierung eindeutig über oder unter dem Zielwert von 11,1 mg/L Nitrat (LAWA, 1998). Aufgrund der begrenzten Fähigkeit des menschlichen Auges, geringe Farbunterschiede wahrzunehmen, und der Ungenauigkeit der Referenzfarbskala

Subforschungsfrage 1.1:

Welche Messmethoden sind geeignet, um mithilfe des Citizen Science-Ansatzes die Nitratkonzentration verschiedener Gewässertypen zu untersuchen?

ließen sich die übrigen von den Teilnehmer:innen gemessenen Werte nicht eindeutig über oder unter den Grenz- und Zielwerten einordnen. Mithilfe der verwendeten Teststäbchen kann daher zwar ein Überblick über die Nitratbelastung in einer Region gewonnen werden, der genaue Anteil der Probenahmestellen mit Ziel- oder Grenzwertüberschreitung lässt sich jedoch nicht ableiten (vgl. Abbildung 69, S. 159). Die Genauigkeit der Teststäbchen reicht dennoch aus, um verschiedene Einflüsse auf die Nitratbelastung der beprobten Gewässer zu beobachten und statistisch nachzuweisen, wie im weiteren Verlauf der Diskussion dargestellt wird. Damit haben sich die verwendeten Teststäbchen für die dargestellte Zielsetzung des Citizen Science-Projektes als geeignet erwiesen.

Werden andere Zielsetzungen verfolgt, so gelangen die verwendeten Teststäbchen aufgrund der Messgenauigkeit schnell an ihre Grenzen, sodass andere Messmethoden gewählt werden sollten. Sofern ein ausreichendes Budget vorliegt, kann zunächst auf Teststäbchen anderer Marken zurückgegriffen werden, die eine intensivere Färbung des Testfeldes und eine passgenauere Referenzfarbskala aufweisen. Im Rahmen der projektbegleitenden Masterarbeit wurden die vergleichsweise teuren „Merckoquant® Nitrat-Teststäbchen“ (Artikelnummer: M-1.10020.0001) photometrisch untersucht. Diese weisen im Vergleich zu den verwendeten Teststäbchen bereits bei geringen Konzentrationen eine intensivere Färbung des Testfeldes auf, sodass insbesondere Konzentrationen unter 100 mg/L besser voneinander unterschieden werden können (Rolf, 2021). Jedoch sollten auch diese vor der Verwendung in Citizen Science-Projekten in weiteren Schritten validiert werden, um die Messgenauigkeit zu identifizieren sowie gegebenenfalls vorliegende Über- oder Unterschätzungen der Nitratbelastung zu quantifizieren. Die Validierung sollte dabei vor der Datenerhebung erfolgen, um eine ausreichende Datengüte für die gewählte Zielsetzung des Projektes sicherzustellen.

Eine weitere Optimierung der Messmethode kann durch die Kombination von Teststäbchen und einem Farbsensor erreicht werden, da auf diese Weise subjektive Ableseungenauigkeiten und -fehler ausgeschlossen werden (vgl. Abbildung 41, S. 117). Eine entsprechende Messmethode, bei der die Teststäbchen, ein Farbsensor und eine 3D-gedruckte Messvorrichtung miteinander kombiniert werden, befindet sich aktuell in der Entwicklung durch die Chemiedidaktik und Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück.

Messmethoden mit einer geringeren Nachweisgrenze und einer höheren Messgenauigkeit sind zum Beispiel erforderlich, wenn geringe Schwankungen der Nitratbelastung von Brunnenwasser oder Veränderungen der Nitratkonzentration entlang eines Flusses erforscht werden sollen. So konnten Unterschiede der Nitratbelastung des Bronx Rivers zwischen verschiedenen Probenahmestellen anhand von Citizen Science-Daten nicht untersucht werden, da die Nachweisgrenze der verwendeten Messmethode zu hoch war, um die Änderungen der Nitratkonzentrationen zu erfassen (Bronx River Alliance, 2015). Als Alternative zu Nitrat-Teststäbchen oder anderen Messmethoden, mit denen nur eine halbquantitative Messung möglich ist, stehen mit der photometrischen Nitratbestimmung oder der Ionen-selektiven Elektrode genauere

Messmethoden zur Verfügung, die entweder im Labor oder vor Ort durchgeführt werden können und in weiteren Citizen Science-Projekten bereits verwendet wurden (z. B. Brendelberger, o. J.; Breuer et al., 2015). Nachteil dieser Methoden ist allerdings, dass sie nur von Wissenschaftler:innen oder sehr intensiv geschulten Teilnehmer:innen durchgeführt werden können und deutlich höhere Kosten pro Messung aufweisen als beispielsweise Teststäbchen. Da diese Messmethoden zudem nicht flächendeckend in einem größeren Beprobungsgebiet zur Verfügung gestellt werden können, müssten die Wasserproben konserviert und transportiert werden, was die Kosten und den Aufwand ebenfalls erhöhen.

Im Vergleich zu den präsentierten alternativen Messmethoden lassen sich Teststäbchen damit insgesamt als geeignete Messmethode bewerten, wenn ein flächendeckendes, längerfristiges Nitrat-Monitoring mit dem Citizen Science-Ansatz durchgeführt werden soll, bei dem die Teilnehmer:innen eigenständig und vor Ort Nitratmessungen durchführen, sodass der Aufwand für die Wissenschaftler:innen effektiv reduziert und der Grad der Partizipation der Teilnehmenden erhöht werden. Sie stellen in diesem Fall einen guten Kompromiss zwischen Messgenauigkeit, Einfachheit, Zeit- und Kostenaufwand dar.

Räumliche und zeitliche Skalierung der Citizen Science-Daten

Durch das Engagement der Bürger:innen und Schüler:innen konnten insgesamt 533 Probenahmestellen und 8045 Nitrat-Messwerte in die Untersuchung der Nitratbelastung von Gewässern in den Landkreisen Osnabrück, Cloppenburg, Emsland und Vechta sowie der Stadt Osnabrück einbezogen werden.

Die räumliche Verteilung der Probenahmestellen wurde mit Heatmaps (Kerndichteschätzungen) untersucht (vgl. Abbildung 55, S. 141). Für die Fließgewässer und Brunnen konnte ein großer Bereich des Beprobungsgebietes in das Nitrat-Monitoring einbezogen werden. Lediglich

in ländlichen Gebieten, insbesondere im Norden des Landkreises Osnabrück und im Nordosten des Landkreises Emsland, fehlen Probenahmestellen, um das gesamte Beprobungsgebiet abzudecken. Es zeigte sich außerdem, dass die Dichte der Probenahmestellen in städtischen Gebieten deutlich höher war als im übrigen Probenahmegebiet. Die durch das Citizen Science-Projekt entstandenen Messnetze für die Gewässertypen Brunnenwasser und Fließgewässer bilden damit keine für das gesamte Probenahmegebiet repräsentativen Messnetze, sodass die Ergebnisse nur auf die beprobten Gewässer und nicht auf die gesamte Region übertragen werden können.

Die Ergebnisse der Kerndichteschätzungen decken sich mit der Beteiligung der Öffentlichkeit in weiteren Citizen Science-Projekten. So ist auch die Datenkonzentration der OpenStreetMap in Europa in städtischen Gebieten höher als in ländlichen Gebieten (Neis & Zipf, 2012). In dem weltweiten Bürgerforschungsprojekt „FreshWater Watch“ konzentrieren sich Probenahme-

Subforschungsfrage 1.2:

Inwieweit kann ein flächendeckendes, längerfristiges Nitrat-Monitoring verschiedener Gewässertypen in einem definierten Gebiet mit dem Citizen Science-Ansatz realisiert werden?

stellen ebenfalls in der Umgebung vieler größerer Städte wie beispielsweise Paris, Sao Paulo, Mexiko City, Hyderabad und New York (Earthwatch Institute, 2022). Um dieser beim Citizen Science-Ansatz verbreiteten Problematik zu begegnen, können verschiedene Optimierungen des dargestellten Konzeptes vorgenommen werden. So wäre es möglich, noch vor der Probenahme eine Live-Kartographie der bereits angelegten Probenahmestellen zu veröffentlichen und Gebiete mit einer geringen Probenahmestellendichte intensiv, beispielsweise durch Informationsveranstaltung oder über Social Media, zu bewerben. Darüber hinaus könnten explizit Probenahmestellen in dünn besiedelten Gebieten von den Wissenschaftler:innen festgelegt und über die Projekt-Webseite beworben werden, sodass interessierte Personen in dieser Region diese Probenahmestellen untersuchen können. Werden die ausgeschriebenen Probenahmestellen nicht von Bürger:innen oder Schüler:innen ausgewählt, so könnten studentische Hilfskräfte oder Wissenschaftler:innen einspringen.

Um eine zu hohe Probenahmestellendichte, beispielsweise in städtischen Gebieten, zu vermeiden, können ebenfalls verschiedene Vorgehensweisen gewählt werden. Einerseits wäre es für Oberflächengewässer möglich, Wasserkörper, an denen bereits eine Probenahmestelle eingetragen wurde, für weitere Probenahmestellen zu blockieren. Um motivierte Bürger:innen nicht zu verlieren, könnten über die Webseite alternative Probenahmestellen in der Umgebung vorgeschlagen werden. Auf diese Weise kann das Ziel verfolgt werden, möglichst viele Wasserkörper in das Nitrat-Monitoring einzubeziehen, sodass diese beispielsweise analog zur Studie von Bishop et al. (2020) hinsichtlich ihres ökologischen Zustand bewertet und zur SDG 6.3.2-Berichterstattung herangezogen werden können. Regenwassermessungen sind ebenfalls eine Ausweichmöglichkeit, da diese ortsunabhängig durchgeführt werden können. Eine weitere Option besteht darin, dass Teilnehmer:innen sich bei der Beprobung gleicher Probenahmestellen abwechseln oder gemeinsam Messungen durchführen. Dies resultiert bei gleicher Teilnehmendenzahl zwar in einer geringeren Anzahl an Probenahmestellen, jedoch könnten sich die Teilnehmenden gegenseitig motivieren, bis zum Ende des Beprobungszeitraums weiterzumessen, sodass die zeitliche Skalierung der Daten optimiert wird. Messfehler könnten zudem reduziert werden, indem sich die Teilnehmer:innen bei den Nitratmessungen gegenseitig unterstützen.

Neben diesen Methoden zur Optimierung des Messnetzes, die vor Beginn der Messungen berücksichtigt werden könnten, ist auch eine Optimierung des Messnetzes nach der Beprobungsphase möglich. Bei einer zu hohen Dichte von Brunnenwasser-Probenahmestellen könnten zu dichte Probenahmestellen zum Beispiel anhand des vom NLWKN und LBEG formulierten Leifadens eliminiert werden, bevor eine repräsentative Auswertung der übrigbleibenden Probenahmestellen erfolgt (NLWKN & LBEG, 2006). Da dies nur zielführend ist, wenn ein flächendeckendes Messnetz mit einer ausreichend hohen Anzahl an Probenahmestellen im gesamten Beprobungsgebiet vorliegt, wurde in dem dargestellten Citizen Science-Projekt auf eine Eliminierung zu dichter Probenahmestellen vor der Auswertung verzichtet.

Im Vergleich zu den Gewässertypen Brunnenwasser und Fließgewässer wurden deutlich weniger Beprobungen von stehenden Gewässern, Regenwasser und Quellwasser durchgeführt. Bereits genannte Verbesserungsvorschläge wie eine Ausschreibung von noch fehlenden Probenahmestellen oder Gebieten, in denen zu wenige Probenahmestellen vorliegen, könnten Bürger:innen animieren, diese Gewässertypen zu untersuchen. Es bleibt in weiteren Projekten zu überprüfen, ob durch eine Umsetzung dieser Optimierungsvorschläge eine bessere räumliche Verteilung der Probenahmestellen erreicht werden kann.

Neben einer geeigneten, räumlichen Verteilung der Probenahmestellen wurde auch eine hoch aufgelöste zeitliche Skalierung des Citizen Science-Datensatzes angestrebt. Wie in Kapitel 4.5.1 bereits dargestellt, wurden im Vergleich zu anderen Citizen Science-Projekten auch nach über einem Jahr noch viele Probenahmestellen aktiv von den Teilnehmer:innen beprobt, sodass saisonale Nitratschwankungen untersucht werden konnten. Als Anreize, über einen längeren Zeitraum aktiv am Projekt teilzunehmen, wurden regelmäßig Newsletter zum aktuellen Stand des Projektes versendet und ein Gewinnspiel in Anlehnung an den Tag des Ehrenamts im Dezember 2020 durchgeführt. Ergänzend wurden verschiedene Materialien zur Stickstoffproblematik, beispielsweise eine interaktive, digitale Ausstellung (vgl. Abbildung 36, S. 101), veröffentlicht. Darüber hinaus wurden die Forschungspat:innen beauftragt, die Bürger:innen regelmäßig zu kontaktieren und für weitere Messungen zu motivieren. Wie die Evaluation des Projektes zeigt (vgl. Kapitel 5.4.3), war der Kontakt zwischen den Schüler:innen und Bürger:innen jedoch teilweise gering, sodass ergänzend unterschiedliche Plattformen für den Austausch zwischen den verschiedenen Projektteilnehmer:innen geschaffen werden könnten, um die Teilnehmenden über einen längeren Zeitraum für die aktive Beteiligung am Projekt zu motivieren. Dies kann durch eine digitale Austauschplattform auf der Webseite (z. B. einen Kommentarbereich) oder durch gemeinsam durchgeführte Events wie beispielsweise Stichtagsmessungen realisiert werden. Um das Gemeinschaftsgefühl zu stärken, könnten außerdem Workshops oder CitizenLabs angeboten werden, in denen Bürger:innen, Schüler:innen und Wissenschaftler:innen gemeinsam verschiedene Phasen des Forschungsprozesses beleuchten und weitere Schritte planen. Auch Diskussionsveranstaltung mit verschiedenen betroffenen Personen, beispielsweise Landwirt:innen, Naturschutzorganisationen oder Wasserverbänden, könnten eine Vernetzung der Teilnehmenden und eine längere aktive Beteiligung fördern, waren jedoch aufgrund der im Projektzeitraum liegenden COVID-19-Pandemie nur begrenzt realisierbar.

Gegebenenfalls kann auch eine Reduzierung des zeitlichen Aufwands für die Teilnehmenden dazu führen, dass diese länger aktiv an dem Citizen Science-Projekt teilnehmen. Für die Zielsetzungen des Nitrat-Monitorings stellten sich die Dauer und Frequenz der Beprobungen als geeignet heraus. Allerdings resultierte die regelmäßige Messung der Nitratbelastung über 18 Monate in einem insgesamt hohen zeitlichen Aufwand für die Teilnehmenden. Letztendlich muss die Häufigkeit und Dauer der Beprobung spezifisch an verschiedene Zielsetzungen

angepasst werden. Wenn beispielsweise die Entwicklung der Nitratbelastung über mehrere Jahre beobachtet werden soll, so ist es zielführender, nur wenige Messungen im Jahr, beispielsweise einmal pro Quartal, durchzuführen, sodass sich der Zeitaufwand für die Teilnehmenden in Grenzen hält. Insbesondere für Brunnen, welche eine vergleichsweise konstante Nitratbelastung aufweisen (vgl. Abbildung 68, S. 158), reicht eine geringere Anzahl an Messungen pro Jahr aus.

Im Allgemeinen zeigt das Citizen Science-Projekt, dass durch die Beteiligung der Öffentlichkeit ein längerfristiges, flächendeckendes Nitrat-Monitoring in einem definierten Beprobungsgebiet realisierbar ist. Es bleibt in weiteren Projekten zu prüfen, ob durch die dargestellten Optimierungen auch repräsentative Messnetze mithilfe des Citizen Science-Ansatzes gebildet und eine bessere zeitliche Skalierung der Daten erreicht werden können.

Analyse verschiedener Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung von Gewässern

Subforschungsfrage 1.3:

Inwieweit lassen sich mit den Citizen Science-Daten Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung untersuchen und inwieweit stimmen die Ergebnisse mit den aus der Theorie abgeleiteten Hypothesen überein?

In einem weiteren Schritt wurde analysiert, inwieweit verschiedene Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung anhand des Citizen Science-Datensatzes untersucht werden können. Sowohl Einflüsse der Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung als auch räumliche und zeitliche Einflussfaktoren ließen sich anhand der Daten beobachten und statistisch nachweisen. Der Citizen Science-Ansatz gelangte jedoch an seine Grenzen, wenn zu wenige Probenahmestellen vorlagen oder komplexere Parameter für eine Analyse bekannt sein müssten, die mithilfe des Citizen Science-Ansatzes nicht bestimmt werden konnten. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Anhand der Klassifizierung der Gewässer durch die Schüler:innen und Bürger:innen war es möglich, Einflüsse verschiedener Gewässermerkmale auf die Nitratbelastung zu untersuchen. Für die beprobten Fließgewässer konnte bestätigt werden, dass schmale Gewässer eine höhere Nitratbelastung aufweisen als breite Gewässer, bei denen Nitrateinträge durch größere Wasservolumina stärker verdünnt werden. Die Breite der Gewässer wurde vereinfacht als Maß für den Durchfluss herangezogen, da letzterer, insbesondere bei breiten und tiefen Flüssen, nicht mittels einfacher Messmethoden in Citizen Science-Projekten bestimmt werden kann.

Ein Zusammenhang zwischen der Brunnentiefe und der Nitratbelastung konnte allerdings nicht nachgewiesen werden, obgleich stärkere Nitratbelastungen in flach verfilterten Probenahmestellen bereits in verschiedenen Studien beobachtet wurden (z. B. Wriedt et al., 2019). Verschiedene Optimierungen des Forschungsdesigns können vorgenommen werden, um gegebenenfalls Unterschiede der Nitratbelastung in verschiedenen Tiefen nachweisen zu können. Da sich neben der Brunnentiefe weitere Faktoren wie die Landbedeckung und -nutzung oder hydrogeologische Bedingungen auf die Nitratbelastung auswirken, sollten diese in der Analyse der Daten berücksichtigt werden. Hierzu bieten sich die Berechnung des Kendall-

Tau-c Rangkorrelationskoeffizienten innerhalb homogener Stichproben (z. B. Probenahmestellen klassifiziert nach Niederung, Bergland und Geest) oder eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit mehreren unabhängigen Variablen an (z. B. der Scheirer-Ray-Hare-Test als nichtparametrisches Äquivalent zur parametrischen mehrfaktoriellen Varianzanalyse (Scheirer et al., 1976)). Ersteres wurde durchgeführt, ergab jedoch ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse, was sich gegebenenfalls auf die sehr kleinen Stichprobengrößen durch die Aufteilung der Daten zurückführen lässt. Die aufgestellte Hypothese kann damit weder verifiziert noch falsifiziert werden.

Die dargestellten Hypothesen ließen sich dabei nur anhand der Probenahmestellen überprüfen, für welche die Teilnehmer:innen die Breite des Flusses beziehungsweise die Tiefe des Brunnens angegeben haben. Eine wichtige Voraussetzung für die Überprüfung der Hypothesen ist damit eine ausreichende Anzahl an Probenahmestellen, die mithilfe der Fragebögen genauer klassifiziert werden. Daher sollte die Klassifizierung der Probenahmestellen nicht erst parallel zur Durchführung der Nitratmessungen erfolgen, sondern vor der Datenerhebung. So kann vermieden werden, dass Daten von Probenahmestellen fehlen, welche nur über einen kurzen Zeitraum von den Teilnehmer:innen beprobt wurden. Auf diese Weise können außerdem Unklarheiten, die sich beispielsweise aus uneindeutigen Standortnamen oder ungenauen Standortdaten ergeben, frühzeitig erkannt und vor der Beprobung der Gewässer behoben werden, sodass dem in Kapitel 4.4.2 und 4.5.1 beschriebenen Verlust von Daten, die nicht zur Auswertung herangezogen werden konnten, entgegengewirkt wird. Ungeeignete Probenahmestellen wie beispielsweise Gartenteiche können außerdem frühzeitig von den Wissenschaftler:innen identifiziert und gegen geeignete Probenahmestellen ausgetauscht werden. Interessierte Bürger:innen, welche zunächst ein ungeeignetes Gewässer ausgesucht haben, können hierfür animiert werden, ein anderes Gewässer in ihrer Region oder Regenwasser zu untersuchen. Letzteres ist aufgrund der verwendeten Regensammler standortunabhängig und stellt in jedem Fall eine Alternative dar.

Nach Bewertung der Standortgenauigkeit und Messregelmäßigkeit wurden räumliche und zeitliche Einflüsse auf die Nitratbelastung untersucht. Für Fließgewässer konnten signifikante Unterschiede der Nitratbelastung in bebauten Flächen, landwirtschaftlichen Flächen und Wäldern und naturnahen Flächen nachgewiesen werden. Die Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer war in landwirtschaftlichen Flächen und städtischen Flächen jeweils signifikant höher als in Wäldern und naturnahen Flächen, wobei in landwirtschaftlichen Flächen mit 17,2 % der höchste Anteil an Fließgewässern mit sehr hohen Nitratbelastungen vorlag. In einem Citizen Science-Projekt am Fluss Amanalco in Mexiko konnte der Zusammenhang zwischen der Nitratbelastung und Landnutzung durch eine Korrelation zwischen der Nitratkonzentration und dem Flächenanteil der jeweiligen Landnutzung im Teileinzugsgebiet der Probenahmestellen nachgewiesen werden (Calderón Cendejas et al., 2021). Durch die Berücksichtigung der Landnutzung in den gesamten Teileinzugsgebieten der jeweiligen Probenahmestellen ermög-

licht diese Vorgehensweise einen Rückschluss auf die Quellen der Nitratbelastung. Die Ergebnisse des Nitrat-Monitorings spiegeln hingegen zunächst einen Ist-Stand der Nitratbelastung der beprobten Gewässer an der Probenahmestelle wider. Transportwege oder Quellen der Nitratbelastung konnten durch die Citizen Science-Daten nicht untersucht werden, da weder die Teileinzugsgebiete der Probenahmestellen noch ein geeignetes Gewässernetz mit Abflussraten und weitere relevante Daten bekannt waren, um angelehnt an das Projekt am Fluss Amanalco oder an die Nährstoffmodellierung des NLWKN Quellen der Nitratbelastung zu identifizieren (Calderón Cendejas et al., 2021; NLWKN, 2020d). Es bleibt zu überprüfen, ob eine Nährstoffmodellierung mit dem dargestellten Citizen Science-Ansatz (ggfs. bei Verwendung besserer Messmethoden) in Zusammenarbeit mit Institutionen, welche weitere Daten zur Verfügung stellen könnten, möglich ist.

Statistisch signifikante Unterschiede der Nitratbelastung von stehenden Gewässern und Regenwasser bei unterschiedlicher Landbedeckung und -nutzung lagen nicht vor. Jedoch wurden ausschließlich bei Regenwasser-Probenahmestellen in städtisch geprägten Flächen sowie in Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen erhöhte bis sehr hohe Nitratbelastungen gemessen. Aufgrund der geringen Anzahl der für die räumlichen Analysen geeigneten Probenahmestellen lassen sich die Hypothesen zum Einfluss der Landbedeckung und -nutzung auf die Nitratbelastung für stehende Gewässer und Regenwasser weder endgültig verifizieren noch falsifizieren. Der Citizen Science-Ansatz gelangt auch an seine Grenzen, wenn der Einfluss der Landbedeckung und -nutzung auf die Nitratbelastung des Grundwassers untersucht werden soll. Um zu beurteilen, welche Landbedeckung und -nutzung sich auf die Probenahmestelle auswirkt, muss das Zustromgebiet der Probenahmestelle bekannt sein. Das Zustromgebiet ist in der Regel für Hausbrunnen nicht bekannt und kann nur anhand verschiedener Parameter ermittelt werden (u. A. Filtertiefe, Flurabstand, Strömungsrichtung des Grundwassers), die sich nicht mit einfachen Messmethoden durch den Citizen Science-Ansatz bestimmen lassen (Cremer, 2015; NLWKN, 2017a).

Neben der Landbedeckung und -nutzung wirken sich hydrogeologische Bedingungen auf die Nitratbelastung des Grundwassers aus. Signifikante Unterschiede der Nitratbelastung wurden mithilfe eines Kruskal-Wallis- und Post-hoc-Tests zwischen Brunnen in Niederungs- und Geestgebieten identifiziert. Der Anteil der beprobten Brunnen, die den chemischen Grenzwert von 50 mg/L eindeutig überschreiten, ist dabei in Geestgebieten mit 31,0 % deutlich höher als in Niederungsgebieten (7,2 %) und im Bergland (10,3 %). Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Beobachtungen des NLWKN (2020b).

Anhand des Citizen Science-Datensatzes konnten auch saisonale Schwankungen der Nitratbelastung von Oberflächengewässern eindeutig beobachtet und mit statistisch signifikanten Ergebnissen durch Friedman-Tests nachgewiesen werden. Die Nitratbelastungen der beprobten fließenden und stehenden Gewässern waren im Winter 2019/2020 und Winter 2020/2021 jeweils höher als im Sommer 2020. Im Gegensatz dazu wiesen die Nitratbelastungen der

beprobten Brunnen keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Jahreszeiten auf, sodass alle Hypothesen bestätigt werden konnten. Das durchgeführte Citizen Science-Projekt reiht sich damit neben weiteren Citizen Science-Projekten wie der „Stunde der Gartenvögel“ ein, die zeigen, dass sich Trends mithilfe des Citizen Science-Ansatzes sehr gut beobachten lassen (NABU-Bundesverband, 2019).

Ist man sich der Grenzen des Citizen Science-Ansatzes bewusst, so können wie gezeigt zahlreiche Fragestellungen hinsichtlich verschiedener Einflüsse auf die Nitratbelastung von Gewässern untersucht werden. Grenzen ergeben sich jedoch, wenn komplexere Parameter wie die Strömungsrichtung oder Teileinzugsgebiete von Probenahmestellen für die Untersuchung von Einflussfaktoren bekannt sein müssen, die sich nicht mit dem Citizen Science-Ansatz bestimmen lassen. Bei der Konzeption eines Forschungsdesigns sollte unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen von Citizen Science entschieden werden, ob eine Datenerhebung mit dem Citizen Science-Ansatz zielführend ist. Sofern die genannten Einschränkungen keine Bedeutung für das geplante Forschungsvorhaben haben, bietet der Citizen Science-Ansatz die Möglichkeit, mit geringem personellem und zeitlichem Aufwand der Wissenschaftler:innen durch die Freiwilligenarbeit von Schüler:innen und Bürger:innen langfristige, flächendeckende Messreihen durchzuführen. Damit offenbart der Citizen Science-Ansatz ein großes Potenzial für die Gewässerforschung.

Konsistenz/Komplementarität der Monitoring-Ergebnisse mit weiteren Messinitiativen

In einem letzten Schritt der Datenauswertung wurde die Güte des Citizen Science-Datensatzes durch einen Vergleich mit den Ergebnissen weiterer Messinitiativen bewertet. Für den Vergleich mit den Ergebnissen des VSR-Gewässerschutzes wurde für die Landkreise Osnabrück, Cloppenburg, Vechta und Emsland jeweils der Anteil der Brunnen berechnet, bei dem eine Überschreitung des Grenzwertes von 50 mg/L vorlag. Die Daten des Citizen Science-Projektes und des VSR-Gewässerschutzes ergaben unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit der Teststäbchen einen vergleichbaren Anteil an Grenzwertüberschreitungen für die genannten Landkreise. Insbesondere im Landkreis Vechta wurde durch beide Messinitiativen ein hoher Anteil an Grenzwertüberschreitungen festgestellt (Citizen Science-Projekt: $37,2 \pm 6,4$ %, VSR: 40,8 %). Der Vergleich offenbart dabei nicht nur die hohe Nitratbelastung des Brunnenwassers in den Landkreisen im Probenahmegebiet, sondern weist auch auf eine Richtigkeit der Monitoring-Daten hin. Jedoch zeigt sich, dass die verwendeten Teststäbchen eine zu hohe Ungenauigkeit aufweisen, um den exakten Anteil der Grenzwertüberschreitungen in einem Gebiet zu ermitteln.

Subforschungsfrage 1.4:

Inwieweit sind die Ergebnisse des Citizen Science-Projektes konsistent mit oder komplementär zu den Datensätzen anderer Messinitiativen?

Für den Vergleich der Citizen Science-Daten mit den Beprobungen des NLWKN wurde für jede Citizen Science-Probenahmestelle mithilfe einer Nearest Neighbor-Analyse die nächstgelegene

NLWKN-Probenahmestelle identifiziert. Die Brunnenwasser-/Grundwasser-Probenahmestellen wurden hierfür zunächst entsprechend ihrer mittleren Filtertiefe in 10 m-Schritten klassifiziert, um die Vertikalzonierung der Nitratbelastung zu berücksichtigen.

Die Nitratbelastung von 87,7 % der insgesamt 114 einander zugeordneten Fließgewässer-Probenahmestellen ist unter Berücksichtigung der Ungenauigkeit der Teststäbchen als gleich einzuordnen. Für 13 der 16 Citizen Science-Probenahmestellen, die eine vom NLWKN abweichende Nitratbelastung aufweisen, konnten potenzielle Ursachen für die Abweichungen identifiziert werden, sodass die NLWKN-Probenahmestelle nicht als Referenz für die Citizen Science-Probenahmestelle geeignet ist (Beispiel: Das durch das Citizen Science-Projekt beprobte Fließgewässer mündet unterhalb der NLWKN-Probenahmestelle in das vom NLWKN beprobte Fließgewässer). Ähnliche Ergebnisse wurden von Bishop et al. (2020) berichtet, welche die anhand von Citizen Science-Daten berechneten Indikatorwerte für SDG 6.3.2 mit den Daten der offiziellen Monitoring-Programme der Behörden für 111 Wasserkörper in England verglichen haben. Für 80 % der verglichenen Gewässerkörper kamen beide Monitoring-Programme zu dem gleichen Ergebnis (Indikator-Zielwert 6.3.2 eingehalten oder nicht eingehalten). Unterschiede wurden ebenfalls auf unterschiedliche Merkmale der Probenahmestelle (z. B. Beprobung von kleineren Gewässern durch die Citizen Science-Teilnehmer:innen) zurückgeführt. Beide Citizen Science-Projekte zeigen, dass mithilfe des Citizen Science-Ansatz ein Überblick über den Zustand von Gewässern gewonnen werden kann, der vergleichbare, wenn auch ungenauere Ergebnisse liefert wie behördliche Monitoring-Programme.

Für den Vergleich der Brunnenwasser-Beprobungen mit den Daten des NLWKN konnten nur 37 Brunnen mit bekannter mittlerer Filtertiefe aus dem Citizen Science-Projekt herangezogen werden. Um die Datenbasis zu erhöhen, wird wie bereits dargestellt empfohlen, die Klassifizierung der Probenahmestellen vor der Beprobungsphase durchzuführen. Der Vergleich mit den Grundwasser-Probenahmestellen des NLWKN resultiert in einer Übereinstimmung von lediglich 59,5 %, jedoch wurden für 14 der insgesamt 15 beprobten Brunnen mit abweichenden Ergebnissen potenzielle Ursachen für die Abweichungen identifiziert, welche wiederum eine Vergleichbarkeit der zugeordneten Probenahmestellen in Frage stellen. Anhand des Vergleichs mit den Daten des NLWKN kann die Güte der Brunnenwasser-Messdaten daher nicht abschließend bewertet werden. Der Vergleich zeigte jedoch, dass die Citizen Science-Messdaten bestehende Messnetze ergänzen könnten, insbesondere in Gebieten, in denen bestehende Messnetz nur eine geringe Probenahmestellendichte aufweisen. So wurden insgesamt vier Fokusregionen lokalisiert, in denen die Citizen Science-Daten auf noch nicht erfasste Nitrat-Hotspots oder eine zu geringe Messstellendichte im NLWKN-Messnetz hindeuten (vgl. Anhang K).

Zusammenfassend geben die Ergebnisse des Vergleichs mit dem VSR und NLWKN Hinweise auf die Richtigkeit der Citizen Science-Daten, auch wenn diese aufgrund zu geringer Vergleichsmöglichkeiten nicht abschließend bewertet werden kann. Eine Optimierung des Konzeptes besteht diesbezüglich darin, stichprobenartig Brunnen der Teilnehmenden auch durch die

Wissenschaftler:innen oder kooperierende Institutionen zu beproben, um die Richtigkeit der gemessenen Daten sicherzustellen.

Fazit: Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung

Resümierend kann der dargestellte Citizen Science-Ansatz hinsichtlich verschiedener Fragestellungen einen hohen Beitrag zur Gewässerforschung leisten. Räumliche und zeitliche Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung ließen sich ebenso wie Einflüsse der Gewässermerkmale anhand des Citizen Science-Datensatzes beobachten und statistisch nachweisen. Der Vergleich mit weiteren Messinitiativen deutet unter Berücksichtigung der begrenzten Messgenauigkeit ebenfalls auf eine hohe Güte des Citizen Science-Datensatzes hin. Auch in weiteren Citizen Science-Projekten mit Bezug zur Stickstoffbelastung von Gewässern konnten zahlreiche Fragestellungen beantwortet werden, zum Beispiel zu globalen Trends der Nitratbelastung oder zur SDG-Berichterstattung.

Forschungsfrage 1:

Inwieweit kann der Citizen Science-Ansatz einen Beitrag zur Untersuchung der Stickstoffbelastung von Gewässern leisten?

Ungeeignet ist der Citizen Science-Ansatz jedoch für Fragestellungen, die komplexere Parameter einbeziehen, welche nicht mithilfe des Citizen Science-Ansatzes bestimmt werden können. Wenn die Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes wie in dem dargestellten Projekt eigenständig Nitratmessungen durchführen sollen, können zudem nur begrenzt aufwändige und günstige Messmethoden wie zum Beispiel Nitrat-Teststäbchen verwendet werden. Sind Daten mit einer höheren Genauigkeit erforderlich, so kann auf Methoden wie die photometrische Nitratbestimmung zurückgegriffen werden, welche nur von den Wissenschaftler:innen oder sehr intensiv geschulten Bürger:innen durchgeführt werden können und damit deutlich zeit- und kostenaufwändiger sind.

Wirken sich die dargestellten Grenzen des Citizen Science-Ansatzes nicht oder nur begrenzt auf die wissenschaftliche Zielsetzung eines Projektes aus, so ist der Citizen Science-Ansatz zu empfehlen. Mit ihm lassen sich großflächige und längerfristige Messreihen durch die Zusammenarbeit mit Schüler:innen und Bürger:innen erheben, welche nur durch einen hohen persönlichen und zeitlichen Aufwand von Wissenschaftler:innen gewonnen werden könnten. Damit kann der Citizen Science-Ansatz einen wichtigen Beitrag zur Gewässerforschung leisten.

Um das Potenzial des dargestellten Citizen Science-Konzeptes weiter zu optimieren, werden im Folgenden Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Zielsetzungen formuliert.

4.5.3. Handlungsempfehlungen für Citizen Science in der Gewässerforschung

Die Konzeption eines bürgerwissenschaftlichen Forschungsvorhabens hängt in erster Linie von der Zielsetzung des Projektes ab. Zunächst sollte jedoch geprüft werden, ob der Citizen Science-Ansatz im Allgemeinen für die wissenschaftliche Fragestellung anwendbar und praktikabel ist, was von verschiedenen Faktoren abhängt. Eine Entscheidungshilfe liefern

beispielsweise das Umweltbundesamt (Rückert-John et al., 2017) oder Bürger schaffen Wissen (Pettibone et al., 2016). Stellt sich der Citizen Science-Ansatz für das geplante Forschungsvorhaben als praktikabel heraus, sollte das Projekt basierend auf den Ergebnissen bereits durchgeführter Citizen Science-Projekte konzipiert werden, um eine stetige Verbesserung des Citizen Science-Ansatzes zu gewährleisten und den Beitrag für die fachwissenschaftliche Forschung zu steigern.

Daher werden im Folgenden verschiedene Adaptionen des dargestellten Citizen Science-Konzeptes und Handlungsempfehlungen für drei verschiedene Zielsetzungen von Citizen Science im Bereich der Gewässerforschung dargestellt.



Zielsetzung 1: Flächendeckendes Übersichts-Monitoring über mehrere Monate in einem definierten Probenahmegebiet

Das dargestellte Citizen Science-Projekt wurde konzipiert, um ein flächendeckendes Nitrat-Monitoring über 18 Monate in den Landkreisen Osnabrück, Emsland, Vechta und Cloppenburg sowie der Stadt Osnabrück durchzuführen und verschiedene Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung zu untersuchen. Anhand der Ergebnisse wurde das Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung bewertet. Rund 600 Bürger:innen und 200 Schüler:innen haben hierfür verschiedene, selbstgewählte Gewässer (Fließgewässer, stehende Gewässer, Regenwasser, Quellwasser, Brunnenwasser) zweiwöchentlich mit Nitrat-Teststäbchen untersucht, verschiedene Gewässermerkmale mithilfe eines Fragebogens klassifiziert und die Daten über eine Webseite an die Universität Osnabrück übermittelt. Die Wissenschaftler:innen haben parallel die verwendeten Teststäbchen validiert und eine Klassifizierung der Messwerte hinsichtlich verschiedener Ziel- und Grenzwerte abgeleitet. Die von den Teilnehmer:innen gemessenen Daten wurden im Anschluss an die Beprobungsphase von den Wissenschaftler:innen in mehreren Kontrollschritten überprüft und hinsichtlich verschiedener Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung mit nichtparametrischen, statistischen Testverfahren untersucht. Das entwickelte Konzept stellte sich für die Zielsetzung grundlegend als geeignet heraus, dennoch wurden auf Grundlage der Ergebnisse Optimierungen identifiziert, die sich auf die Messmethode, die Bildung des Messnetzes und auf den Ablauf der Datenerhebung und -auswertung beziehen.

Für die genannte Zielsetzung sind Nitrat-Teststäbchen, mit denen sich die Nitratbelastung von Gewässern halbquantitativ von 0 bis 500 mg/L bestimmen lässt, grundsätzlich geeignet. Sofern finanzielle Mittel vorhanden sind, sollten jedoch Nitrat-Teststäbchen gewählt werden, welche eine intensive Verfärbung und passgenaue Farbskala aufweisen (vgl. Kapitel 4.4.1). Die ausgewählte Messmethode sollte vor Beginn des Citizen Science-Projektes validiert werden, um eine ausreichende Güte der Messdaten sicherzustellen. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Messmethode eine ausreichende Datenqualität für das Forschungsvorhaben aufweist (Pettibone et al., 2016). Je nachdem, welcher Konzentrationsbereich in dem Forschungsvorhaben von Bedeutung ist, können auch Teststäbchen mit einem angepassten Messbereich, zum

Beispiel von 0 bis 50 mg/L, ausgewählt werden. Der Messbereich sollte dabei nicht nur auf vorgegebene Ziel- und Grenzwerte abgestimmt werden, sondern auch auf die zu erwartenden Konzentrationen der Gewässerproben. Um diese abzuschätzen, können entweder Daten bereits bestehender Messinitiativen herangezogen oder Stichprobenmessungen im Probenahmegebiet durchgeführt werden. Nach Auswahl der Messmethode und Festlegung des Untersuchungsdesigns kann das Projekt in die Akquirierung von Teilnehmenden und die Auswahl der Probenahmestellen übergehen.

Wenn ein repräsentatives Messnetz angestrebt wird, so muss ausreichend Zeit für die Auswahl der Probenahmestellen eingeplant werden. Verschiedene Vorgehensweisen können hierfür verfolgt werden. Einerseits können Probenahmestellen durch die Wissenschaftler:innen festgelegt und im Anschluss an Interessierte zugeteilt werden. Dies erfordert jedoch eine erhebliche Vorbereitungszeit durch die Wissenschaftler:innen und schließt aus, dass Bürger:innen ihr Wissen über lokale Gegebenheiten, zum Beispiel in Form von geeigneten Zugängen zu Gewässern, gewinnbringend einbringen. Darüber hinaus können beispielsweise private Brunnen nicht von den Wissenschaftler:innen berücksichtigt werden. Daher ist ein mehrschrittiges Verfahren, in dem Bürger:innen Probenahmestellen vorschlagen, welche im Anschluss von den Wissenschaftler:innen begutachtet werden, eher zu empfehlen. Damit bereits in dieser Phase alle notwendigen Informationen zu den Probenahmestellen vorliegen, sollte eine Klassifikation ebendieser gleichzeitig mit dem Anlegen der Probenahmestelle über eine Projekt-Webseite erfolgen. Für das Forschungsvorhaben ungeeignete Probenahmestellen wie beispielsweise Gartenteiche können auf diese Weise schnell identifiziert und ersetzt werden, indem die Teilnehmenden animiert werden, andere Probenahmestellen zu untersuchen. Nach einiger Zeit kann das bis dahin bestehende Messnetz von den Wissenschaftler:innen begutachtet werden, sodass gegebenenfalls eine erneute Bewerbung des Projektes möglich ist, wenn das gebildete Messnetz noch nicht das gesamte geplante Beprobungsgebiet umfasst. Möglichkeiten hierzu wurden bereits in Kapitel 4.5.2 dargestellt. Beispielsweise kann eine Verbesserung der Abdeckung des Beprobungsgebietes durch gezielte Bewerbung noch fehlender Gebiete oder die Ausschreibung von Probenahmestellen erreicht werden. Erst, wenn das durch die Probenahmestellen gebildete Messnetz den Ansprüchen des Forschungsvorhabens genügt, sollte in die nächste Phase der Datenerhebung übergegangen werden. Durch die dargestellten Optimierungen ändert sich der Ablauf der Datenerhebung (vgl. Abbildung 42, S. 118) wie folgt. Eine vollständige Darstellung des optimierten Schemas ist in Anhang L zu finden.

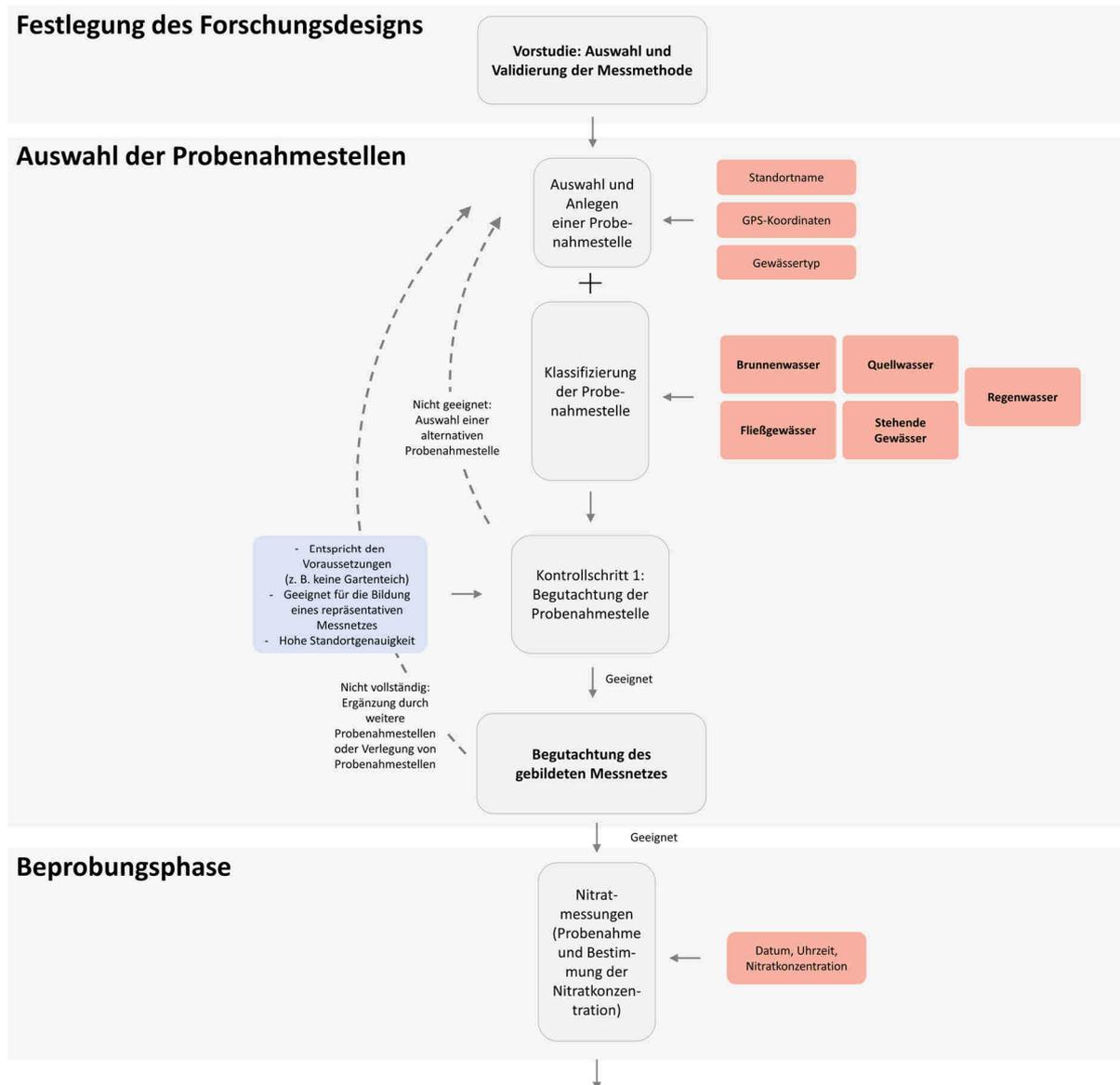


Abbildung 73: Optimierter Ablauf der Datenerhebung, vollständiges Schema in Anhang L (eigene Abbildung).

Die Dauer und die Frequenz der Nitrat-Messungen sollten sich an dem Forschungsziel orientieren, jedoch auch den Arbeitsaufwand für die Teilnehmenden berücksichtigen. Aufgrund geringerer Nitratschwankungen im Grundwasser sind bei Brunnen-Beprobungen beispielsweise weniger Messungen notwendig als in Oberflächengewässern (vgl. Kapitel 4.4.7). Um die Teilnehmer:innen zu motivieren, länger oder regelmäßiger an dem Projekt teilzunehmen, können neben Newslettern, Gewinnspielen oder begleitenden Bildungsmaterialien auch Workshops, CitizenLabs oder Diskussionsrunden angeboten werden, die den Gedanken der Untersuchung mit einem Gemeinschaftserlebnis verbinden. Dadurch lässt sich das Gemeinschaftsgefühl stärken, welches als wesentliche Gelingbedingung von Citizen Science-Projekten betrachtet wird (Moczek, 2018). Wenn die Teilnehmer:innen nicht nur in die Datenerhebung, sondern auch in weitere Phasen des Forschungsprozesses involviert werden sollen, müssen außerdem

Formate eingeplant werden, in denen die Bürger:innen entsprechende Kompetenzen, zum Beispiel das Formulieren von Forschungsfragen, erlernen.

Entsprechend der zehn Prinzipien guter Praxis in Citizen Science sollten die Ergebnisse des Projektes transparent und öffentlich zugänglich gemacht werden (ECSA, 2015). In dem dargestellten Citizen Science-Projekt wurden hierfür über verschiedene Formate unterschiedliche Zielgruppen berücksichtigt, beispielsweise in Form von wissenschaftlichen Papern und Konferenzbeiträgen, Begleitbroschüren, Zeitungs-, Fernseh- und Radiobeiträgen sowie öffentlichen Veranstaltungen, in denen die Ergebnisse präsentiert und diskutiert wurden. Wenn ein großes Einzugsgebiet mit einer geringen Bevölkerungsdichte vorliegt, können digitale Formate angeboten werden, um lange Fahrtwege zu vermeiden und vielen Teilnehmer:innen die Teilnahme zu ermöglichen. Insbesondere in dichter besiedelten Gebieten und für digital weniger affine Personen bieten Präsenzveranstaltungen viele Vorteile. Stehen eher jüngere Personen im Fokus des Forschungsvorhabens, so spielen Social Media-Plattformen eine größere Rolle. Entsprechend der Zielgruppen sollten verschiedene Angebote kombiniert werden, um den Ansprüchen aller Teilnehmenden gleichermaßen gerecht zu werden.

Für ein erfolgsversprechendes Citizen Science-Projekt müssen sich zudem wissenschaftliche Ziele mit den Erwartungen der Zielgruppen vereinen lassen und bestenfalls gemeinsame Interessen betreffen und ein synergetisches Zusammenarbeiten ermöglichen (Bonn et al., 2021; Pettibone et al., 2016). Weichen die Interessen der Wissenschaftler:innen und Projektteilnehmer:innen zu weit voneinander ab, kann sich dies auf die Datenqualität auswirken, beispielsweise wenn Bürger:innen die Teilnahme am Projekt bereits nach kurzer Zeit abbrechen. Daher ist es auch für die Erreichung der wissenschaftlichen Ziele notwendig, Feedback der Teilnehmenden zu berücksichtigen und das Forschungskonzept gegebenenfalls kurzfristig anzupassen. Entsprechende Kommunikationskanäle müssen bereits vor Beginn des Projektes eingerichtet sowie ausreichend Zeit für die Kommunikation mit den Teilnehmer:innen eingeplant werden. Um das Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung zu erhöhen, spielen damit nicht nur fachwissenschaftliche Anforderungen eine Rolle, sondern auch die Bedürfnisse der Zielgruppen. Werden diese zu einem harmonischen Zusammenarbeiten vereint, können auch weitere Zielsetzungen mit dem dargestellten Citizen Science-Ansatz verfolgt werden, wie im Folgenden dargestellt wird.



Zielsetzung 2: Untersuchungen temporärer Ereignisse oder lokaler Auffälligkeiten

Wenn sich bereits ein enges Netzwerk aus Wissenschaftler:innen, Bürger:innen, Schüler:innen und weiteren Beteiligten gebildet hat, kann dieses Netzwerk für weitere Zielsetzungen genutzt werden. So können beispielsweise temporäre Ereignisse wie Überschwemmungen oder Extremwetterereignisse und lokale Auffälligkeiten wie zum Beispiel eine starke Algenblüte gemeinsam untersucht werden.

Die bereits mit dem notwendigen Material ausgestatteten Teilnehmer:innen könnten hierfür durch die Wissenschaftler:innen instruiert werden, in einem bestimmten Zeitraum oder nach einem bestimmten Ereignis eigenständig Messungen durchzuführen oder Gewässerproben zu sammeln und für weitere Untersuchungen an die Wissenschaftler:innen zu senden. Ähnliche Momentaufnahmen der Gewässergüte werden in sogenannten WaterBlitz-Events des Citizen Science-Projektes „FreshWater Watch“ bereits erfolgreich erhoben, in denen Freiwillige in einer begrenzten 1- bis 4-tägigen Veranstaltung eine möglichst große Anzahl an Messungen in einer Region durchführen (Bishop et al., 2020).

Darüber hinaus könnten die Teilnehmenden selbst ungewöhnliche Beobachtungen einsenden, die gemeinsam untersucht werden können. Im Gegensatz zum Citizen Science-Projekt „Open-GeoResearch - Klima, Umwelt, Stadt“ (Geodätisches Institut, RWTH Aachen, 2022) könnten Teilnehmende auf diese Weise nicht nur Antworten von Expert:innen zu Fragen erhalten, zu denen sie bisher noch keine Erklärungen gefunden haben, sondern selbst an der Beantwortung und Erforschung eines beobachteten Phänomens mitwirken. Auf diese Weise können neue Forschungslücken aufgedeckt werden, woraus wiederum ein Mehrgewinn für die Wissenschaftler:innen resultiert.



Zielsetzung 3: Beitrag zum SDG-Indikator 6.3.2 (Anteil der Gewässer mit guter Wasserqualität)

Bürgerwissenschaftliche Projekte können zudem nicht nur für die Gewässerforschung genutzt werden, sondern auch, um den Fortschritt bei der Verwirklichung verschiedener politischer Zielsetzungen zu überprüfen. Der bürgerwissenschaftliche Ansatz kann beispielsweise darauf ausgerichtet werden, einen Beitrag zu den SDG-Indikatoren zu leisten oder zu überprüfen, ob Ziel- und Grenzwerte aus der Grundwasser- und Oberflächengewässerverordnung eingehalten werden (A/RES/71/313, 2017/E/CN.3/2022/2; OGewV, 2016/09.12.2020; GrwV, 2010/04.05.2017).

Das ersteres durch den Citizen Science-Ansatz unterstützt werden kann, wurde bereits durch Bishop et al. (2020) dargestellt. Insbesondere in Ländern wie beispielsweise Sambia, in denen die Gewässerqualität bis dato nicht oder nur ungenügend überwacht wird, kann Bürgerforschung bestehende Datensätze ergänzen oder sogar als Hauptdatenquelle genutzt werden, um weltweit die Erfassung der SDG-Indikatoren zu fördern. Entsprechende Monitoring-Konzepte können zuvor in Ländern mit bereits bestehenden Monitoring-Programmen evaluiert werden, wie in dieser Arbeit dargestellt.

Wenn das dargestellte Citizen Science-Konzept auf SDG-Indikator 6.3.2 (Anteil der Gewässer mit guter Wasserqualität) angepasst werden soll, sind weitere chemische Parameter zu ergänzen. Für Grundwasser beinhaltet der SDG-Indikator 6.3.2 neben der Nitratkonzentration beispielsweise die elektrische Leitfähigkeit und den pH-Wert, für Flüsse kommen darüber hinaus

der gelösten Sauerstoff, der Gesamtstickstoffgehalt, Orthophosphat und der pH-Wert als Parameter hinzu (United Nations Water, 2018). Entsprechende Messmethoden, die in einem Citizen Science-Projekt Anwendung finden könnten, sind hierfür zunächst zu prüfen. Mit den verwendeten Teststäbchen könnten neben Nitrat auch Nitrit und der pH-Wert halbquantitativ bestimmt werden. Parameter, welche nicht von den Teilnehmer:innen vor Ort gemessen werden können, könnten gegebenenfalls nachträglich mithilfe geeigneter Messmethoden im Labor analysiert werden. Damit die Teilnehmer:innen dennoch in hohem Maße partizipieren, bieten sich Workshops an, in denen diese Parameter gemeinsam bestimmt werden. Das adaptierte Konzept ähnelt damit dem Projekt „Aqua Check“, bei dem am sogenannten „Tag der offenen Bordtür“ gemeinsam chemische, biologische und physikalische Parameter von Gewässerproben auf dem Schiff „MS Halle“ untersucht werden (science2public, 2021).

Die dargestellten Optimierungen ergeben sich aus den Ergebnissen und Erfahrungen des durchgeführten Citizen Science-Konzeptes, wurden jedoch noch nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit angewendet. Daher bleibt zu überprüfen, ob die Optimierungen des dargestellten Citizen Science-Konzeptes zu einem höheren Beitrag des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung führen und die dargestellten Zielsetzungen tatsächlich erreicht werden können.

4.6. Ausblick

Neben der Effektivität der vorgeschlagenen Optimierungen verbleiben weitere Forschungsfragen, die anhand der dargestellten Ergebnisse noch nicht beantwortet wurden. Diese betreffen für den Citizen Science-Ansatz geeignete Messmethoden, die Anwendbarkeit in weiteren Regionen, die übergeordnete Nutzung der gewonnenen Daten über das Projekt hinaus und das Bildungspotenzial des Citizen Science-Ansatzes.

Entwicklung und Evaluation von Messmethoden:

Zunächst sind Messmethoden für weitere biologische, physikalische und chemische Parameter zu testen, welche in Citizen Science-Projekten angewendet werden könnten, um das Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung über die Nitratthematik hinaus bewerten zu können. Dies beinhaltet nicht nur Messmethoden für weitere Stickstoffverbindungen wie beispielsweise Nitrit und Ammonium, sondern auch für weitere relevante Parameter wie Phosphat, Sauerstoff, Mikroplastik oder die Artenvielfalt eines Gewässers. In mehreren Citizen Science-Projekten wurden bereits unterschiedliche Messmethoden für verschiedene Parameter angewendet und teilweise evaluiert (z. B. Bishop et al., 2020; Bronx River Alliance, 2015; Kikuchi et al., 2010; Strobl et al., 2020). Anhand eines systematischen Reviews bereits im Kontext der Bürgerwissenschaften evaluierter Messmethoden könnte eine Übersicht abgeleitet werden, mit der bereits verwendbare Methoden und noch bestehender Forschungsbedarf identifiziert werden.

Darüber hinaus besteht Entwicklungspotenzial hinsichtlich einfacher, kostengünstiger Messmethoden mit ausreichender Messgenauigkeit für den Citizen Science-Ansatz. Eine Möglichkeit, die Genauigkeit der halbquantitativen Nitratmessung mit Teststäbchen zu erhöhen, besteht in der Auswertung der Teststäbchen mit einem Reflektionsspektrometer. Eine an dieses Vorgehen angelehnte DoItYourself-Messmethode, bei welcher ein kostengünstiger Farbsensor mit einer 3D-gedruckten Messvorrichtung kombiniert wird, um die Färbung des Testfeldes objektiv zu ermitteln, befindet sich aktuell in der Entwicklung und verspricht genauere, aber dennoch kostengünstige und einfache, quantitative Messungen der Nitratkonzentration (vgl. Abbildung 41, S. 117). Dieser Ansatz ließe sich auch auf Teststäbchen für weitere Parameter übertragen, sodass ein und dieselbe Messmethode für verschiedene Forschungsvorhaben genutzt werden könnte.

Anwendbarkeit des dargestellten Konzeptes in weiteren Regionen:

Das dargestellte Citizen Science-Projekt wurde zunächst in einer Region durchgeführt, in der im Allgemeinen ein hohes Interesse an der Nitratproblematik und wissenschaftlicher Forschungsprojekte besteht (vgl. Kapitel 2.1.5 und 4.3.1, Wissenschaft im Dialog/Kantar Emnid, 2019). Durch das hohe Interesse der Gesellschaft konnten zahlreiche Bürger:innen und Schüler:innen akquiriert werden, die an dem Citizen Science-Projekt teilgenommen und über 8000 Messungen durchgeführt haben. Da in dieser Region außerdem bereits durch den NLWKN ein flächendeckendes und langfristiges Nitrat-Monitoring verschiedener Gewässertypen durchgeführt wird, konnte das dargestellte Konzept erfolgreich erprobt werden.

Unter Berücksichtigung der dargestellten Optimierungen hinsichtlich verschiedener Zielsetzungen kann das Citizen Science-Konzept nun in Regionen angewendet werden, in denen die Wasserqualität noch nicht oder unzureichend untersucht wird, wie es die World Water Quality Alliance (2021) empfiehlt. Es bleibt jedoch zu überprüfen, ob auch in anderen Beprobungsgebieten ein flächendeckendes, längerfristiges Gewässer-Monitoring in Zusammenarbeit mit der Bevölkerung realisiert werden kann. Insbesondere in Gebieten, in denen keine staatlichen Monitoring-Programme durchgeführt werden, könnten Bürgerforschungsprojekte dabei unterstützen, bestehende Datenlücken zu schließen. Mithilfe des Citizen Science-Ansatzes könnten zudem Eintragspfade von gesundheitsgefährdenden Schadstoffen identifiziert, Verbesserungsmaßnahmen eingeleitet und ein Bewusstsein für den Gewässerschutz geschaffen werden.

Darüber hinaus wurde vorerst nur Süßwasser in dem dargestellten Citizen Science-Konzept untersucht. Messmethoden sowie geeignete Konzepte zur Beprobung von Übergangs- oder Küstengewässern mit hohem Salzgehalt müssen zunächst erprobt werden, bevor diese ebenfalls großflächig oder in noch nicht beprobten Gebieten Anwendung finden können.

Übergeordnete Verwendbarkeit der durch das Projekt erhobenen Daten:

In dem dargestellten Projekt wurden die von den Bürger:innen und Schüler:innen erhobenen Daten zunächst verwendet, um das Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die

Gewässerforschung zu evaluieren. Darüber hinaus wurden vier Fokusregionen identifiziert, in denen die Citizen Science-Daten Hinweise darauf geben, dass die Nitratbelastung aktuell noch nicht vollständig durch bestehende, staatliche Monitoringprogramme abgebildet wird. Die vier dargestellten Regionen sollen zukünftig mit dem NLWKN diskutiert werden, sodass die Citizen Science-Daten nicht nur einen Mehrwert für die fachwissenschaftliche Forschung, sondern auch für staatliche Monitoring-Programme liefern könnten. Die Daten können außerdem für weitere Forschungsvorhaben in adaptierter Form, die dem Datenschutz gerecht wird, unter www.nitrat.uos.de → „Interaktive Karte zum Nitrat-Monitoring“ eingesehen werden.

Potenzial des dargestellten Citizen Science-Konzeptes für die Bildung:

Neben Zielsetzungen für die fachwissenschaftliche Forschung werden zahlreiche Bildungsziele mit dem Citizen Science-Ansatz verfolgt (Phillips et al., 2018). Hinsichtlich der tatsächlichen Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 2.3.4). Um dieser Forschungslücke zu begegnen, wurde die im folgenden Kapitel dargestellte Begleitstudie durchgeführt.

5. Begleitforschung: Wirksamkeit des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes für die Bildung

5.1. Forschungsfragen

Im Rahmen einer quantitativen Begleitstudie wird in diesem zweiten Forschungsschwerpunkt die Wirksamkeit des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes im Kontext der Umweltbildung und naturwissenschaftlichen Schulbildung untersucht. Die Dissertation fokussiert sich damit nicht nur auf die bereits in Kapitel 4 dargestellten wissenschaftlichen Outcomes von Citizen Science, sondern auch auf individuelle Outcomes für die Teilnehmer:innen, beispielsweise in Bezug auf Interessen, dem Umweltbewusstsein oder einem besseren Verständnis von Wissenschaft (vgl. Kapitel 2.3.4, Shirk et al., 2012).



Abbildung 74: Beiträge des Citizen Science-Ansatzes zur Umweltbildung und naturwissenschaftlichen Schulbildung (eigene Abbildung).

Aus der in Kapitel 2.4 identifizierten Forschungslücke wurden hierzu folgende Forschungsfragen abgeleitet:

2. Inwiefern kann das Citizen Science-Projekt das allgemeine Umweltbewusstsein und das themenspezifische Umweltbewusstsein (Einstellungen, Verhalten und Kenntnisse zum Thema Gewässerschutz) der Projektteilnehmer:innen positiv beeinflussen?
3. Inwieweit hat die Teilnahme der Schüler:innen als Forschungspat:innen an einem Citizen Science-Projekt eine Wirkung auf Interesse und Motivation, Selbstwirksamkeitserwartung und Selbstkonzept sowie das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften im naturwissenschaftlichen Unterricht?

Der Fokus liegt damit zum einen im Bereich der Umweltbildung auf der Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes zur Förderung des allgemeinen und themenspezifischen Umweltbewusstseins zum Gewässerschutz. Insbesondere stellt sich die Frage, inwieweit Citizen Science dazu beiträgt, das Umweltverhalten der Teilnehmenden positiv zu verändern und damit aktiv einen Beitrag für den Umwelt- und Gewässerschutz leisten kann. Diese Zielsetzung bezieht sich

auf alle Zielgruppen des Projektes, sodass die teilnehmenden Schüler:innen und Bürger:innen in die Begleitstudie einbezogen werden. Die Konstrukte lassen sich dem von Phillips et al. (2018) formulierten Learning Outcome „Behavior & Stewardship“ zuordnen.

Zum anderen werden verschiedene Bildungsziele von Citizen Science im schulischen Kontext fokussiert, die sich ebenfalls aus dem Framework zur Formulierung und Erfassung individueller Lernziele und -ergebnisse von Citizen Science von Phillips et al. (2018) ableiten. In Forschungsfrage 3 werden mit den Konstrukten Interesse, Motivation, Selbstwirksamkeit und Verständnis der Natur der Naturwissenschaften vier der von Phillips et al. (2018) dargestellten Learning Outcomes (vgl. Abbildung 28, S. 75) aufgegriffen. Die Begleitstudie wird darüber hinaus um das Konstrukt Selbstkonzept ergänzt, welches eng mit den Konstrukten Motivation, Interesse und Selbstwirksamkeit zusammenhängt (vgl. Kapitel 2.3.4). Somit umfasst die dritte Forschungsfrage insgesamt 5 Konstrukte, die im Rahmen der Begleitstudie untersucht werden. Um das Potenzial von Citizen Science für die schulische Bildung zu erfassen, werden die Schüler:innen, welche als Forschungspat:innen am Projekt teilgenommen haben, in die Studie einbezogen. Somit wird nicht nur die Wirksamkeit des Citizen Science-Konzeptes, sondern auch des Forschungspatenansatzes untersucht. Zur Untersuchung der beiden dargestellten Forschungsfragen werden folgende Hypothesen abgeleitet.

5.2. Hypothesenbildung

(a) Wirksamkeit von Citizen Science für die Umweltbildung:

Allgemeines und themenspezifisches Umweltbewusstsein: Die Auseinandersetzung mit realen Umweltproblemen, die Teilnahme an Datensammlungen und wissenschaftlichen Tätigkeiten und die örtliche Gebundenheit eines Lernangebots gelten als Best Practice-Ansätze für die Umweltbildung, womit der Citizen Science-Ansatz eine besondere Bedeutung für diese erhält (Berndt, 2021; Stern et al., 2014). Die tatsächliche Wirkung von Citizen Science auf das Umweltbewusstsein (kurz UB) wurde jedoch erst in wenigen Studien systematisch untersucht, weshalb es Gegenstand dieser Forschungsarbeit ist (Berndt, 2021). Das Umweltbewusstsein wird hierfür in die Dimensionen Einstellungen und Verhaltensweisen differenziert, wobei erstere im Rahmen der Begleitstudie zusätzlich in affektive und kognitive Einstellungen unterteilt werden (BMU & UBA, 2019). Zudem wird in der Begleitstudie das allgemeine und das themenspezifische Umweltbewusstsein differenziert, wobei sich letzteres konkret auf Einstellungen, Verhaltensweisen und Kenntnisse zum Thema Gewässerschutz bezieht.

Die Ergebnisse bisheriger Studien zum Umweltverhalten sind different und reichen von keinen oder nur geringen Verhaltensänderungen bis hin zu veränderten Alltagspraktiken oder einem erhöhten politischen Engagement (vgl. Kapitel 2.3.4, Jordan et al., 2011; Toomey & Domroese, 2013). Eine direkte Verhaltensänderung in einem schulischen Citizen Science-Projekt wurde beispielsweise in dem „ForskarFredags massexperiment 2020“ beobachtet, wobei sich diese

explizit auf die Lebensmittelverschwendung bezog und nicht auf das allgemeine Umweltverhalten (Vetenskap & Allmänhet, 2021). Durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Thema Gewässerschutz im Rahmen des in dieser Arbeit dargestellten Citizen Science-Projektes wird ebenfalls eine Veränderung des themenspezifischen Umweltverhaltens erwartet, welches als Konkretisierung des allgemeinen Umweltverhaltens Verhaltensweisen umfasst, die mit dem Ziel des Gewässerschutzes ausgeführt werden (J. Rost et al., 2001). Auch ein Wissenszuwachs in Form von steigenden themenspezifischen Umweltkenntnissen wird aufgrund der intensiven, inhaltlichen Auseinandersetzung der Teilnehmer:innen mit dem Thema Gewässerschutz erwartet.

Die Umwelteinstellungen bilden ein recht stabiles Konstrukt, das sich auch in Umweltbildungsmaßnahmen nicht so leicht verändern lässt, wie Berndt (2021) anhand mehrerer Studien zusammenfasst. Dennoch unterscheiden sich die Ergebnisse bisheriger Interventionsstudien im Kontext von Citizen Science von keinen Veränderungen bis zu einer Verbesserung der Einstellungen zu verschiedenen Umweltthemen. In der Studie von Berndt (2021) zur Wirksamkeit von Citizen Science in der Umweltbildung zeigt sich eine mittelfristige, statistisch signifikante Verbesserung des Umweltverhaltens, während hingegen die (Naturschutz-)Einstellungen keine Veränderungen aufweisen. Aufbauend hierauf wird erwartet, dass sich die allgemeinen und themenspezifischen, affektiven und kognitiven Umwelteinstellungen nicht durch die Teilnahme am Projekt verändern.

Eine Wirkung auf das allgemeine Umweltbewusstsein wird ebenfalls nicht erwartet, da sich dieses auf Bereiche bezieht, welche nicht in dem Citizen Science-Projekt zur Stickstoffbelastung von Gewässern thematisiert wurden. Zusammenfassend werden folgende Hypothesen abgeleitet.

UB-H1: „Die Intervention (Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin oder Bürgerforscher:in) ist nicht in der Lage, das allgemeine Umweltbewusstsein der Teilnehmenden zu verändern“

UB-H2: „Die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt führt zu einer Verbesserung des Umweltverhaltens in Bezug auf den Gewässerschutz.“

UB-H3: „Die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt führt zu höheren Umweltkenntnissen zum Thema Gewässerschutz.“

(b) Wirksamkeit von Citizen Science für die naturwissenschaftliche Schulbildung:

Durch Citizen Science werden nicht nur Ziele im Bereich der Umweltbildung angestrebt, sondern auch weitere Learning Outcomes, die im Rahmen der Begleitstudie im Kontext der

naturwissenschaftlichen Schulbildung untersucht werden. Folgende Hypothesen werden hierfür abgeleitet.

Verständnis der Natur der Naturwissenschaften (VNOS): In einigen Citizen Science-Projekten wurde bereits ein positiver Einfluss von Citizen Science auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften festgestellt, welcher sich durch die direkte Partizipation an wissenschaftlicher Forschung erklären lässt (vgl. Kapitel 2.3.4, Berndt, 2021; Jones et al., 2018; Peters-Burton, 2015; Straub, 2020). Darauf aufbauend wird folgende Hypothese abgeleitet.

VNOS-H1: „Die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin führt zu einem erhöhten Verständnis der Natur der Naturwissenschaften.“

Jedoch spiegelt sich die Verbesserung in bisherigen Studien nicht in allen Dimensionen der Natur der Naturwissenschaften wider. In Berndt (2021) wurden keine statistisch signifikanten Veränderungen der Dimensionen Rechtfertigung und Zweck festgestellt. Kruse et al. (2020) berichten sogar über eine Verschlechterung der Dimension „Zweck der Naturwissenschaften“, begründen die unerwarteten Ergebnisse jedoch mit einem ungeeigneten Fragebogen. Um diesen Unsicherheiten bezüglich der Wirkungen von Citizen Science zu begegnen, werden alle in Tabelle 6 (S. 79) dargestellten, empirisch nachweisbaren Kerndimensionen der Natur der Naturwissenschaften in der Begleitstudie untersucht.

Motivationale Regulation (MR): Wenn die Schüler:innen in ihrer Rolle als Forschungspat:innen positive Kompetenzerfahrungen und eine hohe soziale Einbindung durch die Zusammenarbeit mit den Bürgerforscher:innen erleben, so ist entsprechend der Selbstbestimmungstheorie eine Entwicklung von externalen zu selbstbestimmteren Regulationsformen beziehungsweise die Aufrechterhaltung von selbstbestimmter, intrinsischer Motivation möglich (Ryan & Deci, 2000, 2002). Diesen positiven Einflüssen stehen jedoch negative Erfahrungen gegenüber, die Schüler:innen durch eine Überforderung in ihrer Rolle als Forschungspat:innen erfahren können, beispielsweise wenn sie nicht genug Unterstützung erhalten oder sich nicht ausreichend vorbereitet fühlen. Darüber hinaus wird die Ausprägung der intrinsischen Motivation von der Autonomie beeinflusst, welche von der Übereinstimmung der eigenen Werte mit den Projektaufgaben und -zielen abhängt (Ryan & Deci, 2002). Wenn die Tätigkeiten als Forschungspat:innen nicht mit den eigenen Werten übereinstimmen, sondern die Verpflichtung zu diesen Tätigkeiten dominiert, liegen eher extrinsische Regulationsformen vor, die sich mit fehlender Identifikation mit dem Projekt nicht über den Projektverlauf verbessern. Aufgrund dieser entgegengesetzten Möglichkeiten, wie der Forschungspatenansatz die motivationale Regulation beeinflussen könnte, wird folgende Hypothese aufgestellt.

MR-H1: „Die Intervention (Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin) ist im Allgemeinen nicht in der Lage, die motivationale Regulation hin zu intrinsischen Regulationsformen zu verbessern.“

Interesse an naturwissenschaftlichen Themen (IN): Die Partizipation an authentischer Forschung kann auch das Interesse an den Projektinhalten oder wissenschaftlichen Themen steigern, wie bereits in einigen Citizen Science-Projekten im schulischen Kontext gezeigt werden konnte (vgl. Kapitel 2.3.4, Hiller & Kitsantas, 2015; Kelemen-Finan et al., 2018; Ruiz-Mallén et al., 2016; Silva et al., 2016). Inwieweit ein allgemeines Interesse an naturwissenschaftlichen Themen durch Citizen Science gefördert werden kann, ist vorerst unklar und wird daher in der Begleitstudie untersucht. Da das durchgeführte Citizen Science-Projekt eine hohe Interdisziplinarität aufweist und beispielsweise über den Stoffkreislauf die Biologie und Chemie und über verschiedene Messmethoden die Physik berührt, wird folgende Hypothese abgeleitet:

IN-H1: „Die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt führt zu einem erhöhten Interesse an naturwissenschaftlichen Themen.“

Selbstwirksamkeitserwartung (SW): Die Selbstwirksamkeit in schulischen Citizen Science-Projekten kann positiv beeinflusst werden, wenn Schüler:innen positive Erfahrung bei der Bewältigung ihrer Tätigkeit erleben und die Möglichkeit haben, die Forschung durch die Zusammenarbeit mit den Wissenschaftler:innen aktiv mitzugestalten (Aivelo & Huovelin, 2020; Spicer et al., 2020). Auch das Vertrauen der Wissenschaftler:innen in die Schüler:innen, als „Expert:innen“ die Bürger:innen unterstützen zu können, kann in einer positiven Selbstwirksamkeit resultieren, sofern die nachfolgenden Anstrengungen der Schüler:innen erfolgreich sind (Schwarzer & Jerusalem, 2002). Dem gegenüber stehen Misserfolge aufgrund zu hoher Herausforderungen bei den Aktivitäten, insbesondere den Herausforderungen durch die Tätigkeit als Forschungspat:innen. Sofern die Schüler:innen eine ausreichende Unterstützung durch die Lehrer:innen und Wissenschaftler:innen erhalten, wird in Bezug auf die schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit der Schüler:innen in den Naturwissenschaften von folgender Hypothese ausgegangen.

SW-H1: „Durch die Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin wird die schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit positiv verändert.“

Übergeordneter lässt sich die allgemeine Selbstwirksamkeit, also die „über Situationen und Handlungsfelder generalisierte Kompetenzerwartung“ (Beierlein et al., 2012, S. 7) betrachten, welche über die schulische Selbstwirksamkeit hinaus geht und von vielen weiteren Faktoren abhängt, sodass vermutet wird, dass die Teilnahme am Citizen Science-Ansatz keinen Einfluss auf dieses Konstrukt hat.

SW-H2: „Die Intervention (Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin) ist nicht in der Lage, die allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung der Schüler:innen positiv zu verändern.“

Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften (SK): Das Selbstkonzept ist ebenfalls hierarchisch aufgebaut und überlappt sich in vielen Bereichen mit der Selbstwirksamkeit, ist jedoch sozialnormorientierter als diese und definiert sich im gesamten „eher durch die Deskription und Evaluation der eigenen gegenwärtigen Leistungen“ (Feng et al., 2015, S. 159) als durch zukunftsbezogene Herausforderungen. Daher wird neben der Selbstwirksamkeit auch das Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften untersucht, welches ein Unterkonstrukt des schulischen Selbstkonzeptes beziehungsweise konkreter des mathematischen Selbstkonzeptes der Begabung bildet (Marsh et al., 1988; Möller & Trautwein, 2009).

Das schulbezogene Selbstkonzept wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Hierzu zählen unter anderem verschiedene Informationen, welche zum Vergleich der eigenen Fähigkeiten herangezogen werden können. Zunächst wird das Selbstkonzept durch interindividuelle beziehungsweise soziale (externale) Vergleiche beeinflusst. Vergleiche mit Bezugsgruppen wirken sich unabhängig von den tatsächlichen Fähigkeiten dann positiv auf das Selbstkonzept aus, wenn die Bezugsgruppe leistungsschwächer ist. Dieser Effekt wird auch als Big-Fish-Little-Pond-Effekt bezeichnet (Marsh, 2005; Möller & Köller, 2004). Wenn die Schüler:innen in ihrer Rolle als Forschungspat:innen und „Expert:innen“ positive Erfahrungen hinsichtlich ihrer eigenen Fähigkeiten im Vergleich zu den Bürger:innen machen können, so kann sich dies positiv auf das Selbstkonzept auswirken. Erleben sie jedoch Misserfolge und führen diese auf internal-stabile Ursachen wie beispielsweise eine mangelnde Begabung zurück, ist eine negative Beeinflussung des Selbstkonzeptes möglich. Auch intraindividuelle, dimensionale (internale) Vergleiche, zum Beispiel zwischen den Leistungen im Seminarfach und anderen Fächern, oder temporale Vergleiche, in denen die eigenen Leistungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten verglichen werden, beeinflussen das Selbstkonzept (Möller & Köller, 2004; Möller & Trautwein, 2009). So ist es möglich, dass die Schüler:innen innerhalb der Laufzeit des Seminars feststellen, durch die zunehmenden Kenntnisse immer sicherer die Tätigkeiten als Forschungspat:innen bewältigen zu können, und so ein höheres Selbstkonzept entwickeln. Aus diesen Überlegungen wird folgende Hypothese abgeleitet.

SK-H1: „Durch die Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin wird das Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften positiv verändert.“

Letztendlich werden alle dargestellten Konstrukte auch durch weitere Faktoren beeinflusst, beispielsweise durch den Schulunterricht in weiteren naturwissenschaftlichen Fächern oder Reifungsprozesse, die in Kapitel 5.5.2 diskutiert werden. Um diese Einflüsse berücksichtigen und als Störvariablen möglichst weit kontrollieren zu können, wurde folgendes Studiendesign gewählt.

5.3. Forschungsdesign

5.3.1. Ablauf der Erhebung: Zwei-Gruppen Pre-Post-Design

Um die Wirksamkeit des Citizen Science-Projektes anhand der Forschungsfragen zu untersuchen und die Hypothesen zu überprüfen, wurde für die Begleitstudie das in Abbildung 75 dargestellte Zwei-Gruppen Pre-Post-Design ausgewählt (Döring & Bortz, 2016).

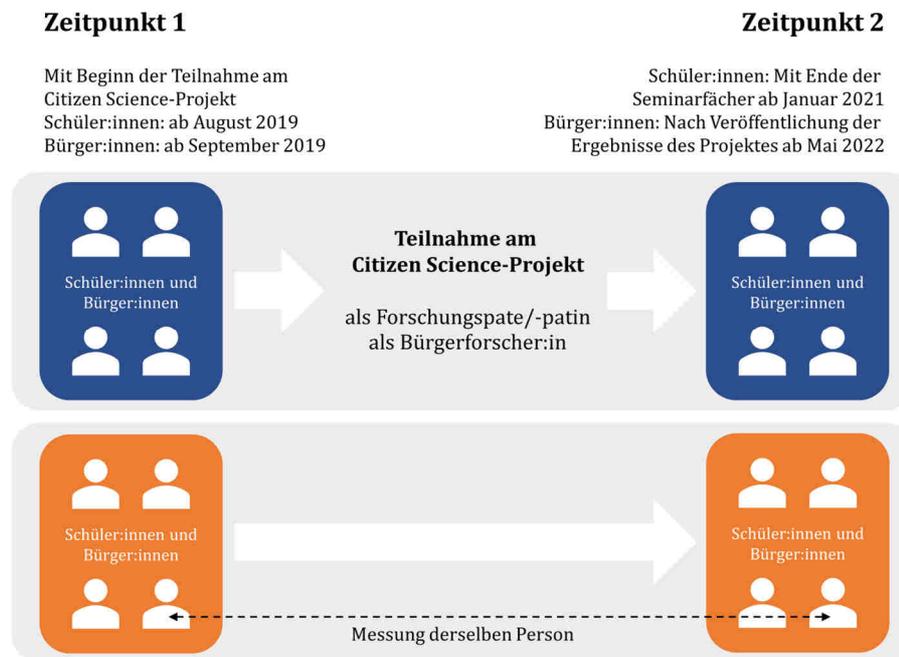


Abbildung 75: Versuchsdesign der Begleitstudie (eigene Abbildung).

Als Interventionsgruppe wurden Bürger:innen und Schüler:innen in die Studie eingeschlossen, die als Bürgerforscher:innen oder Forschungspat:innen an dem Citizen Science-Projekt teilgenommen haben. Als Vergleichsgruppe wurden weitere Schüler:innen aus den Parallelklassen/-kursen der teilnehmenden Schüler:innen beziehungsweise Personen aus dem Bekanntheitskreis der teilnehmenden Bürger:innen herangezogen. Da die Gruppenzugehörigkeit organisatorisch durch die Teilnahme an dem Nitrat-Monitoring vorgegeben war und nicht randomisiert wurde, handelt es sich um ein quasi-experimentelles Design. Dadurch können Störfaktoren nicht ausgeschlossen werden, wie in Kapitel 5.5.2 diskutiert wird. Die Ergebnisse dieses Versuchsdesigns müssen daher mit Vorsicht interpretiert werden, da keine eindeutigen Rückschlüsse auf kausale Zusammenhänge möglich sind (Baur & Blasius, 2014; D. H. Rost, 2013).

Als Erhebungsinstrument wurden Fragebögen mit verschiedenen, bereits erprobten Skalen in adaptierter Form verwendet, die in Kapitel 5.3.2 näher beschrieben werden. Mithilfe des überwiegend quantitativen Designs können die in Kapitel 5.2 abgeleiteten Hypothesen gezielt überprüft werden. Die Fragebögen wurden darüber hinaus durch offene Fragen ergänzt und enthalten damit qualitative Elemente, die einen tieferen Einblick in die subjektive Sichtweise der

Schüler:innen und Bürger:innen erlauben und auf diese Weise ein umfassenderes Bild des Untersuchungsgegenstandes ergeben (Kelle, 2008).

Um Unterschiede der Interventions- und Vergleichsgruppe berücksichtigen zu können, wurde ein Pre-Post-Design gewählt, welches einen Vor- und Nachtest enthält (D. H. Rost, 2013). Der Pretest wurde mit der Interventionsgruppe jeweils direkt zu Beginn der Teilnahme an dem Projekt durchgeführt. Die Schüler:innen haben den Pretest demnach ab August 2019 innerhalb der ersten Seminarfachstunden ausgefüllt, die Bürger:innen ab September 2019 kurz vor oder nach der Einweisung in die Messmethode durch die Schüler:innen. Die Vergleichsgruppen haben den Fragebogen aus organisatorischen Gründen jeweils erst mit einigen Tagen Verspätung erhalten, was aufgrund des langen Versuchszeitraums unproblematisch ist. Da die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt für die Schüler:innen nur bis Ende der Seminarfächer verpflichtend war, wurde der Posttest für die Schüler:innen der Interventionsgruppe und Vergleichsgruppe mit Ende der Seminarfächer ab Januar 2021 durchgeführt. Eine spätere Durchführung, beispielsweise nach Beendigung des Citizen Science-Projektes und Veröffentlichung der Monitoring-Ergebnisse, unterlag der Gefahr einer geringen Rücklaufquote, da viele Schüler:innen unter anderem aufgrund der sich anschließenden Abiturprüfungen nicht weiter an dem Projekt teilgenommen haben. Im Gegensatz dazu wurden die Bürger:innen der Interventionsgruppe, welche auch nach Januar 2021 weiterhin an dem Projekt partizipiert haben, und die Bürger:innen der Vergleichsgruppe erst nach Veröffentlichung der Projektergebnisse ab Mai 2022 befragt.

5.3.2. Erhebungsinstrument

(a) Allgemeiner Aufbau des Erhebungsinstrumentes

Zur Untersuchung der Forschungsfragen und Hypothesen anhand des dargestellten Versuchsdesigns wurden zwei Fragebögen konzipiert, welche bereits erprobte Skalen enthalten, die entsprechend der dargelegten Forschungsfragen adaptiert wurden. Fragebogen 1 richtet sich an die Schüler:innen der Interventions- und Vergleichsgruppe, Fragebogen 2 an die Bürger:innen der Interventions- und Vergleichsgruppe (vgl. Abbildung 76, S. 194). Vollständige Versionen der Fragebögen sind in Anhang M und N zu finden. Beide Fragebögen beinhalten jeweils einen Bereich zum allgemeinen und themenspezifischen Umweltbewusstsein, um die Hypothesen UB-H1, UB-H2 und UB-H3 zu überprüfen (vgl. Tabelle 19 S. 195). Fragebogen 1 für die Schüler:innen wurde um weitere Skalen zum Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, zur motivationalen Regulation, zum Interesse an naturwissenschaftlichen Fächern, zur Selbstwirksamkeit und zum Selbstkonzept ergänzt, um Forschungsfrage 3 und Hypothese VNOS-H1 bis Hypothese SK-H1 zu untersuchen (vgl. Tabelle 20, S. 199). Die Posttests für die Interventionsgruppen enthalten zudem jeweils einen weiteren Abschnitt zur Evaluation des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes und zu den Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf den Projektverlauf (vgl. Tabelle 21, S. 202). Des Weiteren wurden offene Texteingabe-

möglichkeiten ergänzt, über welche die Bürger:innen und Schüler:innen positive, negative und weitere Anmerkungen zum Citizen Science- und Forschungspatenansatz sowie zu dem Einfluss der COVID-19-Pandemie auf das Projekt eingeben konnten. Weitere Kommentare konnten in den Schlussbemerkungen notiert werden.

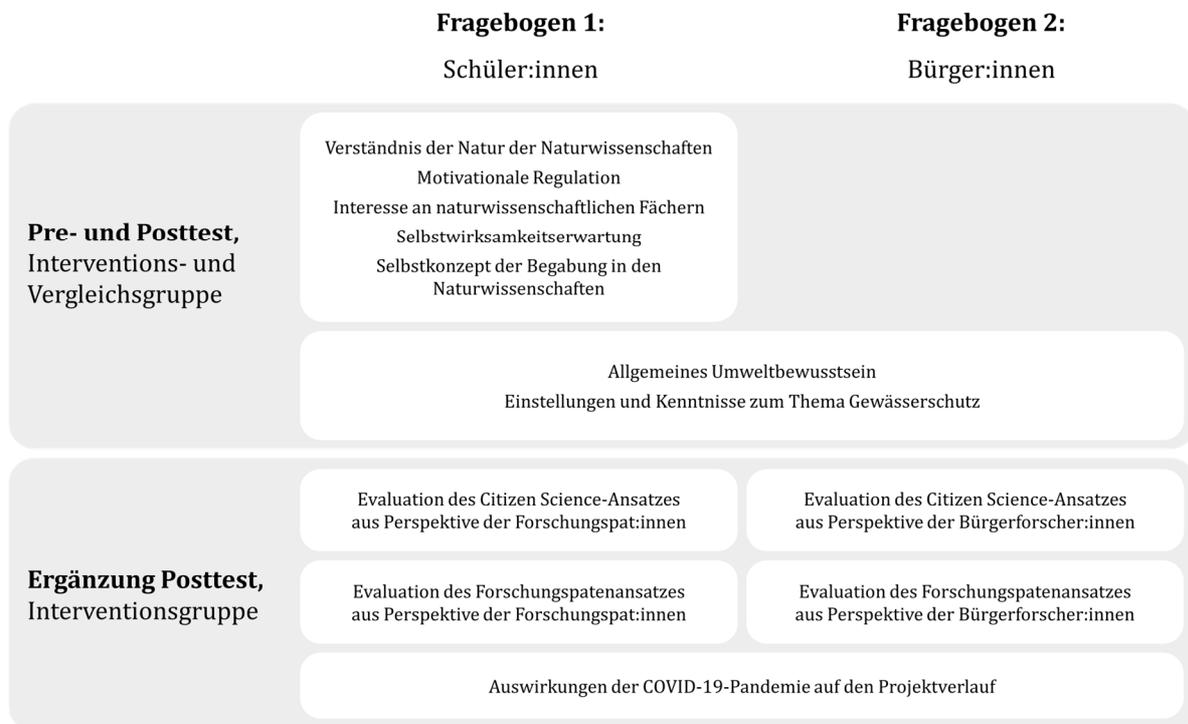


Abbildung 76: Aufbau der Fragebögen (eigene Abbildung).

Die konzipierten Fragebögen wurden jeweils in die Software „SoSci Survey“ implementiert und konnten über einen Link von den Teilnehmer:innen digital aufgerufen und ausgefüllt werden. Über Filterfragen wurden die Evaluationsitems ein- oder ausgeblendet.

Um die Pre- und Posttests der Schüler:innen und Bürger:innen einander zuzuordnen zu können, wurde innerhalb des Fragebogens zudem ein pseudonymisierter, sechsstelliger Zuordnungscode von den Befragten erstellt, welcher sich wie folgt zusammensetzt: die ersten beiden Buchstaben des Vornamens der Mutter, die ersten beiden Buchstaben des Vornamens des Vaters und die ersten beiden Ziffern des eigenen Geburtstages.

Da für einen Großteil der Skalen in der Literatur eine 5-stufige Likert-Skala verwendet und die Güte dieser Skalen unter Verwendung dieser Skala überprüft wurde (z. B. Beierlein et al., 2012; Kremer, 2010; F. H. Müller et al., 2007), wurde für alle in der Begleitstudie eingesetzten Skalen ebenfalls eine 5-stufige Likert-Skala gewählt (1 „stimme gar nicht zu“, 2 „stimme eher nicht zu“, 3 „unentschieden“, 4 „stimme eher zu“, 5 „stimme voll zu“).

Die verwendeten Konstrukte sowie ihre Dimensionen werden im Folgenden unter anderem anhand eines Itembeispiels mit Bezug zur Literatur dargestellt. Zur Vereinheitlichung werden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert.

(b) Konstrukte der Begleitstudie mit Bezug zur Umweltbildung

In der Begleitstudie wurde die Wirksamkeit des Projektes auf das allgemeine Umweltbewusstsein und das themenspezifische Umweltbewusstsein mit Bezug zu den Einstellungen, dem Verhalten und den Kenntnissen zum Thema Gewässerschutz untersucht. Hierzu wurden die folgenden Skalen verwendet (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Untersuchte Konstrukte der Begleitstudie mit Bezug zur Umweltbildung mit Itembeispielen, vollständige Fassung in Anhang M und N, (-): invertierte Items.

Konstrukt	Dimension	Itembeispiel	Itemanzahl
Allgemeines Umweltbewusstsein (BMU & UBA, 2019)	Umweltaffekt	Der Klimawandel bedroht auch unsere Lebensgrundlagen hier in Deutschland.	7
	Umweltkognition	Mehr Umweltschutz bedeutet auch mehr Lebensqualität und Gesundheit für alle.	8
	Umweltverhalten	Für meine alltäglichen Wege benutze ich das Fahrrad, öffentliche Verkehrsmittel oder gehe zu Fuß.	5
Themenspezifisches Umweltbewusstsein (eigene Items, angelehnt an BMU & UBA, 2019)	Themenspezifischer Umweltaffekt	Die Verschlechterung der Wasserqualität durch den Menschen empört mich.	8
	Themenspezifische Umweltkognition	Mehr Gewässerschutz bedeutet auch mehr Lebensqualität und Gesundheit für alle.	8
	Themenspezifisches Umweltverhalten	Ich mache mir beim Einkaufen keine unnötigen Sorgen darüber, ob ein Produkt die Wasser-Situation in irgendeiner Weise schädigen könnte. (-)	10
	Themenspezifische Umweltkenntnisse	Ich weiß, wie ich mein eigenes Handeln ändern kann, um zu einer nachhaltigen Wassernutzung beizutragen.	8

Allgemeines Umweltbewusstsein: Zur Untersuchung des allgemeinen Umweltbewusstseins wurde ein Befragungsinstrument herangezogen, welches für die Umweltbewusstseinsstudie 2018 des BMU und UBA (2019) aufbauend auf bereits bestehenden Umweltbewusstseinsstudien entwickelt wurde und von einem mehrdimensionalen Verständnis vom Umweltbewusstsein ausgeht, das folgende Dimensionen umfasst:

Umweltaffekt: „Einstellungen, bei denen emotionale Reaktionen auf Umweltthemen im Vordergrund stehen. Die Fragen hierzu enthalten in der Regel positive oder negative Gefühlsaussagen (zum Beispiel: „ich freue mich“, „es macht mich wütend“).“ (BMU & UBA, 2019, S. 68)

Die Dimension „Umweltaffekt“ umfasst 7 Items zu Einstellungen, die sich auf verschiedene Umweltprobleme wie die Abholzung der Wälder, die Plastikmüllproblematik und den Klimawandel sowie auf verschiedene Gefühle wie beispielsweise Freude, Beunruhigung und Wut

beziehen und eins zu eins aus der vorhandenen Skala in den Fragebogen 1 und 2 für die Begleitstudie übernommen wurden.

Umweltkognition: „Einstellungen, in denen sachliche Aussagen zu Umweltthemen beurteilt werden, etwa in Bezug auf Ressourcennutzung oder die Verantwortung für die Umweltsituation künftiger Generationen.“ (BMU & UBA, 2019, S. 68)

Die Dimension „Umweltkognition“ beinhaltet 8 Items zu sachlichen Aussagen zu verschiedenen Umweltbereichen, welche ebenfalls ohne Änderungen in die Fragebögen übernommen wurden. Die Items thematisieren unter anderem Einstellungen zur Verantwortung der Generationen, zur Relevanz von Umweltschutz und zu Möglichkeiten für und Auswirkungen von Umweltschutz.

Umweltverhalten: „Aussagen zu eigenen Verhaltensweisen in unterschiedlichen umweltrelevanten Lebensbereichen wie Ernährung, Einkauf, Alltagsmobilität [...]“ (BMU & UBA, 2019, S. 68)

Die Dimension „Umweltverhalten“ umfasst 5 Items, die sich auf Verhaltensweisen beziehen, welche sich positiv oder negativ auf den Umweltschutz auswirken und mit einer Skala von den Befragten eingeordnet werden können. Die Einordnung erfolgt damit über eine Selbsteinschätzung der Befragten. Da Schüler:innen oftmals nicht beim Kauf von Haushaltsgeräten mitentscheiden, wurde das erste Item wie folgt geändert:

Ursprüngliches Item: „Beim Kauf von Haushaltsgeräten wähle ich besonders energieeffiziente Geräte (A+++ oder A++ Energieeffizienzsiegel).“

Adaptiertes Item: „Wasser, Licht und elektrische Geräte lasse ich nur so lange an wie notwendig.“

Drei weitere Items zum Umweltverhalten aus der Umweltbewusstseinsstudie (BMU & UBA, 2019) können nur mit den Antwortmöglichkeiten „ja“, „nein“ und „weiß nicht“ beantwortet werden und beziehen sich auf den Bezug von Ökostrom, das Spenden von Geld und das Engagement für den Umwelt- und Klimaschutz. Da die Schüler:innen in der Regel weder beim Bezug von Energie für den Haushalt mitentscheiden, noch größere Summen Geld spenden können, wurde dieser zweite Teil der Umweltverhalten-Items nicht in die Fragebögen übernommen.

Themenspezifisches Umweltbewusstsein: Da keine geeigneten Skalen zum themenspezifischen Umweltbewusstsein im Bereich Gewässerschutz gefunden wurden, wurde das bereits dargestellte Befragungsinstrument zum allgemeinen Umweltbewusstsein auf den Bereich des Gewässerschutzes ausgerichtet. Es ergeben sich zunächst die folgenden drei Dimensionen:

Themenspezifischer Umweltaffekt: Für die Dimension „themenspezifischer Umweltaffekt“ wurden Items aus dem Befragungsinstrument des BMU und UBA (2019) auf die Gewässerverschmutzung und Nitratproblematik fokussiert und ergänzt, wie folgendes Beispiel zeigt. Ein weiteres Item zu den emotionalen Reaktionen zum Verstoß von Deutschland gegen die

europäische Grundwasserrichtlinie wurde ergänzt, sodass insgesamt 8 Items für diese Dimension vorliegen.

<p>Ursprüngliches Item: „Menschengemachte Umweltprobleme wie die Abholzung der Wälder oder das Plastik in den Weltmeeren empören mich.“</p>	<p>Adaptiertes Item: „Die Beeinträchtigung der Wasserqualität durch den Menschen empört mich.“</p>
---	--

Themenspezifische Umweltkognition: Auf gleiche Weise wurden 7 Items aus der Dimension „Umweltkognition“ auf den Gewässerschutz fokussiert, wie folgendes Beispiel verdeutlicht.

<p>Ursprüngliches Item: „Mehr Umweltschutz bedeutet auch mehr Lebensqualität und Gesundheit für alle.“</p>	<p>Adaptiertes Item: „Mehr Gewässerschutz bedeutet auch mehr Lebensqualität und Gesundheit für alle.“</p>
--	---

Ein Item wurde durch ein neu formuliertes Item ersetzt, da es sich nicht auf den Gewässerschutz fokussieren ließ:

<p>Ursprüngliches Item: „Es gibt natürliche Grenzen des Wachstums, die unsere industrialisierte Welt längst erreicht hat.“</p>	<p>Ersetzt durch Item: „Als einzelne:r kann ich nichts für den Gewässerschutz tun. (umgepolt)“</p>
--	--

Themenspezifisches Umweltverhalten: Um das themenspezifische Umweltverhalten zu erfassen, wurden Items zu verschiedenen Verhaltensweisen formuliert, die sich positiv oder negativ auf den Gewässerschutz auswirken.

Drei Items beziehen sich auf den Verbrauch von Wasser, insbesondere von Trinkwasser (z. B. „Ich nutze anstelle von Trinkwasser z. B. Regenwasser zu Bewässerung des Gartens.“). Vier weitere Items thematisieren das Ernährungs- und Konsumverhalten, das sich auf den Gewässerschutz auswirkt (z. B. „Ich kaufe Lebensmittel aus kontrolliert biologischem Anbau.“ und „Zu den Hauptmahlzeiten esse ich Fleisch. (umgepolt)“). Zwei Items umfassen das Mobilitätsverhalten, welches sich durch die Stickoxid-Emissionen ebenfalls auf die Stickstoffbelastung von Gewässern auswirkt (vgl. Kapitel 2.2.6) (z. B. „Wenn ich Orte mit dem Auto schneller erreichen kann als mit dem öffentlichen Verkehr, nutze ich das Auto. (umgepolt)“). In einem weiteren Item wird der Verbrauch von Ressourcen wie Wasser selbst, aber auch der Energieumsatz thematisiert, welcher ebenfalls in Zusammenhang mit den Emissionen reaktiver Stickstoffverbindungen steht (vgl. Kapitel 2.2.6) („Wasser, Licht und elektrische Geräte lasse ich nur so lange an wie notwendig.“). Da viele Verhaltensweisen, die sich auf das allgemeine Umweltbewusstsein beziehen, auch im Bereich des Gewässerschutzes eine große Rolle spielen, wurden vier der genannten Items aus der Dimension „Umweltverhalten“ in die Dimension „Themenspezifisches Umweltverhalten“ übernommen (vgl. Anhang M und N).

Themenspezifische Umweltkenntnisse: Neben den drei Dimensionen des Umweltbewusstseins wurde die Dimension „Themenspezifische Umweltkenntnisse“ ergänzt, um zu untersuchen, inwieweit das Citizen Science-Projekt zu einem Kenntniszuwachs der Teilnehmenden im Bereich der Stickstoffbelastung von Gewässern geführt hat. Diese Dimension umfasst insgesamt 8 Items zu den Kenntnissen über Möglichkeiten der Informationsbeschaffung und der bisherigen Auseinandersetzung mit aktuellen Verordnungen, den Ursachen und den Auswirkungen einer hohen Nitratbelastung auf die Umwelt und den Menschen sowie zu den Konsequenzen des eigenen Handelns für den Gewässerschutz (z. B. „Ich weiß, welche Konsequenzen mein eigenes Handeln für den Gewässerschutz hat.“).

Es erfolgt dabei eine Selbsteinschätzung der Teilnehmer:innen zu den genannten Bereichen, sodass der tatsächliche Wissensstand der Teilnehmenden in Form einer Wissensabfrage nicht psychometrisch erhoben wird. Vielmehr soll die Dimension „themenspezifische Umweltkenntnisse“ als Indikator für den Grad der Auseinandersetzung der Teilnehmer:innen mit dem Thema Gewässerschutz dienen.

(c) Konstrukte der Begleitstudie mit Bezug zur naturwissenschaftlichen Schulbildung

Neben dem allgemeinen und themenspezifischen Umweltbewusstsein wird die Wirksamkeit des Citizen Science-Projektes auf verschiedene Aspekte der naturwissenschaftlichen Schulbildung untersucht. Hierfür werden weitere Skalen in den Fragebogen 1 für die Schüler:innen der Interventions- und Vergleichsgruppe aufgenommen. Diese beziehen sich auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, die motivationale Regulation, das Interesse an naturwissenschaftlichen Themen, die Selbstwirksamkeit und das Selbstkonzept. Die hierzu verwendeten und teilweise adaptierten Skalen werden in Tabelle 20 (S. 199) dargestellt und im Folgenden erläutert.

Verständnis der Natur der Naturwissenschaften: Das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften ist ein mehrdimensionales Konstrukt, das unter anderem mit den in Kapitel 2.3.4 dargestellten, empirisch nachweisbaren Kerndimensionen beschrieben werden kann (Urhahne et al., 2008). Zur Untersuchung dieses Konstruktes wurde ein quantitatives Messinstrument mit 44 Items herangezogen, das von Urhahne, Kremer und Mayer (2008) entwickelt und von Kremer (2010) veröffentlicht wurde. Die Items teilen sich auf 7 Subskalen auf und wurden bis auf folgende Veränderung eins zu eins aus der Arbeit von Kremer (2010) übernommen.

Das Item „Für Naturwissenschaftler[:innen] sind Experimente mit unerwarteten Ergebnissen wertlos“ (Kremer, 2010, S. 162) wird von Kremer als nicht umgepolt dargestellt. Damit steht das Item im direkten Gegensatz zu anderen Items der Dimension Rechtfertigung wie beispielsweise „In den Naturwissenschaften können sich neue Vorstellungen aus den eigenen Fragen und Experimenten entwickeln“. Daher wird davon ausgegangen, dass die Polung des Items in Kremer (2010) falsch angegeben wurde. Das entsprechende Item wird für die hier dargestellte Begleitstudie umgepolt.

Tabelle 20: Untersuchte Konstrukte der Begleitstudie mit Bezug zur naturwissenschaftlichen Schulbildung mit Itembeispielen, vollständige Fassung in Anhang N, (-): invertierte Items.

Konstrukt	Dimension	Itembeispiel	Itemanzahl
Verständnis der Natur der Naturwissenschaften (Kremer, 2010)	Herkunft des Wissens	Nur Naturwissenschaftler:innen können naturwissenschaftliche Theorien entwickeln. (-)	5
	Sicherheit des Wissens	Alle Fragen in den Naturwissenschaften haben genau eine Lösung. (-)	7
	Rechtfertigung des Wissens	Gute Theorien stützen sich auf die Ergebnisse aus vielen verschiedenen Experimenten.	9
	Entwicklung des Wissens	Durch neue Entdeckungen kann sich verändern, was Naturwissenschaftler:innen für richtig halten.	8
	Einfachheit des Wissens	Naturwissenschaftliche Theorien und Gesetze werden eher kompliziert als einfach formuliert. (-)	5
	Zweck der Naturwissenschaften	Naturwissenschaftler:innen führen Experimente durch, um zu erklären, wie bestimmte Ereignisse zustande kommen.	5
	Kreativität von Naturwissenschaftler:innen	Kreatives Denken verträgt sich nicht mit den auf Logik beruhenden Naturwissenschaften. (-)	5
Motivationale Regulation (F. H. Müller et al., 2007)	Intrinsische Regulation	Ich arbeite und lerne in naturwissenschaftlichen Fächern, weil es mir Spaß macht.	5
	Identifizierte Regulation	Ich arbeite und lerne in naturwissenschaftlichen Fächern, weil ich damit mehr Möglichkeiten bei der späteren Berufswahl habe.	4
	Introjizierte Regulation	Ich arbeite und lerne in naturwissenschaftlichen Fächern, weil ich möchte, dass meine Lehrer/innen denken, ich bin ein guter Schüler/eine gute Schülerin.	4
	Externale Regulation	Ich arbeite und lerne in naturwissenschaftlichen Fächern, weil ich sonst von zu Hause Druck bekomme.	4
Interesse an naturwissenschaftlichen Themen (adaptiert nach D. H. Rost, 2008)	-	Ich könnte mir vorstellen, ein naturwissenschaftliches Fach zu studieren.	7
Selbstwirksamkeitserwartung	Allgemeine Selbstwirksamkeit (Beierlein et al., 2012)	In schwierigen Situationen kann ich mich auf meine Fähigkeiten verlassen.	3
	Schul-/Fachbezogene Selbstwirksamkeit (adaptiert nach Jerusalem & Sattow, 1999)	Ich kann auch die schwierigen Aufgaben in den Naturwissenschaften lösen, wenn ich mich anstrengte.	7
Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften (adaptiert nach Grave, 2015)	-	Kein Mensch kann alles. Für Naturwissenschaften habe ich einfach keine Begabung. (-)	6

Motivationale Regulation: Nach der Selbstbestimmungstheorie von Deci und Ryan (1993) lassen sich verschiedene Motivationsformen von intrinsischer bis extrinsischer Motivation unterscheiden (vgl. Kapitel 2.3.4), die sich entsprechend des Grades der Selbstbestimmung in weitere Regulationsstile differenzieren lassen. Ausgehend vom „SQR-A“ (Academic Self-Regulation Questionnaire) (Ryan & Connell, 1989) haben Müller et al. (2007) eine adaptierte und ergänzte, deutschsprachige Skala zur motivationalen Regulation erprobt und veröffentlicht, welche mit insgesamt 17 Items die folgenden Dimensionen abdeckt:

„Extrinsische Regulationsstile: [...] die externale Regulation basiert auf Belohnungen oder der Vermeidung von negativen Konsequenzen; [...] zur introjizierten Regulation sind Handlungen zu zählen, die auf selbstwertbezogene Kontingenzen wie das Handeln abzielen, um ein schlechtes Gewissen zu vermeiden oder weil es „sich gehört“, eine Handlung durchzuführen; [...] die identifizierte Regulation liegt dann vor, wenn man eigene Handlungsziele verfolgt (z.B. einen Schulabschluss), aber nicht an der Handlung oder den Gegenständen an sich interessiert ist.

Intrinsischer Regulationsstil: [...] intrinsische Motivation geht einher mit Freude, Interesse und Selbstbestimmung (=Prototyp selbstbestimmten Handelns)“ (F. H. Müller et al., 2008, S. 5)

Als Gesamtmaß der wahrgenommenen Selbstbestimmung wird nach Müller et al. (2007) der Selbstbestimmungsindex (*SDI*) berechnet:

$$SDI = 2 \cdot \text{intrinsische Regulation} + \text{identifizierte Regulation} \\ - \text{introjizierte Regulation} - 2 \cdot \text{externale Regulation}$$

Interesse an naturwissenschaftlichen Themen: Um das Interesse an den naturwissenschaftlichen Themen zu erheben, wurde eine von Rost (2008) publizierte Skala mit 7 Items verwendet, die in Anlehnung an verschiedene Studien formuliert wurden (siehe Köller, Schnabel & Baumert, 2000; u. A. Schiefele et al., 1993; Sparfeldt et al., 2004). Aufgrund starker Korrelationen zwischen verschiedenen Interessensaspekten (z. B. Nützlichkeit und Wichtigkeit) wird in dieser Skala auf eine Berücksichtigung beziehungsweise Unterscheidung ebendieser verzichtet (D. H. Rost, 2008; Sparfeldt et al., 2004). Neben der Skala mit 7 Items stellt Rost (2008) eine extreme Kurzskala mit nur einem Item zur Erfassung schulfachspezifischer Interessen dar, welche jedoch lediglich in der Sekundarstufe I geprüft wurde und daher keine Anwendung in dieser Begleitstudie findet.

Allgemeine und schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit: Um die Wirksamkeit der Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt auf die allgemeine Selbstwirksamkeit zu untersuchen, wird das Messinstrument „AKSU“ (Allgemeine Selbstwirksamkeit Kurzskala) herangezogen. Die Kurzskala enthält 3 Items, die eins zu eins in die Begleitstudie übernommen wurden (Beierlein et al., 2012).

Wird das Konstrukt der Selbstwirksamkeit weiter spezifiziert, so ordnen sich zwischen der situationsspezifischen und allgemeinen Selbstwirksamkeit bereichsspezifische Konzepte wie

beispielsweise die schulbezogene Selbstwirksamkeitserwartung ein, welche „die Kompetenzerwartungen von Schülern im Umgang mit schulischen Anforderungen“ (Schwarzer & Jerusalem, 2002, S. 40) beschreibt. Die schulische Selbstwirksamkeit wird in der Begleitstudie fokussiert auf die Selbstwirksamkeit in naturwissenschaftlichen Fächern. Zur Erfassung des als „schul-/fachbezogenen Selbstwirksamkeit“ bezeichneten Konstruktes wird die von Jerusalem und Satow (1999) veröffentlichte Skala „WIRKSCHUL“ (Schulbezogene Selbstwirksamkeitserwartung) herangezogen und konkretisiert, wie folgendes Itembeispiel zeigt.

Ursprüngliches Item: „Ich kann auch die schwierigen Aufgaben im Unterricht lösen, wenn ich mich anstreng.“	Adaptiertes Item: „Ich kann auch die schwierigen Aufgaben in den Naturwissenschaften lösen, wenn ich mich anstreng.“
--	--

Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften: Zur Erhebung des Selbstkonzeptes der Begabung in den Naturwissenschaften wurden 6 Items von Budke (2019) herangezogen und adaptiert, indem die Items auf das naturwissenschaftliche Selbstkonzept bezogen wurden, wie das folgende Beispiel zeigt. Die von Budke (2019) formulierte Skala basiert auf dem hierarchischen Selbstkonzeptmodell von Shavelson et al. (1976) sowie auf mehreren hierauf aufbauenden Studien (z. B. Grave, 2015; Köller, Daniels et al., 2000).

Ursprüngliches Item: „Kein Mensch kann alles. Für Chemie habe ich einfach keine Begabung. (umgepolt)“	Adaptiertes Item: „Kein Mensch kann alles. Für Naturwissenschaften habe ich einfach keine Begabung. (umgepolt)“
---	---

(d) Items zur Evaluation des Projektes

Durch einen letzten Abschnitt im Posttest der Interventionsgruppe wurde das Citizen Science-Projekt evaluiert. Die Evaluation umfasst den Citizen Science-Ansatz, den Forschungspatenansatz und die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf den Projektverlauf. Dabei werden die Perspektiven der Schüler:innen als Forschungspat:innen und der Bürger:innen als Bürgerforscher:innen getrennt berücksichtigt, sodass sich die in Tabelle 21 (S. 202) dargestellte Struktur ergibt. Die Items wurden frei formuliert, basieren also nicht auf bereits vorhandenen Skalen, und erheben keinen Anspruch eines psychometrischen Verfahrens. Sie sollen vielmehr einen Überblick geben, wie die Schüler:innen und Bürger:innen ihre Teilnahme an dem Projekt wahrgenommen haben und ob sie sich zukünftig vorstellen können, erneut an einem Citizen Science-Projekt teilzunehmen. Durch die Ergänzung weiterer offener Texteingabemöglichkeiten konnten die Schüler:innen und Bürger:innen positive und negative Anmerkungen zum Citizen Science-Projekt und Forschungspatenansatz nennen, auf Grundlage derer konkrete Verbesserungsmöglichkeiten abgeleitet werden (vgl. Kapitel 5.4.3). Darüber hinaus wurde qualitativ Feedback von den Lehrer:innen erhoben, wie in folgender Tabelle dargestellt wird.

Tabelle 21: Evaluation des Citizen Science-Projektes und Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf den Projektverlauf.

Evaluationsfokus	Bezug	Itembeispiel	Itemanzahl
Evaluation durch die Bürger:innen	Citizen Science-Ansatz	Bürger:innen sollten öfters die Möglichkeit haben, sich an Forschungsprojekten zu beteiligen.	7
	Forschungspatenansatz	Durch meine:n Forschungspaten/-patin (Schüler:in einer Projektschule) habe ich mich gut betreut gefühlt.	2
Evaluation durch die Schüler:innen	Citizen Science-Ansatz	Schüler:innen sollten öfters die Möglichkeit haben, sich an aktuellen Forschungsthemen zu beteiligen.	3
	Forschungspatenansatz	Es macht mir Spaß, die Bürger:innen als Forschungspate/-patin zu unterstützen.	4
Auswirkungen der COVID-19-Pandemie	-	Aufgrund der COVID-19-Pandemie konnte ich meiner Rolle als Bürger-Forscher:in (bzw. Forschungspate/-patin) nicht gerecht werden.	4
Evaluation durch die Lehrer:innen	Offenes Frageformat mit Eingabemöglichkeit: „Im Folgenden können Sie uns anonym Feedback zum Citizen Science-Projekt „Schüler und Bürger forschen zusammen mit Wissenschaftlern zum Thema Stickstoffbelastung von Gewässern“ geben.“		

5.3.3. Statistische Methoden

Vorbereitung: Die mithilfe der Software „SoSci Survey“ digital erhobenen Daten wurden zunächst als SPSS Syntax exportiert, anschließend in SPSS (Version IBM SPSS Statistics 28) importiert und in diesem Programm ausgewertet. Umgepolte Items wurden bereits vor der Erhebung in SoSci Survey markiert und lagen damit in der exportierten Datei invertiert vor, sodass die Skala einheitlich interpretiert werden konnte. Nicht beantwortete Fragen wurden in der Analyse als fehlende Werte behandelt.

Über den Zuordnungscode, die Schule und das Alter der Schüler:innen und Bürger:innen wurden die Pre- und Posttests zusammengefügt. Die Items des Pre- und Posttests wurden hierfür durch die Ergänzung „_pre“ beziehungsweise „_post“ den Testzeitpunkten zugeordnet. Zur Erleichterung der Auswertung wurde eine Datendatei mit allen Skalen zum allgemeinen und themenspezifischen Umweltbewusstsein erstellt, welche die Daten der Schüler:innen und Bürger:innen zu den entsprechenden Konstrukten enthält. In einer weiteren Datei wurden lediglich die Daten der Schüler:innen gespeichert und die Konstrukte zur naturwissenschaftlichen Schulbildung ausgewertet (vgl. Anhang O).

Bildung eines Testwertes für die Skalen und Subskalen: Als Testwert wurde für jede Skala/Subskala der untersuchten Konstrukte das arithmetische Mittel der Skalenwerte aller Items berechnet, sofern alle Items der Skala/Subskala beantwortet wurden. Andernfalls wurde der Testwert als fehlend behandelt. Im Gegensatz zum Summenscore, der ebenfalls häufig als Testwert für Likert-Skalen herangezogen wird, kann der Mittelwert zwischen Skalen mit einer unterschiedlichen Anzahl an Items direkt verglichen werden (Bortz & Döring, 2006).

Um die interne Konsistenz der Skalen vor Bildung der Testwerte zu überprüfen, wurde der Koeffizient Cronbachs α , welcher von der Anzahl der Items und den Korrelationen zwischen den Items abhängt, mit SPSS berechnet (Cronbach, 1951). Werte ab $\alpha = 0,8$ weisen in der Regel auf eine hohe interne Konsistenz hin, wobei in verschiedenen Studien bei kürzeren Skalen auch Werte ab $\alpha = 0,6$ akzeptiert wurden (Bortz & Döring, 2006; Krüger et al., 2014). Schmitt (1996) schlägt einen Schwellenwert von $\alpha = 0,7$ vor, der für die vorliegende Begleitstudie angewendet wurde. Darüber hinaus wurde geprüft, ob sich die Reliabilität der Skalen verbessert, wenn einzelne Items weggelassen werden.

Statistische Testverfahren: Die über das arithmetische Mittel berechneten Testwerte wurden zunächst mithilfe deskriptiver Methoden wie beispielsweise der Mittelwerte M , der Differenzen $d_{pre/post}$ zwischen Pre- und Posttest, der Streuungsmaße (Standardabweichung SD) und Diagrammen ausgewertet. Des Weiteren wurden die folgenden statistischen Testverfahren angewendet, um die Hypothesen zu überprüfen.

Zunächst wurden gepaarte (abhängige) t -Tests durchgeführt, mit denen getestet werden kann, ob Unterschiede der Mittelwerte einer abhängigen Variable zwischen zwei Zeitpunkten vorliegen. So konnte beispielsweise untersucht werden, ob signifikante Unterschiede des Verständnisses der Natur der Naturwissenschaften vor und nach der Intervention auftreten. Die Abhängigkeit der Messungen, die Intervallskalierung der Testwerte als abhängige Variable und die Nominalskalierung der unabhängigen Variable als Voraussetzungen für den gepaarten t -Test sind hierfür erfüllt. Ausreißer und die Normalverteilung der Differenzen wurden jeweils vor Durchführung des t -Tests mithilfe von Boxplots, Q-Q-Diagrammen und Shapiro-Wilk-Tests überprüft. Ausreißer wurden gegebenenfalls von den Tests ausgeschlossen. Bei einer Stichprobengröße von $N > 30$ kann eine Normalverteilung angenommen werden. Die Nullhypothese, also die Gleichheit der Mittelwerte der beiden abhängigen Gruppen, wurde abgelehnt, wenn der p -Wert unter dem gewählten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ liegt (Bortz & Schuster, 2010). Als Effektstärke wurde Cohen's d mit SPSS berechnet und nach Cohen (1988) wie folgt interpretiert.

$0,2 \leq d < 0,5$	kleiner Effekt
$0,5 \leq d < 0,8$	mittlerer Effekt
$0,8 \leq d $	großer Effekt

Um darüber hinaus zu prüfen, ob Unterschiede auf die Intervention zurückzuführen sind, wurde eine Vergleichsgruppe in das Studiendesign integriert, welche nicht an dem Citizen Science-Projekt teilgenommen hat. Der Einfluss der Teilnahme am Projekt auf die Veränderung der Testwerte wurde mit 2x2 faktoriellen, gemischten Varianzanalysen (Mixed ANOVA) mit dem Zwischensubjektfaktor „Gruppenzugehörigkeit“ mit 2 Faktorstufen (Interventions- und Vergleichsgruppe) und dem Innersubjektfaktor Zeit mit ebenfalls 2 Faktorstufen (Zeitpunkt 1 und Zeitpunkt 2) untersucht (Döring & Bortz, 2016). Die abhängigen Variablen (Testwerte)

sind jeweils mindestens intervallskaliert, der Zwischensubjektfaktor (Gruppenzugehörigkeit) ist unabhängig und nominalskaliert und der Innersubjektfaktor (Zeit) ist abhängig und nominalskaliert. Die Voraussetzung der Normalverteilung wurde für jede Faktorkombination mit Shapiro-Wilk-Tests und Q-Q-Diagrammen überprüft, jedoch gilt die ANOVA als relativ robust gegenüber Verletzungen der Normalverteilung (Salkind, 2010; Schäfer, 2016). Starke Ausreißer wurden über Boxplots identifiziert und von der Analyse ausgeschlossen. Da der Innersubjektfaktor nur zwei Stufen hat, muss die Voraussetzung der Sphärizität nicht geprüft werden. Die Varianzgleichheit wird mithilfe des Levene-Tests (Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen) und des Box-Tests (Test auf Gleichheit der Kovarianzenmatrizen) überprüft. Die Voraussetzungen gelten jeweils bei $p < 0,05$ als verletzt. Sind die Voraussetzungen erfüllt, können anhand der ANOVA Interaktionseffekte und Haupteffekte überprüft werden. Liegt ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Zeit und der Gruppenzugehörigkeit vor, so wird die zeitliche Veränderung der abhängigen Variable (z. B. des Interesses) von der Gruppenzugehörigkeit beeinflusst, die Interventionsgruppe verhält sich also überzufällig anders als die Vergleichsgruppe. Anhand der Haupteffekte können Effekte eines Faktors auf die abhängige Variable über die Faktorstufen des anderen Faktors hinweg untersucht werden. Ein signifikanter Haupteffekt des Zwischensubjektfaktors „Gruppenzugehörigkeit“ bedeutet, dass sich Interventions- und Vergleichsgruppe über den gesamten Messzeitraum hinweg signifikant voneinander unterscheiden. Ein signifikanter Haupteffekt des Innersubjektfaktors „Zeit“ bedeutet, dass signifikante Unterschiede zwischen Pre- und Posttest über beide Gruppen hinweg vorliegen. Signifikante Effekte liegen jeweils vor, wenn die p -Werte unter dem gewählten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ liegen (Döring & Bortz, 2016). Zur Beurteilung der Effektstärke wird das partielle Eta-Quadrat η^2_p verwendet, welches durch SPSS berechnet und wie folgt interpretiert wird (Cohen, 1988).

$0,01 \leq |\eta^2_p| < 0,06$ kleiner Effekt

$0,06 \leq |\eta^2_p| < 0,14$ mittlerer Effekt

$0,14 \leq |\eta^2_p|$ großer Effekt

Mithilfe des Tools G*Power wurde bei nicht signifikanten Ergebnissen in einer Post-Hoc-Analyse zudem die Sensitivität der Varianzanalyse für den Nachweis von Interaktionseffekten berechnet (Faul et al., 2007). Hierzu wurde eine Teststärke von $(1-\beta) = 0,8$ und ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ festgelegt. Ist die Teststärke geringer als $(1-\beta) = 0,8$, so ist die Wahrscheinlichkeit β , einen Fehler 2. Art zu begehen, also die Nullhypothese nicht abzulehnen, obwohl die Alternativhypothese zutrifft, größer als 20 %. „Ein nicht-signifikantes Ergebnis darf nur dann zum Anlass genommen werden, die [Nullhypothese] H_0 anzunehmen, wenn der Test über genügend Teststärke verfügt, so dass er bei Vorhandensein eines Populationseffektes die Chance gehabt hätte, signifikant zu werden“ (Döring & Bortz, 2016, S. 670). Über eine Post-Hoc-

Analyse der Sensitivität kann die Effektstärke des Interaktionseffektes berechnet werden, welche sich zuverlässig mit der gegebenen Stichprobengröße nachweisen ließe (Faul et al., 2007).

5.3.4. Planung und Beschreibung der Stichprobe

Planung der Stichprobe: In der Literatur finden sich zu den untersuchten Konstrukten im Kontext Citizen Science keine oder wenige Angaben zu den zu erwartenden Effektstärken. Berndt (2021) berichtet beispielsweise über ein im schulischen Kontext eingebundenes Citizen Science-Projekt für die Gesamtskala des Konstruktes „Verständnis der Natur der Naturwissenschaften“ von einer geringen Effektstärke ($\eta^2_p = 0,05$) sowie von einer Veränderung des Umwelthandelns über die Projektlaufzeit mit einer mittleren Effektstärke ($\eta^2_p = 0,07$). Die Effektstärken bewegen sich jeweils nahe an der von Cohen (1988) genannten Grenze von $\eta^2_p = 0,06$ für mittlere Effekte, sodass dieser Wert für die Planung der Stichprobe verwendet wurde.

Um mittlere Interaktionseffekte mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ und einer Teststärke von $(1-\beta) = 0,80$ mithilfe einer Varianzanalyse mit zwei Gruppen und zwei Zeitstufen nachweisen zu können, sollte die Stichprobe insgesamt mindestens $N = 128$ Personen umfassen (berechnet mit G*Power, A priori-Power-Analyse für „ANOVA: Repeated measures, within-between interactions“, Faul et al., 2007). Werden diese gleichmäßig auf beide Gruppen aufgeteilt, so sollten Interventions- und Vergleichsgruppe jeweils mindestens 64 Personen umfassen.

Zur Untersuchung der Wirksamkeit von Citizen Science auf die Umweltbildung bilden jeweils Schüler:innen und Bürger:innen die Interventions- und Vergleichsgruppe, sodass mindestens 32 Bürger:innen und 32 Schüler:innen die Interventionsgruppe und ebenso viele Personen die Vergleichsgruppe bilden sollten. Die Stichprobe der Bürger:innen wurde wie folgt generiert. Alle am Projekt teilnehmenden Bürger:innen haben einen Einladungslink für die Teilnahme an der Studie als Interventionsgruppe erhalten. Darüber hinaus wurde der Fragebogen von den Teilnehmer:innen an Bekannte weitergeleitet, welche die Vergleichsgruppe bilden. Um möglichst viele Pre-Post-Paare zu erhalten, konnten die Personen aus der Vergleichsgruppe ihre E-Mail-Adresse am Ende des Fragebogens eingeben. Die E-Mail-Adressen wurden getrennt erhoben, sodass sie nicht mit anderen Angaben im Fragebogen verknüpft werden konnten und die Anonymität gewährleistet war.

Zur Untersuchung der Wirksamkeit des Forschungspaten- und Citizen Science-Ansatzes auf die naturwissenschaftliche Schulbildung wurden ausschließlich Schüler:innen in die Befragung eingeschlossen, sodass Interventions- und Vergleichsgruppe jeweils mindestens 64 Schüler:innen umfassen sollten. Neben den Schüler:innen der am Projekt teilnehmenden Seminarfächer (Interventionsgruppe) wurden als Vergleichsgruppe Schüler:innen von vier naturwissenschaftlich ausgerichteten Seminarfächern ausgewählt, die ebenfalls an den Projektschulen stattfanden, jedoch nicht in das Citizen Science-Projekt eingebunden waren. Auf diese Weise wurde das Ziel möglichst vergleichbarer Stichproben verfolgt, die sich lediglich durch die Teilnahme am Citizen Science-Projekt unterscheiden (Döring & Bortz, 2016).

Beschreibung der Stichprobe: Tabelle 22 gibt einen Überblick über die Stichprobengrößen der Interventions- und Vergleichsgruppen.

Tabelle 22: Stichprobengrößen, differenziert nach der Teilnahme als Bürger:in oder Schüler:in und der Gruppenzugehörigkeit (Interventionsgruppe oder Vergleichsgruppe).

	Interventionsgruppe (Teilnahme am Citizen Science-Projekt)			Vergleichsgruppe (Keine Teilnahme am Citizen Science-Projekt)		
	Teilnahme am Pretest	Teilnahme am Posttest	Teilnahme am Pre- und Posttest	Teilnahme am Pretest	Teilnahme am Posttest	Teilnahme am Pre- und Posttest
Bürger:innen	<i>N</i> = 248	<i>N</i> = 109	<i>N</i> = 56	<i>N</i> = 78	<i>N</i> = 18	<i>N</i> = 5
Schüler:innen	<i>N</i> = 158	<i>N</i> = 133	<i>N</i> = 63	<i>N</i> = 36	<i>N</i> = 69	<i>N</i> = 14
Gesamt	<i>N</i> = 406	<i>N</i> = 242	<i>N</i> = 119	<i>N</i> = 114	<i>N</i> = 87	<i>N</i> = 19

Die geplanten Stichprobengrößen für die Interventionsgruppen wurden mit 56 Bürger:innen und 63 Schüler:innen, die am Pre- und Posttest teilgenommen haben, erreicht, obgleich die Rücklaufquoten des Pretests deutlich höher sind als die des Posttests. Dies kann unter anderem aus dem großen Umfang und der dementsprechend langen Bearbeitungsdauer des Fragebogens (insbesondere für die Schüler:innen) resultieren, welche davon abgehalten haben könnten, am Posttest teilzunehmen. Darüber hinaus ist es möglich, dass trotz der Beschreibung des Studiendesigns nicht deutlich wurde, warum nahezu identische Fragebögen zu zwei Zeitpunkten ausgefüllt werden sollten, sodass Personen nicht am Posttest teilgenommen haben in der Annahme, dass die Teilnahme am Pretest genügt. In die Auswertung wurden jedoch jeweils nur Fälle einbezogen, für welche Pre- und Posttest-Daten vorliegen.

Die Beteiligung der Bürger:innen der Vergleichsgruppe ist beim Posttest ebenfalls deutlich geringer als beim Pretest. Da nur 5 Bürger:innen am Pre- und Posttest teilgenommen haben, liegt die erreichte Anzahl deutlich unter der geplanten Stichprobengröße. Daher liefert die Vergleichsgruppe der Bürger:innen lediglich Hinweise, kann jedoch keinesfalls repräsentativ für die Grundgesamtheit der Bevölkerung im Einzugsgebiet bewertet werden. Die oben genannten Gründe für die geringe Beteiligung können auch auf diese Gruppe übertragen werden.

Unerwartet ist, dass deutlich mehr Schüler:innen den Posttest der Vergleichsgruppe ausgefüllt haben, wobei ein Großteil der Posttests über den Zuordnungscode nicht zu Daten des Pretests zugeordnet werden konnten. Gegebenenfalls wurde der Fragebogen für die Schüler:innen der Vergleichsgruppe von den teilnehmenden Lehrer:innen versehentlich zu weiteren Seminarfächern weitergeleitet in dem Unwissen, dass nur Schüler:innen in der Begleitstudie berücksichtigt werden können, welche am Pre- und Posttest teilgenommen haben. Weitere Gründe für die steigende Anzahl an Schüler:innen in der Vergleichsgruppe konnten nicht aus den vorhandenen Daten rekonstruiert werden. Insgesamt verbleiben nur 14 Schüler:innen in der Vergleichsgruppe, welche an beiden Testzeitpunkten teilgenommen haben, sodass die Vergleichsgruppe

ebenfalls nicht repräsentativ für die Grundgesamtheit der Schüler:innen ist, die für die Vergleichsgruppe geeignet sind. Dies beeinflusst die Aussagekraft der Begleitstudie deutlich, wie in Kapitel 5.5.2 weiter diskutiert wird.

Die in Abbildung 77 dargestellten Daten zur Beschreibung der Stichprobe beziehen sich ebenfalls nur auf Personen, die an beiden Testzeitpunkten teilgenommen haben. Die Schüler:innen waren beim Pretest im Schnitt 17,2 Jahre (Interventionsgruppe) bzw. 16,9 Jahre (Vergleichsgruppe) alt, die Bürger:innen 55,5 Jahre (Interventionsgruppe) bzw. 59,0 Jahre (Vergleichsgruppe). Auch die Verteilungen der Geschlechter zwischen Interventions- und Vergleichsgruppe sind recht ähnlich. So waren 61 % beziehungsweise 60 % der befragten Bürger:innen männlich, was darauf zurückzuführen ist, dass insgesamt mehr Männer als Frauen an dem Citizen Science-Projekt teilgenommen haben (vgl. Abbildung 35, S. 100). Bei den Schüler:innen ist das Geschlechterverhältnis ausgeglichener. In der Interventionsgruppe waren 54 % der befragten Personen männlich, 44 % weiblich und eine Person divers. In der Vergleichsgruppe waren jeweils 50 % der befragten Personen männlich und weiblich.

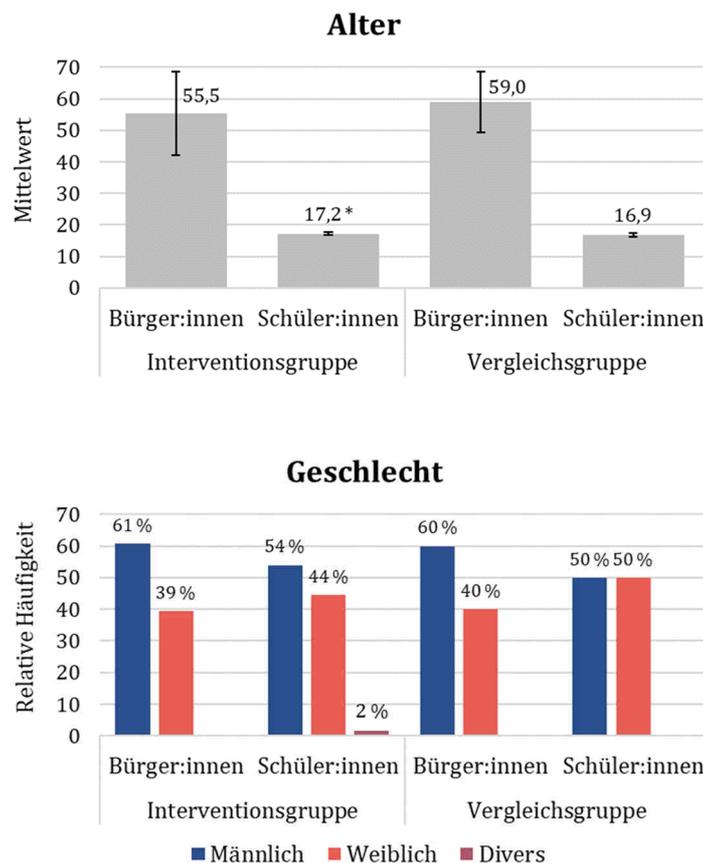


Abbildung 77: Alter und Geschlechterverteilung der Stichprobe, differenziert nach der Teilnahme als Bürger:in oder Schüler:in und der Gruppenzugehörigkeit (Interventionsgruppe oder Vergleichsgruppe). Fehlerbalken in der oberen Abbildung zeigen die Standardabweichung. *Ein Ausreißer wurde entfernt (eigene Abbildung).

5.4. Ergebnisse der Begleitstudie

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Begleitstudie, differenziert nach der Wirksamkeit im Bereich der Umweltbildung und der naturwissenschaftlichen Schulbildung, dargestellt. Hierzu wird jeweils zunächst die interne Konsistenz der Skalen anhand Cronbachs α bewertet, bevor die deskriptive Statistik sowie die Ergebnisse der t -Tests und Varianzanalysen dargestellt werden. Im Anschluss erfolgt eine Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse, in welcher die Hypothesen, sofern möglich, verifiziert oder falsifiziert werden. In Kapitel 5.5 folgt zuletzt die Diskussion der Ergebnisse, welche den Vergleich mit Ergebnissen weiterer Studien, eine Methodenkritik und aus den Ergebnissen abgeleitete Handlungsempfehlungen umfasst.

5.4.1. Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes auf das Umweltbewusstsein

Reliabilitätsanalyse:

Tabelle 23: Interne Skalenreliabilität der (Sub-)Skalen zum allgemeinen und themenspezifischen Umweltbewusstsein (Cronbachs α) für beide Messzeitpunkte ($\alpha < 0,7$ rot markiert).

Konstrukt	Dimension	Item-Anzahl	Cronbachs α	
			Pretest	Posttest
Allgemeines Umweltbewusstsein	Umweltaffekt	7	0,839	0,829
	Umweltkognition	8	0,792	0,761
	Umweltverhalten	5	0,658	0,644
	Alle Dimensionen	20	0,891	0,874
Themenspezifisches Umweltbewusstsein	Themenspezifischer Umweltaffekt	8	0,858	0,832
	Themenspezifische Umweltkognition	8	0,787	0,784
	Themenspezifisches Umweltverhalten	10	0,724	0,706
	Themenspezifische Umweltkenntnisse	8	0,869	0,874
	Alle Dimensionen	34	0,880	0,889

Die Subskalen für das allgemeine und themenspezifische Umweltbewusstsein weisen mit Cronbachs $\alpha > 0,7$ überwiegend akzeptable bis hohe interne Konsistenzen auf, lediglich die Dimension „Umweltverhalten“ liegt unter dem von Schmitt (1996) vorgeschlagenen Schwellenwert von $\alpha = 0,7$ (vgl. Tabelle 23). Die Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse sind mit den statistischen Kennwerten der Umweltbewusstseinsstudie des BMU und UBA (2019) vergleichbar.

Die interne Konsistenz der Subskala „Umweltverhalten“ verbessert sich auf $\alpha = 0,731$ im Pretest und $\alpha = 0,667$ im Posttest, wenn das Item „Für meine alltäglichen Wege benutze ich das Fahrrad, öffentliche Verkehrsmittel oder gehe zu Fuß.“ weggelassen wird. Dies ist plausibel, da viele Teilnehmer:innen im ländlichen Raum wohnen, in dem öffentliche Verkehrsmittel nur begrenzt zur Verfügung stehen und spiegelt sich auch in den Schlussbemerkungen der Bürger:innen und Schüler:innen wider, wie folgende Beispiele zeigen:

Bürger:in: „Da ich weit ab von öffentlichen Verkehrsmittel wohne, habe ich einige Fragen negativ beantworten müssen.“

Schüler:in: „Öffis sind in vielen Kleinstädten und Dörfern eine Rarität. Es bleibt kaum eine andere Möglichkeit als das Auto zu nutzen.“

Dennoch wurde das Item beibehalten, da die Verbesserung der internen Konsistenz durch Weglassen des Items, insbesondere im Posttest, nur gering und die Subskala „Umweltverhalten“ ohnehin bereits vergleichsweise kurz ist. In der Umweltbewusstseinsstudie des BMU und UBA (2019) wird die interne Konsistenz der Subskala Umweltverhalten mit $\alpha_{BMU \& UBA} = 0,62$ darüber hinaus als akzeptabel bewertet.

Eine Umformulierung des Items, bei welcher beispielsweise auch Fahrgemeinschaften oder die Vermeidung des Flugverkehrs aufgegriffen werden, wird für zukünftige Studien empfohlen, die (unter anderem) im ländlichen Raum durchgeführt werden.

Ergebnisse zum allgemeinen Umweltbewusstsein:

Die affektiven und kognitiven Umwelteinstellungen der Interventionsgruppe weisen bereits zu Beginn des Projektes hohe Mittelwerte von $M_{Pretest} = 4,269$ (Umweltaffekt) und $M_{Pretest} = 4,306$ (Umweltkognition) auf, welche zwischen Pre- und Posttest auf einem nahezu gleichen Niveau bleiben (Umweltaffekt: $d_{pre/post} = -0,033$, Umweltkognition: $d_{pre/post} = -0,024$, vgl. Tabelle 24, Abbildung 78). Die Mittelwerte der Subskala „Umweltverhalten“ sind für die Interventionsgruppe mit $M_{Pretest} = 3,371$ und $M_{Posttest} = 3,442$ geringer als die Mittelwerte des Umweltaffektes und der Umweltkognition, steigen jedoch leicht vom Pre- zum Posttest an ($d_{pre/post} = 0,071$). Die Unterschiede sind jeweils nicht signifikant (Umweltaffekt: $t(103) = 0,771$, $p = 0,443$, Umweltkognition: $t(103) = 0,548$, $p = 0,585$, Umweltverhalten: $t(103) = -1,314$, $p = 0,192$). Die für den t -Test notwendige Voraussetzung der Normalverteilung der Paardifferenzen der abhängigen Variable kann für die Interventionsgruppe angenommen werden, da $N > 30$ (Bortz & Schuster, 2010).

Tabelle 24: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Allgemeines Umweltbewusstsein“, getrennt nach den Dimensionen, der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.

Dimension	Gruppen- zugehörigkeit	Pretest		Posttest		Differenz
		M	SD	M	SD	$d_{pre/post}$
Umweltaffekt	Interventionsgruppe ($N = 104$)	4,269	0,587	4,236	0,645	-0,033
	Vergleichsgruppe ($N = 14$)	3,786	0,920	3,898	0,897	0,112
Umweltkognition	Interventionsgruppe ($N = 104$)	4,306	0,523	4,282	0,576	-0,024
	Vergleichsgruppe ($N = 14$)	3,786	0,728	3,857	0,802	0,071
Umweltverhalten	Interventionsgruppe ($N = 104$)	3,371	0,724	3,442	0,798	0,071
	Vergleichsgruppe ($N = 14$)	3,143	0,681	3,200	0,642	0,057

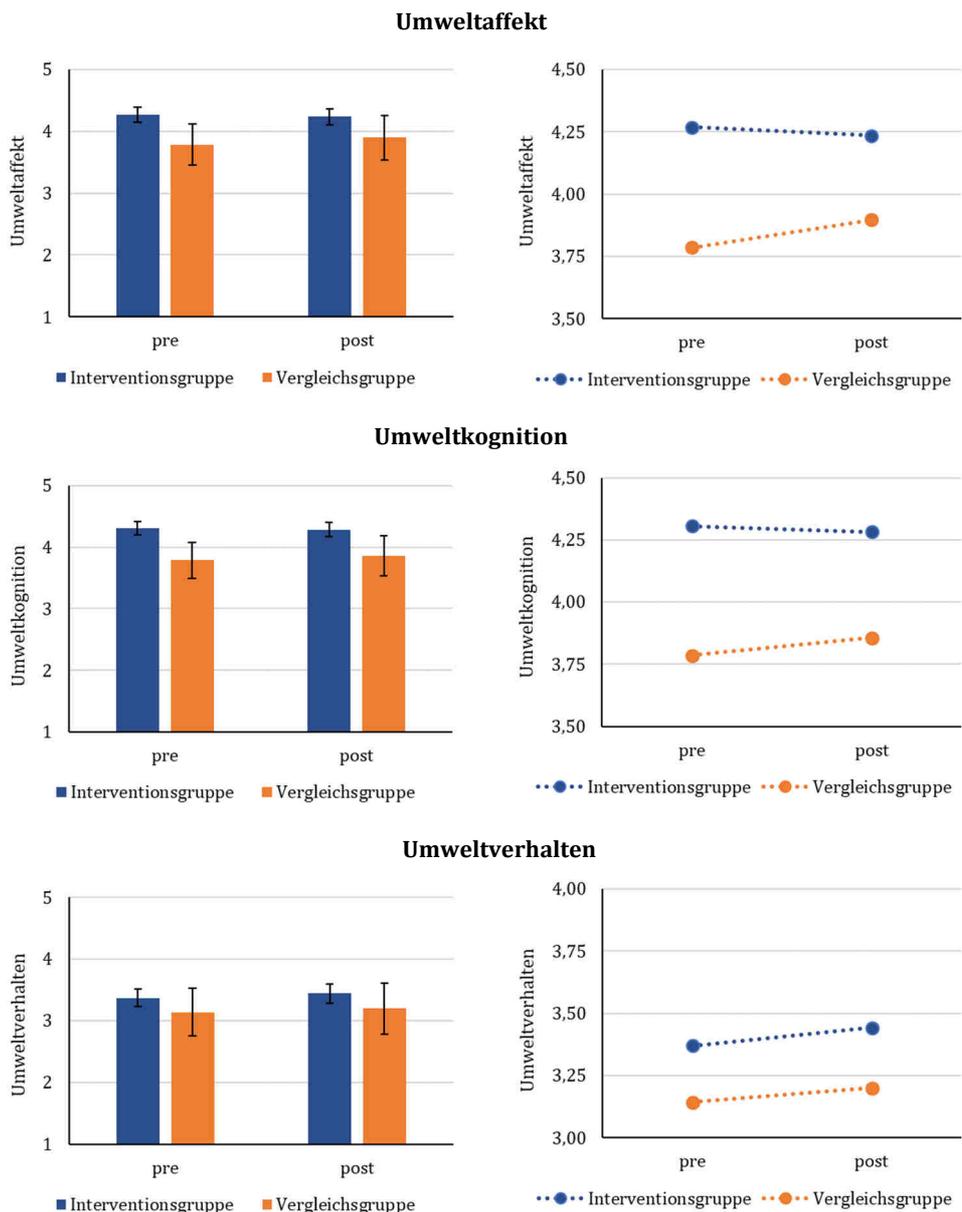


Abbildung 78: Mittleres allgemeines Umweltbewusstsein; getrennt nach den Dimensionen, der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken in den linken Diagrammen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).

Im Gruppenvergleich liegen die Mittelwerte der Interventionsgruppe zu jedem Zeitpunkt und für jede Subskala über den Mittelwerten der Vergleichsgruppe, wobei die Unterschiede für die Dimensionen „Umweltaffekt“ und „Umweltkognition“ zu beiden Testzeitpunkten höher sind als die Unterschiede der Gruppen für die Dimension „Umweltverhalten“ (vgl. Abbildung 78). Im Gegensatz zur Interventionsgruppe erhöhen sich die Mittelwerte der Vergleichsgruppe vom Pre- zum Posttest für alle Subskalen, bleiben jedoch trotzdem deutlich unter dem Niveau der Interventionsgruppe. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Varianzanalyse wider, für welche die folgenden Voraussetzungen geprüft wurden.

Für die Interventionsgruppe kann die Normalverteilung der abhängigen Variable für alle Subskalen für beide Testzeitpunkte mit $N > 30$ erneut angenommen werden. Die abhängige Variable weist für die Vergleichsgruppe im Pre- und Posttest für die Subskala „Umweltaffekt“ gemäß dem Shapiro-Wilk-Test keine Normalverteilung auf ($p < 0,05$), auch die Q-Q-Diagramme deuten auf Abweichungen von der Normalverteilung hin (vgl. Anhang O). Aufgrund der Robustheit der ANOVA gegen eine Verletzung der Voraussetzung der Normalverteilung können die Ergebnisse dennoch interpretiert werden (Salkind, 2010; Schäfer, 2016). Die Homogenität der Fehlervarianzen zwischen den Gruppen ist für jede Subskala gemäß dem Levene-Test für alle Variablen erfüllt ($p > 0,05$), ebenso ist die Homogenität der Kovarianzenmatrizen gemäß dem Box-Test gegeben ($p > 0,05$).

Für die Subskalen „Umweltaffekt“ und „Umweltkognition“ treten signifikante kleine bis mittlere Haupteffekte für den Faktor Gruppenzugehörigkeit auf, was auf Unterschiede zwischen der Interventions- und Vergleichsgruppe über beide Testzeitpunkte hinweg spricht (Umweltaffekt: $F(1,116) = 5,437$, $p = 0,021$, $\eta^2_p = 0,045$, Umweltkognition: $F(1,116) = 9,638$, $p = 0,002$, $\eta^2_p = 0,077$). Für die Subskala „Umweltverhalten“ liegt hingegen kein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Gruppenzugehörigkeit vor ($F(1,116) = 1,388$, $p = 0,241$). Ebenso werden für alle Subskalen keine signifikanten Haupteffekte für den Innersubjektfaktor Zeit festgestellt (Umweltaffekt: $F(1,116) = 0,411$, $p = 0,523$, Umweltverhalten: $F(1,116) = 0,143$, $p = 0,706$, Umweltkognition: $F(1,116) = 0,702$, $p = 0,404$). Darüber hinaus treten für keine Subskala statistisch signifikante Interaktionseffekte auf, die Teilnahme am Citizen Science-Projekt hat damit entsprechend der Testergebnisse keinen Einfluss auf die Veränderung des Umweltaffektes ($F(1,116) = 1,379$, $p = 0,243$), der Umweltkognition ($F(1,116) = 0,581$, $p = 0,448$) und des Umweltverhaltens ($F(1,116) = 0,008$, $p = 0,927$). Die Ergebnisse deuten insgesamt darauf hin, dass Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes bereits vor der Intervention ein höheres Umweltbewusstsein aufweisen, das über die Teilnahme hinweg relativ stabil bleibt.

Ergebnisse zum themenspezifischen Umweltbewusstsein:

Auch beim Konstrukt „themenspezifisches Umweltbewusstsein“ sind die Mittelwerte der Interventionsgruppe zu den Subskalen „themenspezifischer Umweltaffekt“ ($M_{Pretest} = 4,060$, $M_{Posttest} = 4,093$) und „themenspezifische Umweltkognition“ ($M_{Pretest} = 4,194$, $M_{Posttest} = 4,273$) höher als die Mittelwerte der Subskala „themenspezifisches Umweltverhalten“ ($M_{Pretest} = 3,315$, $M_{Posttest} = 3,416$). Die themenspezifischen Umweltkenntnisse der am Citizen Science-Projekt teilnehmenden Personen sind im Mittel ($M_{Pretest} = 3,022$, $M_{Posttest} = 3,743$) ebenfalls geringer als die themenspezifischen, affektiven und kognitiven Einstellungen. Für die Interventionsgruppe steigen alle Mittelwerte vom Pre- zum Posttest an, wobei der Anstieg für die Skala „themenspezifische Umweltkenntnisse“ am höchsten ist ($d_{pre/post} = 0,721$) (vgl. Tabelle 25, Abbildung 79). Die Unterschiede sind für die Subskalen „themenspezifisches Umweltverhalten“ ($t(100) = -2,229$, $p = 0,028$, $d = -0,222$) und „themenspezifische Umweltkenntnisse“ ($t(103) = -9,665$, $p < 0,001$, $d = -0,948$) signifikant, jedoch nicht für die Subskalen

„themenspezifischer Umweltaffekt“ ($t(103) = -0,679, p = 0,499$) und „themenspezifische Umweltkognition“ ($t(103) = -1,687, p = 0,095$).

Die Mittelwerte der Interventionsgruppe liegen für die Subskalen „themenspezifischer Umweltaffekt“, „themenspezifische Umweltkognition“ und „themenspezifische Umweltkenntnisse“ darüber hinaus deutlich über den Mittelwerten der Vergleichsgruppe, welche für die genannten Subskalen vom Pre- zum Posttest jeweils leicht ansteigen. Lediglich für die Subskala „Umweltverhalten“ liegt der Mittelwert der Vergleichsgruppe beim Pretest zunächst über dem Mittelwert der Interventionsgruppe, jedoch sinkt der Wert für die Vergleichsgruppe, während er für die Interventionsgruppe steigt.

Dies zeigt sich auch in der Varianzanalyse, welche einen signifikanten Interaktionseffekt der Faktoren Gruppenzugehörigkeit und Zeit für die Subskala „Themenspezifisches Umweltverhalten“ aufweist ($F(1,113) = 7,114, p = 0,009, \eta^2_p = 0,059$). Weitere signifikante Interaktionseffekte liegen nicht vor (Themenspezifischer Umweltaffekt: $F(1,116) = 0,216, p = 0,643$, Themenspezifische Umweltkognition: $F(1,116) = 0,035, p = 0,852$, Themenspezifische Umweltkenntnisse: $F(1,116) = 2,153, p = 0,145$). Alle Voraussetzungen für die Varianzanalysen sind jeweils für alle Subskalen erfüllt (Levene-Tests: $p > 0,05$; Box-Tests: $p > 0,05$; Normalverteilung für die Interventionsgruppe kann angenommen werden, da $N > 30$; Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung der Normalverteilung für die Vergleichsgruppe: $p > 0,05$, vgl. Anhang O). Für die Subskala „themenspezifische Umweltkenntnisse“ liegen des Weiteren ein signifikanter Haupteffekt des Innersubjektfaktors Zeit ($F(1,116) = 26,623, p < 0,001, \eta^2_p = 0,187$) und ein signifikanter Haupteffekt des Zwischensubjektfaktors Gruppe ($F(1,116) = 5,196, p = 0,024, \eta^2_p = 0,043$) vor. Demnach sind die Umweltkenntnisse der Interventionsgruppe über alle Testzeitpunkte hinweg signifikant höher als die der Vergleichsgruppe und beide Gruppen zeigen eine signifikante Verbesserung der Umweltkenntnisse. Weitere signifikante Haupteffekte liegen nicht vor (vgl. Anhang O).

Tabelle 25: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Themenspezifisches Umweltbewusstsein“, getrennt nach den Dimensionen, der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.

Dimension	Gruppenzugehörigkeit	Pretest		Posttest		Differenz
		M	SD	M	SD	$d_{pre/post}$
Themenspezifischer Umweltaffekt	Interventionsgruppe ($N = 104$)	4,060	0,628	4,093	0,599	0,033
	Vergleichsgruppe ($N = 14$)	3,732	0,762	3,830	0,814	0,098
Themenspezifische Umweltkognition	Interventionsgruppe ($N = 104$)	4,194	0,538	4,273	0,545	0,079
	Vergleichsgruppe ($N = 14$)	3,929	0,682	3,982	0,753	0,053
Themenspezifisches Umweltverhalten	Interventionsgruppe ($N = 101$)	3,315	0,590	3,416	0,653	0,101
	Vergleichsgruppe ($N = 14$)	3,379	0,512	3,143	0,455	-0,236
Themenspezifische Umweltkenntnisse	Interventionsgruppe ($N = 104$)	3,022	0,822	3,743	0,687	0,721
	Vergleichsgruppe ($N = 14$)	2,741	0,998	3,143	0,856	0,402

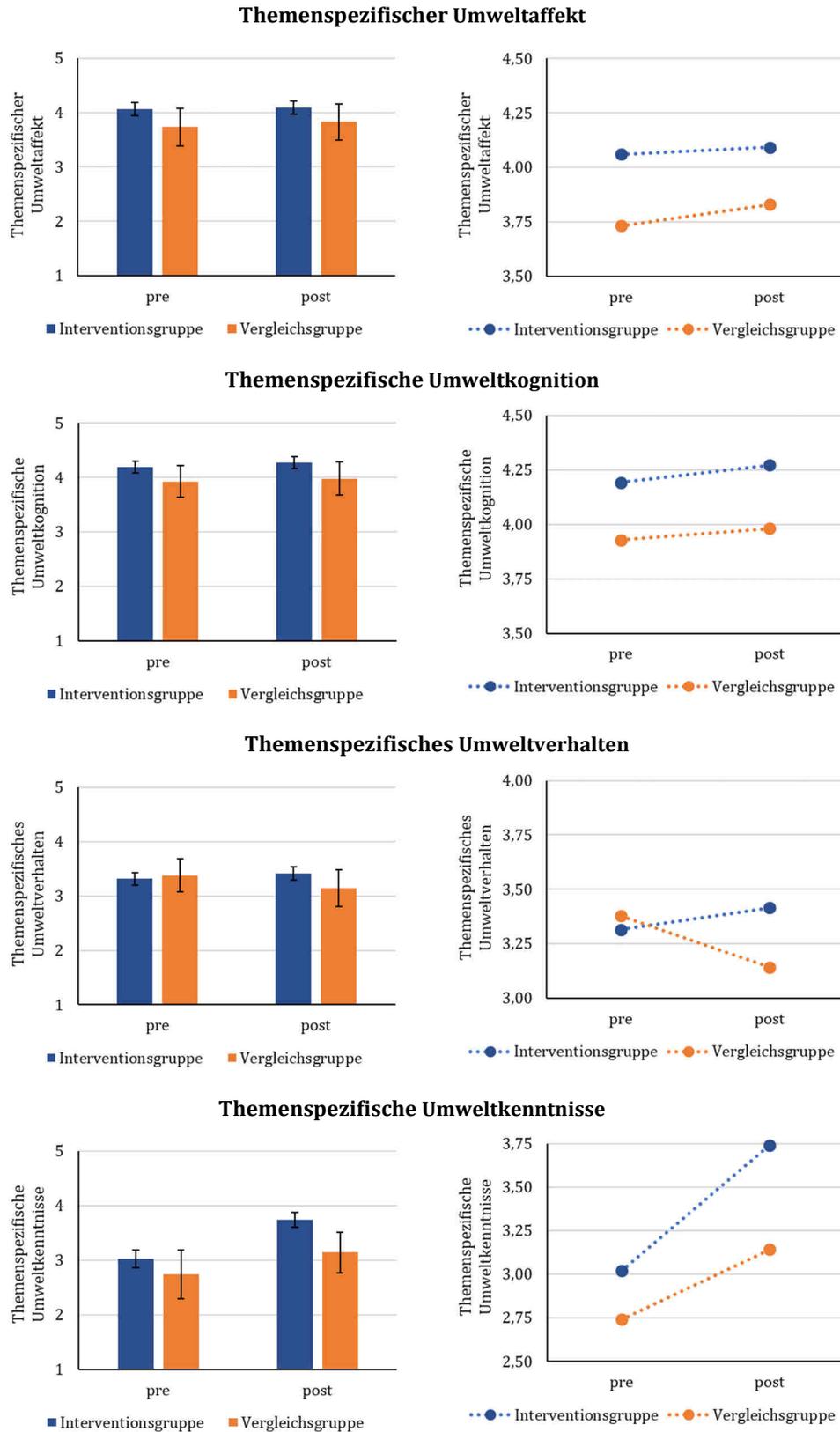


Abbildung 79: Mittleres themenspezifisches Umweltbewusstsein; getrennt nach den Dimensionen, der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken in den linken Diagrammen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).

Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse:

Die Wirksamkeit der Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt als Bürgerforscher:in oder Forschungspate/-patin auf das allgemeine und themenspezifische Umweltbewusstsein wurde anhand von 3 Subskalen (Umweltaffekt, -kognition und -verhalten) zum allgemeinen Umweltbewusstsein und 4 Subskalen zu den kognitiven und affektiven Einstellungen, dem Umweltverhalten und den Umweltkenntnissen in Bezug auf den Gewässerschutz untersucht. Die Subskalen weisen jeweils eine akzeptable interne Konsistenz auf, lediglich für die Subskala „Umweltverhalten“ sind Anpassungen für den ländlichen Raum empfehlenswert (vgl. Tabelle 23, S. 208). Für die Auswertung der Daten wurden neben deskriptiver Statistik *t*-Tests und Varianzanalysen durchgeführt.

Wie erwartet sind die allgemeinen und themenspezifischen, affektiven und kognitiven Einstellungen der Interventionsgruppe recht stabil und weisen nur geringe, statistisch nicht signifikante Unterschiede zwischen Pre- und Posttest auf ($|d_{pre/post}| \leq 0,079$, vgl. Tabelle 24, S. 209 und Tabelle 25, S. 212). Das allgemeine Umweltverhalten der Interventionsgruppe steigt ebenfalls nur leicht vom Pre- zum Posttest ($d_{pre/post} = 0,071$), der Unterschied ist nicht statistisch signifikant ($t(103) = -1,314$, $p = 0,192$). Im Gegensatz dazu kann eine signifikante Verbesserung des themenspezifischen Umweltverhaltens ($d_{pre/post} = 0,101$, $t(100) = -2,229$, $p = 0,028$, $d = -0,222$) und der themenspezifischen Umweltkenntnisse ($d_{pre/post} = 0,721$, $t(103) = -9,665$, $p < 0,001$, $d = -0,948$) der Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes festgestellt werden. Dies gibt erste Hinweise auf die Korrektheit der aufgestellten Hypothesen:

UB-H1: „Die Intervention (Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin oder Bürgerforscher:in) ist nicht in der Lage, das allgemeine Umweltbewusstsein der Teilnehmenden zu verändern“

UB-H2: „Die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt führt zu einer Verbesserung des Umweltverhaltens in Bezug auf den Gewässerschutz.“

UB-H3: „Die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt führt zu höheren Umweltkenntnissen zum Thema Gewässerschutz.“

Eine finale Hypothesenentscheidung kann jedoch erst unter Berücksichtigung der Vergleichsgruppe getroffen werden, welche nicht an dem Citizen Science-Projekt teilgenommen hat. Hierzu wurde für jede Subskala eine Mixed ANOVA durchgeführt. Ein signifikanter Interaktionseffekt wurde für die Subskala „Themenspezifisches Umweltverhalten“ festgestellt ($F(1,113) = 7,114$, $p = 0,009$, $\eta^2_p = 0,059$), weitere signifikante Interaktionseffekte liegen jedoch nicht vor. Entsprechend dieser Ergebnisse hat die Teilnahme am Citizen Science-Projekt lediglich einen Einfluss auf die Veränderung des themenspezifischen Umweltverhaltens. Um

Hypothese UB-H2 abschließend zu verifizieren, bedarf es jedoch einer größeren, repräsentativen Vergleichsgruppe, um auszuschließen, dass Veränderungen des Umweltverhaltens nicht auf Störfaktoren wie beispielsweise eine allgemeine Entwicklung und Sensibilisierung der Gesellschaft in Bezug auf den Umweltschutz zurückzuführen sind.

Die Hypothesen UB-H1 und UB-H3 können ebenfalls nicht abschließend verifiziert oder falsifiziert werden, da die Sensitivität der Varianzanalysen zu gering ist, um die Nullhypothesen, welche von keiner Veränderung ausgehen, anzunehmen. Werden eine Teststärke von $(1-\beta) = 0,8$ und ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ vorausgesetzt, so lassen sich mit der gegebenen Stichprobengröße von maximal $N = 118$ Personen lediglich Interaktionseffekte mit einer mindestens mittleren Effektstärke von $\eta^2_p > 0,064$ zuverlässig nachweisen, wie eine Analyse der Sensitivität in G*Power zeigt (Faul et al., 2007; Umrechnung der Effektstärken nach Lenhard & Lenhard, 2016). Darüber hinaus ist die Stichprobe der Vergleichsgruppe zu klein, als dass sie als repräsentativ für die Gesamtbevölkerung bewertet werden kann.

Die Ergebnisse geben damit zwar erste Hinweise darauf, dass eine Steigerung des Umweltverhaltens und der Kenntnisse in Bezug auf die Umweltproblematik, die in einem Citizen Science-Projekt fokussiert wird, durch Citizen Science möglich ist. Um diese These final anzunehmen, ist jedoch weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

5.4.2. Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes im Kontext der naturwissenschaftlichen Schulbildung

Reliabilitätsanalyse:

In Tabelle 26 (S. 216) werden die Skalenreliabilitäten (Cronbachs α) der Konstrukte im Kontext der naturwissenschaftlichen Schulbildung für beide Testzeitpunkte aufgelistet. Die Skalen und Subskalen für die Konstrukte „Motivationale Regulation“, „Interesse an naturwissenschaftlichen Themen“, „Selbstwirksamkeitserwartung“ und „Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften“ weisen mit $0,744 \geq \alpha \geq 0,921$ jeweils akzeptable bis hohe interne Konsistenzen auf. Daher wurde das arithmetische Mittel als Testwert für jede (Sub-)Skala ohne Ausschluss von Items gebildet. Lediglich die internen Konsistenzen der Subskalen „Einfachheit des Wissens“ ($\alpha_{\text{Pretest}} = 0,662$, $\alpha_{\text{Posttest}} = 0,564$), „Zweck der Naturwissenschaften“ ($\alpha_{\text{Pretest}} = 0,648$) und „Kreativität von Naturwissenschaftler:innen“ ($\alpha_{\text{Pretest}} = 0,639$) des Konstruktes „Verständnis der Natur der Naturwissenschaften“ liegen unter dem von Schmitt (1996) vorgeschlagenen Schwellenwert von $\alpha = 0,7$. Für die Subskalen „Einfachheit des Wissens“ und „Kreativität von Naturwissenschaftler:innen“ kann für keinen Testzeitpunkt eine Verbesserung der internen Konsistenz erreicht werden, wenn Items weggelassen werden (vgl. Anhang O). Für die Subskala „Zweck der Naturwissenschaften“ kann die interne Konsistenz im Pretest zwar durch das Weglassen des Items „Ziel naturwissenschaftlicher Theorien ist es, einem Teil menschlicher Erfahrungen eine Ordnung zu geben.“ verbessert werden ($\alpha = 0,682$), gleichzeitig verschlechtert sich jedoch die interne Konsistenz im Posttest ($\alpha = 0,793$). Daher wurde das Item

beibehalten. Da die interne Konsistenz der Subskalen „Zweck der Naturwissenschaften“ und „Kreativität von Naturwissenschaftler:innen“ zumindest in den Posttests jeweils über dem Schwellenwert von $\alpha = 0,7$ liegen, werden die Subskalen in die Auswertung einbezogen (Schmitt, 1996). Aufgrund der geringen internen Konsistenz der Subskala „Einfachheit des Wissens“ im Pre- und Posttest wird diese von der Auswertung ausgeschlossen. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den von Kremer (2010) in verschiedenen Teilstudien dargestellten internen Reliabilitäten der Subskalen. Auch hier wies die Subskala „Einfachheit des Wissens“ eine geringe interne Konsistenz auf und wurde teilweise ausgeschlossen (Kremer & Mayer, 2013).

Tabelle 26: Interne Skalenreliabilität der (Sub-)Skalen zu Konstrukten mit Bezug zur naturwissenschaftlichen Schulbildung (Cronbachs α) für beide Messzeitpunkte ($\alpha < 0,7$ rot markiert).

Konstrukt	Dimension	Item-Anzahl	Cronbachs α	
			Pretest	Posttest
Verständnis der Natur der Naturwissenschaften	Herkunft des Wissens	5	0,730	0,778
	Sicherheit des Wissens	7	0,732	0,831
	Rechtfertigung des Wissens	9	0,713	0,742
	Entwicklung des Wissens	8	0,809	0,887
	Einfachheit des Wissens	5	0,662	0,564
	Zweck der Naturwissenschaften	5	0,648	0,798
	Kreativität von Naturwissenschaftler:innen	5	0,639	0,738
	Alle Dimensionen	44	0,868	0,915
Motivationale Regulation	Intrinsische Regulation	5	0,920	0,894
	Identifizierte Regulation	4	0,892	0,884
	Introjierte Regulation	4	0,787	0,782
	Externale Regulation	4	0,754	0,744
Interesse an naturwissenschaftlichen Themen	-	7	0,914	0,921
Selbstwirksamkeitserwartung	Allgemeine Selbstwirksamkeit	3	0,874	0,816
	Schul-/Fachbezogene Selbstwirksamkeit	7	0,855	0,858
Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften	-	6	0,851	0,819

Ergebnisse zum Verständnis der Natur der Naturwissenschaften:

Das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften der Schüler:innen wurde anhand der sechs nach der Reliabilitätsanalyse übrigbleibenden Subskalen und anhand der Gesamtskala untersucht. In Abbildung 80 und Tabelle 27 sind die Ergebnisse zur Gesamtskala dargestellt, eine Übersicht der Ergebnisse zu den Subskalen findet sich in Anhang P.

Mit Mittelwerten von $M_{Pretest} = 4,045$ und $M_{Posttest} = 4,091$ ist das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften (Gesamtskala) der Schüler:innen, die als Forschungspat:innen am Citizen Science-Projekt teilgenommen haben, im Allgemeinen hoch, weist allerdings nur eine leichte

Verbesserung zwischen Pre- und Posttest auf ($d_{pre/post} = 0,046$). Die Unterschiede sind nicht statistisch signifikant, wie ein t -Test zeigt ($t(50) = -0,842, p = 0,404$).

Die Vergleichsgruppe weist zunächst ein leicht geringeres Verständnis der Natur der Naturwissenschaften auf ($M_{Pretest} = 3,997$), welches über die Zeit jedoch im Vergleich zur Interventionsgruppe stärker ansteigt ($M_{Posttest} = 4,237, d_{pre/post} = 0,240$). Mithilfe einer Varianzanalyse werden signifikante Interaktions- und Haupteffekte getestet. Die Voraussetzungen für die Varianzanalyse für die Gesamtskala sind dabei erfüllt (Levene-Test: $p > 0,05$ für beide Testzeitpunkte; Box-Test: $p > 0,05$; Normalverteilung für die Interventionsgruppe kann angenommen werden, da $N > 30$; Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung der Normalverteilung für die Vergleichsgruppe: $p > 0,05$, vgl. Anhang O). Es liegt jedoch kein statistisch signifikanter Interaktionseffekt vor ($F(1,58) = 1,968, p = 0,166$). Die Gruppenzugehörigkeit hat demnach keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Veränderung des allgemeinen Verständnisses der Natur der Naturwissenschaften. Da kein signifikanter Haupteffekt des Faktors Gruppe vorliegt ($F(1,58) = 0,178, p = 0,675$), hat die Gruppenzugehörigkeit auch über alle Zeitpunkte hinweg keinen Einfluss auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften.

Zwischen Pre- und Posttest liegt über beide Gruppen hinweg jedoch eine statistisch signifikante Verbesserung des Verständnisses der Natur der Naturwissenschaften vor, wie der signifikante Haupteffekt mittlerer Größe des Faktors Zeit zeigt ($F(1,58) = 4,305, p = 0,042, \eta^2_p = 0,069$).

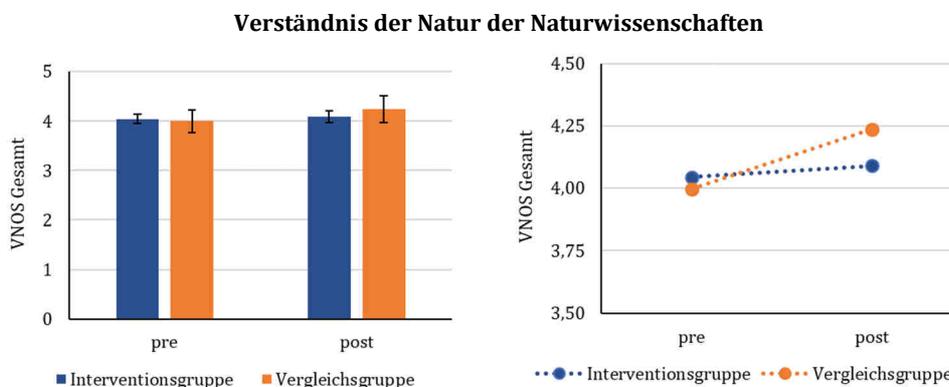


Abbildung 80: Mittleres Verständnis der Natur der Naturwissenschaften; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).

Tabelle 27: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Gesamtskala „Verständnis der Natur der Naturwissenschaften“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.

Gruppenzugehörigkeit	Pretest		Posttest		Differenz
	M	SD	M	SD	$d_{pre/post}$
Interventionsgruppe ($N = 51$)	4,045	0,316	4,091	0,427	0,046
Vergleichsgruppe ($N = 9$)	3,997	0,445	4,237	0,287	0,240

Werden die Dimensionen des Verständnisses der Natur der Naturwissenschaften im Detail betrachtet, ergeben sich folgende Ergebnisse (vgl. Anhang P).

Die höchsten Mittelwerte der Interventionsgruppe finden sich für Pre- und Posttest für die Dimension „Entwicklung des Wissens“ ($M_{Pretest} = 4,470$ und $M_{Posttest} = 4,518$). Die Dimension „Kreativität von Naturwissenschaftler:innen“ weist mit $M_{Pretest} = 3,396$ und $M_{Posttest} = 3,777$ die geringsten Mittelwerte auf. Die Differenzen zwischen den Mittelwerten für Pre- und Posttest der Interventionsgruppe bewegen sich zwischen $d_{pre/post} = -0,013$ (Rechtfertigung des Wissens) und $d_{pre/post} = 0,381$ (Kreativität von Naturwissenschaftler:innen), wobei sich lediglich die Dimension „Rechtfertigung des Wissens“ im Mittel leicht verschlechtert, während für alle weiteren Dimensionen erhöhte Mittelwerte im Posttest vorliegen (vgl. Anhang P). Die Unterschiede für die Dimensionen „Herkunft des Wissens“, „Sicherheit des Wissens“, „Entwicklung des Wissens“ und „Zweck der Naturwissenschaften“ sind dabei sehr gering ($d_{pre/post} \leq 0,085$). Lediglich das Verständnis der Schüler:innen der Interventionsgruppe zur Kreativität von Naturwissenschaftler:innen steigt stark an ($d_{pre/post} = 0,381$). Für diese Subskala liegt ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen Pre- und Posttest vor ($t(51) = -4,306$, $p < 0,001$, $d = -0,597$). Für die fünf weiteren in der Auswertung berücksichtigten Subskalen treten für die Interventionsgruppe entsprechend der Ergebnisse von t - und Wilcoxon-Tests keine signifikanten Unterschiede auf (vgl. Anhang O, für die Subskala „Entwicklung des Wissens“ wurde aufgrund der Verletzung der Voraussetzung der Normalverteilung ein Wilcoxon-Test durchgeführt).

In einem zweiten Schritt der Auswertung wurden ergänzend die Daten der Vergleichsgruppe herangezogen und mithilfe von Varianzanalysen mit den Daten der Interventionsgruppe gemeinsam ausgewertet. Für die Subskalen „Herkunft des Wissens“, „Rechtfertigung des Wissens“, „Zweck der Naturwissenschaften“ und „Kreativität von Naturwissenschaftler:innen“ sind die Voraussetzungen für die Varianzanalyse jeweils mit Ausnahme der Normalverteilung der abhängigen Variable, auf welche die ANOVA robust reagiert, erfüllt (vgl. Anhang O, Salkind, 2010; Schäfer, 2016). Für die Subskala „Entwicklung des Wissens“ dürfen nur Haupteffekte interpretiert werden, da die Voraussetzung der Gleichheit der Kovarianzmatrizen nicht erfüllt ist (Box-Test: $p < 0,05$). Für diese Subskalen liegen jeweils, sofern interpretierbar, keine statistisch signifikanten Interaktionseffekte und keine statistisch signifikanten Haupteffekte des Zwischensubjektfaktors Gruppe vor (vgl. Anhang O). Die Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin hat damit weder einen Einfluss auf das Verständnis bezüglich der genannten Dimensionen über die Zeit hinweg, noch auf die Veränderung des Verständnisses. Ein signifikanter Haupteffekt des Innersubjektfaktors Zeit tritt lediglich für die Subskala „Kreativität von Naturwissenschaftler:innen“ auf ($F(1,59) = 12,084$, $p < 0,001$, $\eta^2_p = 0,170$). Über beide Gruppen hinweg ist mit der Zeit eine deutliche Verbesserung des Verständnisses zu dieser Dimension zu beobachten.

Ergebnisse zur motivationalen Regulation in naturwissenschaftlichen Fächern:

Der Selbstbestimmungsindex (*SDI*) kann Werte zwischen -12 und 12 annehmen, wobei positive Werte ein Maß für die Selbstbestimmung und negative Werte ein Maß für die Kontrolle darstellen. Insgesamt liegen für die Schüler:innen der Interventions- und Vergleichsgruppe im Mittel positive Werte vor, die Selbstbestimmung überwiegt damit der Kontrolle (vgl. Tabelle 28, Abbildung 81). Die Schüler:innen, die am Citizen Science-Projekt teilgenommen haben, weisen mit $M_{Pretest} = 4,182$ und $M_{Posttest} = 3,967$ für beide Testzeitpunkte jeweils geringere Mittelwerte für das Maß der Selbstbestimmung auf als die Schüler:innen der Vergleichsgruppe ($M_{Pretest} = 5,917$, $M_{Posttest} = 5,594$). Das Maß der Selbstbestimmung nimmt sowohl für die Interventionsgruppe ($d_{pre/post} = -0,215$) als auch für die Vergleichsgruppe ($d_{pre/post} = -0,323$) vom Pre- zum Posttest ab. Die Unterschiede sind jeweils nicht signifikant (Interventionsgruppe: $t(51) = 0,496$, $p = 0,622$, Vergleichsgruppe: $t(8) = 0,335$, $p = 0,747$).

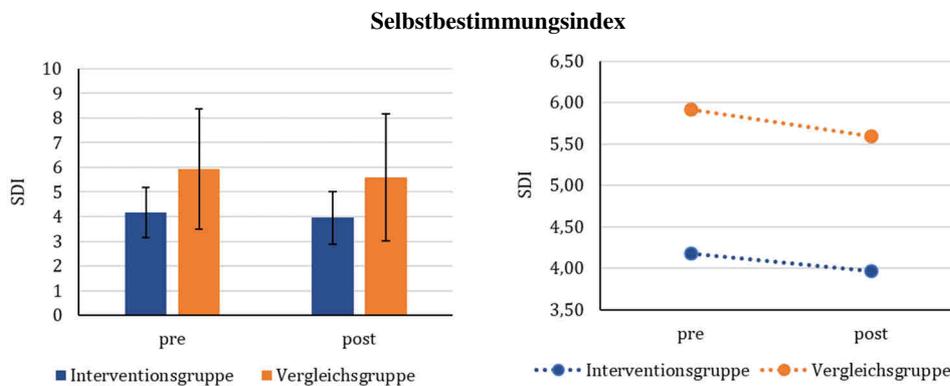


Abbildung 81: Mittlerer Selbstbestimmungsindex (*SDI*); getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).

Tabelle 28: Mittelwerte (*M*) und Standardabweichungen (*SD*) für den berechneten Selbstbestimmungsindex (*SDI*) für die Skala „Motivationale Regulation“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.

Gruppenzugehörigkeit	Pretest		Posttest		Differenz
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	$d_{pre/post}$
Interventionsgruppe (<i>N</i> = 52)	4,182	3,452	3,967	3,864	-0,215
Vergleichsgruppe (<i>N</i> = 9)	5,917	4,763	5,594	3,700	-0,323

Um den Einfluss der Teilnahme am Citizen Science-Projekt auf die Veränderung der motivationalen Regulation zu untersuchen, wurde eine Mixed ANOVA durchgeführt. Die Voraussetzungen für die Varianzanalyse sind erfüllt (Levene-Tests: $p > 0,05$; Box-Test: $p > 0,05$; Normalverteilung für die Interventionsgruppe kann angenommen werden, da $N > 30$; Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung der Normalverteilung für die Vergleichsgruppe: $p > 0,05$, vgl. Anhang 0). Es liegen weder ein signifikanter Interaktionseffekt ($F(1,59) = 0,009$, $p = 0,923$) noch signifikante Haupteffekte für den Faktor Zeit ($F(1,59) = 0,232$, $p = 0,632$) oder den Faktor Gruppenzugehörigkeit ($F(1,59) = 1,855$, $p = 0,178$) vor. Die Teilnahme am Monitoring hat entsprechend der

Ergebnisse keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Veränderung der motivationalen Regulation der Schüler:innen.

Werden die Subskalen der motivationalen Regulation fokussiert (vgl. Anhang Q), so ergibt sich ein signifikanter Interaktionseffekt für die Dimension „Introjierte Regulation“ ($F(1,59) = 13,745, p < 0,001, \eta^2_p = 0,189$). Während die introjierte Regulation der Vergleichsgruppe als Form der extrinsischen Regulation vom Pre- zum Posttest stark ansteigt ($d_{pre/post} = 1,000$), bleibt der Grad der introjierten Regulation der Schüler:innen, die am Citizen Science-Projekt teilgenommen haben, auf einem fast gleichbleibenden Niveau ($d_{pre/post} = 0,034$). Weitere signifikante Interaktionseffekte liegen nicht vor (vgl. Anhang O).

Ergebnisse zum Interesse an naturwissenschaftlichen Themen:

Das Interesse an naturwissenschaftlichen Themen der Schüler:innen, die am Citizen Science-Projekt teilgenommen haben, ist bereits zu Beginn deutlich geringer als das Interesse der Vergleichsgruppe (Interventionsgruppe: $M_{pretest} = 3,654$, Vergleichsgruppe: $M_{pretest} = 4,161$). Bei beiden Gruppen verändert sich das Interesse zwischen Pre- und Posttest im Mittel nur gering. Während es für die Interventionsgruppe leicht steigt ($d_{pre/post} = 0,044$), sinkt es bei der Vergleichsgruppe ($d_{pre/post} = -0,054$) (vgl. Abbildung 82, Tabelle 29). Die Unterschiede sind jeweils nicht signifikant, wie Wilcoxon-Tests ergeben, welche aufgrund der Verletzung der Voraussetzung der Normalverteilung der Paardifferenzen bei der Vergleichsgruppe durchgeführt wurden (Interventionsgruppe: $z = -0,702, p = 0,482$, Vergleichsgruppe: $z = -0,736, p = 0,461$).

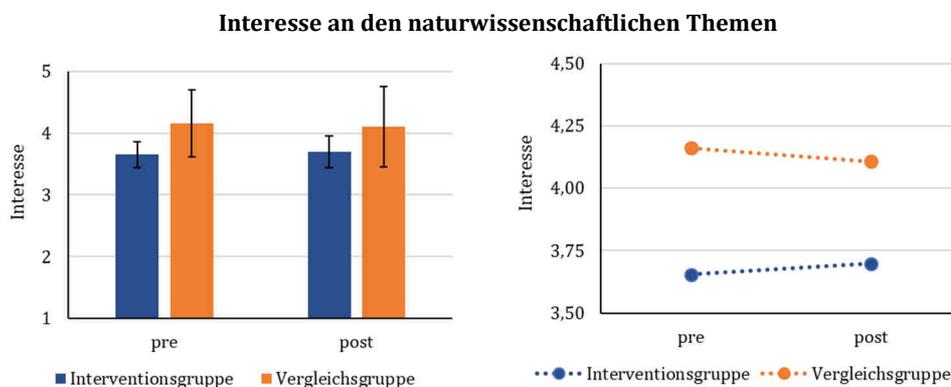


Abbildung 82: Mittleres Interesse an den naturwissenschaftlichen Fächern; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).

Tabelle 29: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Interesse“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.

Gruppenzugehörigkeit	Pretest		Posttest		Differenz
	M	SD	M	SD	$d_{pre/post}$
Interventionsgruppe ($N = 52$)	3,654	0,755	3,698	0,929	0,044
Vergleichsgruppe ($N = 83$)	4,161	0,806	4,107	0,825	-0,054

³ Ein starker Ausreißer wurde von der Analyse ausgeschlossen (vgl. Anhang O).

Die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse sind mit Ausnahme der Gleichheit der Kovarianzenmatrizen (Box-Test: $p < 0,05$) erfüllt, daher können nur Haupteffekte interpretiert werden (Levene-Tests: $p > 0,05$; Normalverteilung für die Interventionsgruppe kann angenommen werden, da $N > 30$; Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung der Normalverteilung für die Vergleichsgruppe: $p > 0,05$, vgl. Anhang O). Signifikante Haupteffekte liegen weder für den Faktor Zeit ($F(1,58) = 0,002$, $p = 0,966$) noch für den Faktor Gruppenzugehörigkeit ($F(1,58) = 2,331$, $p = 0,132$) vor.

Ergebnisse zur allgemeinen und schul-/fachbezogenen Selbstwirksamkeit:

Die allgemeine Selbstwirksamkeit der Interventionsgruppe verändert sich vom Pre- zum Posttest ebenfalls nur geringfügig ($d_{pre/post} = 0,077$), während die allgemeine Selbstwirksamkeit der Vergleichsgruppe deutlich ansteigt ($d_{pre/post} = 0,416$) (vgl. Tabelle 30, Abbildung 83). Die Unterschiede zwischen Pre- und Posttest sind jeweils nicht statistisch signifikant (Interventionsgruppe: $t(51) = -0,888$, $p = 0,379$, Vergleichsgruppe: $t(7) = -1,279$, $p = 0,242$).

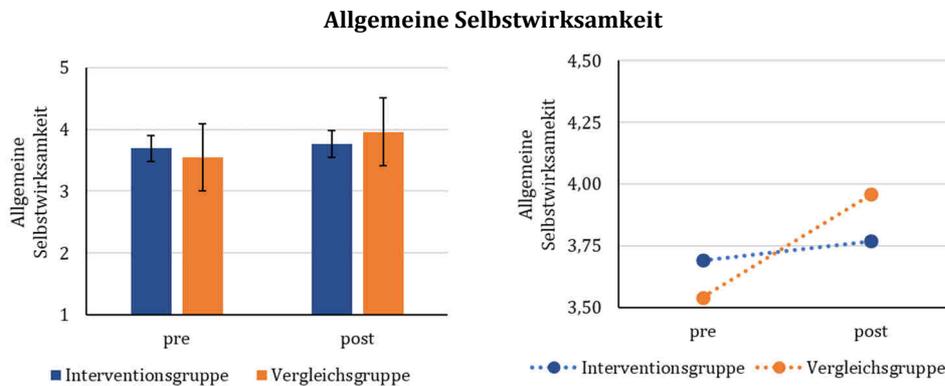


Abbildung 83: Mittlere allgemeine Selbstwirksamkeit; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).

Tabelle 30: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Allgemeine Selbstwirksamkeit“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.

Gruppenzugehörigkeit	Pretest		Posttest		Differenz
	M	SD	M	SD	$d_{pre/post}$
Interventionsgruppe ($N = 52$)	3,692	0,746	3,769	0,821	0,077
Vergleichsgruppe ($N = 8^4$)	3,542	0,890	3,958	0,330	0,416

Da die Gleichheit der Fehlervarianzen (Levene-Tests: $p < 0,05$ für den Pretest) und der Kovarianzenmatrizen (Box-Test: $p < 0,05$) nicht gegeben ist, werden die Ergebnisse der Varianzanalyse nicht interpretiert (vgl. Anhang O).

⁴ Ein starker Ausreißer wurde von der Analyse ausgeschlossen (vgl. Anhang O).

Neben der allgemeinen Selbstwirksamkeit wurde die schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit in Bezug auf die naturwissenschaftlichen Fächer untersucht (vgl. Abbildung 84, Tabelle 31).

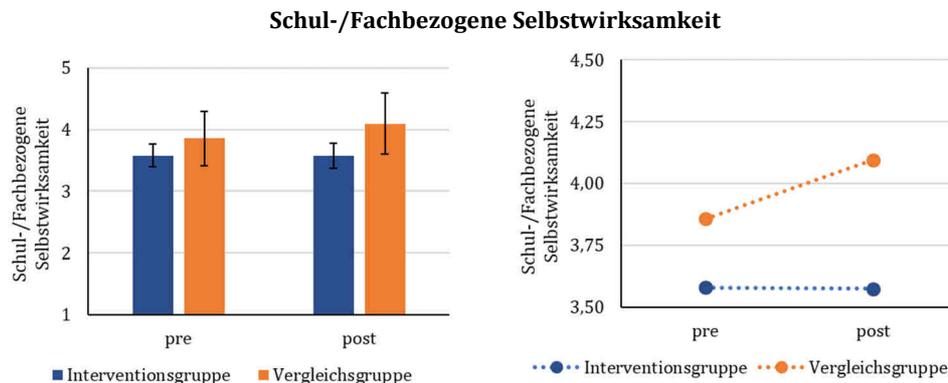


Abbildung 84: Mittlere schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).

Tabelle 31: Mittelwerte (*M*) und Standardabweichungen (*SD*) zur Skala „Schul-/Fachbezogene Selbstwirksamkeit“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.

Gruppenzugehörigkeit	Pretest		Posttest		Differenz
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	$d_{pre/post}$
Interventionsgruppe (<i>N</i> = 51 ⁵)	3,580	0,606	3,574	0,766	-0,006
Vergleichsgruppe (<i>N</i> = 9)	3,857	0,937	4,095	0,490	0,238

Die schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit der Schüler:innen, die am Citizen Science Projekt teilgenommen haben, ist im Pre- und Posttest im Mittel vergleichsweise gering und relativ konstant ($M_{Pretest} = 3,580$, $M_{Posttest} = 3,574$, $d_{pre/post} = -0,006$). Die Vergleichsgruppe weist bereits zu Beginn höhere Mittelwerte als die Interventionsgruppe auf, welche zum Posttest deutlich ansteigen ($M_{Pretest} = 3,857$, $M_{Posttest} = 4,095$, $d_{pre/post} = 0,238$). Die Unterschiede sind jeweils nicht statistisch signifikant (Interventionsgruppe: $t(50) = 0,062$, $p = 0,951$, Vergleichsgruppe: $t(8) = -0,941$, $p = 0,374$).

Da die Voraussetzungen erfüllt sind, wurde eine Mixed ANOVA durchgeführt (Levene-Tests: $p > 0,05$; Box-Test: $p > 0,05$; Normalverteilung für die Interventionsgruppe kann angenommen werden, da $N > 30$; Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung der Normalverteilung für die Vergleichsgruppe: $p > 0,05$, vgl. Anhang O). Es liegen jedoch weder ein statistisch signifikanter Interaktionseffekt ($F(1,58) = 1,036$, $p = 0,313$) noch signifikante Haupteffekte des Faktors Zeit ($F(1,58) = 0,943$, $p = 0,335$) oder des Faktors Gruppenzugehörigkeit ($F(1,58) = 3,221$, $p = 0,078$) vor. Entsprechend der Ergebnisse der Varianzanalyse hat die Teilnahme am Citizen Science-Projekt keinen Effekt auf die Veränderung der schul-/fachbezogenen Selbstwirksamkeit.

⁵ Ein starker Ausreißer wurde von der Analyse ausgeschlossen (vgl. Anhang O).

Ergebnisse zum Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften:

Zuletzt wurde das Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften untersucht (vgl. Tabelle 32, Abbildung 85). Das Selbstkonzept der Interventions- und Vergleichsgruppe weist im Pretest im Mittel nur kleine Unterschiede auf (Interventionsgruppe: $M_{pretest} = 3,922$, Vergleichsgruppe: $M_{pretest} = 3,926$), jedoch steigt das Selbstkonzept der Vergleichsgruppe leicht an ($d_{pre/post} = 0,018$), während es für die Interventionsgruppe leicht sinkt ($d_{pre/post} = -0,082$). Die Unterschiede sind jeweils nicht statistisch signifikant (Interventionsgruppe: $t(50) = 0,925$, $p = 0,360$, Vergleichsgruppe: $t(8) = -0,068$, $p = 0,948$).

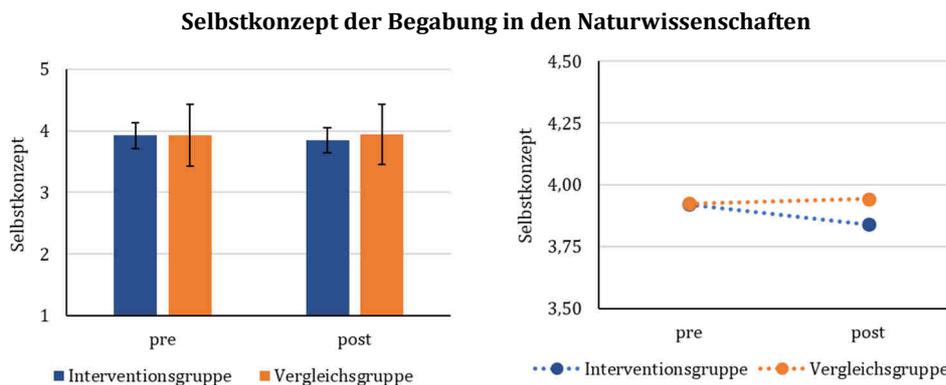


Abbildung 85: Mittleres Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).

Tabelle 32: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.

Gruppenzugehörigkeit	Pretest		Posttest		Differenz
	M	SD	M	SD	$d_{pre/post}$
Interventionsgruppe ($N = 51$)	3,922	0,728	3,840	0,733	-0,082
Vergleichsgruppe ($N = 9$)	3,926	0,830	3,944	0,682	0,018

Alle Voraussetzungen für eine Varianzanalyse sind erfüllt (Levene-Tests: $p > 0,05$; Box-Test: $p > 0,05$; Normalverteilung für die Interventionsgruppe kann angenommen werden, da $N > 30$; Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung der Normalverteilung für die Vergleichsgruppe: $p > 0,05$, vgl. Anhang O). Jedoch liegt weder ein statistisch signifikanter Interaktionseffekt ($F(1,58) = 0,176$, $p = 0,676$) vor, noch können Haupteffekte des Faktors Zeit ($F(1,58) = 0,070$, $p = 0,792$) oder des Faktors Gruppenzugehörigkeit ($F(1,58) = 0,053$, $p = 0,819$) beobachtet werden. Demnach hat die Teilnahme am Citizen Science-Projekt keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Veränderung des Selbstkonzeptes der Begabung in den Naturwissenschaften.

Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse:

Neben der Wirksamkeit von Citizen Science auf das Umweltbewusstsein der Teilnehmenden wurden verschiedene Aspekte der naturwissenschaftlichen Schulbildung anhand von sechs Skalen (teilweise mit Subskalen) untersucht. Die Skalen und Subskalen weisen mit Ausnahme einiger Subskalen des Konstruktes „Verständnis der Natur der Naturwissenschaften“ eine ausreichende interne Konsistenz auf (vgl. Tabelle 26, S. 216). Aufgrund einer zu geringen internen Konsistenz im Pre- und Posttest wurde die Subskala „Einfachheit des Wissens“ von der Analyse ausgeschlossen. Es wurden, sofern möglich, *t*-Tests für verbundene Stichproben und Varianzanalysen durchgeführt. Bei Verletzung der Voraussetzungen wurden Wilcoxon-Tests als nichtparametrisches Pendant zum *t*-Test gewählt.

Für keine der vorliegenden Gesamtskalen liegen für die Interventionsgruppe statistisch signifikante Unterschiede der abhängigen Variable zwischen Pre- und Posttest vor (*t*-Tests oder Wilcoxon-Tests: $p > 0,05$). Darüber hinaus konnten für die Gesamtskalen keine statistisch signifikanten Interaktionseffekte festgestellt werden, sofern die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse erfüllt waren (Interaktionseffekte: $p > 0,05$). Entsprechend dieser Ergebnisse hat die Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin keinen statistisch signifikanten Einfluss auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, die motivationale Regulation der Schüler:innen in den naturwissenschaftlichen Fächern, das Interesse an diesen, die allgemeine und schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit und das Selbstkonzept der Beteiligung in den Naturwissenschaften. Dennoch können die Nullhypothesen, die von keinem Unterschied ausgehen, nicht angenommen werden, wie im Folgenden anhand der einzelnen Hypothesen für die Skalen und Subskalen gezeigt wird.

Verständnis der Natur der Naturwissenschaften:

VNOS-H1: „Die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin führt zu einem erhöhten Verständnis der Natur der Naturwissenschaften.“

Die deskriptive Auswertung der Daten zeigt, dass sich das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften der am Citizen Science-Projekt teilnehmenden Schüler:innen für die Gesamtskala und für alle Subskalen mit Ausnahme der Dimension „Rechtfertigung des Wissens“ im Mittel verbessert. Die Unterschiede zwischen Pre- und Posttest sind jedoch für die Gesamtskala und die Dimensionen Herkunft, Sicherheit, Entwicklung, Rechtfertigung und Zweck sehr gering ($|d_{pre/post}| \leq 0,085$, vgl. Tabelle 27 und Anhang P) und statistisch nicht signifikant (*t*- oder Wilcoxon-Tests: $p > 0,05$). Lediglich das Verständnis der teilnehmenden Schüler:innen von der Kreativität von Naturwissenschaftler:innen steigt deutlich ($d_{pre/post} = 0,381$) und statistisch signifikant vom Pre- zum Posttest (*t*-Test: $p < 0,05$).

Ausgehend von dieser Verbesserung einer einzelnen Dimension lässt sich jedoch nicht schlussfolgern, dass die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt zu einem erhöhten, allgemeinen

Verständnis der Natur der Naturwissenschaften führt, sodass Hypothese VNOS-H1 nicht verifiziert werden kann. Diese Schlussfolgerung wird auch dadurch gestützt, dass weder für die Gesamtskala noch für die Subskalen signifikante Interaktionseffekte vorliegen (Varianzanalyse-Interaktionseffekte: $p > 0,05$).

Die Nullhypothese, welche von keinem Einfluss der Teilnahme am Citizen Science-Projekt auf die Veränderung des Verständnisses der Natur der Naturwissenschaften ausgeht, kann jedoch ebenfalls nicht angenommen werden, da die Sensitivität der Varianzanalyse zu gering ist, um gegebenenfalls vorliegende Interaktionseffekte zu erkennen. Mit der gegebenen Anzahl aller Schüler:innen ($N = 60$), welche die Items zum Verständnis der Natur der Naturwissenschaften beantwortet haben, ließen sich mit einer Teststärke von $(1-\beta) = 0,8$ und einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ lediglich mittlere Interaktionseffekte mit einer Effektstärke von $\eta^2_p \geq 0,123$ zuverlässig nachweisen (Faul et al., 2007; Umrechnung der Effektstärken nach Lenhard & Lenhard, 2016). Darüber hinaus ist die Stichprobengröße $N = 9$ der Vergleichsgruppe erneut zu gering, um als geeignete, repräsentative Referenz zu dienen. Damit ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden, um Hypothese VNOS-H1 zu beantworten.

Motivationale Regulation:

MR-H1: „Die Intervention (Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin) ist im Allgemeinen nicht in der Lage, die motivationale Regulation hin zu intrinsischen Regulationsformen zu verändern.“

Auch für das Konstrukt „Motivationale Regulation“ liegen nur geringe, statistisch nicht signifikante Unterschiede des Selbstbestimmungsindex zwischen Pre- und Posttest für die Schüler:innen vor, die am Citizen Science-Projekt teilgenommen haben ($d_{pre/post} = -0,215$, t -Test: $p > 0,05$). Während die identifizierte und introjizierte Regulation leicht steigen, verringern sich die intrinsische und extrinsische Regulation im Mittel.

Lediglich für die Subskala „introjizierte Regulation“ liegt ein statistisch signifikanter Interaktionseffekt vor, der auf den starken Anstieg in der Vergleichsgruppe und vergleichsweise konstante Werte für die Interventionsgruppe zurückgeführt werden kann. Da die Vergleichsgruppe zu klein ist ($N = 9$), kann aus diesen Ergebnissen erneut keine Schlussfolgerung in Bezug auf die Hypothese abgeleitet werden.

Des Weiteren ist die Sensitivität des Tests so gering, dass mit der gegebenen Stichprobengröße ($N = 61$) mit einer Teststärke von $(1-\beta) = 0,8$ und einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ lediglich mittlere Interaktionseffekte mit einer Effektstärke von $\eta^2_p \geq 0,121$ zuverlässig nachgewiesen werden können (Faul et al., 2007; Umrechnung der Effektstärken nach Lenhard & Lenhard, 2016). Daher kann die Nullhypothese, die von keinem Einfluss der Teilnahme am Citizen Science-Projekt auf die Veränderung der motivationalen Regulation ausgeht, nicht angenommen werden. Hypothese MR-H1 lässt sich damit weder verifizieren noch falsifizieren.

Interesse an den Naturwissenschaften:

IN-H1: „Die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt führt zu einem erhöhten Interesse an naturwissenschaftlichen Themen.“

Gleiches gilt für das Interesse der Schüler:innen an naturwissenschaftlichen Themen, welches für die Interventionsgruppe im Mittel geringfügig vom Pre- zum Posttest zunimmt ($d_{pre/post} = 0,044$), während es für die Vergleichsgruppe abnimmt ($d_{pre/post} = -0,054$). Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant (Wilcoxon-Tests: $p > 0,05$) und so gering, dass keine Rückschlüsse auf die Hypothese getätigt werden können. Interaktionseffekte können nicht interpretiert werden, da keine Gleichheit der Kovarianzenmatrizen vorliegt. Damit lässt sich auch Hypothese IN-H1 nicht verifizieren oder falsifizieren.

Allgemeine und schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit:

SW-H1: „Durch die Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin wird die schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit positiv verändert.“

SW-H2: „Die Intervention (Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin) ist nicht in der Lage, die allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung der Schüler:innen positiv zu verändern.“

Die allgemeine und schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit der Interventionsgruppe bleibt zwischen Pre- und Posttest nahezu konstant (allgemein: $d_{pre/post} = 0,077$, schul-/fachbezogen: $d_{pre/post} = -0,006$), während für die Vergleichsgruppe eine Steigerung der Mittelwerte beider Subskalen vorliegt (allgemein: $d_{pre/post} = 0,416$, schul-/fachbezogen: $d_{pre/post} = 0,238$). Eine Hypothesenbewertung der beiden dargestellten Hypothesen kann anhand der vorliegenden Daten jedoch nicht erfolgen.

Für die Skala „Allgemeine Selbstwirksamkeit“ sind die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse nicht erfüllt, sodass Hypothese SW-H2 nicht verifiziert oder falsifiziert werden kann. Die deskriptive Statistik liefert lediglich Hinweise darauf, dass die allgemeine Selbstwirksamkeit nicht positiv durch die Teilnahme am Citizen Science-Projekt beeinflusst wird.

Die nahezu konstante mittlere schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit der Interventionsgruppe liefert erste Hinweise darauf, dass die Teilnahme am Citizen Science-Projekt ebenfalls nicht zu einer positiven Veränderung der schul-/fachbezogenen Selbstwirksamkeit geführt hat. Jedoch ist auch hier keine finale Hypothesenentscheidung möglich, da keine signifikanten Interaktionseffekte vorliegen (Varianzanalyse-Interaktionseffekte: $p > 0,05$) und die Sensitivität des Tests so gering ist, dass nur mittlere Interaktionseffekte mit einer Effektstärke $\eta^2_p \geq 0,123$ zuverlässig nachgewiesen werden könnten (Faul et al., 2007; Umrechnung der Effektstärken nach Lenhard & Lenhard, 2016).

Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften:

SK-H1: „Durch die Teilnahme am Citizen Science-Projekt als Forschungspate/-patin wird das Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften positiv verändert.“

Auch für das Konstrukt „Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften“ lässt sich die aufgestellte Hypothese weder verifizieren noch falsifizieren. Während das Selbstkonzept der Vergleichsgruppe im Mittel leicht steigt ($d_{pre/post} = 0,018$), sinkt es für die Interventionsgruppe ($d_{pre/post} = -0,082$). Die Unterschiede sind jeweils nicht statistisch signifikant (t -Tests: $p > 0,05$). Darüber hinaus liegen keine Interaktionseffekte vor (Varianzanalyse-Interaktionseffekte: $p > 0,05$). Die Sensitivität der Varianzanalyse ist des Weiteren erneut zu gering, sodass mit der gegebenen Stichprobengröße ($N = 60$) mit einer Teststärke von $(1-\beta) = 0,8$ und einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ nur mittlere Interaktionseffekte mit einer Effektstärke $\eta^2_p \geq 0,123$ zuverlässig nachgewiesen werden könnten (Faul et al., 2007; Umrechnung der Effektstärken nach Lenhard & Lenhard, 2016).

Die Aussagekraft der Begleitstudie wird damit bezüglich aller Konstrukte im Wesentlichen durch die geringe Stichprobengröße und die daraus resultierende geringe Sensitivität sowie die zu kleine, nicht repräsentative Vergleichsgruppe negativ beeinflusst. Darüber hinaus sind weitere Störfaktoren zu berücksichtigen, die in Kapitel 5.5.2 diskutiert werden.

5.4.3. Evaluation und Verbesserungspotenzial des Citizen Science-Ansatzes und Forschungspatenansatzes

Die Evaluation des Projektes basiert auf den Rückmeldungen von den teilnehmenden Bürger:innen, Schüler:innen und Lehrer:innen. Neben der Evaluation des Forschungspaten- und Citizen Science-Ansatzes werden die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie aus Perspektive der Schüler:innen und Bürger:innen dargestellt. Aus den von den Bürger:innen und Schüler:innen genannten Anmerkungen werden Verbesserungsmöglichkeiten für den Citizen Science- und Forschungspatenansatz abgeleitet.

Evaluation des Projektes aus Perspektive der Bürger:innen:

Die Bürger:innen bewerten das Citizen Science-Projekt im Allgemeinen sehr positiv, wie die Evaluation zeigt, an welcher 104 Bürgerforscher:innen teilgenommen haben. Die Ergebnisse der Evaluation werden in Abbildung 86 (S. 228) dargestellt und nachfolgend unter Berücksichtigung der Bemerkungen der Bürger:innen aus den offenen Frageformaten präzisiert.

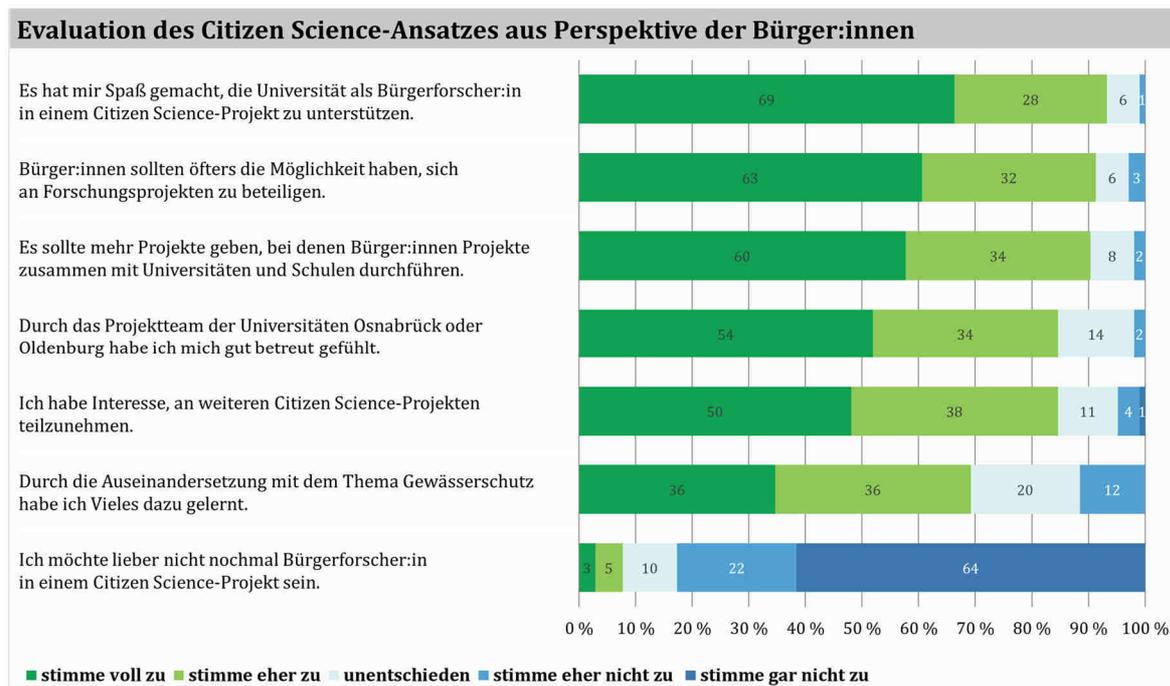


Abbildung 86: Evaluation des Citizen Science-Ansatzes aus Perspektive der Bürger:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert).

93,3 % der Teilnehmer:innen stimmen (voll oder eher) zu, dass es ihnen Spaß gemacht hat, die Universität als Bürgerforscher:in in einem Citizen Science-Projekt zu unterstützen, wie auch folgendes Zitat einer Bürgerin zeigt (vgl. Anhang O): „*Ich hatte großen Spaß daran, die Wasserproben zu nehmen. War bei jedem Wetter an der Messstelle.*“ Über 90 % stimmen zudem (voll oder eher) zu, dass Bürger:innen öfters die Möglichkeit haben sollten, sich an Forschungsprojekten zu beteiligen und es mehr Projekte geben sollte, bei denen Bürger:innen mit Universitäten und Schulen zusammenarbeiten. Eine Person bewertet die Zusammenarbeit wie folgt: „*Ich habe mich gut betreut und informiert gefühlt und mit großem Interesse das Projekt verfolgt. Dieser Forschungsansatz [sic] ist eine gute Gelegenheit, Bürger und Forschung zu verbinden. Beide Seiten profitieren davon!*“ Die Betreuung durch die Wissenschaftler:innen wurde von insgesamt 84,6 % positiv bewertet, was sich auch in weiteren Bemerkungen der Bürger:innen widerspiegelt: „*Super Betreuung: Bei Fragen bekam ich stets sofort eine sinnvolle Antwort, die Ausstattung war gelungen, die [sic] Auswertungsergebnisse konnten vielfältig und eingängig eingesehen werden, ...*“. Auch die transparente Arbeitsweise wurde positiv hervorgehoben („*Es gab eine hohe Transparenz bezüglich der Durchführung und der Auswertung.*“). Eine Person empfand die Kommunikation sogar als zu intensiv, wie folgende Anmerkung zeigt: „*Am Ende, ziemlich viele Nachrichten und Broschüren (z. B. hätten nur digitale Broschüren für uns ausgereicht)*“. Im Gegensatz dazu formuliert eine teilnehmende Person den Wunsch nach weiteren Informationen zu aus dem Projekt entstandenen wissenschaftlichen Publikationen („*Es wäre interessant, wenn man eine kurze Zusammenfassung der Publikationen hätte. Bezogen auf entstandene Facharbeiten der Paten, geschriebene Paper und sonstige Veröffentlichungen.*“). Der gewünschte Grad an

Information und Kommunikation der Bürger:innen ist entsprechend der Kommentare sehr heterogen. Eine Möglichkeit, dieser Heterogenität zu begegnen, besteht in der Einrichtung einer digitalen Plattform, auf der Informationen nach Bedarf abgerufen werden können.

84,6 % der Teilnehmenden haben Interesse, an weiteren Citizen Science-Projekten teilzunehmen („*Ich finde es klasse [sic] das [sic] es solche Projekte gibt und würde jederzeit wieder mit machen.*“). Nur 7,6 % möchten (eher) nicht nochmal als Bürgerforscher:in an einem Citizen Science-Projekt partizipieren. Gründe hierfür lassen sich aus den negativen Anmerkungen der Teilnehmer:innen ableiten. Unter anderem wurde der lange Beprobungszeitraum von mehreren Personen als negativ empfunden: „*Zeittechnisch war es für [sic] mich als Arbeitende anstrengend und ich musste meine Mitarbeit abbrechen.*“. Wie bereits in Kapitel 4.5.3 diskutiert, kann die Beprobungsdauer und die Frequenz der Beprobungen an die wissenschaftliche Zielsetzung des Projektes angepasst werden. Um beispielsweise jahreszeitliche Unterschiede beobachten zu können, sind regelmäßige Messungen über mehrere Monate erforderlich. Der Aufwand für die Teilnehmer:innen könnte dennoch reduziert werden, indem mehrere Personen abwechselnd einen Gewässerstandort untersuchen. Darüber hinaus könnten Personen, welche keine weiteren Messungen durchführen möchten, durch interessierte Personen abgelöst werden, die erst zu einem späteren Zeitpunkt in das Projekt einsteigen möchten.

Als weiteren Kritikpunkt haben einige Teilnehmer:innen die Messungengenauigkeit der Teststäbchen genannt: „*Ergebnis der Messungen eher schlecht feststellbar. Verfärbungen des Meßstäbchen nur schwer mit der Vergleichsskala auszuwerten. Wie auch im Begleitheft 3 auch beschrieben.*“ Die Verwendung von Teststäbchen mit einer intensiveren Färbung oder die Kombination mit einem Farbsensor wird diesbezüglich empfohlen und erleichtert nicht nur das Ablesen, sondern erhöht auch die Genauigkeit der Daten (vgl. Kapitel 4.6). Darüber hinaus kann die Eingabe der Daten über die Webseite optimiert werden, wie folgende Anmerkungen zeigen: „*Eine App oder eine Webseite mit Account-Login wäre angenehm. Das wiederholende Eingeben des Passworts war etwas müßig.*“; „*Die GPS-Daten für die digitale Übermittlung waren nicht einfach zu senden [sic] weil auf dem Land das nicht immer funktioniert.*“ Um die Übermittlung der Daten zu vereinfachen, könnte neben einem erleichterten Login eine Option ergänzt werden, mit welcher Daten manuell, beispielsweise vom PC zuhause, nachgetragen werden können. Die Datenübermittlung wurde von einigen Personen jedoch auch positiv hervorgehoben („*Die Eingabe der Testergebnisse waren [sic] gut durchzuführen.*“, „*[...] Die digitale Übermittlung der erhobenen Daten erfolgte erfreulich einfach. [...]*“), sodass die für das Projekt aufgebaute, digitale Plattform im Allgemeinen unter Berücksichtigung der genannten Verbesserungsmöglichkeiten für weitere Citizen Science-Projekte empfohlen werden kann.

69,2 % der Bürger:innen, die an der Evaluation teilgenommen haben, stimmen (voll oder eher) zu, durch die Auseinandersetzung mit dem Thema Gewässerschutz Vieles dazu gelernt zu haben, wie auch folgendes Zitat zeigt: „*Ich habe viel dazugelernt und bin mit meinen nachbarn [sic] ins gespräch [sic] gekommen. Mein Blick in die Umwelt/Gewässer wurde erweitert und ich*

konnte durch eine Beobachtung einer evtl. Umweltverschmutzung [sic] am Gewässer und dem darauffolgendem Gespräch [sic] mit dem Gewässerschutz einiges Lernen [sic].“ Darüber hinaus gaben einige Teilnehmer:innen an, nicht nur inhaltlich etwas dazugelernt, sondern auch ein vertieftes Bewusstsein für den Gewässerschutz und die Relevanz des eigenen Verhaltens erlangt zu haben: „Durch die selbst durchgeführten Untersuchungen bekamen auch die Ergebnisse "mehr Relevanz", weil man sich selbst stärker/eher betroffen fühlte, als wenn abstrakt "irgendwo irgendjemand" etwas gemessen hätte. Gleichzeitig sind insbesondere die Inhalte so in den Broschüren etc. aufbereitet worden, dass alles verständlich war und der Bezug zur "eigenen" Umwelt und [sic] eigenem Verhalten deutlich wurde.“; „Stärkung des Bewußtseins für die Nitratproblematik und den Wert sauberen Trinkwassers“. Entsprechend dieser Bemerkungen konnte das Citizen Science-Projekt dazu beitragen, die Teilnehmer:innen für den Gewässerschutz und die Stickstoffproblematik zu sensibilisieren. Gleichzeitig haben einige Teilnehmer:innen ihrem Umfeld von dem Projekt berichtet („Ich habe darüber häufig im freundes- [sic] und Bekanntenkreis erzählt. Dadurch kann man viele Menschen interessieren.“) und auf diese Weise als Multiplikator:innen agiert. Nicht zuletzt konnte das Projekt dazu beitragen, die Problematik vieldimensional zu betrachten und sich über die eigene Meinung hinaus mit verschiedenen Positionen auseinanderzusetzen (z. B. „Es sprengt die Filterblase“).

Im Gegensatz zum insgesamt sehr positiv wahrgenommenen Citizen Science-Ansatz sind die Einschätzungen zum Forschungspatenansatzes differenter (vgl. Abbildung 87).

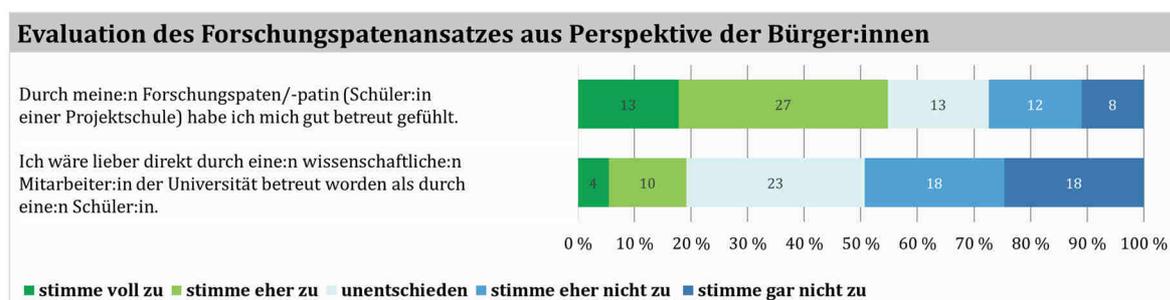


Abbildung 87: Evaluation des Forschungspatenansatzes aus Perspektive der Bürger:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert).

Einige Bürger:innen sehen Vorteile im Forschungspatenansatz, haben positive Erfahrungen in Bezug auf die Betreuung durch die Schüler:innen gemacht oder waren nicht auf eine regelmäßige Unterstützung durch die Forschungspat:innen angewiesen („Ich finde es gut, dass Schüler eine verantwortliche Aufgabe bekommen, die auch von [sic] der Bevölkerung mitunterstützt werden kann.“; „[...] Den Forschungspaten brauchte ich im Verlauf des CSP [Citizen Science-Projektes] nicht in Anspruch nehmen. Die Übergabe der Materialien war ok und problemlos. [...]“). Andere Bürgerforscher:innen hätten sich eine regelmäßige und intensivere Unterstützung durch die Forschungspat:innen gewünscht, wie folgende Anmerkung zeigt: „Forschungspaten sollten sich mindestens in halbjährigen Abständen bei den Teilnehmern melden. Das wirkt positiv, animiert zum "Durchhalten" und kann zur Klärung latent vorhandener Fragen führen.“. Darüber

hinaus kritisieren einige Personen die Unzuverlässigkeit oder Unfreundlichkeit der Schüler:innen: „Was ich nicht so toll fand, war das [sic] meine Messergebnisse nicht in der Onlinekarte auftauchten, diese hatte ich jedesmal an meinen Paten weitergeleitet, der diese dann online melden wollte, beim nächsten Mal werde ich das lieber selbst tun.“; „Nach der eher unfreundlichen, wortarmen Übergabe durch eine Schülerin, gab es keinen Kontakt mehr. Sehr schade.“ Dennoch stimmen 54,8 % der Bürgerforscher:innen (eher oder voll) zu, dass sie sich gut durch die Forschungspat:innen betreut gefühlt haben. Nur 19,2 % würden wissenschaftliche Mitarbeiter:innen für die Betreuung bevorzugen. Handlungsempfehlungen zur Verbesserung des Forschungspatenansatzes werden aufbauend auf diesen Evaluationsergebnissen und den Einschätzungen der Schüler:innen im folgenden Abschnitt abgeleitet.

Evaluation des Projektes aus Perspektive der Schüler:innen:

Die Schüler:innen, welche als Forschungspat:innen am Citizen Science-Projekt teilgenommen haben, bewerten den Citizen Science- und Forschungspatenansatz insgesamt ebenfalls eher positiv, im Vergleich zu den Bürger:innen jedoch wesentlich differenter, wie Abbildung 88 zeigt und nachfolgend anhand der Bemerkungen der Schüler:innen ausgeführt wird.

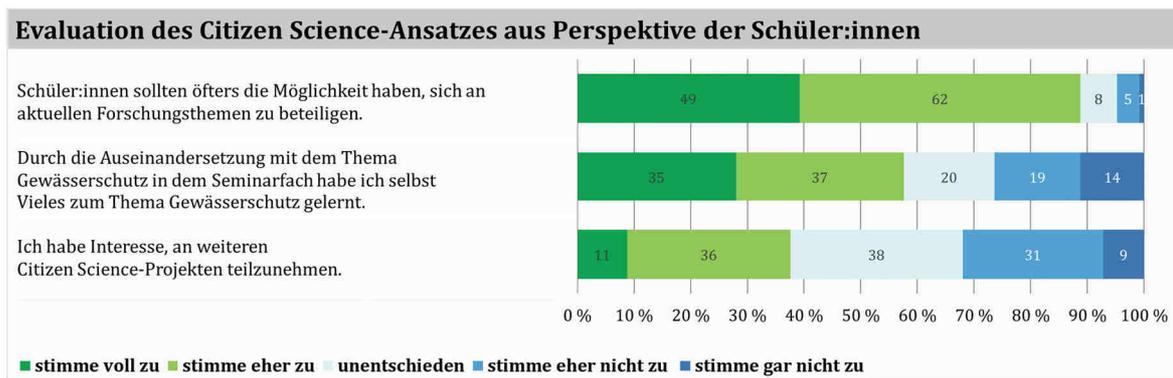


Abbildung 88: Evaluation des Citizen Science-Ansatzes aus Perspektive der Schüler:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert).

88,9 % der 125 Schüler:innen, die an der Evaluation teilgenommen haben, stimmen der Aussage (eher oder voll) zu, dass Schüler:innen öfters die Möglichkeit haben sollten, sich an aktuellen Forschungsthemen zu beteiligen. Die Aussagen der Schüler:innen zum Potenzial, aber auch zu den Grenzen und Verbesserungsmöglichkeiten des Citizen Science-Ansatzes, beziehen sich dabei im Wesentlichen auf die Zusammenarbeit von Gesellschaft, Schule und Wissenschaft, auf den Beitrag zu wissenschaftlichen Forschungsprojekten und zum Umweltschutz, auf das Interesse am Forschungsthema und auf die Gestaltung des Projektes, wie im Folgenden konkretisiert wird.

Die Schüler:innen heben unter anderem den experimentellen Zugang zur Stickstoffproblematik, den Exkurs an die Universität und die vertiefte Auseinandersetzung mit dem Thema positiv hervor („Experimente im Unterricht waren sehr ansprechend.“; „Der Exkurs in die Universität

Osnabrück und die bereitgestellten Experimente erzeugten viel Interesse.“, „Es erfolgt eine wirkliche Auseinandersetzung mit dem Thema Gewässerschutz stimmen 57,6 % der Schüler:innen der Aussage zu, Vieles zum Thema Gewässerschutz dazu gelernt zu haben.

Positiv benennen viele Schüler:innen zudem die Zusammenarbeit von verschiedenen Personen- und Interessensgruppen und die Möglichkeit, sich außerhalb der einseitigen Berichterstattung in den öffentlichen Medien mit betroffenen Personen und Expert:innen über die Nitratproblematik austauschen und informieren zu können (*„Ich fand[e sic] es schön [sic] die Erfahrungen zu dem Thema von fremden Leuten zu hören und nicht nur die typischen Informationen aus den Medien.“*). Dabei wird von den Forschungspat:innen auch die *„Zusammenarbeit von Menschen, die auf den ersten Blick fast nichts gemeinsam haben, auf den zweiten aber ähnliche Interessen teilen“*, hervorgehoben. Auf diese Weise trägt das Projekt dazu bei, so die Schüler:innen, *„[...] dass Menschen unterschiedlichen Alters sich mit wichtigen Themen auseinandersetzen und zusammenarbeiten“*. Diese Aussagen unterstreichen das Potenzial des Citizen Science-Ansatzes, gesellschaftsrelevante, kontroverse Probleme partizipativ zu untersuchen und aus verschiedenen Perspektiven zu beleuchten. Darüber hinaus kann das Projekt, so die Schüler:innen, zu einer Sensibilisierung beitragen (*„Ich finde positiv, dass durch das Projekt eine Sensibilität stattfindet.“*) und bietet nicht nur die Möglichkeit, *„inhaltliche Einblicke zum Thema Gewässerschutz“* zu erhalten, sondern *„aktiv etwas für den Umweltschutz [zu] tun“*.

Einige Schüler:innen empfehlen, die Zusammenarbeit zwischen den Schulen und den Universitäten sowie zwischen den verschiedenen Projektschulen zu intensivieren (*„Man hätte mehr Experimente in der Universität machen können oder sich mit anderen Schulen verständigen sollen [sic] auch wenn dies in der Corona-Zeit sehr schwer zu realisieren war.“*). Die das Projekt koordinierenden Wissenschaftler:innen können eine Stärkung der Zusammenarbeit fördern, indem Plattformen geschaffen werden, mithilfe derer sich einerseits Schüler:innen untereinander kennenlernen und unterstützen können, durch welche andererseits aber auch eine stärkere Einbindung der Schüler:innen in den wissenschaftlichen Prozess gelingen kann und die Schüler:innen einen persönlicheren Bezug zum Projekt und zu allen beteiligten Personen aufbauen können. Dies kann unter anderem in Form von projektbegleitenden, schulübergreifenden Workshops zu verschiedenen Projektphasen, beispielsweise zur Datenaufbereitung und -auswertung, umgesetzt werden, aber auch durch Diskussionsveranstaltungen, PubQuizze oder CitizenLabs, bei denen Schüler:innen und Bürger:innen gemeinsam mit den Wissenschaftler:innen an verschiedenen Themen und Fragestellungen arbeiten. Auf diese Weise wird nicht nur die Zusammenarbeit zwischen den Zielgruppen verstärkt, sondern auch die Kritik einer Schülerin aufgegriffen, dass *„die Auswertungen und tatsächliche Forschung in den (universitären) Institutionen stattfinden“*. In dem dargestellten Citizen Science-Projekt konnten aufgrund der COVID-19-Pandemie mit Ausnahme der Schülerlabore innerhalb der Seminarfachzeit keine Präsenzveranstaltungen durchgeführt werden. Digitale Alternativformate wurden zwar in

reduziertem Umfang angeboten, konnten jedoch nicht von allen Schüler:innen wahrgenommen werden. Auch wenn einige Schüler:innen die digitalen Alternativen als sinnvoll erachteten (*„digitale Möglichkeiten werden sinnvoll genutzt“*), wird für zukünftige Citizen Science-Projekte eine intensivere Zusammenarbeit zwischen den Schulen und zwischen Schüler:innen und Wissenschaftler:innen in verschiedenen Präsenzveranstaltungen empfohlen, um einen direkteren persönlichen Bezug zwischen den verschiedenen beteiligten Institutionen zu ermöglichen und die Partizipation der teilnehmenden Schüler:innen zu erhöhen.

Die Möglichkeit, durch Citizen Science gemeinsam mit der Gesellschaft mit Wissenschaftler:innen zusammenzuarbeiten, transparente Einblicke in wissenschaftliche Projekte zu erhalten und einen Beitrag zu diesen leisten zu können, bewerten die Schüler:innen im Allgemeinen positiv (*„Mit dem Projekt können interessierten Schülern und Bürger [sic] besondere Einblicke gewährt werden.“*; *„Ich finde es super, dass Schülern die Möglichkeit gegeben wird, sich an aktuellen Forschungen zu beteiligen.“*; *„Das Projekt hatte meine Aufmerksamkeit für Umwelt und Forschung geweckt [...]“*). Auf diese Weise erhalten die Schüler:innen entsprechend ihrer eigenen Einschätzung einen *„[...] Einblick darin, wie Forschung betrieben wird [...]“* und können *„[...] frühe Erfahrungen im Wissenschaftliches [sic] Arbeiten“* sammeln. Viele Schüler:innen beschreiben die Teilnahme am wissenschaftlichen Projekt als einfach und selbsterklärend und den Ablauf des Projektes als reibungslos (*„Solide Gestaltung, leicht nachzuvollziehen“*; *„Mehr oder weniger Selbsterklärend [sic]“*; *„Reibungsloser Ablauf. Gute Planung [sic] sodass kaum Hilfe benötigt wurde“*). Lediglich die zeitliche Planung des Projektes wurde von einigen Schüler:innen kritisiert (*„kein Pünktliches [sic] Ergebnis zum Ende für die Schüler“*). Durch die begrenzte Dauer der Seminarfächer wurden die Ergebnisse des Citizen Science-Projektes nicht innerhalb der Seminarfachzeit veröffentlicht. Die Wissenschaftler:innen haben dennoch angeboten, in einem digitalen Workshop einen Einblick in die Zwischenergebnisse und in die weiteren Projektschritte zu geben. Darüber hinaus konnten die Schüler:innen bei Interesse freiwillig an der Ergebnispräsentation und -diskussion teilnehmen. Diese Angebote wurden jedoch nur von wenigen Schüler:innen wahrgenommen. Für zukünftige Projekte sollte die Zeitplanung dahingehend angepasst werden, dass der gesamte Forschungsprozess von den Schüler:innen begleitet werden kann. Da für den gesamten Forschungsprozess ein langer Zeitraum eingeplant werden muss, sind Seminarfächer, die in der Regel 3 Schulhalbjahre dauern, hinsichtlich dieses Aspektes ungeeignet. Eine Alternative besteht darin, dass sich Schulklassen beispielsweise über mehrere Schuljahre an einem Forschungsprojekt beteiligen oder Arbeitsgruppen angeboten werden, in denen Schüler:innen außerhalb des regulären Schulunterrichts an Forschungsprojekten partizipieren können. Letzteres bringt den Vorteil mit, dass sich Schüler:innen freiwillig für eine Projektteilnahme entscheiden, was von vielen Schüler:innen empfohlen wird, wie unter anderem folgende Anmerkung zeigt: *„Ich finde die Durchführung im Seminarfach eher schwierig, da man nicht die Wahl zwischen verschiedenen Projekten hatte und trotzdem teilnehmen*

musste [sic] auch wenn man andere Bereiche vielleicht deutlich interessanter gefunden hätte. Besser fände ich dies in AGs oder bei Wahlmöglichkeiten.“

Die genannten negativen Anmerkungen können Gründe dafür sein, dass nur 37,6 % der Schüler:innen Interesse haben, an weiteren Citizen Science-Projekten teilzunehmen, während 32,0 % der Schüler:innen dieser Aussage (eher oder gar) nicht zustimmen. Weitere Gründe, die für die Schüler:innen gegen eine erneute Teilnahme sprechen, finden sich in der Evaluation des Forschungspatenansatzes aus Perspektive der Schüler:innen.

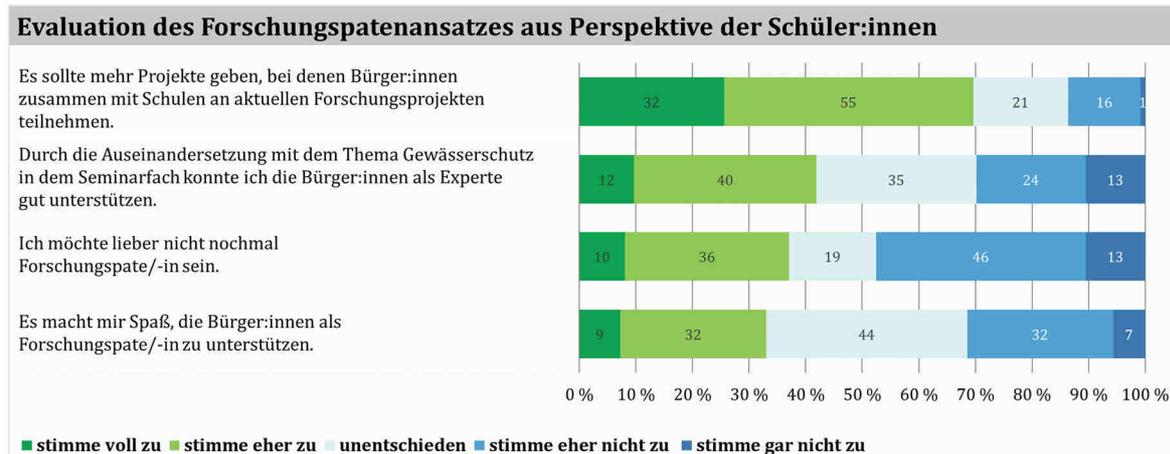


Abbildung 89: Evaluation des Forschungspatenansatzes aus Perspektive der Schüler:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert).

Im Allgemeinen stimmen 69,6 % der Schüler:innen (eher oder voll) zu, dass Schulen gemeinsam mit Bürger:innen an aktuellen Forschungsprojekten teilnehmen sollten (vgl. Abbildung 89). Eine Möglichkeit der Zusammenarbeit ist der in diesem Projekt erprobte Forschungspatenansatz, den die Schüler:innen aufgrund des persönlichen Kontaktes und der einfachen Feedbackmöglichkeiten für die Bürger:innen wertschätzen („Durch den Forschungspaten haben sich die Bürger persönlich angesprochen gefühlt bzw [sic] der Ansprechpartner war nicht irgendein hoher Wissenschaftler. Ich als Forschungspate habe dadurch auch direkt Rückmeldungen bekommen, ob es Probleme oder Auffälligkeiten gab.“). Eine Schülerin empfand die „Kommunikation zwischen Bürgern und Schüler [als] gelungen“, darüber hinaus wurde die Aufgabenverteilung als klar strukturiert bewertet („Alles war sehr strukturiert und klar vorgegeben, so dass man als Pate und auch als teilnehmende [sic] Bürger immer wusste [sic] was zu tun ist. Tatsächlich brauchten die Bürger in wenigen Fällen unsere Hilfe und kamen, nachdem sie das Paket erhalten hatten, meist alleine zurecht. [...]“). Gleichzeitig heben die Schüler:innen das Potenzial des Forschungspatenansatzes hervor, mit dem durch Unterstützung der Wissenschaftler:innen durch die Schüler:innen viele Interessierte in das Projekt involviert werden konnten. Auf diese Weise, so eine Schülerin, konnten sich „[...] die Bürger [...] jeweils an ihren individuellen Forschungspaten wenden, sodass sehr viele Menschen mit eingebunden wurden, aber niemand überfordert war“. Einige Schüler:innen haben ihrerseits Unterstützung von ihren Lehrkräften

erhalten, um die Aufgaben als Forschungspat:innen zu bewältigen, wie folgende Bemerkung wiedergibt: „[...] es kann durch Absprache mit dem Lehrer oder [sic] Lehrerin schnell auf Fragen der Bürger geantwortet werden [...]“. Auf diese Weise konnten sich die Schüler:innen nicht nur über den Gewässerschutz informieren, sondern auch weitere Erfahrungen sammeln, die jedoch nicht genauer im Feedback der Schüler:innen spezifiziert werden („[...] ich konnte mich selbst über das Thema informieren und bin selbst erfahrener geworden [...]“). Als positive Bestärkung nennt eine Schülerin die Freude über das hohe Engagement ihres Umkreises für den Gewässerschutz („[...] es hat mich gefreut zu sehen, dass so viele Bürger in meinem Umkreis zum Gewässerschutz beitragen möchten [...]“).

Dennoch stimmen nur 33,1 % der Schüler:innen der Aussage (eher oder voll) zu, dass sie Spaß an der Unterstützung der Bürger:innen gehabt haben, 37,1 % möchten lieber nicht nochmal Forschungspate/-patin sein. Die Gründe hierfür finden sich in den negativen Projektanmerkungen und sind vielfältig. Zunächst empfanden einige Schüler:innen die Kontaktaufnahme mit fremden Personen als unangenehm oder haben sich unsicher gefühlt („[...] meist unangenehm [sic] mit fremden [sic] in Kontakt zu treten [...]“; „Ich habe mich doch sehr unwohl gefühlt, als junges Mädchen alleine zu einem unbekanntem erwachsenem Mann nach Hause zu fahren.“). Die Angst der Schüler:innen muss in Folgeprojekten zwingend berücksichtigt werden, beispielsweise indem die Schüler:innen bei der Kontaktaufnahme durch ihre Lehrer:innen oder Eltern begleitet werden, die Forschungspat:innen in Kleingruppen mit ihren Mitschüler:innen zusammenarbeiten oder der Kontakt zu den Bürger:innen ausschließlich im sicheren, schulischen Raum mit Unterstützung der Lehrkräfte stattfindet. Des Weiteren wurde die Zusammenarbeit zwischen den Schüler:innen und Bürger:innen auch durch die Reaktion der Bürger:innen negativ beeinträchtigt, wie mehrere Schüler:innen berichten. Trotz des Versuches der Schüler:innen, mit den Bürger:innen zusammenzuarbeiten, wurde der Kontakt durch die Bürger:innen teilweise nicht aufrechterhalten („[...] Trotz höflichem Umgang via WhatsApp, haben sich unsere Bürger kaum zurückgemeldet.“; „Manche Bürger/Bürgerinnen waren nicht allzu kooperativ.“). Altersdifferenzen, lange Fahrtstrecken oder eine schlechte Erreichbarkeit der zu Betreuenden haben die Kontaktaufnahme entsprechend der Rückmeldung der Schüler:innen zusätzlich erschwert („[...] allerdings finde ich es schade, dass die Alterdifferenzen [sic], aber auch die Entfernungen zu den jeweiligen Projektteilnehmern teilweise größer waren. [...] Eben aufgrund der Altersdifferenzen ergaben sich zurückhaltende Interaktionen, welche mir u.a. den Spaß am Projekt genommen haben.“). Darüber hinaus merkt eine Schülerin an, dass sich die Kommunikationswege durch den Forschungspatenansatz verlängert haben und Fragen der Bürger:innen gegebenenfalls schneller beantwortet werden können, wenn diese direkt den Kontakt zu Wissenschaftler:innen aufnehmen und nicht den Umweg über die Schüler:innen und Lehrer:innen gehen („Leichter, jedoch wahrscheinlich unpersönlicher [sic], wäre es vermutlich gewesen, wenn Fragen der Teilnehmer nicht erst über den Paten, zum jeweiligen Fachlehrer und dann zur Universität [sic] weitergeleitet worden [sic] wären. Dadurch entstanden [sic] größere Zeiträume [sic] in

denen der [sic] Teilnehmer das Projekt vielleicht gar nicht oder nicht richtig fortführen konnten. [...]“). Eine Einrichtung einer FAQ-Seite oder einer Plattform, mit der schnell Kontakt zu den Wissenschaftler:innen aufgebaut werden kann, könnte diesen Problemen entgegenwirken.

Ein weiterer Aspekt, der von mehreren Schüler:innen kritisch angemerkt wird, ist die zu geringe Vorbereitung der Schüler:innen auf die Rolle als Forschungspat:innen, sodass die Schüler:innen es als „[...] große Aufgabe [empfunden haben], immer die passenden Antworten auf die Fragen der Bürger zu haben [...]“ und sich eine „bessere Vorbereitung der Schüler in der schule [sic]“ wünschen. So stimmten 29,8 % der Schüler:innen (gar oder eher) nicht der Aussage zu, dass sie die Bürger:innen durch die Auseinandersetzung mit dem Thema Gewässerschutz gut unterstützen konnten. Diese Überforderung kann sich negativ auf die Selbstwirksamkeitserwartung, das Selbstkonzept und die Motivation der Schüler:innen auswirken und ist dementsprechend in Folgeprojekten zu vermeiden, indem die Schüler:innen einerseits vor der Betreuung der Bürger:innen intensiver auf ihre Aufgabe vorbereitet werden und sich thematisch tiefergehend mit der Nitratproblematik auseinandersetzen und andererseits während des Nitrat-Monitorings direkter durch die Wissenschaftler:innen bei der Betreuung der Bürger:innen unterstützt werden. Neben einer thematisch intensivierten Vorbereitung auf die Aufgaben als Forschungspate/-patin bieten sich zudem Workshops an, in denen Softskills wie beispielsweise Kooperationsbereitschaft und Kommunikationsfähigkeiten trainiert werden können. Da hierzu eine Verlängerung der Vorbereitungszeit der Schüler:innen erforderlich ist, sind auf drei Schulhalbjahre begrenzte Seminarfächer nicht optimal geeignet.

Resümierend bringt der Forschungspatenansatz auf der einen Seite viele Vorteile mit sich, welche sich auch in dem Feedback der Bürger:innen und Schüler:innen widerspiegeln. Ein wesentlicher Vorteil liegt darin, dass durch die Ausbildung von Schüler:innen als Forschungspat:innen viele Teilnehmer:innen persönlich betreut werden können, was durch wenige Wissenschaftler:innen ohne Unterstützung nicht möglich wäre. Auf der anderen Seite empfinden viele Schüler:innen die Aufgaben als Forschungspat:innen als überfordernd oder als Zwang, was sich negativ auf die Motivation, das Selbstkonzept und die Selbstwirksamkeit der Schüler:innen auswirken kann. Damit die Schüler:innen ihre Aufgaben als Forschungspat:innen erfolgreich bewältigen und positiv erleben können, ist eine zeitintensive Vorbereitung erforderlich, sodass für Citizen Science-Projekte an Schulen deutlich längere Zeiträume eingeplant werden müssen. Darüber hinaus sollte die Unterstützung der Wissenschaftler:innen als Forschungspat:innen freiwillig erfolgen. So könnte den Schüler:innen beispielsweise angeboten werden, entweder selbst Daten zu erheben oder andere Personen als Mentor:in bei der Datenerhebung zu unterstützen. Falls sich viele Schüler:innen nicht bereit für die Betreuung weiterer Personen fühlen, können auch Bürger:innen als Forschungspat:innen ausgebildet werden, die stärker an dem Projekt partizipieren möchten. Nicht zuletzt könnten Studierende in Citizen Science-Projekten als Zielgruppe eingebunden werden und als Forschungspat:innen agieren und auf diese Weise sowohl Softskills als auch wissenschaftliche Kompetenzen trainieren. Um ausgehend vom

Forschungspatenansatz ein optimiertes Mentoring-Konzept zu entwickeln, sind weitere konzeptionelle Arbeiten notwendig und weiterer Forschungsbedarf vorhanden, wie auch in Kapitel 5.5.3 dargestellt wird.

Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf das Citizen Science-Projekt:

Zu Anfang des Jahres 2020 und damit nur wenige Monate nach Beginn des Citizen Science-Projektes wurde COVID-19 von der WHO als Pandemie eingestuft, was auch in Deutschland zu weitreichenden Maßnahmen zur Eindämmung der Pandemie führte (RKI, 2020; WHO, 2020). Aufgrund strenger Kontaktbeschränkungen für öffentliche und schulische Aktivitäten konnten Präsenzveranstaltungen wie beispielsweise Wanderausstellungen und Diskussionsrunden nicht oder erst zum Ende des Projektes durchgeführt werden. Um Präsenzveranstaltungen, welche nicht stattfinden konnten, auszugleichen, wurden von den Wissenschaftler:innen eine digitale Ausstellung, Newsletter und Broschüren sowie eine digitale Ergebnispräsentation für die Schüler:innen, Bürger:innen und weitere Interessierte angeboten.

Die Schüler:innen konnten zu Anfang des Projektes zwar noch das Schülerlabor an den Universitäten Osnabrück und Oldenburg besuchen, jedoch fanden im Anschluss innerhalb der Seminarfachzeit keine weiteren Präsenzveranstaltungen gemeinsam mit den Wissenschaftler:innen statt. Teilweise wurde sogar der Präsenzunterricht an den Schulen durch Distanzlernen ersetzt, sodass die Seminarfächer von den Lehrer:innen nur über Videokonferenzen oder über digital übermittelte Unterrichtsmaterialien und Aufgabenstellungen weitergeführt werden konnten (Niedersächsisches Kultusministerium, 2020). Anfang 2021 wurde von den Wissenschaftler:innen als Ausgleich für die ausgefallenen Präsenzveranstaltungen ein digitales Seminar angeboten, in dem die Zwischenergebnisse berichtet und weitere Projektschritte gemeinsam mit den Schüler:innen geplant wurden.

Die digitalen Angebote konnten nur teilweise von den Schüler:innen angenommen werden, unter anderem, weil technische Schwierigkeiten vorlagen oder weil die Belastung durch die COVID-19-Pandemie für die Prüfungskurse bereits so hoch war, dass die Seminarfächer nicht prioritär behandelt wurden. Um abzuschätzen, inwieweit die COVID-19-Pandemie den Verlauf des Projektes beeinträchtigt hat, wurde dieser Aspekt in die Evaluation aufgenommen und aus Perspektive der Schüler:innen und Bürger:innen bewertet. Die Ergebnisse werden in Abbildung 90 (S. 238) und Abbildung 91 (S. 239) dargestellt und nachfolgend anhand der Bemerkungen der Schüler:innen und Bürger:innen konkretisiert.

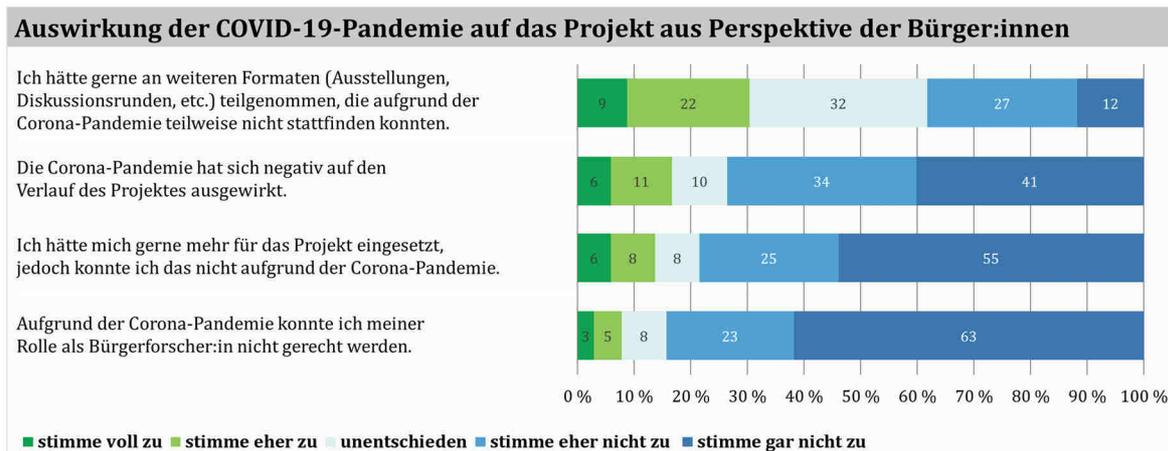


Abbildung 90: Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf das Citizen Science-Projekt aus Perspektive der Bürger:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert).

Nur 16,7 % der Bürger:innen stimmen (voll oder eher) zu, dass sich die COVID-19-Pandemie negativ auf den Verlauf des Projektes ausgewirkt hat. Viele Bürger:innen gaben an, dass sie „[...] trotzdem gut informiert“ wurden und die „elektronische Kommunikation einwandfrei funktionierte“. Die COVID-19-Pandemie hat sogar Vorteile mit sich gebracht, wie einige Bürger:innen berichteten, da digitale Alternativangebote besser erreicht werden konnten als die ursprünglich geplanten Präsenzveranstaltungen („Die digitale Diskussionsrunde war für mich ein Vorteil, weil es mir die weite Anfahrt erspart hat und ich mich trotzdem [sic] gut informiert gefühlt habe.“; „[...] Ich hätte bspw. aufgrund von einer zu großen Anreise keine Präsenzveranstaltung besucht und war sehr froh über die digitale Infoveranstaltung [...]). Nur 13,7 % hätten sich gerne mehr für das Citizen Science-Projekt eingesetzt, als es durch die COVID-19-Pandemie möglich war und nur 7,8 % stimmen (voll oder eher) zu, ihrer Aufgabe als Bürgerforscher:in aufgrund der COVID-19-Pandemie nicht gerecht geworden zu sein. Dies unterstreicht eine Bürgerin mit folgender Aussage: „Ich kann nicht sagen [sic] das [sic] die Durchführung des Projektes durch Corona eingeschränkt war, ich selbst hatte ja ein Fließgewässer, [sic] als Messstelle gewählt, mitten zwischen Feldern.“. 30,4 % hätten gerne an weiteren Formaten wie beispielsweise Ausstellungen oder Diskussionsrunden teilgenommen, ein größerer Anteil von 38,2 % der Bürger:innen stimmt dieser Aussage jedoch nicht zu. Insgesamt hatte die COVID-19-Pandemie aus Perspektive der Bürger:innen damit nur einen geringen Einfluss auf das Projekt.

Die Schüler:innen schätzen die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie aus ihrer Perspektive als Forschungspat:innen deutlich negativer ein, wie folgende Abbildung 91 zeigt. Insgesamt stimmen 46,8 % der Schüler:innen der Aussage (voll oder eher) zu, dass sich die COVID-19-Pandemie negativ auf das Projekt ausgewirkt hat. So seien aufgrund der COVID-19-Pandemie entsprechend eines Schülers „[...] die Ergebnisse der Forschung bzw. Die [sic] Forschung selbst ein wenig untergegangen. Man konnte das Projekt nicht mehr so ganz nachverfolgen, was ärgerlich war [...]“. Ein weiterer Schüler merkt mit Bezug auf die COVID-19-Pandemie an, dass „sowohl die Kommunikation zu den BürgerInnen als auch die Thematisierung [sic] im Fach

Seminarfach erschwert worden“ sei. Die durch die COVID-19-Pandemie erschwerte Zusammenarbeit mit den Bürger:innen wird auch von weiteren Schüler:innen hervorgehoben („Kontaktbeschränkungen [sic] haben Kommunikation zu Bürgern erschwert“; „Ein näherer Kontakt mit den Paten wäre sehr wünschenswert gewesen. [...]“). Diese Aspekte können auch Gründe sein, warum 38,5 % der Schüler:innen angeben, aufgrund der COVID-19-Pandemie ihrer Rolle als Forschungspat:innen nicht gerecht geworden zu sein. 34,9 % der Schüler:innen geben zudem an, dass sie sich gerne mehr für das Projekt eingesetzt hätten, als es durch die COVID-19-Pandemie möglich war.

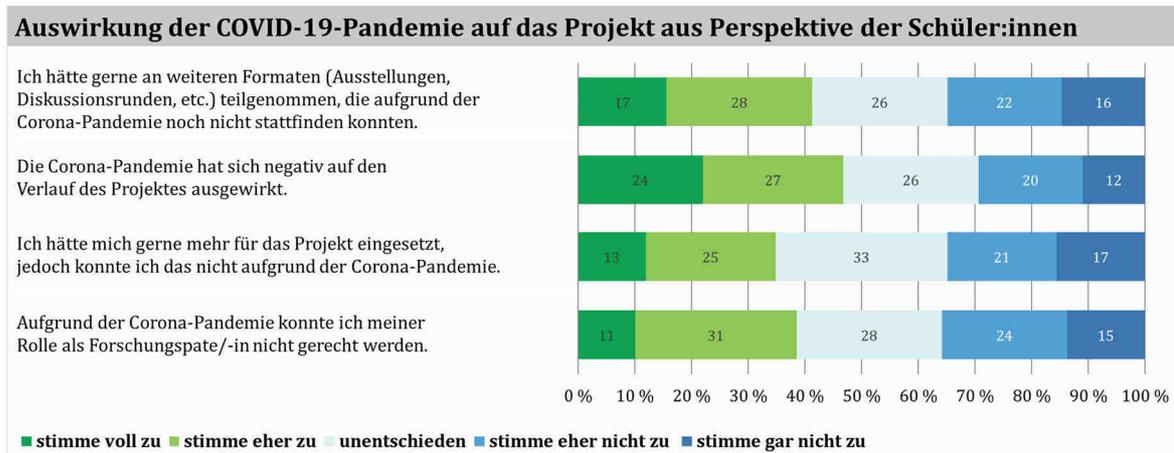


Abbildung 91: Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf das Citizen Science-Projekt aus Perspektive der Schüler:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genders adaptiert).

Auf der anderen Seite finden einige Schüler:innen, dass die Umsetzung des Projektes trotz der Pandemie gelungen sei (*„Trotz der Pandemie ist es gut gelungen, das Projekt umzusetzen. Meine betreuten Bürger hatten kaum Fragen und haben mich auch nicht angerufen, obwohl ich es angeboten hatte. Demnach denke ich, dass sie trotz fehlender Experimente oder Diskussionsrunden sehr gut mit dem Projekt zufrieden waren.“*). Eine bedeutende Rolle spielte dabei, so eine Schülerin, das Engagement ihrer Lehrerin für die ansprechende Gestaltung des Seminarfaches trotz der COVID-19-Pandemie (*„Ich finde, dass unsere Lehrerin trotz der Pandemie es gemeistert hat, viele Diskussionsrunden zu machen, weswegen ich dort keinen weiteren Bedarf gesehen habe.“*) 41,3 % der Schüler:innen hätten jedoch gerne an weiteren Angeboten teilgenommen, die aufgrund der COVID-19-Pandemie nicht oder nur digital angeboten wurden.

Die vor Projektbeginn nicht vorhersehbaren Einschränkungen durch die COVID-19-Pandemie haben sich entsprechend der Evaluationsergebnisse stärker auf die Partizipation der Forschungspat:innen ausgewirkt als auf die Beteiligung der Bürger:innen am Citizen Science-Projekt. Dies wirkt sich insbesondere auf den zweiten Teil der Begleitstudie aus, in dem die Wirksamkeit der Intervention in Bezug auf die naturwissenschaftliche Schulbildung untersucht wurde, wie in Kapitel 5.5.2 weiter diskutiert wird.

Evaluation des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes aus Perspektive der Lehrer:innen:

Die Möglichkeit der Evaluation des Projektes wurde nur von einer Lehrerin genutzt, welche die Betreuung und den Austausch mit den Wissenschaftler:innen, die Unterstützung durch Materialbereitstellung und den Besuch des Schülerlabors positiv hervorhebt. Sie schließt ihr Feedback ab mit den Worten „*es hat super Spaß gemacht: gerne wieder! [...]*“. Aufgrund der geringen Beteiligung an der Evaluation kann zwar keine verallgemeinerte Einschätzung des Projektes aus Perspektive der Lehrer:innen abgeleitet werden, jedoch gibt das dargestellte Feedback erste Hinweise darauf, dass das Projekt auch von Seiten der Lehrer:innen positiv wahrgenommen wurde.

Im folgenden Kapitel wird das Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Umweltbildung und die naturwissenschaftliche Schulbildung anhand der Ergebnisse der Begleitstudie und Evaluation des Projektes zusammengefasst und abschließend diskutiert. Darüber hinaus werden Grenzen der Begleitstudie in einer Methodenkritik dargestellt sowie und der weitere Forschungsbedarf konkretisiert.

5.5. Diskussion und Fazit: Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung

5.5.1. Zusammenfassung und Diskussion der Begleitstudie

Mit dem Citizen Science-Ansatz werden nicht nur Ziele für die wissenschaftliche Forschung verfolgt, sondern auch Bildungsziele, die sich entsprechend der Ausrichtung des Projektes in verschiedene Bereiche gliedern können. Begleitend zum dargestellten Citizen Science-Projekt wurde die Wirksamkeit des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes für die Umweltbildung und die naturwissenschaftliche Schulbildung untersucht. Die ausgewählten Konstrukte, welche im Rahmen der Begleitstudie fokussiert wurden, orientieren sich an den von Phillips et al. (2018) abgeleiteten Learning Outcomes und dem von Lüsse et al. (2022a) herausgearbeiteten Potenzial von Citizen Science für die naturwissenschaftliche Bildung.

Ausgehend von verschiedenen Studien, die bereits im Kontext Citizen Science durchgeführt wurden, und allgemeinen, psychologischen Theorien wurden Hypothesen zur Wirksamkeit auf das allgemeine und themenspezifische Umweltbewusstsein, auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, auf die motivationale Regulation, auf das Interesse an naturwissenschaftlichen Themen, auf die allgemeine und schul-/fachspezifische Selbstwirksamkeit und auf das Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften abgeleitet (vgl. Kapitel 5.2). Während eine positive Wirkung der Teilnahme an dem Projekt als Bürgerforscher:in oder Forschungspate/-patin auf die themenspezifischen Umweltkenntnisse und Verhaltensweisen erwartet wurde, gelten die Umwelteinstellungen als vergleichsweise stabiles Konstrukt, weshalb

für diese Dimensionen des Umweltbewusstseins von keinen Veränderungen ausgegangen wurde (Berndt, 2021). Ebenso wurde vermutet, dass das Projekt im schulischen Kontext und die Teilnahme als Forschungspate/-patin zwar einen positiven Einfluss auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, das Interesse an naturwissenschaftlichen Themen, die schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit und das Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften hat, jedoch nicht in der Lage ist, die motivationale Regulation oder die allgemeine Selbstwirksamkeit positiv zu beeinflussen.

Zur Überprüfung der Hypothesen wurde eine quantitative Fragebogenstudie im Zwei-Gruppen Pre-Post-Design durchgeführt, mit welcher die Wirksamkeit der Intervention (Teilnahme am Citizen Science-Projekt) unter Berücksichtigung einer Vergleichsgruppe, welche nicht an dem Citizen Science-Projekt teilgenommen hat, untersucht werden kann. Hierzu wurden bereits erprobte Skalen übernommen und, ggfs. in adaptierter Form, zu zwei Fragebögen zusammengefasst (vgl. Kapitel 5.3.1 und 5.3.2). Der Fragebogen für die Schüler:innen der Interventions- und Vergleichsgruppe umfasst Konstrukte zur Umweltbildung und naturwissenschaftlichen Schulbildung, während der Fragebogen für die Bürger:innen als verkürzte Fassung nur Skalen zur Umweltbildung enthält. Mit Ausnahme der Dimension „Einfachheit des Wissens“ des Konstruktes „Verständnis der Natur der Naturwissenschaften“, welche aufgrund einer geringen internen Skalenreliabilität von der Analyse ausgeschlossen wurde, waren die internen Konsistenzen der (Sub-)Skalen jeweils akzeptabel (vgl. Tabelle 23, S. 208 und Tabelle 26, S. 216). Als Testwert wurde jeweils das arithmetische Mittel aller Itemwerte der Skalen und Subskalen berechnet. Im Posttest wurden Items zur Evaluation des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes und zu den Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf den Projektverlauf ergänzt.

Insgesamt haben $N = 138$ Schüler:innen und Bürger:innen am Pre- und Posttest teilgenommen, wobei die Interventionsgruppe deutlich größer war ($N = 119$) als die Vergleichsgruppe ($N = 19$) (vgl. Tabelle 22, S. 206). Die geplanten Stichprobengrößen der Interventionsgruppen (Schüler:innen und Bürger:innen) wurden damit erreicht, die Größen der Vergleichsgruppen liegen jedoch deutlich unter den geplanten Stichprobengrößen (vgl. Kapitel 5.3.4). Die Auswirkungen hiervon auf die Aussagekraft der Studie werden in Kapitel 5.5.2 diskutiert.

Zur Auswertung der Daten wurden neben deskriptiver Statistik gepaarte t -Tests und 2×2 faktorielle, gemischte Varianzanalysen berechnet, sofern die Voraussetzungen erfüllt waren. Alternativ wurden Wilcoxon-Tests durchgeführt (vgl. Kapitel 5.3.3).

Forschungsfrage 2:

Inwiefern kann das Citizen Science-Projekt das allgemeine Umweltbewusstsein und das themenspezifische Umweltbewusstsein (Einstellungen, Verhalten und Kenntnisse zum Thema Gewässerschutz) der Teilnehmer:innen positiv beeinflussen?

Die Ergebnisse der Begleitstudie geben erste Hinweise darauf, dass das themenspezifische Umweltverhalten und themenspezifische Umweltkenntnisse durch den Citizen Science-Ansatz positiv beeinflusst werden können. So liegen für die Interventionsgruppe statistisch signifikante Unterschiede dieser Subskalen zwischen Pre- und Posttest vor (t -Tests: $p < 0,05$). Das allgemeine Umweltbewusstsein (Dimensionen: Umweltaffekt, Umweltkognition, Umweltverhalten) sowie themenspezifische, affektive und kognitive Einstellungen sind stabiler und weisen nur geringe, statistisch nicht signifikante Unterschiede zwischen Pre- und Posttest auf (t -Tests: $p > 0,05$).

Um zu untersuchen, ob die Veränderungen tatsächlich auf die Intervention zurückzuführen sind, wurden unter Berücksichtigung der Vergleichsgruppe Varianzanalysen durchgeführt. Für das themenspezifische Umweltverhalten liegt ein signifikanter Interaktionseffekt der Faktoren Zeit und Gruppenzugehörigkeit vor (Varianzanalyse-Interaktionseffekte: $p < 0,05$), die Teilnahme am Monitoring hat demnach einen positiven Effekt auf die Veränderung des Umweltverhaltens. Während das Umweltverhalten der Interventionsgruppe in Bezug auf den Gewässerschutz vom Pre- zum Posttest leicht steigt, sinkt dieses für die Vergleichsgruppe deutlich. Aufgrund der geringen Stichprobengröße der Vergleichsgruppe ist jedoch weder eine Repräsentativität gegeben, noch kann ausgeschlossen werden, dass die Veränderungen des themenspezifischen Umweltverhaltens auf Störfaktoren zurückzuführen sind. Weitere signifikante Interaktionseffekte für die weiteren Subskalen liegen nicht vor (Varianzanalyse-Interaktionseffekte: $p > 0,05$). Aufgrund der geringen Stichprobengröße und der daraus resultierenden geringen Sensitivität der Varianzanalysen für Interaktionseffekte können die Nullhypothesen, welche von keinem Einfluss der Teilnahme auf die Veränderungen der jeweiligen Dimensionen ausgehen, jedoch ebenfalls nicht angenommen werden. Demnach können die aufgestellten Hypothesen zum allgemeinen und themenspezifischen Umweltbewusstsein final weder verifiziert noch falsifiziert werden.

In wenigen weiteren Studien wurde die Wirksamkeit von Citizen Science in Bezug auf das Umweltbewusstsein bereits untersucht (vgl. Kapitel 2.3.4). Das hier dargestellte Projekt und die Begleitstudie deuten analog zu den Ergebnissen von Vetenskap & Allmänhet (2021) und Berndt (2021) darauf hin, dass Citizen Science-Projekte im Bereich der Umweltbildung durch eine positive Verhaltensänderung einen aktiven Beitrag zum Umweltschutz leisten können. Aufgrund weiterer, differenter Studienergebnisse, in denen teilweise keine oder nur geringe Verhaltensänderung beobachtet wurden (vgl. Kapitel 2.3.4, Berndt, 2021), ist jedoch weiterer Forschungsbedarf vorhanden, der in Kapitel 5.5.3 konkretisiert wird.

Ergänzend zu der hier dargestellten Begleitstudie zum Citizen Science-Projekt wurde von Lüsse (2022) die Eignung und Wirksamkeit der in Teilprojekt 2 konzipierten Heimexperimen-

tierbox untersucht, mit welcher interessierte Bürger:innen als Ergänzung zum Nitrat-Monitoring die Möglichkeit erhalten haben, sich experimentell vertieft mit der Stickstoffproblematik auseinanderzusetzen. Eine Fragebogenstudie mit 36 Bürger:innen, welche die Heimexperimentierbox erhalten und bearbeitet haben, zeigte geringe positive Effekte hinsichtlich der untersuchten Lernziele Selbstwirksamkeit, Interesse und wissenschaftsmethodische Kompetenzen. Eine sich anschließende Interviewanalyse von Lüsse (2022) ergab, dass die Ergänzung von Citizen Science-Projekten durch Heimexperimentierboxen zu einer intensiven Auseinandersetzung mit einem Thema und einer Festigung und Vertiefung des Wissens beitragen kann. Aufgrund der geringen Stichprobengröße sind die Ergebnisse der Fragebogenstudie von Lüsse (2022) ebenfalls nicht repräsentativ, sodass bezüglich der Wirksamkeit von Heimexperimentierboxen im Kontext von Citizen Science weiterer Forschungsbedarf vorliegt.

Auch hinsichtlich der Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes für die naturwissenschaftliche Schulbildung ergibt sich weiterer Forschungsbedarf, da die Aussagekraft der in dieser Arbeit dargestellten Begleitstudie ebenfalls zu gering ist, um die Hypothesen zu den untersuchten Konstrukten zu verifizieren oder zu falsifizieren. Aufbauend auf den Varianzanalysen, welche keine signifikanten Interaktionseffekte für die untersuchten Gesamtskalen ergeben haben, können weder die Nullhypothesen noch die Alternativhypothesen angenommen werden. Dies resultiert zum einen aus der zu geringen Stichprobengröße ($N \leq 63$) und der sich daraus ergebenden geringen Sensitivität der Varianzanalysen, sodass lediglich mittlere Interaktionseffekte zuverlässig nachgewiesen werden könnten (vgl. Kapitel 5.4.2). Zum anderen kann die interventionsunabhängige Entwicklung der Schüler:innen in Bezug auf die untersuchten Konstrukte über den Interventionszeitraum von 18 Monaten durch die geringe Stichprobengröße der Vergleichsgruppe nicht repräsentativ abgebildet werden. Beispielsweise wurden in weiteren Studien unabhängig von der Teilnahme an einem Citizen Science-Projekt jahrgangsabhängige Verbesserungen des Verständnisses der Natur der Naturwissenschaften und Unterschiede der motivationalen Regulation zwischen verschiedenen Altersgruppen festgestellt (Kremer & Mayer, 2013; Thomas & Müller, 2011).

Werden die Daten der Schüler:innen, die am Projekt teilgenommen haben, rein deskriptiv betrachtet, zeigt sich eine geringe Verbesserung des Verständnisses der Natur der Naturwissenschaften (Gesamtskala: $d_{pre/post} = 0,046$), des Interesses an naturwissenschaftlichen Themen ($d_{pre/post} = 0,044$) und der allgemeinen Selbstwirksamkeit ($d_{pre/post} = 0,077$), während die von den Schüler:innen wahrgenommene Selbstbestimmung ($d_{pre/post} = -0,215$) sowie die schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit ($d_{pre/post} = -0,006$) und das Selbstkonzept der

Forschungsfrage 3:

Inwieweit hat die Teilnahme der Schüler:innen als Forschungspat:innen an einem Citizen Science-Projekt eine Wirkung auf Interesse und Motivation, Selbstwirksamkeitserwartung und Selbstkonzept sowie das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften im naturwissenschaftlichen Unterricht?

Begabung in den Naturwissenschaften ($d_{pre/post} = -0,082$) abnehmen. Die Unterschiede sind jeweils statistisch nicht signifikant (t -Tests oder Wilcoxon-Tests: $p > 0,05$).

Gründe für die Abnahme der wahrgenommenen Selbstbestimmung, der fach-/schulspezifischen Selbstwirksamkeit und des Selbstkonzeptes der Begabung finden sich in der Evaluation des Projektes. So stimmten 29,8 % der Schüler:innen (gar oder eher) nicht der Aussage zu, dass sie die Bürger:innen durch die Auseinandersetzung mit dem Thema Gewässerschutz gut unterstützen konnten (vgl. Kapitel 5.4.3). Dies zeigt, dass eine intensivere, inhaltliche und prozessorientierte Vorbereitung der Schüler:innen auf die Aufgaben als Forschungspat:innen notwendig ist. Darüber hinaus empfanden einige Schüler:innen die Aufgaben als Forschungspat:innen als unangenehm oder als Zwang, was sich negativ auf die motivationale Regulation, die Selbstbestimmung und die Selbstwirksamkeit der Schüler:innen auswirken kann. Diese Ergebnisse stellen in Frage, ob eine verpflichtende Teilnahme der Schüler:innen als Forschungspat:innen in einem Citizen Science-Projekt im Rahmen eines Seminarfaches zielführend ist. Dennoch bewerten viele Bürger:innen und Schüler:innen den Forschungspatenansatz und die Zusammenarbeit von Universitäten, Schulen und der Gesellschaft positiv und erkennen die Vorteile von Mentoringkonzepten wie dem Forschungspatenansatz für Citizen Science-Projekte, da diese eine persönliche, direkte Betreuung von vielen Personen gewährleisten. Alternative Konzepte, in denen interessierte Bürger:innen als Forschungspat:innen geschult werden oder freiwillige Arbeitsgruppen für Schüler:innen angeboten werden, bleiben in weiteren Projekten zu erproben. Das Citizen Science-Projekt wurde unabhängig vom Forschungspatenansatz von vielen Bürger:innen und Schüler:innen positiv bewertet, wobei der Beitrag zur Wissenschaft und zum Umweltschutz, die Einblicke und Erfahrungen in wissenschaftliche Arbeitsweisen, die thematische Auseinandersetzung mit dem Thema, die Sensibilisierung für den Gewässerschutz, der Austausch mit verschiedenen beteiligten Personen sowie die Gestaltung und Strukturierung des Projektes positiv hervorgehoben wurden. 93,3 % der Bürger:innen stimmten (voll oder eher) zu, dass es ihnen Spaß gemacht hat, die Universität als Bürgerforscher:in in einem Citizen Science-Projekt zu unterstützen und 84,6 % der Bürger:innen haben Interesse, an weiteren Citizen Science-Projekten teilzunehmen.

Während die Bürger:innen keine große Beeinflussung des Projektes durch die COVID-19-Pandemie wahrgenommen haben, schätzen die Schüler:innen die Auswirkungen der Pandemie deutlich negativer ein. Insgesamt stimmten 46,8 % der Schüler:innen der Aussage (voll oder eher) zu, dass sich die COVID-19-Pandemie negativ auf das Projekt ausgewirkt hat. 41,3 % der Schüler:innen hätten gerne an weiteren Angeboten teilgenommen, die aufgrund der COVID-19-Pandemie nicht oder nur digital angeboten wurden und 34,9 % der Schüler:innen gaben an, dass sie sich gerne mehr für das Projekt eingesetzt hätten, als es durch die COVID-19-Pandemie möglich war (vgl. Abbildung 91, S. 239). Die COVID-19-Pandemie kann sich dabei nicht nur negativ auf den Erfolg des Projektes ausgewirkt, sondern auch Einflüsse auf die Begleitstudie haben, wie in der folgenden Methodenkritik aufgegriffen wird.

5.5.2. Methodendiskussion und Limitationen der Begleitstudie

Die dargestellte Begleitstudie unterliegt verschiedenen Limitationen, die in folgender Methodenkritik anhand der von Döring & Bortz (2016) formulierten Phasen des empirisch-quantitativen Forschungsprozesses und der entsprechenden Gütekriterien dargestellt werden. Zunächst werden die inhaltliche Relevanz und die Herleitung des Forschungsgegenstandes reflektiert, bevor das Design, die Messverfahren und die Stichprobenziehung der Begleitstudie diskutiert werden. Zuletzt werden die Datenerhebung, -aufbereitung und -analyse hinsichtlich der Gütekriterien bewertet, bevor schlussendlich die Ergebnispräsentation begutachtet wird.

1. Inhaltliche Relevanz des Forschungsthemas: Der Citizen Science-Ansatz erlangt nicht nur in der fachwissenschaftlichen Forschung, sondern auch in der Bildung eine steigende Aufmerksamkeit (Kermish-Allen et al., 2019). Die Arbeitsgruppe „Citizen Science in Schulen“ der deutschen Citizen Science-Plattform „Bürger schaffen Wissen“ verfolgt zudem das folgende Ziel: „Jede Schulklasse sollte einmal bei einem Citizen-Science-Projekt mitmachen“ (Bürger schaffen Wissen, o. J.). Wie in Kapitel 2.3.4 dargestellt, werden mit dem Citizen Science-Ansatz verschiedene Learning Outcomes im schulischen und außerschulischen Bildungsbereich verfolgt, die von einem gesteigerten Interesse an einem wissenschaftlichen Thema über ein höheres Verständnis der Natur der Naturwissenschaften bis hin zu verschiedenen Verhaltensänderungen reichen (Lüsse et al., 2022a; Phillips et al., 2018). Die tatsächliche Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes ist bisher jedoch nur in wenigen Studien untersucht worden, die Ergebnisse sind teilweise different (vgl. Kapitel 2.3.4). Daher besteht weiterer Forschungsbedarf zur Wirksamkeit des Citizen Science-Ansatzes, dem mit dieser Begleitstudie begegnet wurde. Der Fokus wurde dabei neben der Wirksamkeit auf das Umweltbewusstsein auf verschiedene Zielsetzungen von Citizen Science in der naturwissenschaftlichen Schulbildung gelegt.

2. Herleitung des Forschungsgegenstandes und theoretischen Hintergrundes: Der aktuelle Forschungsgegenstand wurde anhand von einer umfangreichen Recherche aktueller Literatur abgeleitet und reicht von einer Gegenüberstellung verschiedener Definitionen und Klassifikationen des Begriffes „Citizen Science“ bis hin zum konkreten Potenzial von Citizen Science im Bildungsbereich, welches auf den von Phillips et al. (2018) systematisch abgeleiteten Learning Outcomes aufbaut. Ergänzend wurden einschlägige Theoriemodelle und bereits vorliegende Studien im Kontext Citizen Science zu den untersuchten Konstrukten herangezogen (vgl. Kapitel 2.3.4). Die Forschungsfragen orientieren sich am aktuellen Forschungsbedarf, die Hypothesen wurden inhaltlich anhand der dargestellten Theorie begründet. Die Rahmenbedingungen und die Konzeption des Citizen Science-Projektes wurden bei der Hypothesenbildung berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.4 und 5.2).

3. Interne und externe Validität des Studiendesigns: Das Studiendesign wurde aufbauend auf den Forschungsfragen und den zu überprüfenden Hypothesen ausgewählt und in Kapitel 5.3

transparent dargestellt. Die Begleitstudie wurde in Form eines quasi-experimentellen Studiendesigns durchgeführt, welches einen Pre- und Posttest sowie eine Vergleichs- und Interventionsgruppe umfasst. Die Aufteilung der Studienteilnehmer:innen erfolgte aufgrund der organisatorischen Rahmenbedingungen nicht randomisiert, die Gruppenzugehörigkeit war durch die Teilnahme am Citizen Science-Projekt vorgegeben.

Bei optimalen Studienbedingungen können Störeinflüsse, die aus der fehlenden Randomisierung resultieren, kontrolliert werden (Döring & Bortz, 2016). In der vorliegenden Studie können Störeinflüsse aus folgenden Gründen jedoch nicht ausgeschlossen werden. Zunächst können personenbezogene Störvariablen wie beispielsweise das Alter oder das Geschlecht vorliegen. Interventions- und Vergleichsgruppe weisen diesbezüglich jedoch recht ähnliche Eigenschaften auf (vgl. Abbildung 77, S. 207). Aus diesem Grund sowie aufgrund der ohnehin kleinen Stichproben wurde darauf verzichtet, diese Variablen als weitere Faktoren oder als Kovariate in der Varianzanalyse oder einer Kovarianzanalyse zu berücksichtigen.

Des Weiteren zeigt sich, dass die Teilnehmer:innen aus der Interventionsgruppe von vornherein für viele Dimensionen ein höheres allgemeines und themenspezifisches Umweltbewusstsein aufweisen als die Vergleichsgruppe. Im Gegensatz dazu weisen die Schüler:innen der Interventionsgruppe im Pretest hinsichtlich einiger Konstrukte zur naturwissenschaftlichen Schulbildung wesentlich geringere Mittelwerte auf als die Vergleichsgruppe. Durch die Messwiederholung können diese Unterschiede der Gruppen berücksichtigt und Einflüsse der Intervention als Interaktionseffekte in der Varianzanalyse nachgewiesen werden. Dennoch ist es möglich, dass sich der Citizen Science-Ansatz für Schüler:innen mit anderen Voraussetzungen, beispielsweise mit einem höheren Interesse an den Naturwissenschaften, besser eignet. Eine differenzierte Untersuchung des Einflusses verschiedener Voraussetzungen der Schüler:innen auf die Wirksamkeit des Citizen Science-Projektes ist aufgrund der geringen Stichprobengrößen nicht möglich.

Neben personenbezogenen Einflüssen liegen weitere Störvariablen vor, die durch das nicht-randomisierte Design verstärkt werden. So werden die untersuchten Konstrukte im Kontext der naturwissenschaftlichen Schulbildung nicht nur durch die Teilnahme am Citizen Science-Projekt beeinflusst, sondern auch durch den Unterricht und die Erfahrungen in den weiteren naturwissenschaftlichen Fächern. Um diesen Einfluss in einer Begleitstudie tatsächlich berücksichtigen zu können, bedarf es einer weitaus größeren Stichprobengröße für die Interventions- und insbesondere für die Vergleichsgruppe. In einem optimierten Studiendesign würden Schüler:innen mit gleichen Voraussetzungen, also idealerweise mit den gleichen naturwissenschaftlichen Kursen, randomisiert auf die Interventions- und Vergleichsgruppe aufgeteilt werden. Dies würde jedoch die Wahlfreiheit der Schüler:innen für die Seminarfächer einschränken und ist damit zunächst organisatorisch nicht möglich und auch forschungsethisch nicht zu empfehlen, da die Teilnahme an der Studie dann in einem Nachteil für die Schüler:innen resultiert.

Mit der COVID-19-Pandemie liegt eine weitere, nicht kontrollierbare Störvariable vor, die sich nicht nur auf den Verlauf des Projektes ausgewirkt hat, sondern auch die Begleitstudie beeinflusst. Aufgrund der Kontaktbeschränkungen zur Eindämmung der Pandemie wurden viele der geplanten Veranstaltungen, beispielsweise die Wanderausstellung und Diskussionsveranstaltungen, nicht in Präsenz und erst mit Verzögerung und eingeschränkt digital angeboten (vgl. Kapitel 5.4.3). Die digitalen Veranstaltungen konnten nur teilweise von den Schüler:innen besucht werden, sodass der Grad der Partizipation der Schüler:innen an dem Projekt aufgrund der COVID-19-Pandemie stark variiert. Darüber hinaus wurden zeitweise auch die Seminarfächer an der Schule durch Distanzlernen ersetzt, wobei die Umsetzung des Distanzlernens den Lehrer:innen oblag und auf verschiedene Arten und Weisen und in unterschiedlicher Intensität realisiert wurde. Aufgrund der ohnehin schon geringen Stichprobengrößen wurden die Partizipationsgrade, beispielsweise in Form der Teilnahme am digitalen Workshop oder der Bearbeitung der digitalen Ausstellung, nicht als weiterer Faktor in die Varianzanalyse aufgenommen, weshalb der Einfluss des Partizipationsgrades nicht bewertet werden kann.

Die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie aus Perspektive der Bürger:innen und Schüler:innen wurden in der Evaluation erhoben. Es zeigte sich, dass die Schüler:innen die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf das Projekt und auf ihre Rolle als Forschungspat:innen wesentlich negativer bewerten als die Bürger:innen. Die eingeschränkte Partizipationsmöglichkeit kann sich unter anderem negativ auf die Motivation und das Interesse der Schüler:innen an dem Forschungsprojekt, aber auch auf die Entwicklung eines besseren Verständnisses für die Natur der Naturwissenschaften auswirken. Durch die intensive Berichterstattung über die COVID-19-Pandemie und die wissenschaftliche Forschung zu ebendieser kann das Naturwissenschaftsverständnis jedoch auch positiv durch die Pandemie beeinflusst worden sein.

Schlussendlich lässt sich aus den hier dargestellten Gründen nicht final ableiten, ob Veränderungen der untersuchten Variablen auf die Teilnahme am Citizen Science-Projekt zurückzuführen sind oder aus Störvariablen resultieren, die nicht kontrolliert werden konnten. Aufgrund der nicht annehmbaren Kausalität der Ergebnisse können Forschungsfrage 2 und 3 nicht final beantwortet werden, sodass weiterer Forschungsbedarf besteht, um das Potenzial von Citizen Science für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung zu untersuchen.

Neben der internen Validität sind verschiedene Kriterien der externen Validität zu erfüllen, welche sicherstellt, dass sich „Ergebnisse auf andere Orte, Zeiten, Operationalisierungen der abhängigen und unabhängigen Variablen oder auf andere Personen als die konkret untersuchten verallgemeinern lassen“ (Döring & Bortz, 2016, S. 95). Die externe Validität wird durch die geringe Stichprobengröße der Vergleichsgruppe negativ beeinflusst, welche wie bereits in Kapitel 5.3.4 dargestellt deutlich unter der geplanten Stichprobengröße lag und keine Repräsentativität gewährleistet.

Auch der große Umfang des Fragebogens für die Schüler:innen kann dazu führen, dass insbesondere hinten im Fragebogen platzierte Items nicht mehr wahrheitsgemäß von den Schüler:innen beantwortet werden, sodass für weitere Studien empfohlen wird, die Begleitstudie auf weniger Konstrukte zu fokussieren oder kürzere Skalen heranzuziehen (z. B. die extreme Kurzskala zur Erfassung des schulfachspezifischen Interesses von D. H. Rost, 2008).

Nicht zuletzt wird lediglich die Wirksamkeit des dargestellten Citizen Science-Projektes untersucht. Die Ergebnisse können daher nicht auf weitere Citizen Science-Projekte übertragen werden, die beispielsweise nicht den Forschungspatenansatz umfassen. Um allgemeine Effekte von Citizen Science nachzuweisen, bedarf es zukünftig Metaanalysen, welche die Ergebnisse mehrerer Studien zur Wirksamkeit von Citizen Science aggregieren.

4. Operationalisierung: Konstruktvalidität, Reliabilität und Objektivität: Als weiteres Gütekriterium ist eine Operationalisierung des Studiendesigns und der Messinstrumente zu erfüllen. Die in der Begleitstudie untersuchten Konstrukte wurden im theoretischen Hintergrund und Stand der Forschung (vgl. Kapitel 2.3.4) sowohl übergeordnet als auch im Kontext von Citizen Science, unter anderem anhand von Phillips et al. (2018), definiert. Im Anschluss wurden für die Untersuchung der Konstrukte etablierte Skalen herangezogen und auf die Forschungsfragen angepasst (vgl. Kapitel 5.3.2). Die verwendeten Skalen wurden bereits in vorherigen Studien hinsichtlich verschiedener Gütekriterien erprobt (z. B. BMU & UBA, 2019; Kremer, 2010; F. H. Müller et al., 2007; D. H. Rost, 2008; Sparfeldt et al., 2004). Im Rahmen der Begleitstudie wurde darüber hinaus die interne Konsistenz der Skalen über den Koeffizienten Cronbachs α bewertet, Skalen mit einer unzureichenden internen Konsistenz wurden von der Analyse ausgeschlossen.

Eine Problematik ergibt sich jedoch durch die geringe Fokussierung der fachspezifischen Items auf den Projektgegenstand beziehungsweise die durch die Lehrer:innen selbst gewählten Inhalte des Seminarfaches. Wie bereits dargestellt, wurden für fachspezifische Konzepte aufgrund der Interdisziplinarität und thematischen Vielfalt der Seminarfächer alle naturwissenschaftlichen Fächer betrachtet (Beispiel: „Ich könnte mir vorstellen, ein naturwissenschaftliches Fach zu studieren.“). Es ist jedoch möglich, dass sich ein Seminarfach auf einen Themenbereich, zum Beispiel auf chemische Aspekte der Stickstoffproblematik, fokussiert hat und die Begleitstudie damit Disziplinen umfasst, die in diesem Seminarfach keine Rolle gespielt haben. Würde eine strenge Operationalisierung der Intervention und Fokussierung auf vorgeschriebene Inhalte zugunsten der Güte der Begleitstudie verlangt werden, so könnten sich wissenschaftliche Zielsetzungen gegebenenfalls nicht mit schulischen Rahmenbedingungen und den Zielsetzungen der Lehrkräfte vereinbaren lassen und so in einer Unzufriedenheit beider Seiten resultieren. Eine strenge Operationalisierung der Intervention erscheint damit wenig sinnvoll. Dennoch kann der Grad der Operationalisierung erhöht werden, indem neben den Schülerlaboren weitere, obligatorische Veranstaltungen von den Wissenschaftler:innen an den Schulen

durchgeführt werden, sodass alle Schüler:innen ein festes Rahmenprogramm durchlaufen. Aufgrund der unvorhersehbaren COVID-19-Pandemie konnten ursprünglich geplante Veranstaltungen von den Wissenschaftler:innen teilweise nicht durchgeführt werden oder wurden von den Schüler:innen nicht besucht (vgl. Kapitel 5.4.3). Damit liegt eine mangelnde Reliabilität der Interventions-Implementierung vor, welche in einer Unterschätzung des Effekts der Intervention resultieren kann (Döring & Bortz, 2016).

5. Stichprobenziehung: Repräsentativität und externe Validität: Wie bereits dargestellt, sind die Stichprobengrößen der jeweiligen Vergleichsgruppe zu klein, als dass sie „die Population, aus der sie stammt und über die Aussagen getroffen werden sollen, möglichst unverzerrt „im Kleinen“ abbildet“ (Döring & Bortz, 2016, S. 96). Dies betrifft die Untergruppe der Schüler:innen und der Bürger:innen, die nicht am Citizen Science-Projekt teilgenommen haben (vgl. Kapitel 5.3.4). Die geringen Stichprobengrößen führen einerseits zu einer statistisch geringen Sensitivität der Tests, wie in Kapitel 5.4.1 und 5.4.2 bereits dargestellt wurde. Andererseits können Störfaktoren wie eine interventionsunabhängige Reifung der Schüler:innen innerhalb des Testzeitraums, Auswirkungen der COVID-19-Pandemie oder untersuchungsbedingte Testübung oder -müdigkeit durch die geringe Stichprobengröße der Vergleichsgruppe nicht erfasst und kontrolliert werden (Döring & Bortz, 2016).

Die Akquise von Teilnehmer:innen für die Vergleichsgruppe über die Bürger:innen als Multiplikator:innen stellte sich als besonders schwierig heraus, sodass andere Formen der Teilnehmer:innen-Akquise für zukünftige Studien berücksichtigt werden sollten. So könnten Flyer, Online-Foren oder kommerzielle Plattformen für die Gewinnung von Studienteilnehmer:innen für die Vergleichsgruppe genutzt werden. Im schulischen Kontext besteht die Möglichkeit, von vornherein viele Kurse oder Klassen für die Teilnahme als Vergleichsgruppe einzuplanen, um eine geringe Rücklaufquote auszugleichen. Eine Verkürzung des Fragebogens oder Fokussierung auf weniger Konstrukte ist außerdem zu empfehlen, um die Rücklaufquote, insbesondere für den Posttest, zu erhöhen.

6. Sorgfältige und sachgerechte Durchführung der Datenerhebung: Die Datenerhebung wurde über die Anwendung „SoSci Survey“ digital umgesetzt, sodass eine vollständige Sicherung der Rohdaten sichergestellt werden konnte. Die Lehrer:innen haben für die Schüler:innen jeweils als Versuchsleiter:innen agiert und den Fragebogen über einen Link zur Verfügung gestellt, sodass Versuchsleiter(erwartungs)effekte durch eine Beeinflussung in Richtung der den Lehrer:innen nicht bekannten Hypothesen nicht vorliegen können (Döring & Bortz, 2016). Die Bürger:innen haben den Fragebogen über einen Link von den Wissenschaftler:innen erhalten und diesen selbstständig zuhause ausgefüllt, sodass eine Beeinflussung während der Bearbeitung des Fragebogens ebenfalls nicht vorliegen konnte. Die Teilnahme an der Studie war zudem freiwillig und pseudo-anonymisiert, eine Nichtteilnahme führte zu keinen negativen

Auswirkungen. Die Durchführung der Studie im schulischen Kontext wurde durch die Landes-
schulbehörde genehmigt.

7. Datenaufbereitung: Im Anschluss an die Datenerhebung wurden die Daten aus „SoSci Survey“ exportiert und mit SPSS ausgewertet. Umgepolte Items wurden automatisch invertiert. Vor der Auswertung wurden die Pre- und Posttest-Daten zunächst über den Zuordnungscode und über weitere Angaben einander zugeordnet. In die Auswertung wurden im Anschluss nur die Daten der Schüler:innen und Bürger:innen einbezogen, die am Pre- und Posttest teilgenommen haben. Von den Teilnehmer:innen nicht beantwortete Items wurden als fehlende Werte behandelt. Mittelwerte für die Skalen und Subskalen wurden nur berechnet, wenn alle Items der (Sub-)Skala beantwortet wurden. Ausreißer wurden anhand von Boxplots identifiziert und gegebenenfalls von den statistischen Tests ausgeschlossen (vgl. Kapitel 5.3.3).

8. Datenanalyse: Die Daten wurden anschließend basierend auf einem festgelegten, methodischen Vorgehen ausgewertet, das Rückschlüsse auf die Korrektheit der Hypothesen erlaubt, sofern eine ausreichende Sensitivität der Tests gegeben ist (vgl. Kapitel 5.3.3). Da die Sensitivität durch die geringe Stichprobengröße negativ beeinflusst wurde, ist die Aussagekraft der Begleitstudie jedoch so gering, dass keine finalen Hypothesenentscheidungen möglich waren.

9. Ergebnispräsentation: Die Ergebnisse der Begleitstudie wurden in Kapitel 5.4 umfassend dargestellt, weitere Dokumente sind in Anhang O zu finden. Die Limitationen wurden in diesem Kapitel umfangreich diskutiert.

Wie die Methodenkritik zeigt, wird die Aussagekraft der Begleitstudie insbesondere durch unvorhersehbare Störeinflüsse wie die COVID-19-Pandemie und durch zu kleine Stichprobengrößen und daraus resultierende geringe Sensitivitäten der statistischen Tests stark eingeschränkt. Weitere ungünstige Bedingungen wie die Beeinflussung der untersuchten Variablen durch Störeinflüsse, die nicht kontrolliert werden konnten, führen insgesamt dazu, dass die aus der Forschungslücke abgeleiteten Forschungsfragen nicht final beantwortet werden können. Daher ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden, der im Folgenden konkretisiert wird.

5.5.3. Weiterer Forschungsbedarf

Zunächst ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden, um die dargestellten Forschungsfragen 2 und 3 zu beantworten und die Wirksamkeit des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung zu untersuchen. Aufgrund der in Kapitel 5.5.2 dargestellten Limitationen der Begleitstudie ist eine finale Hypothesenentscheidung und Beantwortung der Forschungsfragen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Die Ergebnisse geben lediglich Hinweise darauf, dass sich die Teilnahme an einem Citizen Science-Projekt positiv auf das themenspezifische Umweltverhalten und die themenspezifischen Umweltkenntnisse auswirken kann. Über die Wirksamkeit des Citizen Science- und

Forschungspatenansatzes im Kontext der naturwissenschaftlichen Schulbildung können unter anderem aufgrund der geringen Stichprobengröße und der resultierenden, geringen Sensitivität der statistischen Testverfahren keine Aussagen getroffen oder Hinweise abgeleitet werden. Die Begleitstudie bezieht sich zudem auf die Wirksamkeit des dargestellten Citizen Science-Projektes in Kombination mit dem Forschungspatenansatz. Um die Wirksamkeit von Citizen Science übergeordnet zu untersuchen, bedarf es weiterer Studien und Metastudien zu verschiedenen Citizen Science-Projekten, die beispielsweise andere Forschungsschwerpunkte aufgreifen, sich an andere Zielgruppen richten oder ohne ein Mentoringkonzept wie dem Forschungspatenansatz arbeiten. Erste Studien, welche die Learning Outcomes von Citizen Science untersuchen, wurden bereits in Kapitel 2.3.4 dargestellt (He et al., 2019; Hiller & Kitsantas, 2014; Price & Lee, 2013; Silva et al., 2016). Für ein umfassendes Verständnis der Wirksamkeit von Citizen Science sind weitere Studien erforderlich. Hierbei sind verschiedene Variationen, beispielsweise der Klassenstufen, der Schulformen, der Partizipationsgrade (vgl. Berndt, 2021), der Einbindung in den schulischen Kontext (Regelunterricht vs. Projektarbeit) oder des Interventionsortes (Schule vs. Universität) möglich, um die Frage nach einer optimalen Einbindung von Citizen Science-Projekten in den schulischen Kontext zu beantworten. Durch eine ergänzende Befragung der Lehrer:innen können darüber hinaus Rahmenbedingungen und Zielvorstellungen der Schulen als Voraussetzung für Citizen Science im schulischen Kontext abgeleitet werden.

Auch die Wirksamkeit von Mentoring-Ansätzen im Kontext von Citizen Science ist bisher noch nicht systematisch erforscht worden. Die Evaluation des Citizen Science-Projektes zeigt, dass Mentoring-Ansätze wie der Forschungspatenansatz in Citizen Science-Projekten eine persönliche Betreuung der Teilnehmer:innen gewährleisten können und eine Vernetzung verschiedener Zielgruppen des Projektes fördern. Die Wirksamkeit des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, das Interesse und die Motivation, die Selbstwirksamkeitserwartung und das Selbstkonzept konnte aufgrund der geringen Aussagekraft der Begleitstudie nicht belegt werden. Der Forschungspatenansatz bringt zudem auch Nachteile mit sich, beispielsweise eine potenzielle Überforderung der Schüler:innen bei der Bewältigung ihrer Aufgaben als Forschungspat:innen. Alternativen zu dem dargestellten Ansatz sind die Ausbildung von interessierten Bürger:innen zu Forschungspat:innen oder die Einbettung von Studierenden/studentischen Hilfskräften in das Projekt. In dem dargestellten Projekt haben die Lehrer:innen in gewisser Weise ebenfalls als Mentor:innen agiert und die Schüler:innen in ihrer Rolle als Forschungspat:innen unterstützt. Die besondere Rolle des Engagements von Lehrer:innen bei der Unterstützung von Schüler:innen in Forschungsprojekten wurde bereits von Koomen et al. (2018) beobachtet. In dem von ihnen untersuchten Citizen Science-Projekt versuchten Schüler:innen insbesondere dann die Identität von Wissenschaftler:innen zu übernehmen, wenn sie sich nicht nur selbst als diese sahen, sondern auch von ihrer Lehrerin als solche betrachtet und behandelt wurden. Um die Eignung und

Wirksamkeit verschiedener Mentoring-Ansätze im Kontext von Citizen Science zu erproben, zu untersuchen und gegenüberzustellen, bedarf es weiterer Projekte mit begleitenden Studien.

Weiterer Forschungsbedarf besteht darüber hinaus bezüglich der Impacts von Citizen Science, also nachhaltiger, langfristiger Veränderungen, die erst nach 10 oder mehr Jahren nach Etablierung eines Projektes auftreten und angesichts dieser langen Zeitspanne nur selten untersucht werden (Shirk et al., 2012). Aufgrund der begrenzten Dauer des durchgeführten Citizen Science-Projektes wurden Langzeitveränderungen im Rahmen der Begleitstudie ebenfalls nicht untersucht.

Auch ein Vergleich zwischen der Wirksamkeit von Citizen Science-Projekten und weiteren Angeboten im Bereich der Umweltbildung oder naturwissenschaftlichen Schulbildung ist zielführend, um das Potenzial von Citizen Science zu bewerten. Vergleichend können beispielsweise CitizenLabs herangezogen und hinsichtlich der Fragestellung untersucht werden, inwieweit eine Sensibilisierung der Teilnehmer:innen für den Umweltschutz durch unterschiedliche Angebote besser gelingen kann (Kreienhop & Beeken, 2022).

Schlussendlich bleiben bezüglich des Potenzials von Citizen Science für die Bildung viele Fragen offen, für welche in dieser Arbeit nur erste Hinweise abgeleitet werden konnten. Inwieweit die vorliegende Arbeit die identifizierte Forschungslücke schließen und das erwartete Potenzial von Citizen Science für die fachwissenschaftliche Forschung und Bildung evidenzbasiert nachweisen kann, wird im Folgenden anhand der beiden durchgeführten Studien zusammengefasst.

6. Fazit und Ausblick

Durch den Citizen Science-Ansatz wird eine aktive Beteiligung der Öffentlichkeit an wissenschaftlicher Forschung ermöglicht (Vohland et al., 2021). Dabei werden verschiedene Zielsetzungen verfolgt, die sich nicht nur auf Outcomes für die fachwissenschaftliche Forschung beschränken, sondern auch verschiedene individuelle Outcomes für die Teilnehmenden umfassen (Shirk et al., 2012). Hierzu zählen unter anderem verschiedene Learning Outcomes wie beispielsweise ein höheres Interesse für naturwissenschaftliche Themen, ein besseres Verständnis von den Naturwissenschaften oder ein höheres Bewusstsein für die Auswirkungen des eigenen Verhaltens (Phillips et al., 2018). Insbesondere im Bereich der Nachhaltigkeit bietet Citizen Science damit die Möglichkeit, verschiedene gesellschaftsrelevante Problemstellungen partizipativ zu erforschen und gleichzeitig für diese zu sensibilisieren. Darüber hinaus wird Citizen Science als Möglichkeit gesehen, bestehende Datenlücken, beispielsweise bei der Überprüfung des Fortschritts der SDGs, durch die Beteiligung von Bürger:innen an wissenschaftlicher Forschung zu schließen (Campbell et al., 2020; Fraisl et al., 2020). Die World Water Quality Alliance (2021) und das European Marine Board (Garcia-Soto et al., 2017) empfehlen den Citizen Science-Ansatz als potenziell leistungsfähiges Instrument für das Monitoring und die Forschung zur Güte verschiedener Gewässertypen. Entsprechend dieser Empfehlungen scheint der Citizen Science auch geeignet zu sein, um der Stickstoffbelastung von Gewässern zu begegnen, die im Nordwesten Deutschlands vielerorts zu Überschreitungen gesetzlicher Grenz- und Zielwerte an Probenahmestellen in Oberflächengewässern und im Grundwasser führt (BMU, 2020). Global führen die Stickstoffemissionen einiger weniger, landwirtschaftlich intensiv genutzter Regionen zur Überschreitung der planetaren Belastungsgrenze für den Stickstoffkreislauf (Steffen, Richardson et al., 2015).

Obgleich der Citizen Science-Ansatz viele Outcomes verspricht, sind die tatsächliche Wirksamkeit von Citizen Science im Bildungsbereich und das Potenzial für die Gewässerforschung bisher wenig erforscht. An dieser Stelle setzt ein von den Universitäten Osnabrück und Oldenburg durchgeführtes Citizen Science-Projekt an, in dem rund 600 Bürger:innen und 200 Schüler:innen die Nitratbelastung von Gewässern in den Landkreisen Osnabrück, Emsland, Vechta und Cloppenburg sowie der Stadt Osnabrück gemeinsam mit den Wissenschaftler:innen untersucht haben. Die Schüler:innen haben dabei als sogenannte Forschungspat:innen agiert und die Bürger:innen bei den Nitratmessungen unterstützt. Die von den Teilnehmer:innen erhobenen Daten wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation ausgewertet, um das Potenzial des Citizen Science-Ansatzes für die Gewässerforschung zu evaluieren.

In einer Begleitstudie wurde darüber hinaus die Wirksamkeit des Citizen Science- und Forschungspatenansatzes für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung untersucht. Die Ergebnisse beider Studien werden im Folgenden zusammengefasst.

Hauptstudie: Potenzial von Citizen Science für die Gewässerforschung

Durch das hohe Engagement der Teilnehmer:innen wurden im Rahmen des Citizen Science-Projektes über 18 Monate insgesamt 545 Probenahmestellen der Gewässertypen Fließgewässer, stehende Gewässer, Brunnenwasser, Quellwasser und Regenwasser untersucht. Die Teilnehmer:innen haben dabei von September 2019 bis März 2021 mehrfach, wenn möglich zweiwöchentlich, die Nitratkonzentration von Gewässern in ihrer Region mit Teststäbchen gemessen und die Ergebnisse über eine Webseite an die Universität Osnabrück übermittelt. Insgesamt 8754 Gewässerproben wurden auf diese Weise von den Teilnehmer:innen untersucht.

Anhand der Monitoring-Daten wurde das Potenzial von Citizen Science für die fachwissenschaftliche Forschung anhand folgender Hauptforschungsfrage erforscht.

1. „Inwieweit kann der Citizen Science-Ansatz einen Beitrag zur Untersuchung der Stickstoffbelastung von Gewässern leisten?“

Die Hauptforschungsfrage wurde in vier Subforschungsfragen zur Eignung verschiedener Messmethoden für Citizen Science, zur räumlichen und zeitlichen Skalierung der Monitoring-Daten, zur Eignung der Citizen Science-Daten für die Analyse räumlicher und zeitlicher Einflussfaktoren und zur Kohärenz der Monitoring-Ergebnisse mit den Ergebnissen weiterer Monitoring-Initiativen konkretisiert.

Aufgrund der einfachen Anwendbarkeit und geringen Kosten wurden Nitrat-Teststäbchen, mit denen die Nitratkonzentration halbquantitativ durch den Farbabgleich eines Testfeldes mit einer Referenzskala bestimmt werden kann, als Messmethode für das Citizen Science-Projekt ausgewählt (JBL GmbH & Co KG, 2018). Die Genauigkeit der Teststäbchen wurde in einer Begleituntersuchung aufbauend auf den Daten von Rolf (2021) untersucht. Es zeigte sich, dass die Teststäbchen im Allgemeinen geeignet sind, um einen Überblick über die Nitratbelastung einer Region zu erhalten und starke Einflüsse auf die Nitratbelastung nachzuweisen. Da die Teilnehmer:innen die Nitratkonzentration mit dieser Messmethode selbstständig an der Probenahmestelle bestimmen konnten, wurde eine hohe Partizipation der Teilnehmer:innen erreicht. Dadurch konnte der Zeit- und Kostenaufwand für die Wissenschaftler:innen effektiv reduziert werden. Werden mit einem Citizen Science-Projekt wissenschaftliche Zielsetzungen verfolgt, die genauere Messdaten erfordern, so gelangen die Teststäbchen aufgrund der Messungenauigkeit schnell an ihre Grenzen, sodass auf andere Messmethoden wie beispielsweise die photometrische Bestimmung der Nitratkonzentration zurückgegriffen werden sollte. Diese könnten beispielsweise in CitizenLabs gemeinsam mit Wissenschaftler:innen und Teilnehmer:innen durchgeführt werden, um eine hohe Partizipation der Teilnehmer:innen zu ermöglichen.

Nach der Validierung der Teststäbchen wurden die Daten aus dem Citizen Science-Projekt zunächst hinsichtlich ihrer zeitlichen Skalierung untersucht. 38,8 % der Probenahmestellen wurden auch nach 15 Monaten noch von den Teilnehmer:innen beprobt, was die Analyse saisonaler Schwankungen ermöglichte und im Vergleich zu weiteren Citizen Science-Projekten auf ein hohes Durchhaltevermögen und eine lange aktive Beteiligung der Teilnehmer:innen hinweist (z. B. Moczek, 2018; Neis & Zipf, 2012). Zur Analyse der räumlichen Verteilung wurden Heatmaps erstellt. Für Fließgewässer und Brunnen konnten durch das Citizen Science-Projekt flächendeckende Messnetze realisiert werden, die einen großen Teil des Untersuchungsgebietes (Landkreise Osnabrück, Emsland, Cloppenburg, Vechta und Stadt Osnabrück) umfassen. Aufgrund fehlender Probenahmestellen im ländlichen Raum und der höheren Dichte der Probenahmestellen in städtischen Gebieten sind diese Messnetze jedoch nicht repräsentativ für das gesamte Gebiet. Für stehende Gewässer, Regenwasser und Quellwasser war es aufgrund einer geringeren Anzahl an Probenahmestellen ebenfalls nicht möglich, repräsentative Messnetze zu bilden. Verschiedene Maßnahmen wie beispielsweise eine intensivere Bewerbung des Projektes im ländlichen Raum oder eine Live-Kartographie noch fehlender Gebiete können herangezogen werden, um die räumliche Verteilung der Daten zu optimieren. Es bleibt daher in weiteren Projekten zu prüfen, ob repräsentative Messnetze mit dem Citizen Science-Ansatz realisiert werden können.

Einflüsse unterschiedlicher Gewässermerkmale sowie räumliche und zeitliche Einflüsse auf die Nitratbelastung der verschiedenen Gewässertypen wurden mithilfe nichtparametrischer Testverfahren anhand der Citizen Science-Daten untersucht. Sowohl räumliche Einflüsse wie die Landbedeckung und -nutzung und hydrogeologische Einflussfaktoren, als auch jahreszeitliche Schwankungen konnten beobachtet und anhand der Citizen Science-Daten statistisch nachgewiesen werden. Der Citizen Science-Ansatz gelangt jedoch an seine Grenzen, wenn für eine wissenschaftliche Fragestellung weitere Parameter wie beispielsweise die Zustromgebiete der Probenahmestellen bekannt sein müssen, die mit dem Citizen Science-Ansatz nicht bestimmt werden können. Dennoch zeigen das dargestellte Projekt und weitere bereits durchgeführte Citizen Science-Projekte (z. B. Calderón Cendejas et al., 2021), dass verschiedene Einflüsse auf die Nitratbelastung bei ausreichender Anzahl an Probenahmestellen mithilfe des Citizen Science-Ansatzes untersucht werden können. Der Citizen Science-Ansatz bietet dabei die Möglichkeit, mit geringem personellem und zeitlichem Aufwand von Wissenschaftler:innen durch die Zusammenarbeit mit der Gesellschaft langfristige, flächendeckende Messreihen durchzuführen und offenbart damit ein großes Potenzial für die Gewässerforschung.

Dieses Potenzial bestätigt sich auch durch den Vergleich der Ergebnisse des Citizen Science-Projektes mit weiteren Messinitiativen. Unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit der Teststäbchen sind die durch das Citizen Science-Projekt erhobenen Daten mit den Brunnenwasser-Messungen des VSR-Gewässerschutzes vergleichbar (VSR-Gewässerschutz e.V., 2021b). Eine Nearest Neighbor-Analyse mit den Probenahmestellen des NLWKN und des

Citizen Science-Projektes sowie ein anschließender Vergleich der Nitratbelastungen ergab eine Übereinstimmung von 87,7 % für Fließgewässer-Probenahmestellen und 59,5 % für die beprobten Brunnen. Für 27 der 31 Citizen Science-Probenahmestellen mit vom NLWKN abweichenden Ergebnissen konnten potenzielle Ursachen für die Abweichungen identifiziert werden. Beispielsweise ließen sich die Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen auf unterschiedliche Messbedingungen (z. B. Filtertiefen), große Entfernungen zwischen den zugeordneten Probenahmestellen oder starke lokale Nitratschwankungen zurückführen. Aufgrund einer zu geringen Anzahl an direkt vergleichbaren Probenahmestellen konnte die Güte des Citizen Science-Datensatzes nicht endgültig bewertet werden. In Gebieten, in denen bestehende Messnetze nur eine geringe Probenahmestellendichte aufweisen, können Citizen Science-Messdaten als Ergänzung herangezogen werden, wie auch Bishop et al. (2020) zeigen.

Insgesamt zeigt der Citizen Science-Ansatz damit ein großes Potenzial für die Gewässerforschung. So ist es durch die Beteiligung der Öffentlichkeit an der Gewässerforschung nicht nur möglich, einen Überblick über die Nitratbelastung in einem Gebiet zu erhalten, sondern auch verschiedene Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung zu untersuchen. Verschiedene Optimierungen des dargestellten Konzeptes versprechen eine weitere Steigerung des Potenzials von Citizen Science für die Gewässerforschung. Die dargestellte Arbeit legitimiert damit den Vorschlag der World Water Quality Alliance (2021) und des European Marine Board (Garcia-Soto et al., 2017), Citizen Science für das Monitoring und die Forschung zur Gewässergüte, insbesondere zur Stickstoffbelastung verschiedener Gewässertypen, einzusetzen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht unter anderem bezüglich der Anwendbarkeit von Citizen Science zur Erforschung weiterer biologischer, physikalischer und chemischer Parameter. Während einige Parameter wie beispielsweise die Plastikverschmutzung von Gewässern oder die Wassertemperatur und der pH-Wert bereits durch Projekte wie die „Plastikpiraten“ (Kießling et al., 2020) und durch Citizen Science-Projekte am Bronx River (Bronx River Alliance, 2015) untersucht wurden, besteht bezüglich vieler weiterer Parameter noch Forschungsbedarf. Um diese Parameter zu untersuchen, bedarf es einer Entwicklung und Validierung weiterer Messmethoden, die für den Citizen Science-Ansatz geeignet sind. Eine Möglichkeit hierzu besteht in der Kombination von Teststäbchen mit kostengünstigen Farbsensoren, mit denen die Verfärbung des Testfeldes objektiv erfasst werden kann. Eine an dieses Vorgehen angelehnte DoItYourself-Messmethode für Nitrat wird aktuell in Zusammenarbeit mit der Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück entwickelt.

Darüber hinaus bleibt zu prüfen, ob das dargestellte Citizen Science-Konzept unter Berücksichtigung der Verbesserungsvorschläge auch in weiteren Regionen erfolgreich etabliert werden kann. Insbesondere in Regionen, in denen bis dato noch keine Monitoring-Programme durchgeführt werden, bieten Bürgerforschungsprojekte, mit denen beispielsweise bisherige Datenlücken geschlossen oder gesundheitsgefährdende Stoffe und Umweltschadstoffe identifiziert

werden können, ein großes Potenzial für die Gesellschaft und Wissenschaft sowie übergeordnet für eine nachhaltige Entwicklung.

Begleitstudie: Potenzial von Citizen Science für die Umweltbildung und naturwissenschaftliche Schulbildung

Neben dem Potenzial von Citizen Science für die fachwissenschaftliche Forschung wurde die Wirksamkeit von Citizen Science im Bereich der Umweltbildung und naturwissenschaftlichen Schulbildung untersucht. Die Begleitstudie fokussierte sich dabei auf die folgenden Forschungsfragen.

2. „Inwiefern kann das Citizen Science-Projekt das allgemeine Umweltbewusstsein und das themenspezifische Umweltbewusstsein (Einstellungen, Verhalten und Kenntnisse zum Thema Gewässerschutz) der Projektteilnehmer:innen positiv beeinflussen?“
3. „Inwieweit hat die Teilnahme der Schüler:innen als Forschungspartner:innen an einem Citizen Science-Projekt eine Wirkung auf Interesse und Motivation, Selbstwirksamkeitserwartung und Selbstkonzept sowie das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften im naturwissenschaftlichen Unterricht?“

Zur Überprüfung der zu diesen Forschungsfragen aufgestellten Hypothesen wurde eine quantitative Fragebogenstudie im Zwei-Gruppen Pre-Post-Design mit bereits erprobten, für die Studie adaptierten Skalen durchgeführt. Aufgrund der starken Beeinflussung der Begleitstudie durch die COVID-19-Pandemie (WHO, 2020) und durch weitere Störeinflüsse sowie aufgrund einer zu kleinen Stichprobengröße der Vergleichsgruppen konnten beide Forschungsfragen jedoch nicht final beantwortet werden.

Dennoch liefern die Daten erste Hinweise darauf, dass sich die Teilnahme an dem Citizen Science-Projekt positiv auf das Umweltverhalten und Umweltkenntnisse in Bezug auf den Gewässerschutz ausgewirkt hat und Citizen Science damit einen aktiven Beitrag zum Umweltschutz leisten kann. Diese Vermutung wird durch die Ergebnisse weiterer Studien zu Citizen Science gestützt (z. B. Berndt, 2021; Vetenskap & Allmänhet, 2021). Weiterer Forschungsbedarf im Bereich Science of Citizen Science ist jedoch vorhanden, da es für den noch recht jungen Forschungsansatz bis dato an systematischen, (quasi-)experimentellen Studien zum Bildungspotenzial, auch im Bereich der Umweltbildung, mangelt und bisherige Ergebnisse differenzieren sind (Berndt, 2021).

Dieser weitere Forschungsbedarf besteht auch zum Potenzial von Citizen Science für die naturwissenschaftliche Schulbildung. Diese Arbeit stellt einen Ansatz dar, mit dem unter Berücksichtigung der genannten Verbesserungsmöglichkeiten eine systematische Untersuchung der Wirksamkeit von Citizen Science auf das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, das Interesse und die Motivation, die Selbstwirksamkeit und das Selbstkonzept im Kontext des naturwissenschaftlichen Unterrichts möglich ist. Aufgrund der bereits dargestellten Gründe ist

die Aussagekraft der durchgeführten Studie jedoch zu gering, um Forschungsfrage 3 zu beantworten. Weitere Studien (z. B. Aivelo & Huovelin, 2020; Berndt, 2021; Hiller & Kitsantas, 2014; Lorke & Schmid-Loertzer, 2021) deuten im Allgemeinen eher auf eine positive Wirkung von Citizen Science in Bezug auf die untersuchten Konstrukte hin, jedoch sind auch davon abweichende Studienergebnisse zu finden, die unter anderem auf ungeeignete Untersuchungsmethoden zurückgeführt werden (Kruse et al., 2020). Daher ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden, um die tatsächliche Wirksamkeit von Citizen Science für die naturwissenschaftliche Schulbildung zu untersuchen und die Implementierung von Citizen Science in den schulischen Unterricht zu legitimieren.

7. Publikationen

Die aus dem Projekt entstandenen Publikationen sind in folgender Übersicht sowie in vollständiger Fassung in Anhang R zu finden, sofern open-access veröffentlicht. Weitere vom Projekt losgelöste Publikationen der Autorin werden nachfolgend aufgeführt.

Wissenschaftliche Publikationen als Erstautorin:

- Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2021). Citizen Science & Schule: Wie Schülerprojekte die Forschung zu Themen der Nachhaltigkeit vorantreiben können. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 32(183), 8–15.
- Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2021). Nachhaltigkeit in Gesellschaft, Wissenschaft, Politik und Schule. *Chemie in unserer Zeit*, 55(2), 125–129.
<https://doi.org/10.1002/ciuz.202000006>
- Brockhage, F., Amel, H., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022). „Vom VW-Abgasskandal zur Stickstoffproblematik“: Ein Experimentalssetting (nicht nur) für den Chemieunterricht. *CHEMKON*, 29, Artikel ckon.202100091, 1–6. <https://doi.org/10.1002/ckon.202100091>
- Brockhage, F., Lüsse, M., Klasmeier, J., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022). Citizen Science as an Innovative Approach to Analyze Spatial and Temporal Influences on Nitrate Pollution of Water Bodies: Results of a Participatory Research Project in Germany. *Sustainability*, 14, 9516.
<https://doi.org/10.3390/su14159516>
- Brockhage, F. & Beeken, M. (2022). Citizen Science & Schule – Wirkungen eines Forschungsprojektes zum Thema Gewässerschutz. In S. Habig & H. van Vorst (Hrsg.), *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Virtuelle Jahrestagung 2021* (S. 524–527).

Wissenschaftliche Publikationen als Koautorin:

- Lüsse, M., Brockhage, F., Pietzner, V. & Beeken, M. (2021). Nachhaltige Unterrichtsvorschläge zur Stickstoffproblematik. *Chemie in unserer Zeit*, 55(3), 186–191.
<https://doi.org/10.1002/ciuz.202000005>
- Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2021). Effects of Doing Home Experiments within a Chemistry Citizen Science Project. In G. S. Carvalho, A. S. Afonso & Z. Anastácio (Hrsg.), *Fostering scientific citizenship in an uncertain world (Proceedings of ESERA 2021)* (S. 621–630). CIEC, University of Minho.
- Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022). Citizen science and its potential for science education. *International Journal of Science Education*, 44(7), 1120–1142.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2067365>

Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022). Gemeinsam für unsere Zukunft – Potenzial eines umweltrelevanten Citizen Science-Projekts für den Chemieunterricht. *CHEMKON*, 29, 193–197. <https://doi.org/10.1002/ckon.202100085>

Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022). Citizens' views on home experiments in the context of a chemistry citizen science project. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 18(8), em2142. <https://doi.org/10.29333/ejmste/12246>

Begleithefte für das Citizen Science-Projekt:

Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Mit Citizen Science die Nitratbelastung von Gewässern erforschen (Themenheft 1)*. <https://doi.org/10.48693/122>

Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Die Stickstoffproblematik (Themenheft 2)*. <https://doi.org/10.48693/123>

Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Ergebnisse des Nitrat-Monitorings (Themenheft 3)*. <https://doi.org/10.48693/124>

Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Der Stickstoffproblematik auf der Spur (Themenheft 4: Stickstoff-Box - Begleitheft)*. <https://doi.org/10.48693/125>

Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Der Stickstoffproblematik auf der Spur (Themenheft 5: Stickstoff-Box - Experimentierheft)*. <https://doi.org/10.48693/126>

Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Der Stickstoffproblematik auf der Spur (Themenheft 6: Schülerlabor, inkl. Begleitheft für Lehrkräfte)*. <https://doi.org/10.48693/127>

Weitere, vom Projekt losgelöste Publikationen der Autorin:

Otte, L., Brockhage, F., Kreienhop, N., Lusmüller, J., Schmidt, J. & Beeken, M. (2020). Eigenschaften, Entstehung und Verwendung von Mikroplastik: Kompetenzen in den Bereichen Fachwissen und Erkenntnisgewinnung erwerben. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 31(179), 20–27.

Otte, L., Brockhage, F., Kreienhop, N., Lusmüller, J., Schmidt, J. & Beeken, M. (2020). Lösungsansätze für die Mikroplastikproblematik: Kompetenzen in den Bereichen Bewertung und Kommunikation erwerben. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 31(179), 28–33.

Otte, L., Beeken, M., Brockhage, F., Jansen, C., Kreienhop, N., Lusmüller, J., Penning, H., Peper-Bienzeisler, R. & Schmidt, J. (2021). *Corona zwischen Mythos und Wissenschaft: Mit Tonic Water & Co. in 13 Experimenten die Pandemie verstehen*. Bombini Verlag.

8. Förderung

Das Projekt „Schüler und Bürger forschen zusammen mit Wissenschaftlern zum Thema Stickstoffbelastung von Gewässern“ wurde finanziell durch die DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) gefördert (Aktenzeichen: 34540/01).

Der Abschlussbericht ist zu finden unter:

https://www.dbu.de/projekt_34540/01_db_2848.html (zuletzt aufgerufen am 28.11.2022)

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Literaturverzeichnis

- Aivelo, T. & Huovelin, S. (2020). Combining formal education and citizen science: a case study on students' perceptions of learning and interest in an urban rat project. *Environmental Education Research*, 26(3), 324–340.
<https://doi.org/10.1080/13504622.2020.1727860>
- Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K. & Wilke, B.-M. (2018). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>
- Amt für Wasser und Energie (Hrsg.). (2020). *Grundwasseruntersuchungen im Kanton St.Gallen: Spezialauswertung Nitrate und Chloride im Grundwasser in und nach den Trockenjahren 2003 und 2018*.
- Auerbach, J., Barthelmess, E. L., Cavalier, D., Cooper, C. B., Fenyk, H., Haklay, M., Hulbert, J. M., Kyba, C. C. M., Larson, L. R., Lewandowski, E. & Shanley, L. (2019). The problem with delineating narrow criteria for citizen science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(31), 15336–15337.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1909278116>
- Ayeni, A. O. & Odume, J. I. (2020). Analysis of Algae Concentration in the Lagos Lagoon Using Eye on Water and Algae Estimator Mobile App. *FUTY Journal of the Environment*, 14(2), 105–115.
- Bach, M., Häußermann, U., Klement, L., Knoll, L., Breuer, L., Weber, T., Fuchs, S., Heldstab, J., Reutimann, J. & Schäppi, B. (2020). *Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010-2014 (DESTINO Bericht 2)*. TEXTE: 64/2020. Umweltbundesamt.
- Balla, S., Müller-Pfannenstiel, K., Uhl, R., Kiebel, A., Lüttmann, J., Lorentz, H., Düring, I., Schlutow, A. & Schleuschner, T. (Hrsg.). (2013). *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik: Bd. 1099. Untersuchung und Bewertung von straßenverkehrsbedingten Nährstoffeinträgen in empfindliche Biotope*. Fachverlag NW.
- Ballard, H. L., Fernandez-Gimenez, M. E. & Sturtevant, V. E. (2008). Integration of Local Ecological Knowledge and Conventional Science: a Study of Seven Community-Based Forestry Organizations in the USA. *Ecology and Society*, 13(2).
<https://doi.org/10.5751/ES-02594-130237>
- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. W.H. Freeman and Company.
- Baptista, M., Reis, P. & Andrade, V. de (2018). Let's save the bees! An environmental activism initiative in elementary school. *Visions for Sustainability*(9), 41–48.
<https://doi.org/10.13135/2384-8677/2772>

- Bauchmüller, M. (31. Dezember 2014). Umweltbundesamt - Stickstoff bedroht Pflanzen und Tiere. *Süddeutsche Zeitung*. www.sz.de/1.2286099
- Baur, N. & Blasius, J. (2014). *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-18939-0>
- Bautista-Puig, N., Filippo, D. de, Mauleón, E. & Sanz-Casado, E. (2019). Scientific Landscape of Citizen Science Publications: Dynamics, Content and Presence in Social Media. *Publications*, 7(1), 12. <https://doi.org/10.3390/publications7010012>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.). (September 2013). *Möglichkeiten der Nitratentfernung aus dem Trinkwasser* (Merkblatt 1.6/2).
- Bechtel, A. (2008). *Abschätzung regionaler Nitrateinträge in das Grundwasser unter Verwendung von Nmin-Daten* [Dissertation]. Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe.
- Becker, M., Caminiti, S., Fiorella, D., Francis, L., Gravino, P., Haklay, M., Hotho, A., Loreto, V., Mueller, J., Ricchiuti, F., Servedio, V. D. P., Sîrbu, A. & Tria, F. (2013). Awareness and learning in participatory noise sensing. *PloS one*, 8(12), e81638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081638>
- Beierlein, C., Kovaleva, A., Kemper, C. J. & Rammstedt, B. (2012). *Ein Messinstrument zur Erfassung subjektiver Kompetenzerwartungen. Allgemeine Selbstwirksamkeit Kurzskala (ASKU) (GESIS-Working Papers, 2012/17)*. GESIS - Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften.
- Bell, P., Lewenstein, B., Shouse, A. W. & Feder, M. A. (2009). *Learning Science in Informal Environments: People, Places, and Pursuits*. National Academies Press.
- Bell, S., Marzano, M., Cent, J., Kobierska, H., Podjed, D., Vandzinskaite, D., Reinert, H., Armaitiene, A., Grodzińska-Jurczak, M. & Muršič, R. (2008). What counts? Volunteers and their organisations in the recording and monitoring of biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 17(14), 3443–3454. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9357-9>
- Berkowitz, A. R., Ford, M. E. & Brewer, C. A. (2005). A framework for integrating ecological literacy, civics literacy, and environmental citizenship in environmental education. In E. A. Johnson & M. J. Mappin (Hrsg.), *Environmental Education and Advocacy: Changing Perspectives of Ecology and Education* (S. 227–266).
- Berndt, J. (2021). *Lernen in Citizen Science: Die Auswirkungen unterschiedlicher Partizipationsansätze auf die Lernenden* [Dissertation]. Universität Koblenz-Landau, Koblenz-Landau.
- Birch, H. (2016). Das Haber-Bosch-Verfahren. In H. Birch (Hrsg.), *50 Schlüsselideen Chemie* (S. 68–71). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48510-1_17

- Bischoff, A.-M. (2021). „Nitrat – Skandal oder Panikmache?“ – Konzeption einer Lerneinheit für den Chemieunterricht der Sekundarstufe I im Kontext eines Citizen-Science Projektes [Masterarbeit]. Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg.
- Bishop, I. J., Warner, S., van Noordwijk, T. C. G. E., Nyoni, F. C. & Loiseau, S. (2020). Citizen Science Monitoring for Sustainable Development Goal Indicator 6.3.2 in England and Zambia. *Sustainability*, 12(24), 10271. <https://doi.org/10.3390/su122410271>
- Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinnerby, S., Davidson, E., Dentener, F., Emmett, B., Erisman, J.-W., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A., Pardo, L. & de Vries, W. (2010). Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America*, 20(1), 30–59. <https://doi.org/10.1890/08-1140.1>
- Bodirsky, B. L., Popp, A., Lotze-Campen, H., Dietrich, J. P., Rolinski, S., Weindl, I., Schmitz, C., Müller, C., Bonsch, M., Humpenöder, F., Biewald, A. & Stevanovic, M. (2014). Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution. *Nature communications*, 5, 3858. <https://doi.org/10.1038/ncomms4858>
- Bonn, A., Brink, W., Hecker, S., Herrmann, T. M., Liedtke, C., Premke-Kraus, M., Voigt-Heucke, S., Gönner, J. von, Altmann, C. S., Bauhus, W., Bengtsson, L., Büermann, A., Brandt, M., Bruckermann, T., Dietrich, P., Dörler, D., Eich-Brod, R., Eichinger, M., Ferschinger, L., . . . Woll, S. (2021). *Weißbuch Citizen Science Strategie 2030 für Deutschland*. <https://doi.org/10.31235/osf.io/ew4uk>
- Bonn, A., Richter, A., Vohland, K., Pettibone, L., Brandt, M., Feldmann, R., Goebel, C., Greife, C., Hecker, S., Hennen, L., Hofer, H., Kiefer, S., Klotz, S., Kluttig, T., Krause, J., Küsel, K., Liedtke, C., Mahla, A., Neumeier, V., . . . Ziegler, D. (2016). *Grünbuch Citizen Science Strategie 2020 für Deutschland*. Projekt Bürger schaffen Wissen - Wissen schafft Bürger (GEWISS). <http://www.buergerschaffenwissen.de/>
- Bonney, R., Phillips, T. B., Ballard, H. L. & Enck, J. W. (2016). Can citizen science enhance public understanding of science? *Public Understanding of Science*, 25(1), 2–16. <https://doi.org/10.1177/0963662515607406>
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler ; mit 87 Tabellen* (4., überarb. Aufl.). Springer-Medizin-Verlag.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7. Aufl.). *Springer-Lehrbuch*. Springer.
- Brasseur, G. P., Schultz, M., Granier, C., Saunio, M., Diehl, T., Botzet, M., Roeckner, E. & Walters, S. (2006). Impact of Climate Change on the Future Chemical Composition of the Global Troposphere. *Journal of Climate*, 19(16), 3932–3951. <https://doi.org/10.1175/JCLI3832.1>

- Brendelberger, H. (o. J.). *Seenbeobachtungsprogramm, Kreis Plön: Methoden der chemischen Analysen*. http://www.seen-transparent.de/files/downloads/wasseranalysen_methoden_1993_2010.pdf
- Breuer, L., Hiery, N., Kraft, P., Bach, M., Aubert, A. H. & Frede, H.-G. (2015). HydroCrowd: a citizen science snapshot to assess the spatial control of nitrogen solutes in surface waters. *Scientific reports*, 5, 16503. <https://doi.org/10.1038/srep16503>
- Brockhage, F., Amel, H., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022). „Vom VW-Abgasskandal zur Stickstoffproblematik“: Ein Experimentalssetting (nicht nur) für den Chemieunterricht. *CHEMKON*, 29, Artikel ckon.202100091, 1–6. <https://doi.org/10.1002/ckon.202100091>
- Brockhage, F. & Beeken, M. (2022). Citizen Science & Schule – Wirkungen eines Forschungsprojektes zum Thema Gewässerschutz. In S. Habig & H. van Vorst (Hrsg.), *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Virtuelle Jahrestagung 2021* (S. 524–527).
- Brockhage, F., Lüsse, M., Klasmeier, J., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022). Citizen Science as an Innovative Approach to Analyze Spatial and Temporal Influences on Nitrate Pollution of Water Bodies: Results of a Participatory Research Project in Germany. *Sustainability*, 14, 9516. <https://doi.org/10.3390/su14159516>
- Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2021a). Citizen Science & Schule: Wie Schülerprojekte die Forschung zu Themen der Nachhaltigkeit vorantreiben können. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 32(183), 8–15.
- Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2021b). Nachhaltigkeit in Gesellschaft, Wissenschaft, Politik und Schule. *Chemie in unserer Zeit*, 55(2), 125–129. <https://doi.org/10.1002/ciuz.202000006>
- Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022a). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Der Stickstoffproblematik auf der Spur (Themenheft 6: Schülerlabor, inkl. Begleitheft für Lehrkräfte)*. <https://doi.org/10.48693/127>
- Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022b). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Die Stickstoffproblematik (Themenheft 2)*. <https://doi.org/10.48693/123>
- Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022c). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Ergebnisse des Nitrat-Monitorings (Themenheft 3)*. <https://doi.org/10.48693/124>
- Brockhage, F., Lüsse, M., Pietzner, V. & Beeken, M. (2022d). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Mit Citizen Science die Nitratbelastung von Gewässern erforschen (Themenheft 1)*. <https://doi.org/10.48693/122>

- Brockmann, U., Topcu, D., Schütt, M. & Leujak, W. (2021). *Third assessment of the eutrophication status of German coastal and marine waters 2006 – 2014 in the North Sea according to the OSPAR Comprehensive Procedure. TEXTE: 38/2021*. Umweltbundesamt.
- Bronx River Alliance. (2015). *Citizen Science on the Bronx River: An Analysis of Water Quality Data*. https://bronxriver.org/wp-content/uploads/2021/06/citizenscience_water-quality_ds_final.pdf
- Brossard, D., Lewenstein, B. & Bonney, R. (2005). Scientific knowledge and attitude change: The impact of a citizen science project. *International Journal of Science Education*, 27(9), 1099–1121. <https://doi.org/10.1080/09500690500069483>
- Budke, M. (2019). *Entwicklung und Evaluation des Projektes GreenLab_OS - Empirische Studie zu Effekten von stationären und mobilen Schülerlaborangeboten* [Dissertation]. Universität Osnabrück, Osnabrück.
- Bühl, A. (2012). *SPSS 20: Einführung in die moderne Datenanalyse* (13. Aufl.). *Always learning*. Pearson.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. (1998). *Beurteilung der Wasserbeschaffenheit von Fließgewässern in der Bundesrepublik Deutschland - Chemische Gewässergüteklassifikation* (1. Aufl.). *Oberirdische Gewässer: Konzepte und Strategien*. Kulturbuchverlag.
- Bundesagentur für Arbeit (Hrsg.). (2011). *Klassifikation der Berufe 2010 – Band 1: Systematischer und alphabetischer Teil mit Erläuterungen*. Paderborn.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2020). *Nitratbericht 2020*.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2018). *Zukunft? Jugend fragen! Nachhaltigkeit, Politik, Engagement - eine Studie zu Einstellungen und Alltag junger Menschen* (2. Auflage).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit & Umweltbundesamt (Hrsg.). (2019). *Umweltbewusstsein in Deutschland 2018. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz & Umweltbundesamt (Hrsg.). (Februar 2022). *Zukunft? Jugend fragen! – 2021: Umwelt, Klima, Wandel – was junge Menschen erwarten und wie sie sich engagieren*. Berlin.
- Bundesregierung (Hrsg.). (Juni 2021). *Report on the implementation of the 2030 Agenda for sustainable development: German Voluntary National Review to the HLPF 2021*. Berlin.
- Bunsen, J., Berger, M. & Finkbeiner, M. (2022). *Konzeptionelle Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks: Zur Abbildung möglicher qualitativer und quantitativer Wasserbelastungen entlang eines Produktlebenszyklus. TEXTE: Bd. 44*. Umweltbundesamt.

- Bürger schaffen Wissen (Hrsg.). (o. J.). *AG Citizen Science in Schulen*. <https://www.buerger-schaffenwissen.de/netzwerk/ag-citizen-science-in-schulen>
- Busch, J. A., Bernard, E., Jeansou, E., Price, I., van der Woerd, H. & Zielinski, O. *Changes of water colour in the aquaculture zone of the Ebro Delta, NW Mediterranean - pilot site for citizen observatory*. http://www.citclops.eu/media/citclops/org/documents/publications/busch_oceanoptics14_extabstr.pdf
- Calderón Cendejas, J., Madrid Ramírez, L., Ramírez Zierold, J., Díaz Valenzuela, J., Merino Ibarra, M., Morató Sánchez de Tagle, S. & Chino Téllez, A. (2021). Evaluation of the Impacts of Land Use in Water Quality and the Role of Nature-Based Solutions: A Citizen Science-Based Study. *Sustainability*, 13(19), 10519. <https://doi.org/10.3390/su131910519>
- Campbell, J., Neuner, J., See, L., Fritz, S., Fraisl, D., Espey, J. & Kim, A. (2020). The role of combining national official statistics with global monitoring to close the data gaps in the environmental SDGs. *Statistical Journal of the IAOS*, 36(2), 443–453. <https://doi.org/10.3233/SJI-200648>
- Canfield, D. E., Glazer, A. N. & Falkowski, P. G. (2010). The evolution and future of Earth's nitrogen cycle. *Science*, 330(6001), 192–196. <https://doi.org/10.1126/science.1186120>
- Carlowitz, H. C. von. (1713). *Sylvicultura Oeconomica oder Haußwirthliche Nachricht und Naturgemäße Anweisung zur Wilden Baum-Zucht*.
- Causar, T., Grint, K., Sichani, A.-M. & Terras, M. (2018). 'Making such bargain': Transcribe Bentham and the quality and cost-effectiveness of crowdsourced transcription1. *Digital Scholarship in the Humanities*, 33(3), 467–487. <https://doi.org/10.1093/llc/fqx064>
- Christian Langer. (o. J.). *Flow Map*. <https://home.uni-leipzig.de/idiv/flow/map/>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. Auflage). Lawrence Erlbaum Associates.
- Conijn, J. G., Bindraban, P. S., Schröder, J. J. & Jongschaap, R. (2018). Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.001>
- Conrad, C. C. & Hilchey, K. G. (2011). A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities. *Environmental monitoring and assessment*, 176, 273–291. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1582-5>
- CORINE Land Cover 5 ha (2018): CLC 5*. (2021). GeoBasis-DE, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-landschaftsmodelle/corine-land-cover-5-ha-stand-2018-clc5-2018.html>

- Cornwell, M. L. & Campbell, L. M. (2012). Co-producing conservation and knowledge: Citizen-based sea turtle monitoring in North Carolina, USA. *Social Studies of Science*, 42(1), 101–120. <https://doi.org/10.1177/0306312711430440>
- Crall, A. W., Jordan, R., Holfelder, K., Newman, G. J., Graham, J. & Waller, D. M. (2012). The impacts of an invasive species citizen science training program on participant attitudes, behavior, and science literacy. *Public Understanding of Science*, 22(6), 745–764. <https://doi.org/10.1177/0963662511434894>
- Cremer, N. (2015). Nitrat im Grundwasser - Eintrag, Verhalten und Entwicklungstrends. *Energie I wasser-praxis*(5), 32–39.
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16, 297–334.
- Crutzen, P. J. (2002). The “anthropocene”. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 12(10), 1–5. <https://doi.org/10.1051/jp4:20020447>
- Crutzen, P. J. & Schwägerl, C. (2011). *Living in the Anthropocene: Toward a New Global Ethos*. https://e360.yale.edu/features/living_in_the_anthropocene_toward_a_new_global_ethos
- Deci, E. L. & Ryan, R. M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.25656/01:11173>
- Das Deutsche Nationalkomitee für die UN-Dekade "Bildung für nachhaltige Entwicklung". (2014). *Positionspapier "Zukunftsstrategie BNE 2015+": Position paper "Strategy for ESD 2015+"*. DUK.
- Deutschland hat zu wenig gegen Nitrate im Grundwasser getan (21. Juni 2018). *Frankfurter Allgemeine*. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/eugh-verurteilt-deutschland-wegen-nitrat-im-grundwasser-15651618/so-sieht-es-aus-wenn-der-15651636.html>
- DIN 38405-9:2011-09, *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Anionen (Gruppe D) - Teil 9: Photometrische Bestimmung von Nitrat (D 9)*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Dixon, W. J. & Mood, A. M. (1946). The statistical sign test. *Journal of the American Statistical Association*, 41(236), 557–566. <https://doi.org/10.1080/01621459.1946.10501898>
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5>
- Duce, R. A., LaRoche, J., Altieri, K., Arrigo, K. R., Baker, A. R., Capone, D. G., Cornell, S., Dentener, F., Galloway, J., Ganeshram, R. S., Geider, R. J., Jickells, T., Kuypers, M. M., Langlois, R., Liss, P. S., Liu, S. M., Middelburg, J. J., Moore, C. M., Nickovic, S., . . . Zamora, L.

- (2008). Impacts of Atmospheric Anthropogenic Nitrogen on the Open Ocean. *Science*, 320(5878), 893–897. <https://doi.org/10.1126/science.1150369>
- Duller, C. (2018). *Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS, R und SPSS*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57678-6>
- Dunea, D., Iordache, V., Frasin, L. N., Neagoe, A., Predescu, L. & Iordache, S. (2021). Monitoring Rainwater Properties and Outdoor Particulate Matter in a Former Steel Manufacturing City in Romania. *Atmosphere*, 12(12), 1594. <https://doi.org/10.3390/atmos12121594>
- Dunn, O. J. (1964). Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, 6(3), 241–252. <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>
- Earthwatch Institute. (2022). *Explore our data*. <https://fwwearthw.hub.arcgis.com/pages/explore-our-data>
- Eckstein, P. P. (2016). *Angewandte Statistik mit SPSS*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-10918-9>
- Effertz, A. (2021). *Konzeption einer virtuellen Ausstellung zur Stickstoff- und Nitratproblematik* [Masterarbeit]. Universität Osnabrück, Osnabrück.
- Erfkamp, J. & Müller, A. (1990). Die Stickstoff-Fixierung: Aktuelle chemische und biologische Aspekte. *Chemie in unserer Zeit*, 24(6), 267–279. <https://doi.org/10.1002/ciuz.19900240606>
- Ergas, S. J. & Aponte-Morales, V. (2014). Biological Nitrogen Removal. In *Comprehensive Water Quality and Purification* (S. 123–149). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00047-5>
- Etter, S., Strobl, B., Meerveld, I. & Seibert, J. (2020). Quality and timing of crowd-based water level class observations. *Hydrological Processes*, 34(22), 4365–4378. <https://doi.org/10.1002/hyp.13864>
- EU reicht Nitrat-Klage gegen Deutschland ein (7. November 2016). *Spiegel Wirtschaft*. <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/nitrat-im-grundwasser-eu-reicht-klage-gegen-deutschland-ein-a-1120036.html>
- European Citizen Science Association (Hrsg.). (2015). *Ten Principles of Citizen Science*. Berlin. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/XPR2N>
- European Environment Agency. (2013). *Air quality in Europe — 2013 report. EEA report: 2013,9*. Europ. Environment Agency. <http://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fd8ad097-2bbb-4388-8060-5db14690775b>

- Evans, C., Abrams, E., Reitsma, R., Roux, K., Salmonsén, L. & Marra, P. P. (2005). The Neighborhood Nestwatch Program: Participant Outcomes of a Citizen-Science Ecological Research Project. *Conservation Biology*, 19(3), 589–594.
<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00s01.x>
- Evelyn, J. (1664). *Sylva or a Discourse of Forest Trees and the Propagation of Timber in His Majesties Dominions*.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G. & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191. <https://doi.org/10.3758/BF03193146>
- Faulstich, M. (2015). *Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sondergutachten*. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). http://www.umwelt-rat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_HD.pdf?__blob=publicationFile
- Feigenbaum, S., Hadas, A., Sofer, M. & Molina, J. A. E. (1994). Clay-Fixed Labeled Ammonium as a Source of Available Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 980–985. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030049x>
- Feistel, S., Feistel, R., Nehring, D., Matthäus, W., Nausch, G. & Naumann, M. (2016). *Hypoxic and anoxic regions in the Baltic Sea, 1969 - 2015* (Meereswiss. Ber.). <https://www.io-warnemuende.de/hypoxic-and-anoxic-regions-in-the-baltic-sea-2020.html>
<https://doi.org/10.12754/msr-2016-0100>
- Fels, J. N. (2011). Der Schutz des baltischen Ökosystems – Ausgewählte Problemstellungen. *Natur und Recht*, 33, 539–545. <https://doi.org/10.1007/s10357-011-2099-6>
- Feng, X., Rost, D. H. & Zhang, D. (2015). Akademische Selbstwirksamkeit oder fachbezogene Selbstwirksamkeiten? *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 47(3), 159–172. <https://doi.org/10.1026/0049-8637/a000132>
- Fink, D., Hochachka, W. M., Zuckerberg, B., Winkler, D. W., Shaby, B., Munson, M. A., Hooker, G., Riedewald, M., Sheldon, D. & Kelling, S. (2010). Spatiotemporal exploratory models for broad-scale survey data. *Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America*, 20(8), 2131–2147. <https://doi.org/10.1890/09-1340.1>
- Firehock, K. & West, J. (1995). A Brief History of Volunteer Biological Water Monitoring Using Macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 14(1), 197–202. <https://doi.org/10.2307/1467734>
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., Sheppard, L. J., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J. N., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A. F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M. & Voss, M. (2013). The global nitrogen

- cycle in the twenty-first century. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 368, 20130164.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
- Fraisl, D., Campbell, J., See, L., Wehn, U., Wardlaw, J., Gold, M., Moorthy, I., Arias, R., Piera, J., Oliver, J. L., Masó, J., Penker, M. & Fritz, S. (2020). Mapping citizen science contributions to the UN sustainable development goals. *Sustainability Science*, 15, 1735–1751.
<https://doi.org/10.1007/s11625-020-00833-7>
- Frank, K. A., Schmidt, L.-K. & Syhre, J.-A. (2021). *Hintergrundpapier: Strategien zur Stickstoffreduktion im Rahmen der Ziele für nachhaltige Entwicklung*. Deutsche Umwelthilfe e. V.
- Friedman, M. (1937). The Use of Ranks to Avoid the Assumption of Normality Implicit in the Analysis of Variance. *Journal of the American Statistical Association*, 32(200), 675–701.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522>
- Fritz, C. O., Morris, P. E. & Richler, J. J. (2012). Effect size estimates: current use, calculations, and interpretation. *Journal of experimental psychology. General*, 141(1), 2–18.
<https://doi.org/10.1037/a0024338>
- Frondel, M., Niehues, D. A. & Sommer, S. (2021). Wasserverbrauch privater Haushalte in Deutschland: Eine empirische Mikroanalyse. *Zeitschrift für Wirtschaftspolitik*, 70(3), 230–254. <https://doi.org/10.1515/zfw-2021-2061>
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B. & Cosby, B. J. (2003). The Nitrogen Cascade. *BioScience*, 53(4), 341–356.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2)
- Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., Asner, G. P., Cleveland, C. C., Green, P. A., Holland, E. A., Karl, D. M., Michaels, A. F., Porter, J. H., Townsend, A. R. & Vöosmarty, C. J. (2004). Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, 70, 153–226. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>
- Galloway, J. N., Leach, A., Erisman, J. W., Bleeker, A. & Kohn, R. (2011). *N Print Nitrogen Footprint*. <https://n-print.org/>
- Garcia-Soto, C., van der Meeren, G. I., Busch, J. A., Delany, J., Domegan, C., Dubsky, K., Fauville, G., Gorsky, G., Juterzenka, K. von, Malfatti, F., Mannaerts, G., McHugh, P., Monestiez, P., Seys, J., Węśławski, J. M. & Zielinski, O. (2017). *Advancing Citizen Science for Coastal and Ocean Research* (Position Paper 23 of the European Marine Board). Ostend, Belgien.
- Gardner, G. E., Karl, C., Ferzli, M., Shea, D., Haase, D. & Day, J. B. (2015). The Bennett's Millpond Environmental Learning Project: Place-Based Education with Student-Teacher

- Research Teams. In S. K. Stratton, R. Hagevik, A. Feldman & M. Bloom (Hrsg.), *ASTE Series in Science Education. Educating Science Teachers for Sustainability* (S. 255–274). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16411-3_14
- GENIOS (Hrsg.). (2022). *GENIOS*. <https://beta.genios.de/>
- Geodätisches Institut, RWTH Aachen (Hrsg.). (2022). *OpenGeoResearch*. <https://www.opengeoresearch.org/#project>
- Gerten, D., Heck, V., Jägermeyr, J., Bodirsky, B. L., Fetzer, I., Jalava, M., Kummu, M., Lucht, W., Rockström, J., Schaphoff, S. & Schellnhuber, H. J. (2020). Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sustainability*, 3(3), 200–208. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0465-1>
- Geupel, Jering, Frey, Gohlisch, Lambrecht, Jaschinski, Koppe, Mönch, Mäder, Nissler, Strogies, Mathan, Schneider, Mohaupt, Glante, Dominik, Mauscherding, Schulz, Hummel, . . . Gallander. (2009). *Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoffemissionsminderungsstrategie*. Umweltbundesamt.
- Geupel, M., Richter, S. & Schlesinger, L. (2021). *Stickstoff – Element mit Wirkung: Ein integrierter Zielwert setzt einen neuen Rahmen*. Umweltbundesamt.
- Gewaessernetz*. (2020). Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung; Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. <https://www.umweltkarten-niedersachsen.de/umweltkarten/?lang=de&topic=Hydrologie&bgLayer=Topographie-Grau&layers=Gewaessernetz>
- Gleisberg, D., Kandler, J., Ulrich, H. & Hartz, P. (1976). Eutrophierung und Abwasserreinigung. *Angewandte Chemie*, 88(11), 354–365. <https://doi.org/10.1002/ange.19760881104>
- Graser, A., Mandel, A., Bruy, A., Mearns, B. & Olaya Ferrero, V. (2017). *QGIS: Becoming a GIS power user : learning path : master data management, visualization, and spatial analysis techniques in QGIS and become a GIS power user*. Packt Publishing.
- Grave, H. (2015). *Motivationale Aspekte im Schülerlabor Explain-OS – Eine quantitative Evaluationsstudie* [Masterarbeit]. Universität Osnabrück, Osnabrück.
- Grober, U. (2002). Tiefe Wurzeln: Eine kleine Begriffsgeschichte von 'Sustainable Development' - Nachhaltigkeit. *Natur und Kultur*, 3(1), 116–128.
- Gruber, N. & Sarmiento, J. L. (1997). Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2), 235–266. <https://doi.org/10.1029/97GB00077>
- Haan, G. de (2002). Die Kernthemen der Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. *Zeitschrift für internationale Bildungsforschung und Entwicklungspädagogik*, 25. <https://doi.org/10.25656/01:6177>

- Haan, G. de (2010). The development of ESD-related competencies in supportive institutional frameworks. *International Review of Education*, 56, 315–328.
<https://doi.org/10.1007/s11159-010-9157-9>
- Haan, G. de, Kamp, G., Lerch, A., Martignon, L., Müller-Christ, G. & Nutzinger, H. G. (2008). *Nachhaltigkeit und Gerechtigkeit: Grundlagen und schulpraktische Konsequenzen. Ethics of science and technology assessment: Bd. 33*. Springer.
- Hach (Hrsg.). (2022). *Wie wird die Farbreaktion der Nitrat/Nitrit Teststreifen (2745425) erzeugt?* https://desupport.hach.com/app/answers/answer_view/a_id/1026464/~/wie-wird-die-farbreaktion-der-nitrat%2Fnitrit-teststreifen-%282745425%29-erzeugt%3F-
- Haklay, M. (2016). Why is participation inequality important? In C. Capineri, M. Haklay, H. Huang, V. Antoniou, J. Kettunen, F. Ostermann & R. Purves (Hrsg.), *European Handbook of Crowdsourced Geographic Information* (S. 35–44). Ubiquity Press.
<https://doi.org/10.5334/bax.c>
- Haklay, M. (2018). Participatory citizen science. In S. Hecker, M. Haklay, A. Bowser, Z. Makuch, J. Vogel & A. Bonn (Hrsg.), *Citizen science: Innovation in open science, society and policy* (S. 52–62). UCL Press.
- Hart, A. (2001). Mann-Whitney test is not just a test of medians: differences in spread can be important. *BMJ (Clinical research ed.)*, 323(7309), 391–393.
<https://doi.org/10.1136/bmj.323.7309.391>
- Hartmann, F. & Mietzner, D. (2018). Citizen Science – Die Rolle des Bürgers in der Wissenschaft. *Wissenschaftliche Beiträge / Technische Hochschule Wildau*, 22, 61–70.
https://doi.org/10.15771/0949-8214_2018_8
- Häußermann, U., Bach, M., Klement, L. & Breuer, L. (2019). *Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise – Jahre 1995 bis 2017: Methodik, Ergebnisse und Minderungsmaßnahmen. TEXTE: Bd. 131*. Umweltbundesamt.
- He, Y., Parrish, J. K., Rowe, S. & Jones, T. (2019). Evolving interest and sense of self in an environmental citizen science program. *Ecology and Society*, 24(2).
<https://doi.org/10.5751/ES-10956-240233>
- Hecker, S., Garbe, L. & Bonn, A. (2018). The European citizen science landscape – a snapshot. In S. Hecker, M. Haklay, A. Bowser, Z. Makuch, J. Vogel & A. Bonn (Hrsg.), *Citizen science: Innovation in open science, society and policy* (S. 190–200). UCL Press.
- Heigl, F., Kieslinger, B., Paul, K. T., Uhlik, J. & Dörler, D. (2019). Opinion: Toward an international definition of citizen science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of*

- the United States of America*, 116(17), 8089–8092.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1903393116>
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (Hrsg.). (2022). *Citizen Science-Projekt FLOW: Fließgewässer erforschen – gemeinsam Wissen schaffen*. <https://www.flow-projekt.de/>
- Hidi, S. & Renninger, K. A. (2006). The Four-Phase Model of Interest Development. *Educational Psychologist*, 41(2), 111–127. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_4
- Hiller, S. E. & Kitsantas, A. (2014). The Effect of a Horseshoe Crab Citizen Science Program on Middle School Student Science Performance and STEM Career Motivation. *School Science and Mathematics*, 114(6), 302–311. <https://doi.org/10.1111/ssm.12081>
- Hiller, S. E. & Kitsantas, A. (2015). Fostering Student Metacognition and Motivation in STEM through Citizen Science Programs. In A. Peña-Ayala (Hrsg.), *Intelligent Systems Reference Library. Metacognition: Fundamentals, Applications, and Trends* (Bd. 76, S. 193–221). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11062-2_8
- Hofmann, W. (o. J.). *20 Jahre Seen-Beobachtung im Kreis Plön: 44 Seen im Vergleich*. http://www.seen-transparent.de/files/downloads/ergebnisbericht_bd_3_zusammenfassung
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2), 65–70.
- Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (HYRAUM): Digitale Kartendaten v3.2*. HYRAUM v32. (2015). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Staatliche Geologische Dienste der Bundesländer. Hannover. www.bkg.bund.de
- Jaffe, D. A. (1992). The Nitrogen Cycle. In S. S. Butcher (Hrsg.), *International geophysics series: Bd. 50. Global biogeochemical cycles* (S. 263–284). Academic Press.
- Jansen, W., Block, A. & Knaack, J. (1987). *Saurer Regen: Ursachen, Analytik, Beurteilung*. Metzler.
- JBL GmbH & Co KG (Hrsg.). (o. J.). *JBL PROAQUATEST EASY 7in1: Teststreifen zum Schnelltest von Aquarienwasser*. <https://www.jbl.de/de/produkte/detail/8721/jbl-proaquatest-easy-7in1?country=de>
- JBL GmbH & Co KG (Hrsg.). (2015). *Sicherheitsdatenblatt JBL NO3 Nitrat Test-Set*. <https://www.jbl.de/?mod=download&id=13092&country=de&lang=de>
- JBL GmbH & Co KG (Hrsg.). (2018). *Teststreifen zur Wasseranalyse 7 wichtige Wasserwerte in 1 Minute*. <https://www.jbl.de/?mod=download&id=16239&country=de&lang=de>

- Jerusalem & Satow. (1999). Schulbezogene Selbstwirksamkeitserwartung (WIRKSCHUL). In R. Schwarzer & M. Jerusalem (Hrsg.), *Skalen zur Erfassung von Lehrer- und Schülermerkmalen: Dokumentation der psychometrischen Verfahren im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Modellversuchs Selbstwirksame Schulen* (S. 15–16).
- Johannsen, A., Dähnke, K. & Emeis, K. (2008). Isotopic composition of nitrate in five German rivers discharging into the North Sea. *Organic Geochemistry*, 39(12), 1678–1689.
<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.03.004>
- Jones, M. G., Childers, G., Andre, T., Corin, E. N. & Hite, R. (2018). Citizen scientists and non-citizen scientist hobbyists: motivation, benefits, and influences. *International Journal of Science Education, Part B*, 8(4), 287–306.
<https://doi.org/10.1080/21548455.2018.1475780>
- Jordan, R. C., Gray, S. A., Howe, D. V., Brooks, W. R. & Ehrenfeld, J. G. (2011). Knowledge gain and behavioral change in citizen-science programs. *Conservation biology: the journal of the Society for Conservation Biology*, 25(6), 1148–1154.
<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01745.x>
- Kaumanns, S. C., Blumers, M. & Junglewitz, G. (2016). *Sustainable Development Goals - Indikatoren für die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung*.
- Keil, F. (März 2013). *Virtuelles Wasser und der Wasserfußabdruck: Endbericht zu Arbeitspaket 2.3 des Forschungsprojekts „Wasserflüsse in Deutschland“ des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)*. Berlin.
- Kelemen-Finan, J., Scheuch, M. & Winter, S. (2018). Contributions from citizen science to science education: an examination of a biodiversity citizen science project with schools in Central Europe. *International Journal of Science Education*, 40(17), 2078–2098.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1520405>
- Kelle, U. (2008). *Die Integration qualitativer und quantitativer Methoden in der empirischen Sozialforschung: Theoretische Grundlagen und methodologische Konzepte* (2. Auflage). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Kendall, M. G. (1938). A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika*, 30(1/2), 81.
<https://doi.org/10.2307/2332226>
- Kermish-Allen, R., Peterman, K. & Bevc, C. (2019). The utility of citizen science projects in K-5 schools: measures of community engagement and student impacts. *Cultural Studies of Science Education*, 14(3), 627–641. <https://doi.org/10.1007/s11422-017-9830-4>
- Kessinger, S., Minkos, A., Dauert, U. & Feigenspan, S. (2021). *Luftqualität 2020: Vorläufige Auswertung*. Umweltbundesamt.

- Kiessling, T., Knickmeier, K., Kruse, K., Brennecke, D., Nauendorf, A. & Thiel, M. (2019). Plastic Pirates sample litter at rivers in Germany - Riverside litter and litter sources estimated by schoolchildren. *Environmental pollution*, 245, 545–557.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.025>
- Kiessling, T., Knickmeier, K., Kruse, K. & Parchmann, I. (2020). Die Plastikpiraten : Teilhabe an echter Wissenschaft durch Citizen-Science. *Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie*, 31(179).
- Kikuchi, A., Hakim, L., Heryansyah, A. & Romaidi (2010). Significance of the Easy-to-use Water Quality Checker for Participative Environmental Monitoring and Experience Based Learning. *Journal of Tropical Life Science*, 1, 17–21.
- Kishorekumar, R., Bulle, M., Wany, A. & Gupta, K. J. (2020). An Overview of Important Enzymes Involved in Nitrogen Assimilation of Plants. *Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)*, 2057, 1–13. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9790-9_1
- Kleine, A. (2009). *Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie: Ökologie, Ökonomie und Soziales integrieren* (1. Aufl.). Gabler Edition Wissenschaft. Gabler | GWV Fachverlage. www.gbv.de/dms/zbw/590300873.pdf
- Kofalk, S. (1998). *Einfluss von Bodenvariabilität und Relief auf Wasserhaushalt und Stickstoffgehalte eines Grundmoränenstandorts* [Dissertation]. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Kolar, J. (1990). *Stickstoffoxide und Luftreinhaltung*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-93418-6>
- Köller, O., Daniels, Z., Schnabel, K. U. & Baumert, J. (2000). Kurswahlen von Mädchen und Jungen im Fach Mathematik: Zur Rolle von fachspezifischem Selbstkonzept und Interesse. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 14(1), 26–37.
<https://doi.org/10.1024//1010-0652.14.1.26>
- Köller, O., Schnabel, K. U. & Baumert, J. (2000). Der Einfluß der Leistungsstärke von Schulen auf das fachspezifische Selbstkonzept der Begabung und das Interesse. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 32(2), 70–80.
<https://doi.org/10.1026//0049-8637.32.2.70>
- Koomen, M. H., Rodriguez, E., Hoffman, A., Petersen, C. & Oberhauser, K. (2018). Authentic science with citizen science and student-driven science fair projects. *Science Education*, 102(3), 593–644. <https://doi.org/10.1002/sce.21335>
- Kosztra, B., Büttner, G., Hazeu, G. & Arnold, S. (2019). *Updated CLC illustrated nomenclature guidelines: Service Contract No 3436/R0-Copernicus/EEA.57441 Task 3, D3.1 – Part 1*. Wien.

- Kreienhop, N. J. & Beeken, M. (2022). Citizen_Labs – Konzeption und Evaluation eines Kursangebots zur Plastikmüll- und Mikroplastikproblematik in der Erwachsenenbildung. *CHEMKON*, 29(S1), 280–286. <https://doi.org/10.1002/ckon.202200011>
- Kremer, K. (2010). *Die Natur der Naturwissenschaften verstehen – Untersuchungen zur Struktur und Entwicklung von Kompetenzen in der Sekundarstufe I* [Dissertation]. Universität Kassel, Kassel.
- Kremer, K. & Mayer, J. (2013). Entwicklung und Stabilität von Vorstellungen über die Natur der Naturwissenschaften. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 19, 77–101.
- Kros, J., Gies, T. J. A., Voogd, J. C. H. & Vries, W. de (2013). Efficiency of agricultural measures to reduce nitrogen deposition in Natura 2000 sites. *Environmental Science & Policy*, 32, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.09.005>
- Krüger, D., Parchmann, I. & Schecker, H. (2014). *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0>
- Kruse, K., Kiessling, T., Knickmeier, K., Thiel, M. & Parchmann, I. (2020). Can Participation in a Citizen Science Project Empower Schoolchildren to Believe in Their Ability to Act on Environmental Problems? In I. Parchmann, S. Simon & J. Apotheker (Hrsg.), *Advances in Chemistry Education Series. Engaging Learners with Chemistry* (S. 225–240). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781788016087-00225>
- Kruskal, W. H. & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583–621. <https://doi.org/10.2307/2280779>
- Lammel, G. (1993). NO_x und Folgeprodukte in der Atmosphäre. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 5, 281–285. <https://doi.org/10.1007/BF02937966>
- Lammel, G. & Flessa, H. (1998). Anthropogene Störung des Stickstoff-Kreislaufs. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 10(5), 295–305. <https://doi.org/10.1007/BF03037776>
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (Hrsg.). (1993). *Atmosphärische Deposition: Messung der Niederschlagsbeschaffenheit*. https://www.lawa.de/documents/atmosphaerische_deposition_messung_niederschlagsbeschaffenheit_1552307081.pdf
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.). (2010). *GeoBerichte 3: Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen*. Hannover.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Hrsg.). (2022). *Nährstoffbericht für Niedersachsen 2020/2021*.

- Lehn, H., Flaig, H. & Mohr, H. (1995). Vom Mangel zum Überfluß: Störungen im Stickstoffkreislauf. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 4(1), 13–25.
<https://doi.org/10.14512/gaia.4.1.7>
- Lenhard, W. & Lenhard, A. (2016). *Berechnung von Effektstärken*. <https://www.psychometrica.de/effektstaerke.html> <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17823.92329>
- Lethmate, J. (2005). Der Ammonium- und Nitrattest: Das Experiment. *Biologie in unserer Zeit*, 35(2), 118–124. <https://doi.org/10.1002/biuz.200410278>
- Levy, H., Moxim, W. J. & Kasibhatla, P. S. (1996). A global three-dimensional time-dependent lightning source of tropospheric NO_x. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D17), 22911–22922. <https://doi.org/10.1029/96JD02341>
- Likens, G. E. & Bormann, F. H. (1974). Acid rain: a serious regional environmental problem. *Science*, 184(4142), 1176–1179. <https://doi.org/10.1126/science.184.4142.1176>
- Liu, H.-Y. & Kobernus, M. (2017). Citizen Science and Its Role in Sustainable Development: Status, Trends, Issues, and Opportunities. In L. Ceccaroni & J. Piera (Hrsg.), *Advances in knowledge acquisition, transfer, and management (AKATM) book series. Analyzing the role of citizen science in modern research* (S. 147–167). IGI Global.
<https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0962-2.ch007>
- Lorke, J. & Schmid-Loertzer, V. (August 2021). *Wie wirkt Citizen Science auf das Verständnis von Nature of Science?* <https://www.buergerschaftenwissen.de/blog/wie-wirkt-citizen-science-auf-das-verstaendnis-von-nature-science>
- Lüsse, M. (2022). *Untersuchungen zum Einfluss eines experimentellen Citizen Science-Projektes auf die naturwissenschaftliche Allgemeinbildung* [Dissertation]. Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg.
- Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2021). Effects of Doing Home Experiments within a Chemistry Citizen Science Project. In G. S. Carvalho, A. S. Afonso & Z. Anastácio (Hrsg.), *Fostering scientific citizenship in an uncertain world (Proceedings of ESERA 2021)* (S. 621–630). CIEC, University of Minho.
- Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022a). Citizen science and its potential for science education. *International Journal of Science Education*, 44(7), 1120–1142.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2067365>
- Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022b). Citizens' views on home experiments in the context of a chemistry citizen science project. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 18(8), em2142.
<https://doi.org/10.29333/ejmste/12246>

- Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022c). Gemeinsam für unsere Zukunft – Potenzial eines umweltrelevanten Citizen Science-Projekts für den Chemieunterricht. *CHEMKON*, 29(S1), 193–197. <https://doi.org/10.1002/ckon.202100085>
- Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022d). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Der Stickstoffproblematik auf der Spur (Themenheft 4: Stickstoff-Box - Begleitheft)*. <https://doi.org/10.48693/125>
- Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M. & Pietzner, V. (2022e). *Partizipative Forschung zur Nitratbelastung: Der Stickstoffproblematik auf der Spur (Themenheft 5: Stickstoff-Box - Experimentierheft)*. <https://doi.org/10.48693/126>
- Lüsse, M., Brockhage, F., Pietzner, V. & Beeken, M. (2021). Nachhaltige Unterrichtsvorschläge zur Stickstoffproblematik. *Chemie in unserer Zeit*, 55(3), 186–191. <https://doi.org/10.1002/ciuz.202000005>
- MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG (Hrsg.). (2016). *QUANTOFIX® Nitrat/Nitrit: Rev 2016-12 A011805/913 13/01710*. Düren. <https://www.carlroth.com/medias/BA-ART-347199-FR.pdf?context=bWFzdGVyfGluc3RydWN0aW9uc3wyMTcxMjh8YXBwb-GljYXRpb24vcGRmfGluc3RydWN0aW9ucy9oOTIv-aDU0LzkwMjA2MzgxMzQzMDIucGRmfGM4ZGZiMzA3ZjM1OT-ljMjhmNWZmY2RiYTljNTgyMTdlMDg5NTU1MmVjMWIzNTA5YjM3ZTc1Ym-RiNjY5NDUwZjU>
- Makarovs, K. & Achterberg, P. (2018). Science to the people: A 32-nation survey. *Public Understanding of Science*, 27(7), 876–896. <https://doi.org/10.1177/0963662517754047>
- Malthus, T. J., Ohmsen, R. & van der Woerd, H. J. (2020). An Evaluation of Citizen Science Smartphone Apps for Inland Water Quality Assessment. *Remote Sensing*, 12(10), 1578. <https://doi.org/10.3390/rs12101578>
- Mann, H. B. & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- Marsh, H. W. (2005). Big-Fish-Little-Pond Effect on Academic Self-Concept. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 19(3), 119–127. <https://doi.org/10.1024/1010-0652.19.3.119>
- Marsh, H. W., Byrne, B. M. & Shavelson, R. J. (1988). A multifaceted academic self-concept: Its hierarchical structure and its relation to academic achievement. *Journal of Educational Psychology*, 80(3), 366–380. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.80.3.366>
- Meixner, T., Berkowitz, A. R., Downey, A. E., Pillich, J., LeVeae, R., Smith, B. K., Chandler, M., Gupta, N., Rullman, S., Woodroof, A. & Cherrier, J. (2021). Rapid Assessment and Long-

- Term Monitoring of Green Stormwater Infrastructure with Citizen Scientists. *Sustainability*, 13(22), 12520. <https://doi.org/10.3390/su132212520>
- Meyer, N. J., Scott, S., Strauss, A. L., Nippolt, P. L., Oberhauser, K. S. & Blair, R. B. (2014). Citizen Science as a REAL Environment for Authentic Scientific Inquiry. *Journal of Extension*, 52(4).
- Middleton, J. V. (2001). The Stream Doctor Project: Community-Driven Stream Restoration. *BioScience*, 51(4), 293–296. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0293:TSDPCD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0293:TSDPCD]2.0.CO;2)
- Moczek, N. (2018). Motivationen für freiwilliges Engagement im Citizen-Science-Projekt „Wildkatzensprung“. *Natur und Landschaft*, 93(4), 176–181. <https://doi.org/10.17433/4.2018.50153569.176-181>
- Moczek, N., Hecker, S. & Voigt-Heucke, S. L. (2021). The Known Unknowns: What Citizen Science Projects in Germany Know about Their Volunteers—And What They Don't Know. *Sustainability*, 13(20), 11553. <https://doi.org/10.3390/su132011553>
- Moczek, N., Voigt-Heucke, S. L., Mortega, K. G., Fabó Cartas, C. & Knobloch, J. (2021). A Self-Assessment of European Citizen Science Projects on Their Contribution to the UN Sustainable Development Goals (SDGs). *Sustainability*, 13(4), 1774. <https://doi.org/10.3390/su13041774>
- Möller, J. & Köller, O. (2004). Die Genese akademischer Selbstkonzepte. *Psychologische Rundschau*, 55(1), 19–27. <https://doi.org/10.1026/0033-3042.55.1.19>
- Möller, J. & Trautwein, U. (2009). Selbstkonzept. In E. Wild & J. Möller (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Pädagogische Psychologie* (S. 179–203). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88573-3_8
- Müller, F. H., Andreitz, I. & Hanfstingl, B. (2008). *Die Bedeutung der Selbstbestimmung von Lehrpersonen für Unterricht und Lernen – Empirische Befunde aus dem Interventionsprojekt IMST* (Wissenschaftliche Beiträge aus dem Institut für Unterrichts- und Schulentwicklung Nr. 3). Klagenfurt. Alpen-Adria Universität.
- Müller, F. H., Hanfstingl, B. & Andreitz, I. (2007). *Skalen zur motivationalen Regulation beim Lernen von Schülerinnen und Schülern: Adaptierte und ergänzte Version des Academic Self-Regulation Questionnaire (SRQ-A) nach Ryan & Connell*. (Wissenschaftliche Beiträge aus dem Institut für Unterrichts- und Schulentwicklung Nr. 1). Klagenfurt. Alpen-Adria Universität.
- Müller, M. & Niebert, K. (2017). Verantwortung im Anthropozän. In G. Michelsen (Hrsg.), *Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*. Forum hlz.

- NABU-Bundesverband (Hrsg.). (2019). *15 Jahre Vogelzählung und Citizen Science: Ergebnisse der „Stunde der Gartenvögel“ und der „Stunde der Wintervögel“*. Berlin.
- Nakagawa, K., Amano, H., Persson, M. & Berndtsson, R. (2021). Spatiotemporal variation of nitrate concentrations in soil and groundwater of an intensely polluted agricultural area. *Scientific reports*, 11(1), 2598. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82188-2>
- Nationale Plattform Bildung für nachhaltige Entwicklung & Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2017). *Nationaler Aktionsplan Bildung für nachhaltige Entwicklung: Der deutsche Beitrag zum UNESCO-Weltaktionsprogramm*. https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/nationaler_aktionsplan_bildung_fuer_nachhaltige_entwicklung.pdf?_blob=publicationFile&v=1
- Neis, P. & Zipf, A. (2012). Analyzing the Contributor Activity of a Volunteered Geographic Information Project — The Case of OpenStreetMap. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(2), 146–165. <https://doi.org/10.3390/ijgi1020146>
- niedersachsen-latest-free. (2022). OpenStreetMap und Mitwirkende, bearbeitet und bereitgestellt durch Geofabrik. <http://download.geofabrik.de/europe/germany/niedersachsen-latest-free.shp.zip>
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.). (2007). *Oberirdische Gewässer Band 28: Gütedaten ostfriesischer Oberflächengewässer*. Norden.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.). (2014). *Grundwasser Band 18 Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN): Güte- und Standsmessnetz Grundwasser*. Norden.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.). (2017a). *Grundwasser Band 29: Regionaler Themenbericht. Ermittlung der Ursachen des Eintrages von Tierarzneimitteln in das oberflächennahe Grundwasser. Datenauswertung 2012 bis 2016*. Norden.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.). (2017b). *Oberirdische Gewässer Band 31 Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN): Gütemessnetz Fließgewässer und stehende Gewässer 2017*. Norden.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.). (2020a). *Grundwasserbericht Niedersachsen: Parameterblatt Ammonium (Datenbestand 2019)*. Norden.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.). (2020b). *Grundwasserbericht Niedersachsen: Parameterblatt Nitrat (Datenbestand 2019)*. Norden.

- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.). (2020c). *Grundwasserbericht Niedersachsen: Parameterblatt Nitrit (Datenbestand 2019)*. Norden.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. (2020d). *Oberirdische Gewässer Band 44: Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) Nährstoffsituation der Binnengewässer in Niedersachsen*.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz & Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.). (2006). *Leitfaden für die Auswahl von geeigneten Grundwassermessstellen für die niedersächsischen Grundwasserkörper im Rahmen des Grundwassermonitorings gemäß EG-WRRL*.
- Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.). (2015). *Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5 -10: Naturwissenschaften*. Hannover.
- Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.). (2020). *Schule in Corona-Zeiten – UPDATE: Leitfaden des Niedersächsischen Kultusministeriums für Schulleitungen, Lehrkräfte und pädagogische Fachkräfte an allgemeinbildenden Schulen*.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz. (2017). *Nachhaltigkeitsstrategie für Niedersachsen*. Hannover.
- Nov, O., Arazy, O. & Anderson, D. (2014). Scientists@Home: what drives the quantity and quality of online citizen science participation? *PloS one*, 9(4), e90375.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090375>
- Oelmann, M., Czichy, C., Bergmann, A., Dördelmann, O., Merkel, W., Harms, E., Penning, M., Kaupe, M., Scheele, U. & Zaun, S. (2019). Berechnung der durch Nitratbelastung verursachten Kosten für deutsche Wasserversorger. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 12(1), 24–31.
- Oelmann, M., Czichy, C., Scheele, U., Zaun, S., Dördelmann, O., Harms, E., Penning, M., Kaupe, M., Bergmann, A. & Steenpaß, C. (2017). *Quantifizierung der landwirtschaftlich verursachten Kosten zur Sicherung der Trinkwasserbereitstellung*. TEXTE: Bd. 43. Umweltbundesamt.
- OpenStreetMap*. (2021). <https://www.openstreetmap.org> und Beitragende. <https://www.openstreetmap.org/>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (Hrsg.). (2000). *Towards Sustainable Development: Indicators to Measure Progress (Proceedings of the Rome Conference)*.
<https://doi.org/10.1787/9789264187641-en>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (Hrsg.). (2017). *OPEN RESEARCH AGENDA SETTING* (No. 50). <https://doi.org/10.1787/74edb6a8-en>

- OSPAR (Hrsg.). *IA2017 Eutrophication status in areas assessed in Arctic Waters, the Greater North Sea, Celtic Seas, and the Bay of Biscay, 2006–2014*.
https://odims.ospar.org/en/maps/ia2017-eutrophication-of-biscay-20062014_wwz9t/
- Osterburg, B., Rühling, I., Runge, T., Schmidt, T. G., Seidel, K., Antony, F., Gödecke, B. & Witt-Altfelder, P. (Mai 2007). *Kosteneffiziente Maßnahmenkombinationen nach Wasserwirtschaftsrichtlinie zur Nitratreduktion in der Landwirtschaft: Bericht im Auftrag der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms "Wasser, Boden und Abfall" 2006 (Projekt-Nummer AR 1.05 FAL)*. Braunschweig.
- Osterburg, B. & Runge, T. (Hrsg.). (2007). *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft: Bd. 307. Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer: Eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie*. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL).
- Ott, K. (2009). Leitlinien einer starken Nachhaltigkeit. Ein Vorschlag zur Einbettung des Dreisäulen-Modells. *GAiA*, 18(1), 25–28.
- Otte, L., Beeken, M., Brockhage, F., Jansen, C., Kreienhop, N., Lusmüller, J., Penning, H., Peper-Bienzeisler, R. & Schmidt, J. (2021). *Corona zwischen Mythos und Wissenschaft: Mit Tonic Water & Co. in 13 Experimenten die Pandemie verstehen*. Bombini Verlag.
- Otte, L., Brockhage, F., Kreienhop, N., Lusmüller, J., Schmidt, J. & Beeken, M. (2020a). Eigenschaften, Entstehung und Verwendung von Mikroplastik: Kompetenzen in den Bereichen Fachwissen und Erkenntnisgewinnung erwerben. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 31(179), 20–27.
- Otte, L., Brockhage, F., Kreienhop, N., Lusmüller, J., Schmidt, J. & Beeken, M. (2020b). Lösungsansätze für die Mikroplastikproblematik: Kompetenzen in den Bereichen Bewertung und Kommunikation erwerben. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 31(179), 28–33.
- Overdeest, C., Huyck Orr, C. & Stepenuck, K. (2004). Volunteer Stream Monitoring and Local Participation in Natural Resource Issues. *Human Ecology Review*, 11(2), 177–185.
- Oxford English Dictionary. (2022). *citizen science*, n. <https://doi.org/10.1093/OED/6784505301>
- Pattengill-Semmens, C. V. & Semmens, B. X. (2003). Conservation and management applications of the REEF volunteer fish monitoring program. *Environmental monitoring and assessment*, 81(1-3), 43–50. <https://doi.org/10.1023/A:1021300302208>

- Persson, L., Carney Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., Wit, C. A. de, Diamond, M. L., Fantke, P., Hassellöv, M., MacLeod, M., Ryberg, M. W., Søgaaard Jørgensen, P., Villarrubia-Gómez, P., Wang, Z. & Hauschild, M. Z. (2022). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environmental science & technology*, 56(3), 1510–1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
- Peters-Burton, E. E. (2015). Outcomes of a Self-Regulated Learning Curriculum Model. *Science & Education*, 24, 855–885. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9769-3>
- Pettibone, L., Vohland, K., Bonn, A., Richter, A., Bauhus, W., Behrisch, B., Borchering, R., Brandt, M., Bry, F., Dörler, D., Elbertse, I., Glöckler, F., Göbel, C., Hecker, S., Heigl, F., Herdick, M., Kiefer, S., Kluttig, T., Kühn, E., . . . Ziegler, D. (2016). *Citizen Science für alle: eine Handreichung für Citizen Science Akteure. Bürger Schaffen Wissen (GEWISS)-Publikation*.
- Phillips, T., Porticella, N., Conostas, M. & Bonney, R. (2018). A Framework for Articulating and Measuring Individual Learning Outcomes from Participation in Citizen Science. *Citizen Science: Theory and Practice*, 3(2), 3. <https://doi.org/10.5334/cstp.126>
- Picetti, R., Deeney, M., Pastorino, S., Miller, M. R., Shah, A., Leon, D. A., Dangour, A. D. & Green, R. (2022). Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis. *Environmental research*, 210, 112988. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112988>
- Pietzner, V. & Beeken, M. (2019). *Wasserreinhalung als bedeutendes Thema einer naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung: Ein Citizen-Science-Projekt zur nachhaltigen Wassernutzung: Vollantrag (unveröffentlichtes Dokument)*. Universität Oldenburg, Universität Osnabrück.
- Pocock, M. J. O., Chapman, D. S., Sheppard, L. J. & Roy, H. E. (2014). *A Strategic Framework to Support the Implementation of Citizen Science for Environmental Monitoring. Final Report to SEPA*. Wallingford, Oxfordshire.
- Pradhan, P., Costa, L., Rybski, D., Lucht, W. & Kropp, J. P. (2017). A Systematic Study of Sustainable Development Goal (SDG) Interactions. *Earth's Future*, 5(11), 1169–1179. <https://doi.org/10.1002/2017EF000632>
- Price, C. A. & Lee, H.-S. (2013). Changes in participants' scientific attitudes and epistemological beliefs during an astronomical citizen science project. *Journal of Research in Science Teaching*, 50(7), 773–801. <https://doi.org/10.1002/tea.21090>
- Proteste in Niederlanden: Bauern blockieren Autobahnen (27. Juni 2022). *WELT*. <https://www.welt.de/239596925>

- Raddick, M. J., Bracey, G., Gay, P. L., Lintott, C. J., Murray, P., Schawinski, K., Szalay, A. S. & Vandenberg, J. (2010). Galaxy Zoo: Exploring the Motivations of Citizen Science Volunteers. *Astronomy Education Review*, 9(1). <https://doi.org/10.3847/AER2009036>
- Reineke, W. & Schlömann, M. (2020). *Umweltmikrobiologie* (3. Auflage). Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59655-5>
- Renger, M. (2002). *Sicker- und Fließzeiten von Nitrat aus dem Wurzelraum ins Grundwasser in Abhängigkeit von den Standortbedingungen, insbesondere Boden und Gestein. Arbeitsbericht / Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg: Bd. 223.* Akad. für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg. <https://doi.org/10.18419/opus-8500>
- Rieckmann, M. (2018a). Die Bedeutung von Bildung für nachhaltige Entwicklung für das Erreichen der Sustainable Development Goals (SDGs). *ZEP – Zeitschrift für internationale Bildungsforschung und Entwicklungspädagogik*, 2018(02), 4–10. <https://doi.org/10.31244/zep.2018.02.02>
- Rieckmann, M. (2018b). Learning to transform the world: key competencies in Education for Sustainable Development. In A. Leicht, J. Heiss & W. J. Byun (Hrsg.), *Education on the move. Issues and trends in education for sustainable development* (S. 39–60). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Rieß, W., Mischo, C. & Waltner, E.-M. (2018). Ziele einer Bildung für nachhaltige Entwicklung in Schule und Hochschule: Auf dem Weg zu empirisch überprüfbaren Kompetenzen. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 27(3), 298–305. <https://doi.org/10.14512/gaia.27.3.10>
- RKI (Hrsg.). (2020). *Täglicher Lagebericht des RKI zur Coronavirus-Krankheit-2019 (COVID-19)*. https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Situationsberichte/2020-03-11-de.pdf?__blob=publicationFile
- Roche, J., Bell, L., Galvão, C., Golumbic, Y. N., Kloetzer, L., Knobens, N., Laakso, M., Lorke, J., Mannion, G., Massetti, L., Mauchline, A., Pata, K., Ruck, A., Taraba, P. & Winter, S. (2020). Citizen Science, Education, and Learning: Challenges and Opportunities. *Frontiers in sociology*, 5, 613814. <https://doi.org/10.3389/fsoc.2020.613814>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., Wit, C. A. de, Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., . . . Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rolf, A. K. (2021). *Analyse der Messgenauigkeit handelsüblicher Nitrat-Teststäbchen unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren* [Masterarbeit]. Universität Osnabrück.

- Rost, D. H. (2008). Kann denn Kürze Sünde sein? Erfassung schulfachspezifischer Interessen mit nur einem Item. In Franz Hofmann, Claudia Schreiner, Josef Thonhauser (Hrsg.), *Qualitative und quantitative Aspekte: Zu ihrer Komplementarität in der erziehungswissenschaftlichen Forschung* (S. 225–237). Waxmann.
- Rost, D. H. (2013). *Interpretation und Bewertung pädagogisch-psychologischer Studien: Eine Einführung* (3. Aufl.). *UTB Erziehungswissenschaften, Psychologie: Bd. 8518*. Verlag Julius Klinkhardt.
- Rost, J., Gresele, C. & Martens, T. (2001). *Handeln für die Umwelt: Anwendung einer Theorie*. Waxmann.
- Rückert-John, J., John, R., Jaeger-Erben, M., Wiatr, M., Vohland, K., Ziegler, D., Göbel, C., Talmon-Gros, L., Teichler, T., Bach, N., v. Blanckenburg, C. & Dienel, H.-L. (2017). *Konzept zur Anwendbarkeit von Citizen Science in der Ressortforschung des Umweltbundesamtes. TEXTE: Bd. 49*. Umweltbundesamt.
- Rüger, B. (2002). *Test- und Schätztheorie: Band II: Statistische Tests. Lehr- und Handbücher der Statistik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag. <https://doi.org/10.1524/9783486599633>
- Ruhr-Universität Bochum (Hrsg.). (2022). *CS:iDrop®*. <https://www.ruhr-uni-bochum.de/didachem/CSiDrop.htm>
- Ruiz-Mallén, I., Riboli-Sasco, L., Ribault, C., Heras, M., Laguna, D. & Perié, L. (2016). Citizen Science: Toward Transformative Learning. *Science Communication*, 38(4), 523–534. <https://doi.org/10.1177/1075547016642241>
- Ryan, R. M. & Connell, J. P. (1989). Perceived locus of causality and internalization: examining reasons for acting in two domains. *Journal of Personality and Social Psychology*, 57(5), 749–761. <https://doi.org/10.1037//0022-3514.57.5.749>
- Ryan, R. M. & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *The American psychologist*, 55(1), 68–78. <https://doi.org/10.1037//0003-066X.55.1.68>
- Ryan, R. M. & Deci, E. L. (2002). Overview of self-determination theory: An organismic-dialectical perspective. In E. L. Deci & R. M. Ryan (Hrsg.), *Handbook of self-determination research* (1. Aufl., S. 3–33). University of Rochester Press.
- Salkind, N. J. (Hrsg.). (2010). *Encyclopedia of research design*. SAGE Publications.
- Sarabia, L. A., Sánchez, M. S. & Ortiz, M. C. (2008). Introduction to Ranking Methods. In M. Pavan & R. Todeschini (Hrsg.), *Data handling in science and technology: Bd. 27. Scientific Data Ranking Methods: Theory and Applications* (S. 1–50). Elsevier Science. [https://doi.org/10.1016/S0922-3487\(08\)10001-6](https://doi.org/10.1016/S0922-3487(08)10001-6)

- Schaap, M., Hendriks, C., Kranenburg, R., Kuenen, J., Segers, A., Schlutow, A., Nagel, H.-D., Ritter, A. & Banzhaf, S. (2018). *PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland*. Umweltbundesamt.
- Schäfer, T. (2016). *Methodenlehre und Statistik*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-11936-2>
- Scheirer, C. J., Ray, W. S. & Hare, N. (1976). The Analysis of Ranked Data Derived from Completely Randomized Factorial Designs. *Biometrics*, 32(2), 429–434.
<https://doi.org/10.2307/2529511>
- Schiefele, U., Krapp, A., Wild, K.-P. & Winteler, A. (1993). Der "Fragebogen zum Studieninteresse" (FSI). *Diagnostica*, 39(4), 335–351.
- Schmid, A. (2006). Einfluss von Nitrat und Nitrit aus Fleischerzeugnissen auf die Gesundheit des Menschen. *Ernährungs-Umschau*, 53(2006), 490–495.
- Schmidt, S. & Wellbrock, W. (2021). Alltäglicher nachhaltiger Konsum – Bewusster Umgang mit Lebensmitteln vs. skandalträchtige Verschwendung. In W. Wellbrock & D. Ludin (Hrsg.), *Nachhaltiger Konsum* (S. 719–742). Springer Fachmedien Wiesbaden.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-33353-9_43
- Schmitt, N. (1996). Uses and abuses of coefficient alpha. *Psychological Assessment*, 8(4), 350–353. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.8.4.350>
- Schröder, M. & Agrar Europe (30. März 2020). Änderung der Düngeverordnung: Unterschiedliche Reaktionen auf Dünge-VO. *Wochenblatt für Landwirtschaft und Landleben*.
<https://www.wochenblatt.com/landwirtschaft/nachrichten/unterschiedliche-reaktionen-auf-duenge-vo-12011684.html>
- Schulze, J. (2018). *Entwicklung eines GreenLab_OS-Settings zum Themenkomplex "Stickoxide im Straßenverkehr"* [Masterarbeit]. Universität Osnabrück, Osnabrück.
- Schumann, U. & Huntrieser, H. (2007). The global lightning-induced nitrogen oxides source. *Atmos. Chem. Phys.*(7), 3823–3907. <https://doi.org/10.5194/acpd-7-2623-2007>
- Schwarzer, R. & Jerusalem, M. (2002). Das Konzept der Selbstwirksamkeit. *Selbstwirksamkeit und Motivationsprozesse in Bildungsinstitutionen, Zeitschrift für Pädagogik, Beiheft 44*.
<https://doi.org/10.25656/01:3930>
- Schwoerbel, J. & Brendelberger, H. (2022). *Einführung in die Limnologie: Stoffhaushalt - Lebensgemeinschaften - Technologie* (11. Auflage). Springer Spektrum.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63334-2>
- science2public (Hrsg.). (2021). *Aqua Check*. <https://ms-halle.science/flussaktivitaeten/aqua-check/>

- Selent, K.-D. & Grupe, A. (Hrsg.). (2018). *Die Probenahme von Wasser: Ein Handbuch für die Praxis* (2. Auflage). Deutscher Industrieverlag.
- Senko, J., López-Castro, M. C., Koch, V. & Nichols, W. J. (2010). Immature East Pacific Green Turtles (*Chelonia mydas*) Use Multiple Foraging Areas off the Pacific Coast of Baja California Sur, Mexico: First Evidence from Mark-Recapture Data. *Pacific Science*, 64(1), 125–130. <https://doi.org/10.2984/64.1.125>
- Shavelson, R. J., Hubner, J. J. & Stanton, G. C. (1976). Self-concept: validation of construct interpretations. *Review of Educational Research*, 46(3), 407–444. <https://doi.org/10.3102/00346543046003407>
- Shibata, H., Galloway, J. N., Leach, A. M., Cattaneo, L. R., Cattell Noll, L., Erisman, J. W., Gu, B., Liang, X., Hayashi, K., Ma, L., Dalgaard, T., Graversgaard, M., Chen, D., Nansai, K., Shindo, J., Matsubae, K., Oita, A., Su, M.-C., Mishima, S.-I. & Bleeker, A. (2017). Nitrogen footprints: Regional realities and options to reduce nitrogen loss to the environment. *Ambio*, 46, 129–142. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0815-4>
- Shirk, J. L., Ballard, H. L., Wilderman, C. C., Phillips, T., Wiggins, A., Jordan, R., McCallie, E., Minarchek, M., Lewenstein, B. V., Krasny, M. E. & Bonney, R. (2012). Public Participation in Scientific Research: a Framework for Deliberate Design. *Ecology and Society*, 17(2). <https://doi.org/10.5751/ES-04705-170229>
- Silva, C., Monteiro, A. J., Manahl, C., Lostal, E., Schäfer, T., Andrade, N., Brasileiro, F., Mota, P., Serrano Sanz, F., Carrodegua, J. & Brito, R. (2016). Cell Spotting: educational and motivational outcomes of cell biology citizen science project in the classroom. *Journal of Science Communication*, 15(01), A02. <https://doi.org/10.22323/2.15010202>
- Simonds, F. W. & Sinclair, K. A. (2002). *Surface water-ground water interactions along the lower Dungeness River and vertical hydraulic conductivity of streambed sediments, Clallam County, Washington, September 1999-July 2001* (Water-Resources Investigations Report 2002-4161). <https://doi.org/10.3133/wri024161>
- Smidt, S. (2008). *Wirkungen von Luftschadstoffen auf Pflanzen unter besonderer Berücksichtigung von Waldbäumen: BFW-Dokumentation*.
- Spaiser, V., Ranganathan, S., Swain, R. B. & Sumpter, D. J. T. (2017). The sustainable development oxymoron: quantifying and modelling the incompatibility of sustainable development goals. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 24(6), 457–470. <https://doi.org/10.1080/13504509.2016.1235624>
- Sparfeldt, J. R., Rost, D. H. & Schilling, S. R. (2004). Schulfachspezifische Interessen - ökonomisch gemessen. *Psychologie in Erziehung und Unterricht (PEU)*, 51(3), 213–220.

- Spicer, H., Nadolny, D. & Fraser, E. (2020). Going Squirrelly: Evaluating Educational Outcomes of a Curriculum-aligned Citizen Science Investigation of Non-native Squirrels. *Citizen Science: Theory and Practice*, 5(1), 14. <https://doi.org/10.5334/cstp.275>
- Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim (Hrsg.). (2020). *Stickstoffdioxid-Belastung in Niedersachsen vor und während der Corona-Pandemie: Zwischenbericht (Stand 22.04.2020)*. Hildesheim.
- Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim (Hrsg.). (2021). *Luftqualitätsüberwachung in Niedersachsen: Jahresbericht 2020*. Hildesheim.
- Ständiger Ausschuss „Oberirdische Gewässer und Küstengewässer“ LAWA-AO (Hrsg.). (2017). *Empfehlung zur Übertragung flussbürtiger, meeresökologischer Reduzierungsziele ins Binnenland*.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2019). *Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserbeseitigung: Öffentliche Wasserversorgung - 2016 (Reihe 2.1.1)*.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2022a). *Indicators of the German Sustainable Development Strategy*. <https://sustainabledevelopment-deutschland.github.io/>
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2022b, 30. Juni). *Abfallwirtschaft: Lebensmittelabfälle in Deutschland im Berichtsjahr 2020 (vorläufiges Ergebnis)*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/lebensmittelabfaelle.html>
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81–98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P. & McNeill, J. (2011). The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 369(1938), 842–867. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0327>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W. de, Wit, C. A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855.
- Stern, M. J., Powell, R. B. & Hill, D. (2014). Environmental education program evaluation in the new millennium: what do we measure and what have we learned? *Environmental Education Research*, 20(5), 581–611. <https://doi.org/10.1080/13504622.2013.838749>
- Stevance, A.-S. (Hrsg.). (2015). *Review of Targets for the Sustainable Development Goals: The Science Perspective*.

- Straub, M. C. P. (2020). A Study of Student Responses to Participation in Online Citizen Science Projects. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 18, 869–886. <https://doi.org/10.1007/s10763-019-10001-8>
- Strobl, B., Etter, S., van Meerveld, I. & Seibert, J. (2020). Accuracy of crowdsourced streamflow and stream level class estimates. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 823–841. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1578966>
- Stroh, K., Winkler, G. & Köhler, J. (2018). *UmweltWissen – Schadstoffe: Ammoniak und Ammonium*. Helmbrechts.
- Sutton, M., Howard, C., Adhya, T., Baker, E., Baron, J., Basir, A., Brownlie, W., Cordovil, C., de Vries, W., Eory, V., Green, R., Harmens, H., Hicks, K. W., Jeffery, R., Kanter, D., Lassalletta, L., Leip, A., Masso, C., Misselbrook, T., . . . van Grinsven, H. J. M. (2019). *Grasping the Challenge. A Manifesto for Science-in-Action through the International Nitrogen Management System. Summary Report*.
- Tai, R. H., Qi Liu, C., Maltese, A. V. & Fan, X. (2006). Career choice. Planning early for careers in science. *Science*, 312(5777), 1143–1144. <https://doi.org/10.1126/science.1128690>
- TFA-Dostmann (Hrsg.). (2022). *Analoger Regenschirm 47.1008*. <https://www.tfa-dostmann.de/produkt/analoger-regenschirm-47-1008/>
- Thomas, A. E. & Müller, F. H. (2011). *Skalen zur motivationalen Regulation beim Lernen von Schülerinnen und Schülern - Skalen zur akademischen Selbstregulation von Schüler/innen SRQ-A [G] (überarbeitete Fassung)* [Wissenschaftliche Beiträge aus dem Institut für Unterrichts- und Schulentwicklung]. Alpen-Adria Universität, Klagenfurt.
- Thornhill, I., Loiselle, S., Clymans, W. & van Noordwijk, C. G. E. (2019). How citizen scientists can enrich freshwater science as contributors, collaborators, and co-creators. *Freshwater Science*, 38(2), 231–235. <https://doi.org/10.1086/703378>
- Tie, X., Zhang, R., Brasseur, G. & Lei, W. (2002). Global NO_x production by lightning. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 43, 61–74. <https://doi.org/10.1023/A:1016145719608>
- Toomey, A. H. & Domroese, M. C. (2013). Can citizen science lead to positive conservation attitudes and behaviors? *Human Ecology Review*, 20(1), 50–62.
- Trumbull, D. J., Bonney, R., Bascom, D. & Cabral, A. (2000). Thinking scientifically during participation in a citizen-science project. *Science Education*, 84(2), 265–275. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(200003\)84:2<265::AID-SCE7>3.3.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(200003)84:2<265::AID-SCE7>3.3.CO;2-X)
- Tudor, M. T. & Dvornich, K. M. (2001). The NatureMapping Program: Resource Agency Environmental Education Reform. *The Journal of Environmental Education*, 32(2), 8–14. <https://doi.org/10.1080/00958960109599132>

- Tweddle, J., Carter, L., Batson, M., Hine, S., Bates, A., West, S., Davies, L., Fradera, R. & Norman, S. (2015). *The OPAL Bugs Count Survey Booklet*. https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/opal/BUGS-16pp-booklet_legacy.pdf
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2017). *FAQs zu Nitrat im Grund- und Trinkwasser*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/nutzung-belastungen/faqs-zu-nitrat-im-grund-trinkwasser#wie-ist-die-situation-in-deutschland>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2020). *Stickstoff- und Phosphoreinträge aus Punktquellen und diffusen Quellen in die Oberflächengewässer in Deutschland*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_n-p-eintraege_2020-09-17.xlsx
- Umweltbundesamt & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.). (2017). *Wasserwirtschaft in Deutschland. Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen*. Dessau-Roßlau.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2014). *UNESCO-Roadmap zur Umsetzung des Weltaktionsprogramms "Bildung für nachhaltige Entwicklung"*. Deutsche UNESCO-Kommission e.V.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Hrsg.). (2018). *Education for Sustainable Development: Towards achieving the SDGs (ESD for 2030): A draft framework for the implementation of Education for Sustainable Development beyond 2019*.
- United Nations Environment Programme (Hrsg.). (2019). *Measuring Progress: Towards Achieving the Environmental Dimension of the SDGs* (DEW/2236/NA).
- United Nations Water (Hrsg.). (2018). *Step-by-step methodology for monitoring water quality (6.3.2)*. <https://www.unwater.org/publications/step-step-methodology-monitoring-water-quality-632>
- Urhahne, D., Kremer, K. & Mayer, J. (2008). Welches Verständnis haben Jugendliche von der Natur der Naturwissenschaften? Entwicklung und erste Schritte zur Validierung eines Fragebogens. *Unterrichtswissenschaft*, 36(1), 71–93.
- Vanham, D., Bouraoui, F., Leip, A., Grizzetti, B. & Bidoglio, G. (2015). Lost water and nitrogen resources due to EU consumer food waste. *Environmental Research Letters*, 10(8), 84008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084008>
- Vaughan, H., Whitelaw, G., Craig, B. & Stewart, C. (2003). Linking ecological science to decision-making: delivering environmental monitoring information as societal feedback.

- Environmental monitoring and assessment*, 88, 399–408.
<https://doi.org/10.1023/A:1025593728986>
- Vereinte Nationen. (o. J.). *Communications materials*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material/>
- Vereinte Nationen (Hrsg.). (1972). *Report of the United Nations Conference on the Human Environment: A/CONF.48/14/Rev.1*.
- Vereinte Nationen & World Commission on Environment and Development (Hrsg.). (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future: A/42/427*.
- Veronika Scherbak. (2018). *Konzeption und Durchführung eines Schülerlabortages im Green-Lab_OS zum Thema Nitratbelastung in der Umwelt* [Masterarbeit]. Universität Osnabrück, Osnabrück.
- Verwaltungsgebiete 1 : 1 000 000 VG1000 und VG1000-EW. 2020*. (2020). Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/verwaltungsgebiete-1-1-000-000-mit-einwohnerzahlen-ebenen-stand-31-12-vg1000-ew-ebenen-31-12.html>
- Vetenskap & Allmänhet. (2021). *Svinnkollen Slutrapport - Forskarfredags Massexperiment 2020*. Stockholm.
- Vincent, S. & Civil Design Solutions. (2018). *Status Review of the Updated Rural Access Index (RAI): Draft Final Report, GEN2033C*. London.
- Vitousek, P. M., Menge, D. N. L., Reed, S. C. & Cleveland, C. C. (2013). Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 368(1621), 20130119. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0119>
- Vohland, K., Land-Zandstra, A. M., Ceccaroni, L., Lemmens, R., Perelló, J., Ponti, M., Samson, R. & Wagenknecht, K. (Hrsg.). (2021). *The Science of Citizen Science* (1st ed. 2021). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4>
- Vries, W. de, Kros, J., Kroeze, C. & Seitzinger, S. P. (2013). Assessing planetary and regional nitrogen boundaries related to food security and adverse environmental impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(3-4), 392–402.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.004>
- VSR-Gewässerschutz e.V. (Hrsg.). (2021a). *Bericht über unsere Arbeit 2020/2021*. https://vsr-gewaesserschutz.de/wp-content/uploads/2022/06/Taetigkeitsbericht_20_21.pdf

- VSR-Gewässerschutz e.V. (Hrsg.). (2021b). *Interaktive Nitratkarte - Überblick über die Belastung in den Kreisen*. <https://www.xn--vsr-gewässerschutz-wqb.de/nitratbelastung/belastetes-grundwasser/ni/>
- Wagenschein, D. (2006). *Einfluß der Gewässermorphologie auf die Nährstoffretention - Modellstudie am Beispiel der mittleren Weißen Elster* [Dissertation]. Brandenburgische Technische Universität, Cottbus-Senftenberg.
- Wagner, F., Valenta, P. & Nürnberg, H. W. (1985). Ionen-chromatographische Bestimmung der Anionen Cl⁻, NO₃⁻ und SO₄²⁻ in Regenwasser. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, 320, 470–476. <https://doi.org/10.1007/BF00479814>
- Walessa, Y. (2022). *Konzeption eines interaktiven Citizen-Lab-Konzeptes für Bürgerinnen und Bürger zum Thema Nitratbelastung in der Umwelt* [Bachelorarbeit]. Universität Osnabrück.
- Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R. J., Fetzer, I., te Wierik, S., Porkka, M., Staal, A., Jaramillo, F., Dahlmann, H., Singh, C., Greve, P., Gerten, D., Keys, P. W., Gleeson, T., Cornell, S. E., Steffen, W., Bai, X. & Rockström, J. (2022). A planetary boundary for green water. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 380–392. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8>
- Ward, B. B. (2003). Significance of anaerobic ammonium oxidation in the ocean. *Trends in Microbiology*, 11(9), 408–410. [https://doi.org/10.1016/S0966-842X\(03\)00181-1](https://doi.org/10.1016/S0966-842X(03)00181-1)
- Weiß, C. (2008). Nitrat, Nitrit, Nitrosamine: Teil 1: Nitrat und Nitrit. *Ernährungs Umschau*(4), 236–240.
- Weßnigk, S. (2013). *Kooperatives Arbeiten an industrienahen außerschulischen Lernorten* [Dissertation]. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- West, S. & Pateman, R. (2017). *How could citizen science support the Sustainable Development Goals*. <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/SEI-2017-PB-citizen-science-sdgs.pdf>
- Weston, M., Fendley, M., Jewell, R., Satchell, M. & Tzaros, C. (2003). Volunteers in bird conservation: Insights from the Australian Threatened Bird Network. *Ecological Management and Restoration*, 4(3), 205–211. <https://doi.org/10.1046/j.1442-8903.2003.00169.x>
- WHO (Hrsg.). (2020). *WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020*. <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>

- Wiek, A., Bernstein, M. J., Foley, R. W., Cohen, M., Forrest, N., Kuzdas, C., Kay, B. & Withycombe Keeler, L. (2016). Operationalising Competencies in Higher Education for Sustainable Development. In M. Barth, G. Michelsen, M. Rieckmann & I. Thomas (Hrsg.), *Routledge Handbook of Higher Education for Sustainable Development* (S. 241–260). Routledge.
- Wiek, A., Withycombe, L. & Redman, C. L. (2011). Key competencies in sustainability: a reference framework for academic program development. *Sustainability Science*, 6(2), 203–218. <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0132-6>
- Wirth, R. (2019). *Berufsorientierung im außerschulischen Lernort mit chemiebezogenen Berufen im Umweltschutz: Ergebnisse einer Fragebogenstudie mit Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I* [Dissertation]. Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg.
- Wilcoxon, F. (1945). Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6), 80–83. <https://doi.org/10.2307/3001968>
- Wilhelm, S. (2008). *Wasseraufbereitung: Chemie und chemische Verfahrenstechnik* (7., aktualisierte und ergänzte Auflage). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68887-7>
- Wissenschaft im Dialog/Kantar Emnid (Hrsg.). (2019). *Wissenschaftsbarometer 2019*. Berlin.
- Wittig, R. & Niekisch, M. (2014). *Biodiversität: Grundlagen, Gefährdung, Schutz*. Springer Spektrum.
- Wittig, R. & Streit, B. (2004). *Ökologie: 52 Tabellen. UTB basics: Bd. 2542*. Ulmer.
- Wood, C., Sullivan, B., Iliff, M., Fink, D. & Kelling, S. (2011). eBird: engaging birders in science and conservation. *PLoS biology*, 9(12), e1001220. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001220>
- World Health Organization. (2002). *Evaluation of certain food additives: Fifty-ninth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, Geneva 2002. Report / Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives: Bd. 59*. WHO.
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (Fourth edition incorporating the first addendum). World Health Organization. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK442376/>
- World Water Quality Alliance. (2021). *Assessing Groundwater Quality: A Global Perspective: Importance, Methods and Potential Data Sources: A report by the Friends of Groundwater in the World Water Quality Alliance. Information Document Annex for display at the 5th Session of the United Nations Environment Assembly*. https://www.unigrac.org/sites/default/files/resources/files/Assessing%20Groundwater%20Quality_A%20Global%20Perspective.pdf

Wriedt, G., Vries, D. de, Eden, T. & Federolf, C. (2019). Regionalisierte Darstellung der Nitratbelastung im Grundwasser Niedersachsens. *Grundwasser*, 24, 27–41.

<https://doi.org/10.1007/s00767-019-00415-0>

Wright, D. R., Underhill, L. G., Keene, M. & Knight, A. T. (2015). Understanding the Motivations and Satisfactions of Volunteers to Improve the Effectiveness of Citizen Science Programs. *Society & Natural Resources*, 28(9), 1013–1029.

<https://doi.org/10.1080/08941920.2015.1054976>

Zusammensetzung der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“. (1998). *Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“* *): Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gliederung der Arbeit (eigene Abbildung).....	17
Abbildung 2: Vom Säulen- über das Schnittmengen- zum Vorrangmodell (eigene Abbildung, angelehnt an M. Müller & Niebert, 2017, S. 65).....	22
Abbildung 3: Sustainable Development Goals (Abbildung aus Vereinte Nationen, o. J.).....	23
Abbildung 4: "The Great Acceleration". Links: Sozioökonomische Trends, (1) Weltbevölkerung, (2) Reales Bruttoinlandsprodukt, (3) Nutzung von Primärenergie, (4) Nutzung von Düngemitteln, (5) Wassernutzung, (6) Transportmittel. Rechts: Trends in Bezug auf das Erdsystem, (1) Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre, (2) Lachgaskonzentration in der Atmosphäre, (3) Globale Oberflächentemperatur, (4) Stickstofffluss in Küstengebiete, (5) Ozeanversauerung, (6) Prozentualer Rückgang der durchschnittlichen Artenvielfalt an Land im Vergleich zur Häufigkeit in ungestörten Ökosystemen (Ausschnitte aus Steffen, Broadgate et al., 2015, S. 84 & 87).....	26
Abbildung 5: Planetare Belastungsgrenzen, Stand 2022 (Abbildung von Azote for Stockholm Resilience Centre, aufbauend auf Persson et al. 2022, Wang-Erlandsson et al., 2022 und Steffen et al., 2015).....	27
Abbildung 6: Subglobale Betrachtung der Stickstoffproblematik (Abbildung aus Steffen, Richardson et al., 2015, Supporting Material, S. 18).....	31
Abbildung 7: Ergebnisse der Datenbankanalyse mit „GENIOS (beta)“ (GENIOS, 2022) mit den genannten Suchworten und der Anzahl an Ergebnissen (Stand 27.06.2022) (eigene Abbildung mit Diagrammen von GENIOS, 2022).....	33
Abbildung 8: Anthropogene Einflüsse auf den natürlichen Stickstoffkreislauf (Abbildung geändert nach Lüsse et al., 2022d, S. 9).	37
Abbildung 9: Räumliche Verteilung der Deposition von oxidiertem Stickstoff (links) und reduziertem Stickstoff (rechts) (E_q = Versauerungsequivalent: $71,4 E_q \triangleq 1 \text{ kg}$ Stickstoff) (Abbildung aus Schaap et al., 2018, S. 71).	44
Abbildung 10: Eintragswege von Nitrat in Grundwasser und Oberflächengewässer am Beispiel eines landwirtschaftlich genutzten Bodens (Abbildung aus Osterburg & Runge, 2007, S. 31).	45
Abbildung 11: Vereinfachte Darstellung der Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser am Beispiel eines Fließgewässers (Abbildung verändert nach Simonds & Sinclair, 2002, S. 24).	47
Abbildung 12: Auswirkungen des Stickstoffeintrags in die Nord- und Ostsee. Links: Eutrophierungsbewertung für den Nordostatlantik (Abbildung verändert nach UBA	

& BMU, 2017, mit Daten von OSPAR). Rechts: Todeszonen in der Ostsee mit Sauerstoffdefizit (grau kariert) und Schwefelwasserstoff (rot gestreift) (Abbildung aus Feistel et al., 2016, CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).....	48
Abbildung 13: Räumliche und zeitliche Skalierung der Wirkungen verschiedener Stickstoffverbindungen im Erdsystem (Abbildung aus Faulstich, 2015, S. 53).....	49
Abbildung 14: Stoffwechsel von Nitrat und Nitrit im Körper (Mengen gerundet) (Abbildung aus Schmid, 2006, S. 490).....	50
Abbildung 15: Stickstoffbelastung der Oberflächengewässer in Niedersachsen (NLWKN, 2020d, Teil II b Karte 24).....	52
Abbildung 16: Nitratbelastung des Grundwassers in Deutschland, dargestellt anhand des EUA- und EU-Nitratmessnetzes (eigene Abbildung mit Karten aus BMU, 2020, S. 13 & 19, unter Verwendung der Geobasisdaten DLM1000, 2015, BKG, der Fachdaten der LAWA, bearbeitet durch das Umweltbundesamt, FG I 1.7, 2020).....	54
Abbildung 17: Nitrat-, Nitrit und Ammoniumbelastung des Grundwassers in Niedersachsen (Abbildungen verändert nach NLWKN, 2020a, 2020b, 2020c).....	55
Abbildung 18: N-Düngesaldo der Landkreise und kreisfreien Städte in Niedersachsen (Abbildung geändert nach Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2022, S. 33).	57
Abbildung 19: Transport von anthropogen eingetragenem Nitrat in Gewässern (eigene Abbildung).	58
Abbildung 20: Einfluss der Flächennutzung im Zustromgebiet einer Grundwasser-Messstelle auf die Nitratbelastung (Abbildung aus Cremer, 2015, S. 32).....	59
Abbildung 21: Hydrogeologische Raumlagerung von Niedersachsen (Abbildung verändert nach Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie [LBEG], 2010, S. 7)....	60
Abbildung 22: Präventive und reaktive Maßnahmen (eigene Abbildung).....	62
Abbildung 23: Definitionen von Citizen Science (eigene Abbildung, Zitate aus den angegebenen Quellen).	67
Abbildung 24: Grad der Partizipation der Öffentlichkeit an wissenschaftlicher Forschung (eigene Abbildung, übersetzt nach Shirk et al., 2012, 4).....	69
Abbildung 25: Grad des Engagements und Wissensniveaus in Citizen Science-Projekten (eigene Abbildung nach Haklay, 2018, S. 59).....	70
Abbildung 26: PPSR (Public Participation in Scientific Research) Framework (Abbildung aus Shirk et al., 2012).....	71
Abbildung 27: Gesamtanzahl und Aktivitätsindex der Publikationen zu Citizen Science (Abbildung aus Bautista-Puig et al., 2019, S. 9).....	73

Abbildung 28: Learning Outcomes von Citizen Science (eigene Abbildung, verändert und übersetzt nach Phillips et al., 2018, S. 7).....	75
Abbildung 29: Zusammenführung von Citizen Science, BNE und naturwissenschaftlichem Unterricht (eigene Abbildung unter Verwendung von Niedersächsisches Kultusministerium, 2015, S. 7).....	82
Abbildung 30: Identifizierter Forschungsbedarf im Bereich Citizen Science (eigene Abbildung).....	88
Abbildung 31: Gliederung des Projektes „Schüler und Bürger forschen zusammen mit Wissenschaftlern zum Thema Stickstoffbelastung von Gewässern“ (eigene Abbildung, in Anlehnung an Pietzner & Beeken, 2019, S. 23).....	91
Abbildung 32: Konzeption des Citizen Science-Projektes „Schüler und Bürger forschen zusammen mit Wissenschaftlern zum Thema Stickstoffbelastung von Gewässern“ (eigene Abbildung).....	92
Abbildung 33: Begleitmaterialien für das Nitrat-Monitoring. Links und Mitte: Begleitheft 1; Rechts: Messprotokoll (eigene Abbildung mit Abschnitten aus Brockhage, Lüsse, Pietzner & Beeken, 2022d).....	94
Abbildung 34: Ablauf eines Schülerforschungsprojektes zu Nitrat in Lebensmitteln (Abbildung aus Brockhage et al., 2021a, S. 11, zusammengestellt mit Abbildungen der Schülerin J. Westendorf).....	97
Abbildung 35: Demographische Informationen über die Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes (eigene Abbildung).....	100
Abbildung 36: Projektbegleitende Materialien zur Informationen über die Stickstoffproblematik. Links und Mitte: Begleitheft 2; Rechts: Digitale Ausstellung (eigene Abbildung mit Abschnitten aus Brockhage, Lüsse, Pietzner & Beeken, 2022b).....	101
Abbildung 37: Projektbegleitende Materialien zu den Ergebnissen des Nitrat-Monitorings. Links und Mitte: Begleitheft 3; Rechts: Ausschnitt aus der Präsentation der öffentlichen Abendveranstaltungen (eigene Abbildung mit Abschnitten aus Brockhage, Lüsse, Pietzner & Beeken, 2022c).....	102
Abbildung 38: Darstellung der Ergebnisse in einer Online-Karte am Beispiel eines untersuchten Brunnens (Screenshot der Webseite https://www.home.uni-osnabrueck.de/fbrockhage/nitratmonitoring/map.html).....	103
Abbildung 39: Beiträge des Citizen Science-Ansatzes zur fachwissenschaftlichen Forschung (eigene Abbildung).....	106
Abbildung 40: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Verfärbung des Testfeldes der Nitrat-Teststäbchen (Abbildung aus Rolf, 2021, S. 19).....	116

Abbildung 41: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Störeinflüssen auf die Messung mit den verwendeten Nitrat-Teststäbchen (Abbildung verändert nach Rolf, 2021, S. 22).....	117
Abbildung 42: Schematische Darstellung der Datenerhebung und -auswertung (eigene Abbildung).....	118
Abbildung 43: Bewertung der Standortgenauigkeit der Fließgewässer-Probenahmestellen an zwei Beispielen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	123
Abbildung 44: Bewertung der Nitratbelastung an einer Probenahmestelle anhand des 50. und 90. Perzentils der Mehrfachmessungen (eigene Abbildung).....	125
Abbildung 45: Beispiel zur Bewertung der Schwankung der Nitratbelastung an einer Probenahmestelle (eigene Abbildung).....	129
Abbildung 46: Räumliche Verbindung der Probenahmestellen mit den Landbedeckungs- und -nutzungsklassen auf Level 1 und Level 2 (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	130
Abbildung 47: Nearest Neighbor-Analyse zum Vergleich der Citizen Science- und NLWKN-Daten am Beispiel von zwei Regionen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	132
Abbildung 48: Reflexionsspektren des Nitrat-Testfeldes bei verschiedenen Nitrat-Konzentrationen nach 60 Sekunden (Abbildung verändert nach Rolf, 2021, S. 27). 134	
Abbildung 49: Tatsächlich vorliegende Nitratkonzentrationen für mit den Teststäbchen gemessene Werte (eigene Abbildung, abgeleitet aus Messergebnissen von Rolf, 2021, S. X, Anhang, Invertierung der Achsen zum erleichterten Ablesen der tatsächlich vorliegenden Nitratkonzentration für die gemessenen Nitratkonzentrationen).....	134
Abbildung 50: Anzahl der in die Auswertung einbezogenen Probenahmestellen (eigene Abbildung).....	137
Abbildung 51: Übersicht der Probenahmestellen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	138
Abbildung 52: Anzahl der in die Auswertung einbezogenen Messwerte (eigene Abbildung).....	139
Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf der Messwerteintragungen (eigene Abbildung).....	139
Abbildung 54: Heatmap der Brunnenwasser-Probenahmestellen, Kernel shape: bi-quadratisch, Radius: 8,92 km (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	140

Abbildung 55: Heatmaps der Probenahmestellen aller Gewässertypen, Kernel shape: bi-quadratisch, Radius: 8,92 km (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	141
Abbildung 56: Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	142
Abbildung 57: Nitratbelastung der beprobten stehenden Gewässer (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	143
Abbildung 58: Nitratbelastung des beprobten Regenwassers (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	144
Abbildung 59: Nitratbelastung der beprobten Brunnen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	145
Abbildung 60: Nitratbelastung der beprobten Quellen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	146
Abbildung 61: Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer in Abhängigkeit von der Breite (eigene Abbildung).....	147
Abbildung 62: Zusammenhang zwischen der Nitratbelastung und der mittleren Filtertiefe der beprobten Brunnen (eigene Abbildung).....	148
Abbildung 63: Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer in Abhängigkeit von der Landbedeckung und -nutzung (eigene Abbildung).....	150
Abbildung 64: Nitratbelastung des beprobten Regenwassers in Abhängigkeit von der Landbedeckung und -nutzung (eigene Abbildung).....	153
Abbildung 65: Nitratbelastung des beprobten Brunnenwassers in Abhängigkeit von hydrogeologischen Bedingungen (eigene Abbildung).....	154
Abbildung 66: Jahreszeitlicher Verlauf der Nitratbelastung der beprobten Fließgewässer (eigene Abbildung).....	156
Abbildung 67: Jahreszeitlicher Verlauf der Nitratbelastung der beprobten stehenden Gewässer (eigene Abbildung).....	157
Abbildung 68: Jahreszeitlicher Verlauf der Nitratbelastung der beprobten Brunnen (eigene Abbildung).....	158
Abbildung 69: Vergleich der Citizen Science- und VSR-Daten (eigene Abbildung unter Verwendung der Daten aus VSR-Gewässerschutz e.V., 2021b).....	159
Abbildung 70: Vergleich der Citizen Science- und NLWKN-Daten (eigene Abbildung).....	160
Abbildung 71: Fokusregionen der voneinander abweichenden Brunnenwasser- und Grundwasser-Probenahmestellen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).....	161

Abbildung 72: Fokusregionen der voneinander abweichenden Fließgewässer-Probenahmestellen (eigene Abbildung unter Verwendung der angegebenen Daten).	162
Abbildung 73: Optimierter Ablauf der Datenerhebung, vollständiges Schema in Anhang L (eigene Abbildung).....	180
Abbildung 74: Beiträge des Citizen Science-Ansatzes zur Umweltbildung und naturwissenschaftlichen Schulbildung (eigene Abbildung).	186
Abbildung 75: Versuchsdesign der Begleitstudie (eigene Abbildung).....	192
Abbildung 76: Aufbau der Fragebögen (eigene Abbildung).	194
Abbildung 77: Alter und Geschlechterverteilung der Stichprobe, differenziert nach der Teilnahme als Bürger:in oder Schüler:in und der Gruppenzugehörigkeit (Interventionsgruppe oder Vergleichsgruppe). Fehlerbalken in der oberen Abbildung zeigen die Standardabweichung. *Ein Ausreißer wurde entfernt (eigene Abbildung).	207
Abbildung 78: Mittleres allgemeines Umweltbewusstsein; getrennt nach den Dimensionen, der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken in den linken Diagrammen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).....	210
Abbildung 79: Mittleres themenspezifisches Umweltbewusstsein; getrennt nach den Dimensionen, der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken in den linken Diagrammen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).....	213
Abbildung 80: Mittleres Verständnis der Natur der Naturwissenschaften; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).....	217
Abbildung 81: Mittlerer Selbstbestimmungsindex (<i>SDI</i>); getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).....	219
Abbildung 82: Mittleres Interesse an den naturwissenschaftlichen Fächern; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).....	220
Abbildung 83: Mittlere allgemeine Selbstwirksamkeit; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).....	221
Abbildung 84: Mittlere schul-/fachbezogene Selbstwirksamkeit; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung).....	222

Abbildung 85: Mittleres Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften; getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten, Fehlerbalken im linken Diagramm zeigen das 95 %-Konfidenzintervall (eigene Abbildung)..... 223

Abbildung 86: Evaluation des Citizen Science-Ansatzes aus Perspektive der Bürger:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert)..... 228

Abbildung 87: Evaluation des Forschungspatenansatzes aus Perspektive der Bürger:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert)..... 230

Abbildung 88: Evaluation des Citizen Science-Ansatzes aus Perspektive der Schüler:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert)..... 231

Abbildung 89: Evaluation des Forschungspatenansatzes aus Perspektive der Schüler:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert)..... 234

Abbildung 90: Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf das Citizen Science-Projekt aus Perspektive der Bürger:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert). 238

Abbildung 91: Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf das Citizen Science-Projekt aus Perspektive der Schüler:innen (eigene Abbildung, die Datenbeschriftung entspricht der absoluten Häufigkeit, zur Vereinheitlichung wurden alle Items entsprechend der für die Arbeit gewählten Form des Genderns adaptiert). 239

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Allgemeine Zielsetzung, Konkretisierung in Unterziele und Indikatoren im Rahmen der Agenda 2030 am Beispiel des SDGs 14 (angelehnt an A/RES/71/313, 2017/E/CN.3/2022/2; A/RES/70/1, 2015).....	24
Tabelle 2: Zusammenfassung relevanter Schlüsselkompetenzen für BNE nach Rieckmann (2018a) unter Berücksichtigung von Haan et al., 2008; Haan, 2010; Rieckmann, 2018b; Wiek et al., 2011; Wiek et al., 2016.....	29
Tabelle 3: Direkte Zusammenhänge zwischen der Stickstoffproblematik und den SDGs nach Frank et al. (2021), aktueller Zustand ergänzt durch (Bundesregierung, 2021; Statistisches Bundesamt, 2022a), Abbildungen aus (Vereinte Nationen, o. J.).....	32
Tabelle 4: Mengen und Anteile der wichtigsten N-Verbindungen und Emittentengruppen an der Gesamtemission reaktiven Stickstoffs aus anthropogenen Quellen in Luft und Oberflächengewässer, Mittel 2010 – 2014 (nach Bach et al., 2020, S. 152).....	41
Tabelle 5: Chemische Güteklassifikation der Nährstoffe Nitrat, Nitrit und Ammonium in Fließgewässern, Umrechnung gerundet (LAWA, 1998, S. 26).....	53
Tabelle 6: Empirisch nachweisbare Kerndimensionen der Natur der Naturwissenschaften (Urhahne et al., 2008), beschrieben durch Kremer & Mayer (2013, S. 82).....	79
Tabelle 7: Übersicht verschiedener aktueller und bereits abgeschlossener Citizen Science-Projekte zur Untersuchung von Meeres-, Küsten- und Oberflächengewässern sowie Trink- und Grundwasser, welche den Parameter Nitrat oder Gesamtstickstoff berücksichtigen (Ausschnitt aus Anhang C).....	85
Tabelle 8: Zielgruppen des Projektes, differenziert nach aktiv und passiv in das Citizen Science-Forschungsvorhaben eingebundenen Personen.....	90
Tabelle 9: Methoden zur Bestimmung der Nitrat-Konzentration einer Gewässerprobe (angelehnt an Pietzner & Beeken, 2019, S. 13).....	113
Tabelle 10: Übersicht der mit dem Fragebogen abgefragten Merkmale des Gewässers, der Probenahmestelle und der Umgebung der Probenahmestelle.....	120
Tabelle 11: Übersicht über die in der Auswertung verwendeten, statistischen Testverfahren.....	127
Tabelle 12: Kategorisierung der Nitratmessungen, angelehnt an Ziel- und Grenzwerte für Grundwasser und Oberflächengewässer, mit der für die Darstellung der Ergebnisse ausgewählten Farbgebung (LAWA, 1998; GrwV, 2010/04.05.2017).....	136

Tabelle 13: Anzahl der Fließgewässer-Probenahmestellen in den CORINE-Land Cover Klassen auf Level 1 (<i>CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021</i>).....	150
Tabelle 14: Anzahl der Fließgewässer-Probenahmestellen in den Level 2 CORINE-Land Cover Klassen (<i>CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021</i>).....	151
Tabelle 15: Anzahl der Probenahmestellen in stehenden Gewässern in den CORINE-Land Cover Klassen auf Level 1 (<i>CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021</i>).....	152
Tabelle 16: Anzahl der Regenwasser-Probenahmestellen in den CORINE-Land Cover Klassen auf Level 2 (<i>CORINE Land Cover 5 Ha (2018), 2021</i>).....	152
Tabelle 17: Anzahl der Brunnen-Probenahmestellen in Niederung, Geest und Bergland (klassifiziert nach <i>Hydrogeologische Raumgliederung Von Deutschland (HYRAUM), 2015; LBEG, 2010</i>).....	154
Tabelle 18: Anzahl der mindestens einmal beprobten Probenahmestellen innerhalb der meteorologischen Jahreszeiten.....	155
Tabelle 19: Untersuchte Konstrukte der Begleitstudie mit Bezug zur Umweltbildung mit Itembeispielen, vollständige Fassung in Anhang M und N, (-): invertierte Items.....	195
Tabelle 20: Untersuchte Konstrukte der Begleitstudie mit Bezug zur naturwissenschaftlichen Schulbildung mit Itembeispielen, vollständige Fassung in Anhang N, (-): invertierte Items.....	199
Tabelle 21: Evaluation des Citizen Science-Projektes und Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf den Projektverlauf.....	202
Tabelle 22: Stichprobengrößen, differenziert nach der Teilnahme als Bürger:in oder Schüler:in und der Gruppenzugehörigkeit (Interventionsgruppe oder Vergleichsgruppe).....	206
Tabelle 23: Interne Skalenreliabilität der (Sub-)Skalen zum allgemeinen und themenspezifischen Umweltbewusstsein (Cronbachs α) für beide Messzeitpunkte ($\alpha < 0,7$ rot markiert).....	208
Tabelle 24: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Allgemeines Umweltbewusstsein“, getrennt nach den Dimensionen, der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.....	209
Tabelle 25: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Themenspezifisches Umweltbewusstsein“, getrennt nach den Dimensionen, der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.....	212

Tabelle 26: Interne Skalenreliabilität der (Sub-)Skalen zu Konstrukten mit Bezug zur naturwissenschaftlichen Schulbildung (Cronbachs α) für beide Messzeitpunkte ($\alpha < 0,7$ rot markiert).	216
Tabelle 27: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Gesamtskala „Verständnis der Natur der Naturwissenschaften“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.....	217
Tabelle 28: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) für den berechneten Selbstbestimmungsindex (SDI) für die Skala „Motivationale Regulation“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.....	219
Tabelle 29: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Interesse“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.	220
Tabelle 30: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Allgemeine Selbstwirksamkeit“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.	221
Tabelle 31: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Schul-/Fachbezogene Selbstwirksamkeit“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.....	222
Tabelle 32: Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) zur Skala „Selbstkonzept der Begabung in den Naturwissenschaften“, getrennt nach der Gruppenzugehörigkeit und den Erhebungszeitpunkten.....	223

Abkürzungsverzeichnis

BMU	<i>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit</i>
BMUV.....	<i>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz</i>
BNE	<i>Bildung für nachhaltige Entwicklung</i>
BW	<i>Brunnenwasser</i>
CLC	<i>CORINE Land Cover</i>
DBU	<i>Deutsche Bundesstiftung Umwelt</i>
ECSA.....	<i>European Citizen Science Association</i>
FG.....	<i>Fließgewässer</i>
ICSU.....	<i>International Science Council</i>
IN.....	<i>Interesse</i>
LAWA	<i>Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser</i>
MR.....	<i>Motivationale Regulation</i>
NGO	<i>Nichtregierungsorganisation</i>
NLWKN.....	<i>Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz</i>
OECD.....	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
QW	<i>Quellwasser</i>
SDG.....	<i>Sustainable Development Goal</i>
SDI	<i>Selbstbestimmungsindex</i>
SK.....	<i>Selbstkonzept</i>
SW.....	<i>Selbstwirksamkeitserwartung</i>
UB	<i>Umweltbewusstsein</i>
UN	<i>Vereinte Nationen</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
VNOS.....	<i>Verständnis der Natur der Naturwissenschaften</i>
WCED	<i>World Commission on Environment and Development</i>
WHO.....	<i>Weltgesundheitsorganisation</i>
WoS.....	<i>Web of Science</i>
WWQA.....	<i>World Water Quality Alliance</i>

Anhang

Der beiliegende, digitale Anhang enthält folgende Dateien. Die Dateien sind entsprechend der hier aufgeführten Listung benannt.

Anhang A: Zusammenhänge zwischen der Stickstoffproblematik und den SDGs

Anhang B: Nitratbelastung der Grundwasserkörper in Deutschland

Anhang C: Citizen Science-Projekte mit dem Forschungsgegenstand Wasser

Anhang D: Feinziele des Citizen Science-Projektes

Anhang E: Projektbegleitende Materialien zur Stickstoffbelastung von Gewässern

Anhang F: Schematische Übersicht der Partizipation der Teilnehmer:innen des Citizen Science-Projektes

Anhang G: Aufbau des Regensammlers

Anhang H: Fragebögen zur Klassifikation der Probenahmestellen

Anhang I: Übersicht: Hydrogeologische Räume im Probenahmegebiet

Anhang J: Messdaten: Subjektive Ablesegenauigkeit der Teststäbchen

Anhang K: Untersuchung der Ursachen der Abweichungen

Anhang L: Optimierungen des Ablaufs der Datenerhebung und -auswertung

Anhang M: Pre- und Posttest für die Bürger:innen

Anhang N: Pre- und Posttest für die Schüler:innen

Anhang O: Daten und Ergebnisse der Begleitstudie

Anhang P: Ergebnisse der Begleitstudie zum Verständnis der Natur der Naturwissenschaften

Anhang Q: Ergebnisse der Begleitstudie zur motivationalen Regulation

Anhang R: Publikationen

Erklärung über die Eigenständigkeit der erbrachten wissenschaftlichen Leistung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise entgeltlich / unentgeltlich geholfen.

- Ulrike Schnitger: Aufteilung der angemeldeten Bürger:innen auf die teilnehmenden Schulen, Klassifikation der Berufe der angemeldeten Bürger:innen, Nachtragung von per E-Mail eingereichten Messergebnissen
- Johannes Teck: Installation und Betreuung des Servers zur Datenübertragung für das Nitrat-Monitoring, Vorbereitung der Monitoring-Daten für die Auswertung
- Hanna Müller: Erstellung und Einbindung der Online-Ergebniskarte der Monitoring-Daten, Vorbereitung der Monitoring-Daten für die Auswertung
- Veronika Scherbak: Konzeption eines Schülerlabors zur Nitratbelastung, aus dem einige Experimente für die projektbegleitenden Schülerlabore adaptiert wurden
- Jana Schulze: Konzeption eines Schülerlabors zur Stickoxidbelastung, aus dem einige Experimente für die projektbegleitenden Schülerlabore adaptiert wurden
- Anna Effertz: Konzeption einer digitalen Ausstellung zur Stickstoffproblematik, die in überarbeiteter Fassung für das Projekt verwendet wurde
- Anne-Marie Bischoff: Konzeption einer Lerneinheit zur Nitratproblematik, die über das Projekt hinaus als kostenloses Unterrichtsmaterial veröffentlicht wurde
- Mientje Lüsse: Gemeinsame Erstellung von Begleitmaterial für das Projekt

Weitere Personen waren an der inhaltlichen materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

