



UNIVERSITÄT
KOBLENZ · LANDAU

Universität Koblenz – Landau

Campus Landau

FB7: Natur- und Umweltwissenschaften

Institut für naturwissenschaftliche Bildung

Arbeitsgruppe Chemiedidaktik

Konzeption, Durchführung und Evaluation einer Einheit zum Thema „Gewässeranalytik“ für die Sekundarstufe II am Schülerlabor Freilandmobil

Masterarbeit

Sascha Neff

1. Gutachter: Prof. Dr. Björn Risch
2. Gutachter: Alexander Engl

Name Neff, Sascha

Anschrift



Telefon



E-Mail



Studiengang



Matrikel-Nummer



Inhalt

1 Ausgangslage	1
2 Fachwissenschaftliche Grundlagen	2
2.1 Gewässeranalytik	2
2.1.1 Umgebungsparameter an der Messstelle	2
2.1.2 Probenahme	3
2.1.3 pH-Wert	4
2.1.4 Temperatur	5
2.1.5 Leitfähigkeit	6
2.1.6 Sauerstoffsättigung	6
2.1.7 Chlorid	10
2.1.8 Nitrat	13
2.1.9 Ammonium	16
2.1.10 Beurteilung und Gewässergüteklasse	17
2.2 Unterrichtliche Relevanz	19
2.2.1 Biologie	19
2.2.2 Erdkunde	20
2.2.3 Physik	20
2.2.4 Grund- und Leistungsfach Chemie	21
3 Konzeption der Einheit	22
3.1 Relevantes Vorwissen	22
3.2 Konzeption und Anpassung der Einheit	23
3.3 Alternatives Vorgehen bei fehlendem Zugang zum Online-Portal	26
3.4 Vorschläge zur methodisch-inhaltlichen Vertiefung	28
4 Methodisches Vorgehen	30
4.1 Methoden der Datenerhebung	30
4.2 Methodenwerkzeuge	31
4.2.1 Fragebogen	31

4.2.2 Videoaufzeichnung	36
4.3 Erhebung in der Einzelsituation	37
4.4 Methoden der Datenauswertung	37
4.4.1 Auswertung der Fragebögen	37
4.4.2 Auswertung der Videosequenzen	39
4.4.3 Lesbarkeitsindex (LIX)	45
5 Ergebnis und Diskussion	46
5.1 Ergebnisse der Fragebogen-Erhebung	46
5.1.1 Skala zum aktuellen Interesse	46
5.1.2 Cognitive load	48
5.1.3 Intrinsic cognitive load	53
5.1.4 Extraneous cognitive load	55
5.1.5 Germane cognitive load	57
5.1.6 Gesamtbetrachtung	60
5.2 Ergebnisse der Videoanalyse	63
5.3 Lesbarkeitindex (LIX)	69
5.4 Überarbeitung der erprobten Einheit	70
5.5 LIX nach Überarbeitung – Gegenüberstellung	74
6 Methodenkritik	75
6.1 Kritische Betrachtung der Fragebogen-Erhebung	75
6.2 Kritische Betrachtung der Videoanalyse	76
6.3 Gesamtbetrachtung	76
7 Fazit	78
8 Ausblick	78
8.1 Anpassung der Inhalte an die Mittelstufe	78
8.2 Transformation der Inhalte als Citizen-Science Ansatz	79
8.3 Einbindung in eine Reihenplanung	79
9 Verzeichnis der Literatur	80

10 Verzeichnis der Diagramme	91
11 Abbildungsverzeichnis	93
Eidesstattliche Erklärung	94
Einverständnis zur Nutzung der Abschlussarbeit	95
Anhänge	96

1 Ausgangslage

Die Universität Koblenz- Landau bietet in Kooperation mit dem Eduard-Spranger-Gymnasium Landau interessierten Schülerinnen und Schüler¹ die Möglichkeit ihre Kenntnisse und Kompetenzen im Fachbereich Naturwissenschaften, mit dem Schwerpunkt Chemie, zu vertiefen. Hierzu findet regelmäßig ein *Experimentier-Café* als extracurriculares Angebot statt. Die Teilnahme ist für die Schüler freiwillig. Thematisiert werden an Kenntnisstand und Lebenswelt der Teilnehmer orientierte Experimente, welche von diesen selbst durchgeführt werden. Durch zusammengestellte Materialien und detaillierte Anleitungen ist ein hohes Maß an selbstständiger Tätigkeit der Schülerinnen und Schüler möglich. Dieses Angebot soll fortgeführt werden, wobei eine thematische Vertiefung *Gewässer(-Analyse)* erfolgen soll. Ebenso soll das Konzept als eigenständige Unterrichtseinheit zugänglich gemacht werden.

Das ebenfalls im Rahmen der schulisch-universitären Kooperation am Eduard-Spranger-Gymnasium befindliche Freilandmobil, soll als Ausgangspunkt dienen. Es handelt sich um einen restaurierten Zirkuswagen, welcher mit technischer Ausstattung (Kühlschrank, Spül-tisch, Heizung), hauptsächlich aber mit Labormaterialien bestückt ist. Zusätzlich zu Bechergläsern, Reagenzgläsern, Spateln, Schutzbrillen, Heizplatten, und vielem mehr, sollen künftig auch die *einstein*-Messsysteme zur Erhebung der Gewässergüte dort untergebracht werden. In Verbindung mit einer ausgearbeiteten Konzeption soll zunächst Oberstufenkursen so die Möglichkeit eröffnet werden, realitäts- und naturnahen, fächerübergreifenden Unterricht an einem außerschulischen Lernort zu erleben.

Zielstellung der vorliegenden Arbeit war eine Unterrichtseinheit zum Thema Gewässeranalytik, welche im weiteren Verlauf interessierten Lehrkräften zugänglich gemacht werden sollte, zu konzipieren, durchzuführen und zu evaluieren. Dabei wird der Forschungsfrage nachgegangen, ob sich die konzipierte Einheit als praxistauglich für Schüler im Fach Chemie der Sekundarstufe II erweist. Im Verlauf der Arbeit soll neben der konzeptionellen Gestaltung insbesondere die Auswirkung der Durchführung der Einheit im Freiland auf die aktuelle Interessenslage der Schüler erfasst werden. Weiterhin soll die Konzeption hinsichtlich der adressatengerechten Ausarbeitung untersucht werden. Als zu untersuchende Variablen werden dabei die Konstrukte der kognitiven Belastung, das aktuelle Interesse, der Lesbarkeitsindex, sowie spezifische Probleme bei der Durchführung dienen.

¹ Im Sinne der besseren Lesbarkeit wird künftig von „Schülern“ die Rede sein, wenn „Schülerinnen und Schüler“ gemeint sind. Gleiches gilt für „Lehrer“, „Teilnehmer“ und weitere bezeichnete Personenkreise.

2 Fachwissenschaftliche Grundlagen

Im Folgenden wird neben der fachwissenschaftlichen Betrachtung der thematischen Inhalte der Konzeption auch die schulische Relevanz des Konzeptes beleuchtet. Die fachwissenschaftliche Erörterung der Inhalte zur Gewässeranalytik beschränkt sich aufgrund der Vielzahl bekannter Gütekriterien und Verfahren auf die im Rahmen der Unterrichtseinheit betrachteten Parameter der Wasseranalytik. Eine Ausweitung auf alle erhebbaren Messgrößen und Zustandsbeschreibungen eines Wasserkörpers erscheint an dieser Stelle wenig zielführend und kann der Literatur entnommen werden.

2.1 Gewässeranalytik

2.1.1 Umgebungsparameter an der Messstelle

Gewässer stehen als komplexe Umweltsysteme in reger wechselseitiger Beeinflussung mit den umliegenden atmosphärischen und geologischen Gegebenheiten. Veränderungen im Einzugsgebiet eines Gewässers können sich ebenso auf die Beschaffenheit auswirken, wie Umgebungsparameter an der Messstelle. Die Wassertemperatur, die Beleuchtungsstärke und damit das Lichtklima im Gewässer beeinflussen dabei ebenso wie der Nährstoffeintrag und die Sauerstoffsättigung die biologische Aktivität im Wasser. Im Hinblick auf Nachweise der enthaltenen Stoffe wirken sich die Abflussverhältnisse sowie die Schwebstoffführung aus. So kann ein Eintrag sauerstoffzehrender Stoffe den Sauerstoffgehalt verringern. Ein Nährstoffeintrag kann, insbesondere in Kombination mit guten Beleuchtungsverhältnissen die Assimilationstätigkeit erhöhen und damit zu einem erhöhten Sauerstoffgehalt führen (Hellmann, 1986, S. 21–23). Der Einfluss (jahres-)zeitlicher Schwankungen, welcher beispielsweise durch Bewässerungszeiten (Keller, 2013, S. 96–97) bedingt sein kann, ist zu berücksichtigen.

Zusätzlich zu den erhebbaren Laborparametern ist nach Klee „in vielen Fällen [...] eine Besichtigung der Probestelle notwendig“ (1990, S. 18). So gilt es etwa herauszufinden, ob Tiere in der Nähe des Gewässers weiden, welche Gefälleverhältnisse vor Ort vorliegen, ob der Wasserkörper homogen erscheint und ob verunreinigte Einflüsse ständig oder zeitweise vorhanden sind (Höll, 1986, S. 11). Auch stellen die Strömungsverhältnisse im Umfeld der Probestelle eine bedeutende Einflussgröße dar, da „Abwässer am Prallhang oft auf sehr weite Strecken hin unvermischt bleiben und eine vollständige Vermischung erst viele Kilometer flußabwärts erfolgt“ (Klee, 1990, S. 18).

Aus diesen oben genannten Gründen werden in der Konzeption nicht nur analytische Messungen durchgeführt, sondern über die in den Datenloggern des *einstein*-Messsystems inte-

grierten Sensoren auch Beleuchtungsstärke, UV-Intensität, Lufttemperatur und –druck erfasst. Zur Beurteilung der Strömungsverhältnisse findet ein Fließgeschwindigkeitsmessgerät Verwendung, welches es aufgrund seiner Mobilität erlaubt, die Strömungsgeschwindigkeiten, Kehrwasser- und Ruhebereiche vor Ort zu identifizieren.

2.1.2 Probenahme

Die Art und der Umfang der Probenahme richten sich generell nach den zu bestimmenden Parametern. Zur Charakterisierung von Längsprofilen oder zur Lokalisierung spezifischer Einleitungen ist die Probenahme über weite Strecken eines Gewässers erforderlich. „Die Frage der Homogenität des Wasserkörpers an der jeweiligen Meßstelle ist unter Umständen sehr wichtig und sollte vorab geklärt werden“ (Hellmann, 1986, S. 33). Dies gilt es insbesondere bei Fließgewässern mit entsprechenden Zuflüssen sowie an Flussmündungen zu berücksichtigen. Dagegen bedarf es für die Beschreibung eines Flusses im Jahresverlauf einer kontinuierlichen Entnahme. Neben dem Ort der Entnahme einer Wasserprobe ist auch die Entnahmetiefe von Bedeutung.

Zur Probenahme eignen sich Gefäße aus Glas oder Kunststoff, die gegebenenfalls so konstruiert sind, dass sie sich in unterschiedlichen Wassertiefen befüllen lassen. So beschreiben beispielsweise Mortimer et al. (2014) eine simple Konstruktion zur Probenahme aus verschiedenen Tiefen. Hierzu genügt es, eine Flasche mit einem Gewicht zu versehen und diese durch einen Korken zu verschließen, welcher mit einer Schnur am Flaschenhals gesichert ist. Bei Erreichen der zu beprobenden Tiefe kann somit durch einfaches Ziehen an der Schnur die Flasche geöffnet werden und eine volumenmäßig definierte Wasserprobe einströmen (Schöpfflasche nach Meyer beschrieben in Mortimer et al., 2014, S. 22–23). Als weiterentwickelte Variante der zuvor beschriebenen Konstruktion hat sich der Standard-Wasser-Probennehmer nach Ruttner etabliert. Im Gegensatz zur Schöpfflasche wird dieser jedoch bei Erreichen der Beprobungstiefe nicht geöffnet, sondern verschlossen. Da die Glasröhre als Hauptteil des Probennehmers beim Ablassen sowohl unten als auch oben offen steht, ist somit ebenfalls eine tiefengetreue Entnahme möglich. Darüber hinaus hat sich eine Reihe unterschiedlichster Probenahmegeräte auf dem Markt etabliert. (Mortimer et al., 2014, S. 22–27)

Die Auswahl der Apparatur zur Probenahme muss sich gegebenenfalls auch nach der Art der Untersuchung richten: entfällt beispielsweise die Relevanz der gelösten Gase, so kann auch auf entsprechende Pumpmechanismen zurückgegriffen werden, welche eine unkomplizierte und großvolumige Probenahme ermöglichen. Alternativ zu Pumpen sind auch Druckmechanismen erhältlich, welche durch eine leichte Druckbeaufschlagung der Probe eine Freisetzung

der gelösten Gase verhindern (Gesetz von Henry). Automatische Probennehmer ermöglichen eine ganzjährige Beprobung eines Wasserkörpers unter reduziertem Arbeitsaufwand bei Vermeidung der Gefährdung des Ausführenden (Zygmunt & Banel, 2010, S. 14). Ungeachtet der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Hilfsmittel „ist es oft ausreichend einfach eine Flasche ins Wasser zu tauchen [übersetzt aus dem Englischen]“ (Mortimer et al., 2014, S. 22). Insbesondere nahe des Ufers genügt häufig ein oben offenes, handgeführtes Gefäß (Zygmunt & Banel, 2010, S. 13), „bei Oberflächenproben genügt notfalls ein Eimer“ (Hellmann, 1986, S. 32).

2.1.3 pH-Wert

Besonders Gewässer mit geringem Säurebindungsvermögen reagieren sensibel auf Einträge. Saure Niederschläge kombiniert mit wenig kalkhaltigem Gestein können so zur Absenkung des pH-Wertes in einen für viele Lebewesen ungeeigneten Bereich führen. Allgemein wird ein pH-Bereich zwischen pH=7 und pH=8,5 als optimal angesehen. Viele Fischarten tolerieren zeitweise deutlich niedrigere oder höhere pH-Werte teilweise von rund pH=4,5 bis pH=10,7 (Karpfen, Schleien, Hechte). Dennoch können daraus Schädigungen an Haut und Kiemen resultieren. (Baur, 1987, S. 63–66)

Die Überwachung des pH-Wertes, insbesondere von Fließgewässern, bietet sich häufig stationär an, um auch kurzzeitige Schwankungen zu erfassen (Baur, 1987, S. 52).

Zur Bestimmung des pH-Wertes *in situ* muss die Art und Ansprechzeit des Sensors berücksichtigt werden. Sensoren zur stationären Überwachung bieten sich dabei aufgrund ihrer für Langzeitstabilität optimierten Membran und Sensoreinheit mit hohen Ansprechzeiten nicht an. Ebenso muss die grundlegende Entscheidung, ob dieser Parameter überhaupt vor Ort erhoben werden soll, kritisch abgewägt werden. Bei einer Messung im Labor ist aufgrund konstanter Umgebungsbedingungen grundsätzlich von einem weniger stark beeinflussten Wert auszugehen. Fällt die Entscheidung auf eine Messung *in situ*, so sind mögliche Einflussgrößen zu kompensieren, oder zumindest zu erfassen. (Hansen, 1999b, S. 399)

Neben den gängigen Indikatoren und Universal-Indikatorpapieren bietet sich aufgrund höherer Genauigkeit in der Gewässeranalytik hauptsächlich die potentiometrische Bestimmung des pH-Wertes an. Korrekt funktionierende Sensoren, konstanter Druck und beständige Temperatur vorausgesetzt, lassen sich so zuverlässige pH-Messwerte erzielen. (Wedborg et al., 1999, S. 114)

Als Teil des *einstein*-Messsystems kommt ein pH-Sensor mit flacher Elektrode zum Einsatz, wodurch eine Messung auch bei sehr kleinen Probemengen möglich ist. Dieser Sensor ist durch eine angegebene Ansprechzeit von fünf Sekunden für die Messung vor Ort geeignet. Die zuvor beschriebene Ungenauigkeit bei Arbeiten im Freiland gilt es auch hier zu berücksichtigen: Nach manueller Temperaturkorrektur arbeitet die Elektrode mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$. (Churgin, o.J., S. 2)

2.1.4 Temperatur

Die Wassertemperatur stellt als Parameter der Reaktionskinetik und der Löslichkeitsgleichgewichte einen bedeutenden Einfluss auf die Wasserqualität dar. Werden die Löslichkeitsgleichgewichte von Salzen abhängig von der Art der Lösungsvorganges (endotherm oder exotherm) verschoben, so wirkt eine Temperaturerhöhung auf die Sauerstoffsättigung durch reduzierte Gaslöslichkeit hemmend. Aus diesem Grund bedarf es bei vielen Messgrößen einer Kompensation der Temperatur. Die Temperatur ist folglich für die Bewertung des pH-Wertes und der Ionennachweise relevant. Zur Herstellung eines Bezugs zwischen gemessenem Sauerstoffgehalt und maximal möglichem Sauerstoffgehalt bei gegebener Temperatur wird daher die prozentuale Sauerstoffsättigung angegeben. Neben der indirekten Einflussnahme der Temperatur auf das Verhalten der Organismen besteht auch ein direkter Zusammenhang: Einige Fischarten reagieren sehr empfindlich auf Temperaturschwankungen und können bei Überschreiten einer bestimmten Temperatur verenden. Dieser Grenzwert ist jedoch nicht nur von der jeweiligen (Fisch-)Art abhängig, sondern auch von der Adaption der Tiere. So können Lebewesen, welche an eine niedrigere durchschnittliche Wassertemperatur adaptiert sind, steigende Wassertemperaturen deutlich schlechter verkraften, als dies warm adaptierten Artgenossen möglich ist. Bei Fischen können die Unterschiede allein aufgrund der Adaption bis zu 6°C betragen. (Baur, 1987, S. 83–87)

Die Wassertemperatur wirkt sich auch auf die Beschaffenheit des Ökosystems aus. Die Ausbildung von Temperaturgradienten ermöglicht die Schichtung eines Sees oder langsam fließenden Flusses auf Grundlage der Dichteanomalie des Wassers. (Smol, 2008, S. 2)

Erhöhte Temperaturmesswerte können in ruhigen und flachen Gewässerbereichen aus einer intensiven Sonneneinstrahlung resultieren, als zivilisatorische Einwirkung kommt beispielsweise die Einleitung von Kühlwässern (Kraftwerke, chemische Industrie, und andere) in Frage.

Zur Ermittlung der Temperatur stehen sowohl analoge Thermometer, als auch Messfühler zur Verfügung. Wichtig ist an dieser Stelle die Auswahl einer angepassten Skalierung. Bei zu erwartenden Wassertemperaturen von 0-25°C wäre ein Ölbadthermometer, das den Temperaturbereich bis rund 200°C abbildet, zu ungenau. Digitale Messgeräte sind meist unproblematischer, da sie aufgrund der Konstruktionsweise einen Temperaturbereich bei annähernd gleichbleibender Exaktheit erfassen. Abzulehnen sind lediglich alte Quecksilberthermometer. Diese sind jedoch aufgrund der bekannten Gefahren für Mensch und Natur ohnehin seit etlichen Jahren kaum noch auf dem Markt vertreten.

Im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Durchführung wurde die Wassertemperatur mittels einfacher Alkoholthermometer erfasst, für zukünftige Durchführungen stehen elektronische Temperaturfühler zur Verfügung.

2.1.5 Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit einer Lösung, physikalisch-chemisch ausgedrückt als Kehrwert des elektrischen Widerstandes, hängt von der Fläche der Messelektroden und deren Abstand in der Lösung sowie der spezifischen Leitfähigkeit ab (Atkins & de Paula, 2013, S. 806–807).

Leitfähigkeitsmessungen können gegebenenfalls zur Falsifizierung gemessener Ionenkonzentrationen herangezogen werden (Aas, 2010, S. 403–404). Es gilt dabei zu berücksichtigen, dass die Leitfähigkeit ebenfalls temperaturabhängig ist. Zur Kompensation dienen Temperaturkoeffizienten beziehungsweise Verlaufsdigramme. Näherungsweise kann „mit einem Temperaturgang von 2%/°C“ (Freier & Neeb, 1974, S. 84) kalkuliert werden.

Im Zuge der durchgeführten Einheit fand die Temperaturkompensation manuell durch Einrechnung eines Koeffizienten statt.

2.1.6 Sauerstoffsättigung

Gemäß dem Gesetz von Henry können sich nicht nur ionische oder organische Verbindungen in Wasser lösen, sondern auch Gase. Bei annähernd gleichen Zustandsgrößen eines Wasserkörpers können Veränderungen der Sauerstoffgehalte aus chemischer Sicht vorrangig durch die Variablen Temperatur und Umgebungsdruck auftreten (Brown et al., 2011, S. 518). Im komplexen hydrodynamischen System eines Fließgewässers gelangt Sauerstoff in gelöster Form durch intensiven Kontakt mit der atmosphärischen Luft ins Gewässer (Baur, 1987, S. 10–12).

Für hohe Sauerstoffsättigungswerte sind somit belebte Wasserbereiche förderlich. Ein weiterer der Sauerstoffsättigung zuträglicher Faktor besteht in der Assimilation von Wasserpflanzen. Diese setzen als Nebenprodukt ihrer Photosynthese-Prozesse Sauerstoff frei, welcher sich im Wasser lösen kann. (Koelle, 2010, S. 86)

In stehenden Gewässern ist die Sauerstoffsättigung stark mit der Tiefe der Probenahme in Verbindung mit der jahreszeitlichen Durchmischung des Gewässers korreliert (Mortimer et al., 2014, S. 16–17). „Oberflächenwasser selbst, die mit der Luft dauernd in Berührung stehen, sollen einen Sauerstoffgehalt haben, der der durch Temperatur und Luftdruck bedingten Sättigung entspricht“ (Klee, 1990, S. 64). Dies macht die Sauerstoffsättigung zu einem zentralen Gradmesser für die Qualität eines Gewässers. Bei Betrachtung der Flora und Fauna wird schnell klar, dass die Sauerstoffsättigung deutlich mehr Schwankungen unterliegt, als nur den zuvor genannten physikalischen. Insbesondere „bakterielle Atmung und Zersetzung der sedimentierenden organischen Materie (z.B. Algen) [übersetzt aus dem Englischen]“ (Smol, 2008, S. 187) verbrauchen Sauerstoff. Diese Art der Zehrung wird als biochemischer Sauerstoffbedarf (kurz BSB oder im Englischen BOD) bezeichnet. Dabei stellt dieser Wert nicht nur einen Anhaltspunkt zur „Belastung eines Gewässers mit biologisch oxidierbaren organischen Substanzen“ (Hütter, 1994, S. 109) dar, sondern dient auch als „Kriterium für die biologische Aktivität eines Gewässers“ (Hütter, 1994, S. 109).

Ermittelt wird dieser Wert durch den Vergleich der Konzentration des gelösten Sauerstoffs zu Beginn der Analyse und nach einer gewissen Zeit. Daraus ergibt sich der Verbrauch an Sauerstoff durch biochemische Prozesse. In der Regel wird die Zehrung im Zeitraum von 5 Tagen ermittelt, der sogenannte BSB₅ herangezogen. (Kaur, 2007, S. 138–140)

Weiterhin verbrauchen auch chemische Prozesse gelösten Sauerstoff. Die Gesamtheit aller chemisch oxidierbaren Verbindungen in einem Gewässer kann mit Hilfe des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB oder im Englischen COD) bestimmt werden. Dazu wird einer Wasserprobe ein „starkes Oxidationsmittel (typischerweise Kaliumdichromat unter sauren Bedingungen) [übersetzt aus dem Englischen]“ (Górecki & El-Hussieny Mohamed, 2010, S. 225) zugesetzt. Alternativ zur Oxidation mit Kaliumdichromat kann auch Kaliumpermanganat als Oxidationsmittel eingesetzt werden, das Ergebnis wird als Permanganatindex bezeichnet (Hütter, 1994, S. 104). Nach erfolgter Umsetzung kann das überschüssige Oxidationsmittel anschließend rüchtitriert werden. Aus dem Titrationsergebnis lässt sich sodann die Menge des verbrauchten Sauerstoffs berechnen. Da „Sauerstoff von allen Lebensformen auf diesem Planeten benötigt wird, mit Ausnahme einiger Bakterien [übersetzt aus dem Englischen]“ (Smol,

2008, S. 187) findet insbesondere durch biologische Zehrungsprozesse eine Verringerung des Sauerstoffgehaltes in Gewässern statt. Gleichzeitig finden ebenso chemische Zehrungsprozesse in Form von Oxidationen statt. Neben diesen kontinuierlichen, den Sauerstoffgehalt beeinflussenden, Faktoren können auch spontane Ereignisse die Sauerstoffkonzentration in Gewässern stark verändern. Als auf die Sauerstoffkonzentration negativ wirkende Ereignisse gelten bei Fließgewässern das Aufwirbeln von Sedimenten, insbesondere bei Hochwasser, sommerlich hohe Temperaturen und niedriger Wasserstand, plötzlicher witterungsbedingter Rückgang der Algenpopulation sowie plötzliche Abwassereinleitung. (Koelle, 2010, S. 88)

BSB und CSB sind in der Regel korrelierbar, die Art der Korrelation kann jedoch variieren, da mit dem CSB die Gesamtmenge aller chemisch oxidierbaren Stoffe erhoben wird, wohingegen mit dem BSB nur die biochemisch abbaubaren Stoffe erfasst werden (Górecki & El-Hussieny Mohamed, 2010, S. 224–225).

Die Beurteilung der messbaren Sauerstoffgehalte muss sich an den Verwendungszwecken des Wasserkörpers orientieren. Generell ist ein gutes Sauerstoffangebot zu bevorzugen, welches in Oberflächengewässern biologische Vielfalt ermöglicht. Kommt es jedoch zur Übersättigung eines Gewässers mit Sauerstoff, so gas überschüssiger Sauerstoff in Form kleiner Bläschen aus dem Wasser aus. Diese Bläschen lagern sich auf Objekten im Wasser an, wodurch in Folge die Bildung von Rostknollen an Eisenkörpern (zum Beispiel Leitungsrohre) begünstigt wird. Ebenso tritt eine milchige Trübung des Wassers ein, was aus trinkwassertechnischer Sicht nicht erwünscht ist, da dies vom Verbraucher nicht akzeptiert wird. (Höll, 1986, S. 276–278)

Für Fische sind die Folgen einer Sauerstoffübersättigung ungleich gravierender. Kommt es zur Freisetzung von Gasen aus Lösungen, führt dies auch im Körper der Fische zur Ausbildung von Gasblasen (Klee, 1990, S. 62–64). Bei Bildung von Gasblasen im Blutkreislauf sind die Tiere durch die „Gasblasenkrankheit“ (Hütter, 1994, S. 192) akut vital bedroht. Letztlich ist jedoch nicht nur der Sauerstoffgehalt sondern der Gesamtdruck entscheidend (Hütter, 1994, S. 192).

Bei zu geringem Sauerstoffgehalt eines Gewässers sind alle aeroben Prozesse und Lebewesen gefährdet, bei Unterschreitung der artenabhängigen Mindestwerte kommt es zum Absterben von Populationen.

Starke reduzierte Sauerstoffgehalte stellen darüber hinaus auch ein Risiko für Infrastrukturen dar, da Sauerstoffmangel zu reduzierenden Bedingungen führt. Eisenhaltige Leitungen oder

Bauteile werden unter diesen Bedingungen durch sogenannte „instationäre Korrosion nach Kuch“ (Koelle, 2010, S. 91) deutlich stärker in Mitleidenschaft gezogen als dies durch oxidative Korrosion geschieht. Die Bildung einer Schutzschicht durch einen angepassten Sauerstoffgehalt ist somit zu bevorzugen (Höll, 1986, S. 277).

Lediglich Grundwasser und Tiefenwässer einiger Seen weisen regelmäßig eine annähernde Sauerstofffreiheit auf. Anaerobe Vorgänge wie die Nitratreduktion oder die bakterielle Umwandlung von Sulfaten in Schwefelwasserstoff (Vidal et al., 2014) sind die Folge (Hütter, 1994, S. 94). Im Verhältnis zum atmosphärischen Sauerstoffgehalt von rund 21% zu den Sauerstoffsättigungswerten eines Gewässers zeigt sich, dass bei einem exemplarischen Sauerstoffgehalt von 10mg/L eine Differenz der Werte von etwa sechs Größenordnungen auftritt. Dies verdeutlicht die Empfindlichkeit der aquatischen Systeme, sowie den Bedarf an entsprechend präzisen Messverfahren. (Baur, 1987, S. 10)

Sowohl die elektrometrischen als auch die nasschemischen Verfahren zur Bestimmung des gelösten Sauerstoffs werden durch die Anwesenheit von Schwefelwasserstoff gestört. (Hansen, 1999a, S. 79)

Zur klassischen Bestimmung des Gehaltes an gelöstem Sauerstoff im Wasser bedarf es zunächst einer Fixierung des Sauerstoffs, um die Verfälschung des Wertes durch äußere Einflüsse, wie etwa nicht luftdicht verschlossene Gefäße, Diffusion durch Plastikgefäße oder die zuvor beschriebenen Zehrungsvorgänge auszuschließen. Hierzu hat sich die Fixierung als Manganoxid in Verbindung mit dem Abfüllen in eine Winkler-Flasche etabliert. (Koelle, 2010, S. 89–90) Als Fixierlösung dient in der Regel Mangan(II)-chlorid in alkalischem Milieu. Als Hilfsstoffe werden Nitrit sowie Natriumazidlösung, alternativ Amidosulfonsäure, zugesetzt. Nach kräftiger Durchmischung kann die Probe so gekühlt und lichtgeschützt bis zur Bestimmung im Labor aufbewahrt werden. Zur Titration wird dem Niederschlag mit überstehender Flüssigkeit Kaliumiodid und Salz- oder Phosphorsäure zugegeben. Abschließend wird mit Natriumthiosulfatlösung gegen Stärkelösung als Indikator titriert. (Höll, 1986, S. 139–141) Andere Verfahren sehen die iodometrische Bestimmung aus mit Mangansulfat fixiertem Sauerstoff im schwefelsauren Gemisch vor. (Kaur, 2007, S. 136–138)

Eine orientierende Abschätzung liefert das zuerst beschriebene Prinzip durch die abgestufte Färbung des entstehenden Niederschlags: ein weißlicher Niederschlag zeigt 0-2 mg/L Sauerstoff an, ein elfenbeinfarbener Niederschlag verweist auf 2-4 mg/L, ein hellbrauner Niederschlag indiziert 4-7 mg/L und ein kaffeebrauner Niederschlag ist Sättigungswerten über 7

mg/L zuzuordnen (Baur, 1987, S. 57). Zur photometrischen Bestimmung des Sauerstoffgehaltes eignet sich nach Fixierung als Mangan-Mischoxid die Bestimmung farbiger Iodkomplexe (I_3^-). Als Lichtquelle dient eine Quecksilberdampfampe (Freier & Neeb, 1974, S. 126–129). Für sehr kleine Sättigungswerte (kleiner 0,2 mg Sauerstoff/L) steht ein hochempfindliches Verfahren unter Verwendung von Cer(III)-Chlorid und *o*-Tolidin zur Verfügung (Freier & Neeb, 1974, S. 130–132).

Als alternatives nasschemisches Verfahren ist das Iod-Differenzverfahren nach W. Ohle zu erwähnen, welches auf ähnlichen Umsetzungen, wie das Standardverfahren nach Winkler-Bruhns beruht (Höll, 1986, S. 142).

Neuere messtechnische Verfahren erlauben die Bestimmung des Sauerstoffgehalts mit Hilfe einer galvanometrischen beziehungsweise polarometrischen Messung. Hierzu werden eine Goldkathode und eine Silberanode eingesetzt, welche durch eine angelegte Spannung von 0,8 Volt polarisiert sind, oder wahlweise eine Kombination aus Edelmetallkathode und Bleianode, welche auch ohne externe Spannung arbeiten kann. Über eine selektive Membran kann elementarer Sauerstoff in die Elektrode eindringen und eine Depolarisation mit resultierendem, der Sauerstoffkonzentration proportionalem Stromfluss bewirken. (Leithe, 1972, S. 68)

Die elektrometrische Messung ermöglicht eine Bestimmung vor Ort, reduziert die Fehlerquelle der Probenahme, verbraucht keine Chemikalien (mit Ausnahme austauschbarer Elektrolytlösungen) und ermöglicht das Monitoring im dynamischen System. (Koelle, 2010, S. 90)

Aus den vorgenannten Gründen bietet sich die Bestimmung des Sauerstoffgehaltes mittels Elektrode im Konzept der Unterrichtseinheit an. Dennoch bleibt die Bestimmung der Sauerstoffgehalte als komplexes Verfahren nicht ohne Fehler. Nennenswerte Fehlerquellen sind hier eine beschädigte Membran, welche ausgetauscht werden muss, Lufteinschlüsse in der Elektrodenkammer, mangelhafte Kalibrierung und nicht zuletzt eine ungenaue Temperaturkompensation.

2.1.7 Chlorid

Die umgebenden geologischen Bedingungen beeinflussen den Chloridgehalt eines Gewässers stark. Weisen Gewässer, welche ihren Ursprung in Buntsandstein, Granit oder Gneis haben einen Chloridgehalt von in der Regel maximal 10mg/L auf, so können Grundwässer bereits bis zur dreifachen Konzentration erreichen. „Grundwasser, das einen »guten chemischen Zustand« hat, erfüllt folgende Anforderungen: Es liegen keine Anzeichen für Salz- oder andere Einleitungen vor“ (Völker & Mohaupt, 2015, S. 69).

Aufgrund der hohen Mobilität der Chlorid-Ionen und der fehlenden Veränderung der Konzentrationen durch Abbau oder Selbstreinigungsprozesse ist einer erhöhten Chloridkonzentration praktisch nur durch Verdünnung entgegenzuwirken. Somit stellt der Chloridgehalt eines Gewässers einen relativ beständigen Indikator für Verschmutzungen dar. (Hütter, 1994, S. 95)

Ursachen erhöhter Chloridgehalte finden sich in industriellen Abwässern (Wasserenthärtung, Papierfabriken, Ölquellen, galvanische Industrie), aber auch in landwirtschaftlichen Ab- und Sickerwässern, beispielsweise von Schweinefarmen (Nagy & Nagy, 2014, S. 202).

Der Einsatz von Streusalz zur Enteisung von öffentlichen Straßen und Plätzen zeigt ebenfalls eine starke Korrelation zu den Chloridwerten von Oberflächengewässern (Smol, 2008, S. 303). Die Belastung von Oberflächengewässern mit Chloriden „stammt vorwiegend aus dem menschlichen Harn, mit dem 10-16g Kochsalz – entsprechend 6-10g Chlor – pro Kopf und Tag abgeschieden werden“ (Klee, 1990, S. 86). Versalzung und damit einhergehende steigende Chloridgehalte können somit als direkte Auswirkung menschlicher Aktivitäten betrachtet werden. (Smol, 2008, S. 303)

Weitere Einflussfaktoren sind die Nähe zu Küsten oder Salzlagerstätten. Unter diesen Einflüssen stehende Gewässer können durchaus Werte von 250mg/L bis rund 500mg/L aufweisen (Klee, 1990, S. 86–87). Der Grenzwert für Trinkwasser beträgt 250mg/L (Bundesministerium für Gesundheit; Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz; Bundesrat Reaktorsicherheit, 2001, S. 25).

Chlorid lässt sich in der gravimetrischen Laborpraxis quantitativ als Silberchlorid bestimmen. Hierzu „werden Chloridionen durch Zusatz von Silberionen als schwerlösliches Silberchlorid [aus verd. salpetersaurer Lösung] gefällt“ (Jander et al., 2005, S. 360). Der entstehende weiße Niederschlag kann nach dem Trocknen direkt ausgewogen werden. Wenngleich das Verfahren als sehr genau gilt und „daher zur Ermittlung von relativen Atommassen herangezogen“ (Jander et al., 2005, S. 360) wurde, stellen sich doch einige mögliche Verfahrensfehler dar, die insbesondere im Mehrkomponentensystem eines natürlichen Gewässers berücksichtigt werden müssen. So ist die Fällung nur bedingt selektiv: Bromid, Iodid, Cyanid und Thiocyanat werden mitgefällt, ebenso ist eine Mitfällung von Schwermetallen möglich. Weiterhin kann das Ergebnis der Bestimmung durch verschiedene Faktoren, wie etwa die Lichtempfindlichkeit des Niederschlags, Bildung von Silbersulfid oder Löslichkeitszunahme durch

zu starkes Ansäuern verfälscht werden (Jander et al., 2005, S. 360–361). Die allen quantitativen Arbeitsweisen immanenten systemischen Fehler werden an dieser Stelle als bekannt vorausgesetzt und im Folgenden nicht mehr explizit angeführt.

Als alternative Methode ist die argentometrische Bestimmung als *Chlorid nach Mohr* mit Chromat als Indikator bekannt (Jander et al., 2005, S. 424). Aufgrund der Verwendung des problematischen Chromats ist dieses Verfahren jedoch für den Einsatz an Schulen nicht vorgesehen (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), 2017, S. 71).

Alternativ lässt sich Chlorid ebenfalls argentometrisch unter Verwendung von Fluorescein als Adsorptionsindikator bestimmen. Diese *nach Fajans* beschriebene Arbeitsweise ist durch die Wahl des Indikators für Chlorid selektiv. (Kunze & Schwedt, 2009, S. 141–142)

Als indirekte Bestimmungsmethode ist eine Rücktitration *nach Volhard* möglich. Dazu wird enthaltenes Chlorid zunächst mit einem Überschuss von Silbernitrat ausgefällt, der feste Niederschlag abfiltriert und das überschüssige Silber mit Thiocyanat gegen Eisenammoniumsulfat $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2$ als Indikator titriert. (Jander et al., 2005, S. 424)

Letztlich ist auch eine Bestimmung von Chlorid unter Verwendung potentiometrischer Methoden, wie etwa Kalomel- oder Silberchloridelektroden als Potenzialdifferenz möglich (Kunze & Schwedt, 2009, S. 250–252). „In der Praxis werden Mess- und Bezugselektrode gemeinsam in die Probelösung eingesetzt oder zu einer *Einstab-Messkette* verbunden. Die Vergleichselektrode ist von einem Glasmantel mit Elektrolytlösung umgeben, die durch ein Diaphragma von der Titrierlösung abgetrennt wird“. (Kunze & Schwedt, 2009, S. 252)

In der Forschung finden darüber hinaus kombinierte Methoden, wie etwa die potentiometrische Titration mit Silbernitratlösung Anwendung, wobei der Endpunkt der Titration durch eine Ag/AgCl-Elektrode erfasst wird. Hierzu liegen hochpräzise Verfahrensanweisungen beispielsweise nach Hermann (1951) vor. (Kremling, 1999, S. 239–242)

Dabei zeigt sich die potentiometrische Bestimmungsvariante hinsichtlich des Aufwandes in der Durchführung sowie der Vermeidung problematischer Abfälle bei häufiger Bestimmung ökonomisch und ökologisch als vorteilhaft.

Die Verwendung ionensensitiver Elektroden zur Chloridbestimmung stellt einen bedeutsamen Fortschritt im Vergleich zu den nasschemischen Alternativen dar, und erlaubt somit eine von ökologischen und gesundheitlichen Gefährdungen befreite Durchführung der Maßanalytik im Freiland. Folglich bietet die Bestimmung mittels ionensensitiver Elektroden einen zeitgemä-

ßen Zugang zur Thematik Maßanalyse unter Verwendung an die Freilandarbeit angepasster Instrumente, welche dem Stand der Technik entsprechen.

Weitere Verfahren zur Bestimmung des Chloridgehaltes sind der Literatur zu entnehmen (zum Beispiel Nagy & Nagy, 2014, S. 202–209 und Aas, 2010, S. 405) und werden hier mangels unzureichender Passung auf die benötigte Präzision und die einsetzbaren Mittel nicht weiter beschrieben.

2.1.8 Nitrat

Nitrat stellt als eine der auftretenden Formen im Stickstoffkreislauf einen bedeutenden Nährstoff in Böden und Gewässern dar. Auf natürlichem Weg entsteht Nitrat aus Humus. Im Prozess der biologischen Mineralisierung wird aus der organischen Form im Beisein von Wasser zunächst Ammoniak gebildet. Der durch Desaminierung (Abbau von Aminen) entstandene Ammoniak reagiert mit dem vorliegenden Wasser zu Ammonium. Im weiteren Verlauf wird das Ammonium bakteriell zunächst zu Nitrit, dann in einem weiteren Schritt zu Nitrat oxidiert, diese Oxidationsprozesse werden als Nitrifikation zusammengefasst. (Koelle, 2010, S. 198–199)

Im Bestreben der Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge erfolgt eine progressive Mineraldüngung, insbesondere bei Monokulturen, um die Auslaugung der Böden zu kompensieren. Der so zugeführte Nitratstickstoff kann durch Pflanzen nur bedingt verwertet werden, überschüssige Nährstoffe werden teilweise ausgewaschen. Der Abgang dieser Sickerwässer und deren Eintrag in Oberflächengewässer verändert das Nährstoffangebot im Wasserkörper. (Darimont, 1983, S. 73–77)

Die Auswaschung ist durch die sehr hohe Mobilität des Nitrats überhaupt erst möglich (Koelle, 2010, S. 201). Die Nitratgehalte eines Fließgewässers hängen von drei Einflussgrößen ab. Zunächst sind „Konzentrationsänderungen beim Nitrat durch Änderungen im Volumen oder in der Beschaffenheit eingeleiteter Abwässer“ (Koelle, 2010, S. 203) zu finden. Weiterhin wirkt sich eine Erhöhung der Wassertemperatur mindernd auf die Nitratgehalte aus (Hellmann, 1986, S. 43).

Insbesondere der Weinbau stellt aufgrund stark durchlässiger Bodenbeschaffenheiten eine problematische Domäne hinsichtlich der Düngung dar, da der erhöhte Düngeraustrag häufig über eine noch intensivere Düngung kompensiert werden soll. Unabhängig von der Art des Stickstoffdüngers tritt das hochmobile Nitrat als Endprodukt der Mineralisierungsvorgänge auf. (Darimont, 1983, S. 87)

In Gewässer eingetragenes Nitrat wirkt dort ähnlich wie in Böden als Nährstoff. In der Folge kann es dadurch zu einem stark vermehrten Pflanzenwachstum kommen. Auf ein so gesteigertes Nahrungsangebot folgt ein verstärktes Wachstum der Tiere. Deren Ausscheidungen und Überreste belasten wiederum das Wasser. (Baur, 1987, S. 75)

Nitrat im Trinkwasser wird im Darm resorbiert und hauptsächlich über den Harn wieder ausgeschieden (Hütter, 1994, S. 97). Nitrat kann als Ausgangsstoff für das Umwandlungsprodukt Nitrit angesehen werden. Die Reaktion von sekundären Aminen und Nitriten erzeugt bekanntermaßen karzinogene Nitrosamine. Für Nitrat alleine liegen keine positiven Untersuchungen zur Karzinogenität vor, wohl aber für die Kombination aus Nitrit und Nitrat. (Aydin, 2014, S. 284) Bereits bei Nitratkonzentrationen von 25-40 mg/L wurden solche gesundheitlichen Schädigungen bereits berichtet. Neben dieser latenten Gefahr wurden insbesondere für Kleinkinder bedrohliche Wirkungen hoher Nitratgehalte berichtet. Beruhend auf der Reduktion zu Nitrit, welche aufgrund einer unphysiologischen Darmflora stattfindet, kommt es zur irreversiblen Oxidation von Hämoglobin in roten Blutkörperchen, wodurch der Sauerstofftransport des Blutes stark gehemmt wird (Methämoglobinämie). In der Folge kommt es insbesondere bei Kleinkindern unter sechs Monaten zur Unterversorgung mit Sauerstoff (Zyanose; blue baby syndrome). (Aydin, 2014, S. 284; Höll, 1986, S. 100; Hütter, 1994, S. 97 und Klee, 1990, S. 79) Der Grenzwert für Nitrat im Trinkwasser liegt bei 50 mg/L. (Bundesministerium für Gesundheit; Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz; Bundesrat Reaktorsicherheit, 2001, S. 22)

Die Bestimmung von Nitrat ist gasvolumetrisch *nach Lunge* mit einem Nitrometer möglich. In dieser Apparatur wird in einem mit Ausgleichsgefäß verbundenen Messrohr flüssiges Quecksilber vorgelegt. Durch Zugabe der Analysenlösung in den abgeschlossenen Raum des Messrohrs, sowie Zugabe von konzentrierter Schwefelsäure, tritt bei anschließendem Schütteln eine Reduktion des Nitrats ein. Das Quecksilber wirkt gleichzeitig als Sperrflüssigkeit und als Reduktionsmittel. Unter Berücksichtigung der notwendigen Dichte und Löslichkeitskorrekturen kann anschließend aus dem Volumen des entstandenen Gases der Gehalt an Nitrat errechnet werden. (Jander et al., 2005, S. 509–510) Unter Berücksichtigung ökologischer und gesundheitlicher Aspekte sollten Nachweisreaktionen mit Quecksilber als Reagenz sehr kritisch überdacht werden. Durch den volumenmäßig hohen Einsatz von Quecksilber, sowie den Verbrauch unter Bildung von Quecksilbersulfat, trifft diese Aussage auf die zuvor beschriebene Bestimmungsreaktion in besonderem Maße zu.

Als photometrische Alternative ist die Bestimmung als Sulfanilsäure-azo- α -naphthylamin bekannt. Hierzu ist eine Aufbereitung des Probewassers mit Natriumhydroxid und Zinkpulver als Reduktionsmittel erforderlich, dabei erfolgt die Reduktion zu Ammoniak. Das ebenfalls gebildete Nitrit wird im essigsäuren mit diazotierter Sulfanilsäure und α -Naphthylamin einer Azokopplung unterzogen. Die Extinktion des Azofarbstoffes lässt sich anschließend photometrisch gegen Wasser bestimmen. (Freier & Neeb, 1974, S. 106) Diese Methode ist im Vergleich zur erstbeschriebenen wesentlich weniger umwelt- und gesundheitsgefährdend, dennoch ist auch hier ein nicht unerheblicher Zeit- und Materialaufwand vorzusehen. Auch ist aufgrund der mehrfachen Umsetzung mit einer erhöhten Fehlerwahrscheinlichkeit zu rechnen (Grasshoff et al., 1999, S. 180–181).

Darüber hinaus sind etliche kolorimetrische Verfahren beschrieben, unter anderem sind dies die orientierende *Brucinprobe nach DIN 38405*, das Verfahren *nach Noll*, die Bestimmung von Kleinstmengen *nach Kuisel*, die *Hellige-Methode*, die photometrische Bestimmung mit *2,6-Dimethylphenol nach DIN 38405,3* sowie die organischen Farbnachweise mit Phenoldisulfonsäure oder Natriumsalicylat. Als gravimetrische Methode steht die Auskristallisation mit *Nitronlösung (Merck)* zur Verfügung. (Höll, 1986, S. 44–48 und Koelle, 2010, S. 204–205)

In jüngerer Zeit wurde auch die *Spektrophotometrische Methode nach Griess* zur Nitratbestimmung dargelegt. Ähnlich der zuvor beschriebenen Methoden basiert diese auf der Bildung eines Azofarbstoffes, jedoch wird hier mit Kupfersulfat behandeltes Cadmium als Reduktionsmittel und N-(1-naphthyl)-ethylendiamin-dihydrochlorid zur Azokupplung eingesetzt. (Aas, 2010, S. 404)

Moderne instrumentelle Analytik umfasst neben der UV-Spektroskopie und Ionenchromatographie als spezialisiertes Verfahren der Hochleistungs-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC) (Hütter, 1994, S. 375) vor allem elektrochemische Methoden der Potentiometrie, Voltametrie, Polarographie und Amperometrie (Aydin, 2014, S. 287–291).

Die in der vorliegenden Konzeption eingesetzte ionensensitive Nitratelektrode ist somit als dem Stand der Technik entsprechend zu bewerten. Im Methodenvergleich der gängigen laboranalytischen Messverfahren Ionenchromatographie und Potentiometrie zeigt sich nach Darimont ein Korrelationskoeffizient von 0,991 für vergleichende Messungen unter Einsatz beider Methoden, womit die ionensensitive Bestimmung als quantitativ und wenig fehlerbehaftet anzusehen ist (1983, S. 45–48). Das Messprinzip der Elektrode beruht auf den Poten-

tiometrie. Beim Eintauchen der Elektrode in eine Nitratlösung werden die Nitratmoleküle in der Lösung von der „oxidierten Form des Nitrats[übersetzt aus dem Englischen]“ (Shen-Orr, o.J., S. 2) in der Membran angezogen. Die Stärke des hierdurch entstehenden Potentials ist konzentrationsabhängig.

2.1.9 Ammonium

Ammonium ist einer der Hauptnährstoffe in aquatischen Ökosystemen. Als Grundlage zur Synthese von Proteinen ist es häufig bevorzugter Ausgangsstoff, da es im Gegensatz zu Nitrat vor der Bildung von Aminosäuren nicht reduziert werden muss. Ammoniak, als Gegenspieler im Säure-Base-Paar Ammonium/Ammoniak, wird von Tieren direkt ausgeschieden oder wird bakteriell aus verrottenden Organismen freigesetzt. (Hansen & Koroleff, 1999, S. 161)

Ähnlich wie Nitrat wird auch Ammonium als Pflanzendünger eingesetzt. Auswaschungen sind auch hier möglich, aufgrund der konkurrierenden chemischen Fixierung an Tonminerale ist diese jedoch weniger wahrscheinlich. (Darimont, 1983, S. 79–81)

Die Kenntnis über den Ammoniumgehalt ist eng verknüpft mit dem pH-Wert. Bei pH-Werten kleiner 8,75 liegt hauptsächlich Ammonium vor, bei Werten über 9,75 herrscht Ammoniak vor, da beide Formen ineinander umgewandelt werden. Dies ist insbesondere für die Lebewesen im Wasser relevant, da bereits Ammoniakkonzentrationen zwischen 0,2 und 0,5ppm für einige Fischarten tödlich sind. (Galvão et al., 2014, S. 249–252)

Quantitativ bestimmen lässt sich Ammonium titrimetrisch durch Umsetzung mit einer Base zu Ammoniak. Der Ammoniak wird gleichzeitig durch einen Überschuss an Formaldehyd zu Urotropin umgewandelt und so kontinuierlich aus dem Gleichgewicht entfernt. Als Indikator dient Phenolphthalein. (Kunze & Schwedt, 2009, S. 97) Dieses Verfahren wird als Substitutionstitration bezeichnet (Kunze & Schwedt, 2009, S. 249).

Spektrometrisch lässt sich Ammonium im Indophenol-Blau-Verfahren bestimmen. Hierzu wird zunächst Ammonium in alkalischer Lösung (pH 10,4-11,5) mit Hypochlorit zu Monochloramin umgesetzt. Zusammen mit Phenol und überschüssigem Hypochlorit, katalysiert durch Nitroprussid, entsteht sodann die blaue Verbindung Indophenol, die bei 630nm spektrophotometrisch bestimmt wird. (Aas, 2010, S. 404–405)

Wenngleich die Reaktion mit *Nessler-Reagenz* lange Zeit als Standard zum Nachweis von Ammoniak beziehungsweise dessen Verbindungen genutzt wurde, so stellt die Verwendung von Kalium-Quecksilberiodid heute im Hinblick auf die Entsorgung und Umweltverträglich-

keit ein Problem dar, weshalb auf diese Methode hier nicht näher eingegangen wird. Elektroanalytisch ist die Bestimmung konduktometrisch und voltametrisch möglich. Spektroskopisch sind neben Absorptions- und Emissionsverfahren, eines wurde mit der Indophenol-Blau-Methode bereits näher beschrieben, vor allem fluoreszenzspektroskopische Verfahren hervor zu heben. So ist zum Beispiel die Umsetzung mit Thiol und o-Phthaldialdehyd möglich. In der gängigen Laborpraxis werden häufig ionenchromatographische (HPLC) Verfahren eingesetzt. Diese unterscheiden sich teilweise in der Wahl der stationären Phase (C_8 und C_{18}) sowie der Zusammensetzung der mobilen Phase (allgemein Wasser, niedrigmolekulare Alkohole und Acetonitril). Die Bestimmung von Ammonium mit ionensensitiven Elektroden beruht meist auf der Umwandlung in gelösten Ammoniak und dessen Detektion. Die benötigte Zeit für das Durchdringen der Membran (häufig PTFE) nimmt jedoch bei geringen Konzentrationen stark zu, weshalb dann lange Eintauchzeiten (2-3 Minuten bei Werten kleiner 1mg/L) zum Erreichen stabiler Messwerte notwendig sind. (Galvão et al., 2014, S. 260–266)

Die im *einstein*-Messsystem eingesetzte ionensensitive Elektrode benötigt keine Freisetzung von Ammoniak. Sie enthält eine oxidierte Form von Bromid in der Membran. Beim Eintauchen in eine ammoniumhaltige Lösung werden Ammoniumionen zu den oxidierten Ammoniumionen in der Membran hingezogen. Diese Anziehung wird vom Sensor als Potentialdifferenz ausgewertet. Somit sind von pH=4 bis pH=10 rasche Messungen im Konzentrationsbereich von 0,014-14.000ppm möglich. Lediglich die Reproduzierbarkeit von $\pm 4\%$ schränkt die Vorteile des Verfahrens ein. (Shen-Orr, o.J., S. 2)

2.1.10 Beurteilung und Gewässergüteklasse

Abschließend bedarf es einer Einordnung und Bewertung der jeweils erhobenen Parameter. Hierzu haben sich einige Verfahren etabliert, allen voran das System der Gewässergüteklassen. In diesem wird jeder Güteklasse ein Wertebereich je Parameter zugeordnet. Hinzu kommen ergänzend zu den Messwerten beobachtbare Gegebenheiten vor Ort. Sensorisch wird der Geruch der Wasserprobe als frisch, fast geruchlos; vorhanden aber nicht unangenehm; oder aber faulig unangenehm beurteilt. Auf ähnliche Weise werden Trübung und Farbe des Wassers festgestellt. Hierzu genügt ein klares Gefäß vor weißem Hintergrund, welches mit einer frischen Trinkwasserprobe verglichen wird. So lässt sich direkt nach dem Entnehmen der Probe die Trübung feststellen, und nach Sedimentieren der Trübstoffe die Farbe beurteilen.

Als realer Forschungsgegenstand kann eine Gewässergüte-Klassifizierung nie auf eine einzelne Fachdisziplin beschränkt bleiben. Biologische Parameter können ebenso zur Charakterisierung herangezogen werden. Grundsätzlich sind zur biologischen Kategorisierung der Gewäs-

sergüte zwei Faktoren zu bestimmen: Art und Anzahl der vorkommenden Organismen. Liegt der Fokus auf der Artenbestimmung, werden häufig Indikatororganismen identifiziert, stehen die Populationen im Vordergrund, kann beispielsweise der Saprobien-Index herangezogen werden. Auch vereinfachte Auswertungen und Auszählungen können genutzt werden (Vereinigung Deutscher Gewässerschutz, 2011, S. 47–51).

Wenngleich gewichtete Systeme wie beispielsweise nach Bach (1980) (beschrieben in Adolph, o.J.) oder nach G.R.E.E.N. (Bohn et al., 2003, S. 19) zur endgültigen Bestimmung der Gewässergüte zur Verfügung stehen, so ist dies doch für den Gebrauch im Unterricht kritisch zu reflektieren. Aus diesem Grund wurde im Sinne der unterrichtlichen Anregung zur Beurteilung der Ergebnisse eine vereinfachte Übersicht der Gewässergüteklassen nach Vereinigung Deutscher Gewässerschutz (2011) ausgegeben, auf welcher, wie in Anhang IX dargestellt, bei Bewertung einzelner Parameter schlechter als Stufe 2 dazu angeregt wurde, über mögliche Erklärungen nachzudenken und diese zu diskutieren. Anregungen hierzu im Sinne einzelner Effekte wie Versauerung, Eutrophierung und Abwassereinleitung wurden zusätzlich gegeben.

Auch wenn auf diese Weise am Ende der Unterrichtseinheit keine eindeutig berechnete Gewässergütekategorie für die Messstelle stand, sondern lediglich ein ungefährender Schätzwert, so ist diesem Ansatz der investigative und erkenntnisorientierte Ertrag immanent.

Zusätzlich zu den physikalisch-chemisch messbaren Parametern kann auch die Strukturqualität eines Gewässers erfasst werden. In diese fließen Gegebenheiten der direkten Umgebung einer Messstelle oder eines Gewässerabschnittes mit ein. Unter Zuhilfenahme von Bewertungsbögen werden so etwa die Flächennutzung im Uferbereich, Gewässerverlauf, Ufer- und Grundstruktur, Homogenität und Durchgängigkeit eines Gewässers beurteilt (Vereinigung Deutscher Gewässerschutz, 2011, S. 43). Eine Erhebung der Gewässerstrukturqualität vervollständigt nicht nur die Beschreibung der Messstelle, sondern stellt auch einen Zusammenhang zwischen der Beschaffenheit des Wasserkörpers und den ihn besiedelnden Lebewesen her (Schwevers & Adam, 1999, S. 357). Anthropogene Einflüsse auf ein Fließgewässer, beispielsweise Begründung, Uferbefestigung oder Abdeckung und Verbauung lassen sich durch eine Gewässerstrukturqualität-Erhebung objektiviert beschreiben.

Innerhalb der Konzeption kann eine Öffnung für biologische Parameter über die bereits genannten Materialien zur Bewertung (digitale Anlage) und die vereinfachten Bestimmungs-

schlüssel in *FLUVIDAT* vorgenommen werden. Die Gewässerstrukturgüte kann ebenso zur Referenzierung der Gewässergüte mit der anthropogenen Einflussnahme Eingang finden.

2.2 Unterrichtsliche Relevanz

Zunächst bildet das Konzept die Relevanz außerschulischer Lernorte für die Motivation und den Erkenntnis- sowie Kompetenzgewinn der Schüler ab (siehe hierzu von Niederhäusern et al., o.J., S. 146–149). Ferner kann durch die positive Erfahrung naturwissenschaftlichen Unterrichts an außerschulischen Lernorten ebenfalls das fachbezogene Selbstkonzept kurz- bis mittelfristig positiv beeinflusst werden (Brandt et al., 2008, S. 10).

Durch die praxisnahen Ansätze wird die Gelegenheit zur Arbeit entlang der Interessenschwerpunkte der Schüler geboten. Es ist in diesem Zusammenhang möglich sowohl theoretische Vertiefungen als auch einen experimentellen Fokus abzubilden. Aufgrund der sich bietenden Möglichkeit einer originalen Begegnung (Nießeler, 2015, S. 442) soll jedoch selbige methodisch im Vordergrund stehen. In diesem Zusammenhang wird durch die konkreten Anwendungen und die Problemorientierung der Abstraktionsgrad der Inhalte verringert, wodurch ein gesteigertes Schülerinteresse sowie ein verstärkter Erkenntnisgewinn, welcher mit reduzierter Verständnisschwierigkeit einhergeht, zu erwarten ist.

Nicht zuletzt wird das erlangte Wissen bereits in den Erarbeitungsphasen vernetzt. So sind etwa Rückschlüsse der Gewässer-Parameter auf die Auswirkungen und das Gesamterscheinungsbild des Gewässers exemplarisch vor Ort möglich.

Anders als bei vielen Angeboten außerschulischer Lernorte üblich, wurde in der vorliegenden Konzeption großer Wert auf die Integration der Lehrplaninhalte gelegt, um so die Einbindung der Einheit in den unterrichtlichen Zusammenhang zu wahren (Anton, 2008, S. 239–240). Die Relevanz der Inhalte und Kompetenzen, welche durch die Einheit vermittelt oder vertieft werden, lässt sich durch eine Betrachtung der Lehrpläne für die Oberstufe in den Fächern Physik, Chemie, Biologie und Geographie verdeutlichen. Diesbezüglich wurden die aktuellen Lehrpläne der Sekundarstufe II des Landes Rheinland-Pfalz untersucht und die Passungen im Folgenden dargestellt.

2.2.1 Biologie

Im Fachbereich Biologie kann die vorliegende Konzeption als Bestandteil des Leitthemas 1 „Struktur & Funktion lebender Systeme“ innerhalb des Lehrplanes der Sekundarstufe 2 Eingang finden, hier insbesondere im Themenfeld Lebensformtypen als Bestimmungsübung (Haß et al., 1998, S. 43). Aufgrund der vereinfachten, mediengestützten Bestimmung über das

Online-Portal *FLUVIDAT*, könnte hierüber ein Einstieg in komplexere Bestimmungsübungen stattfinden, sofern die biologischen Faktoren der Gewässergüte zur Bestimmung priorisiert werden sollen. Ungleich besser wäre die Eignung des Themas zur Einordnung in Leitthema 3 „Umwelt und Innenwelt lebender Systeme“. Hier bietet sich vorrangig eine Eingliederung in eine Lerneinheit zum Themenfeld „Erkundung eines Ökosystems“ an, welche nicht nur die „praktische Untersuchung eines Biotops“ (Haß et al., 1998, S. 52) oder die „Messung biotischer und abiotischer Faktoren“ (Haß et al., 1998, S. 52) sondern auch deren Vernetzung mit weiteren Faktoren und den Vergleich der Bioindikation mit chemisch-physikalischen Messmethoden vorsieht (Haß et al., 1998, S. 52).

2.2.2 Erdkunde

Gemäß des Lehrplans Gemeinschaftskunde Sekundarstufe 2 stellen „Wechselwirkungen zwischen Individuum und räumlicher Umwelt (als Bedingungsfeld für eine aktive Mitwirkung bei Umweltgestaltung und –erhaltung)“ und „Beeinflussung und Störung des Naturhaushalts durch (z.T. irreversible) Eingriffe des Menschen beziehungsweise der Gesellschaft“ (Heil et al., 1998, S. 11) bedeutende Aspekte „für den Beitrag der Erdkunde zur politischen Bildung“ (Heil et al., 1998, S. 11) dar. In diesen Kontext lässt sich die Untersuchung der Gewässerstrukturgüte eingliedern. Bereits im Grundfach Erdkunde wird „Umwelterziehung als durchgängiges Prinzip“ in den Vordergrund gerückt, was sich unter dem Gesichtspunkt des Naturschutzes und der Erhaltung von Lebensräumen in vorliegender Konzeption widerspiegelt. Im Leistungsfach Erdkunde eignet sich ebenso eine Einordnung in Teilthema 1.1 „Die Naturlandschaft als Geofaktorensystem“, in welchem die Schüler unter anderem „die Landschaft als Beziehungsgeflecht von Geofaktoren erkennen und dabei ihre Genese aus dem Zusammenwirken endogener und exogener Kräfte“ (Heil et al., 1998, S. 150) erfassen sollen. Wenn gleich im Fachbereich Erdkunde, speziell in diesen Einstiegsthemen zumeist größere Landschaftseinheiten betrachtet werden sollen (Heil et al., 1998, S. 150), so lässt sich doch hier in einem Feldversuch die Entstehung von Lebensräumen und deren Wechselwirkung mit der Umwelt im kleinen Maßstab nachvollziehen. Weiterhin können die Themenpunkte Wasserhaushalt und Böden mit aufgegriffen werden.

2.2.3 Physik

Aus Sicht des Fachbereichs Physik lässt sich das Themenfeld „Strömungsphysik“ an die Einheit angliedern. Geeignet wäre zu diesem Zweck eine tiefergehende Untersuchung der Strömungsbedingungen und –verhältnisse innerhalb eines Gewässers in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie etwa Tiefe, Breite, Gefälle oder Uferbeschaffenheit beziehungsweise Querverbauungen. Ausgehend von den so erhobenen Daten könnte eine induktive Her-

leitung der Strömungsgesetze unter Abstrahierung der Daten stattfinden. Auf Kompetenzebene wären bei einer solchen Vorgehensweise dem Umgang mit Messgeräten, sowie der Erfassung, Aufbereitung und Darstellung/ Auswertung von Daten Rechnung getragen. (Fries et al., o.J., S. 16)

2.2.4 Grund- und Leistungsfach Chemie

Für das Grundfach Chemie in der Oberstufe bietet sich eine Reihe von Implementierungsoptionen. Während unter Bezugnahme auf die Untersuchung und Eintragswege von Ionen das Themenfeld 15 (Pflichtthema) „Chemische Bindung – Atomverbände – Moleküle – Ionenverbindungen“ einen geeigneten Ansatz bietet, wäre auch eine Ausweitung bis hin zur Funktionsweise der Messgeräte – Themenfeld 17-19: Elektrochemie – denkbar. Gleichwohl erschiene eine solche Auslegung im Rahmen des Grundfaches nur als explizite Vertiefung sinnvoll. Unstrittig erscheint dagegen die Zuordnung zum Themenkomplex 16 „Chemisches Gleichgewicht und Massenwirkungsgesetz“ (Pflichtthema). Inhaltlich lassen sich hier die Gleichgewichte der nachzuweisenden Ionen als Löslichkeits-Gleichgewichte erfassen und mit Hilfe des Prinzips von Le Chatelier kann die Temperaturabhängigkeit der Sauerstoffsättigung eines Gewässers nachvollzogen werden. Weiterhin lassen sich sodann durch das Gleichgewichtskonzept Stoffkreisläufe beziehungsweise wechselseitige Konzentrationsbedingungen nachvollziehen und erklären. Geeignet erschiene hierzu beispielsweise der Einfluss des pH-Wertes auf die Leitfähigkeit oder die Ammonium-Konzentration. (Heim et al., 1998, S. 54–56)

Nicht zuletzt ist das mit zehn Unterrichtsstunden umfangreich beschriebene Pflicht-Themenfeld der „Analytik in Anwendungen“ zu nennen. Dieses bietet die Gelegenheit zu intensiver Betrachtung der Messsysteme und dem Vergleich mit anderen Konzepten wie etwa Schnelltests mittels Test-Stäbchen. Neben der Funktionsweise, Nachweisgrenzen, technischen Möglichkeiten, grafischen Darstellungen und Auswertungen lässt sich hierbei auch die praktische Fähigkeit zur quantitativen Arbeitsweise in der Analytik schulen. (Heim et al., 1998, S. 52)

Zusätzlich zu den vorgenannten Einbindungsmöglichkeiten bietet das Leistungsfach die Möglichkeit zur stärkeren Vertiefung der Analytik in den Themenfelder 62 und 63. Innerhalb dieser Themenkomplexe soll die Entwicklung von den klassischen Verfahren hin zu chromatographischen und photometrischen Methoden verlaufen. In diesem Rahmen ließe sich eine erweiterte Einheit optimal integrieren. Während eingangs im Sinne der klassischen Methoden auf nasschemische Verfahren der Bestimmung von Gewässerparametern eingegangen

werden kann und diese geübt werden können (z.B. Sauerstoff nach Winkler), kann anschließend der Übergang zu mikroanalytischen oder Schnelltests die Weiterentwicklung für den Feldeinsatz zeigen. Abschließend ließen sich unter Einbeziehung der Messungen mit Elektroden des vorliegenden Systems die Vor- und Nachteile der einzelnen Möglichkeiten diskutieren und bewerten. (Heim et al., 1998, S. 94–95)

Für die thematische Weiterführung wäre beispielsweise Themenfeld 67 „Atmosphärenchemie“ (Heim et al., 1998, S. 70) eine geeignete Grundlage, um anhand einer selbst erfassten Datenlage mit Vergleichsmessungen die zivilisatorischen Einflüsse auf unsere Umwelt – im speziellen auf die Gewässer – nachzuweisen. Dies ließe sich mit der Vertiefung „Herausforderung Umweltverschmutzung und Umweltschutz“ kombinieren, welche auch „die Rolle moderner analytischer Verfahren [herausarbeitet]“ (Heim et al., 1998, S. 86).

3 Konzeption der Einheit

Die vorliegend beschriebene Unterrichtseinheit wurde in Anlehnung an die in Kapitel 2.2 Unterrichtliche Relevanz dargelegten inhaltlichen Anforderungen der Oberstufe erstellt. Hierzu sei zunächst bemerkt, dass eine in sich abgeschlossene Lerneinheit stets der Einbindung in einen weiter gefassten Gesamtkontext – in der Regel den einer Reihenplanung – bedarf, um im Vorfeld die zur Durchführung notwendigen Grundlagen, sowie im Nachgang eine Weiterführung der Lerninhalte zu erreichen. Diese Konzeption grenzt sich gegenüber vielen anderen Angeboten bewusst dadurch ab, dass sie von einer Lehrkraft eigenständig genutzt und implementiert werden kann und somit keinen zusätzlichen Personalbedarf aufbringt (Engeln, 2004, S. 13).

3.1 Relevantes Vorwissen

Vor dem Einstieg in die angebotene Einheit erscheint eine Wiederholung der theoretischen Betrachtungen zur Ionenbildung und den chemischen Gleichgewichten sinnvoll. Dies ermöglicht ein hohes Maß an eigenständiger Auswertung und Interpretation der Ergebnisse, insbesondere im Vergleich mit gegebenenfalls weiteren vorliegenden Vergleichsdaten. Weiterhin ist eine Thematisierung der klassisch nass-chemischen quantitativen Bestimmungsmethoden der einzelnen zu untersuchenden Parameter empfehlenswert. Dies kann auch exemplarisch anhand unter Punkt 2.1 Gewässeranalytik genannten Methoden erfolgen. Erst wenn das „experimentelle Handwerkszeug und das theoretisch Hintergrundwissen zur Auswertung“ (Kranz, 2008b, S. 156) gegeben sind, sollte auf die instrumentelle Analytik eingegangen wer-

den. Grundlegende kognitive Fähigkeiten zum systematischen wissenschaftlichen Arbeiten dürfen an dieser Stelle aufgrund der Zielgruppe vorausgesetzt werden (Bley, 2013, S. 14).

3.2 Konzeption und Anpassung der Einheit

Als Lokalität diente zur Erprobung das in Abbildung 1 gezeigte Freilandmobil. Diese Verlagerung des Lernortes aus dem Klassen- oder Fachsaal in die schulnahe Umwelt spiegelt die Forderung von Bölts (2014) und anderen nach einer „humanen Ausgestaltung von Raum- und Zeitstrukturen des Lernorts Schule“ (Bölts, 2014, S. 231) im Gefüge Mensch-Natur- Gesellschaft wider. Zunächst unter Einhaltung der zeitlichen Strukturmerkmale des Unterrichts wird die räumliche Nähe zum Untersuchungsgegenstand weitaus deutlicher hervorgehoben, als dies durch eine Analyse vorgelegter Wasserproben im Fachsaal der Fall wäre. Als positiv sind die Nähe zu den schulischen Infrastruktur, der geringe Zeitverlust zum Aufsuchen des Freiland-Erlebnisses sowie der Verlust des „Event-Charakters“ zu werten (Pütz et al., 2012, S. 86–87). Am Standort des Freilandmobils sollen daher auch künftige Durchführungen ermöglicht werden.



Abbildung 1: Das Freilandmobil der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau, AG Chemiedidaktik, dient als Ausgangsort für die Freilandeinheiten. Durch Sitz- und Arbeitsgelegenheiten ist das Konzept sinnvoll ergänzt.

Konzeptionell wird der Lehrkraft eine Handreichung zur Verfügung gestellt, welche den vorgeschlagenen Verlauf der Einheit darlegt und die Inhalte sowie deren Umsetzung benennt. In der Hinführung zum Thema wird zunächst ein problemorientierter Einstieg angeboten, welcher die folgenden Experimente in einen größeren Zusammenhang setzt. Inhaltlich soll dieser für die Wasserqualität und deren Bedeutung sensibilisieren und somit die Motivation für eine

weitere Untersuchung wecken. Weiterhin wird eine Zielstellung formuliert, welche letztlich zum Gesamtziel, der Erfassung und Bewertung der Gewässergüte der Queich in Landau, beiträgt. Eine explizite Materialliste wird an dieser Stelle nicht zur Verfügung gestellt, da die Materialien im Vorfeld bereits vorbereitet werden.

Im weiteren Verlauf der Handreichung werden Zielgruppe – in diesem Fall Schüler der Oberstufe – benannt und ein kurzer Vorschlag zur Methodik unterbreitet, wonach die Lehrkraft in der Phase der Messwerterfassung eine beratende Rolle einnimmt, anschließend als Moderator die Zusammenführung der Messwerte koordiniert und diese in das Online-Portal *FLUVIDAT* überträgt.

Im Fortgang werden fünf Kleingruppen à drei bis fünf Personen gebildet, welche in der Organisationsform der arbeitsteiligen Gruppenarbeit ihre jeweiligen Messdaten erheben. Durch das arbeitsteilige Vorgehen ist eine Beschränkung der Inhalte im Kontext des außerschulischen Lernortes (Kranz, 2008a, S. 151) verwirklicht, wodurch eine Überlastung vermieden werden soll. Aufgrund der thematischen Abgrenzung der Gruppen erscheint eine Gruppeneinteilung anhand der Interessenslage der Schüler angemessen, da somit von einer potentiell höheren Motivation ausgegangen werden kann, und in dieser Konzeption vielen Interessensausrichtungen Rechnung getragen werden kann. Die Anzahl der zu bestimmenden Parameter oder der zu bestimmenden beziehungsweise zu recherchierenden Aspekte wurde so aufgeteilt, dass eine über alle Gruppen gleichförmig verteilte Arbeitsbelastung zu erwarten ist.

So bestimmt Gruppe 1 mit Hilfe der *einstein*-Messgeräte grundlegende physikalische Parameter wie Lufttemperatur und Wetterdaten, Wassertemperatur und Leitfähigkeit. Anhand dieser Daten kann eine grobe Beschreibung der Messstelle sowie des Zeitpunktes der Datenerhebung erfolgen. Die Wassertemperatur findet als Korrekturfaktor für weitere Messungen Verwendung, weshalb diese zuerst ermittelt und den anderen Gruppen durch Notieren auf der Auswertungstabelle zur Verfügung gestellt werden sollte. Die übrigen Messdaten dienen hauptsächlich als Bezugsgrößen zur Beurteilung der gemessenen Gehalte, fließen jedoch ebenfalls in die Bewertung der Gewässergüte mit ein.

Gruppe 2 bestimmt ebenfalls mit Hilfe des *einstein*-Messsystems chemische Grundparameter. Im Einzelnen sind dies Sauerstoff-Sättigung, pH-Wert, Farbe, Geruch und Trübung. Während der Geruch nur subjektiv olfaktorisch beurteilt werden kann, bietet sich für die Bestimmung von Farbe und Trübung neben einer rein visuellen Einschätzung auch die Verwendung des *einstein*-Colorimeters und Trübungsmessgerätes an. Diese Grundwerte bilden die Basis zur

späteren Ermittlung des chemischen Gewässergüte-Indexes im Portal *FLUVIDAT*. Im Rahmen der später beschriebenen Erprobung kamen die photometrischen Verfahren zur Bestimmung von Farbe und Trübung nicht zum Einsatz, da diese geräteseitig nicht kalibrierbar waren zu diesem Zeitpunkt.

Gruppe 3 ermittelt die Gehalte der Ammonium- (NH_4^+), Nitrat- (NO_3^-) und Chloridionen (Cl^-) unter Verwendung ionensensitiver Elektroden im Messsystem *einstein*. Anhand der hierbei ermittelten Werte kann die Einschätzung der chemischen Gewässergüte konkretisiert werden. Im Speziellen geben diese Werte Hinweise auf Art und Umfang von Eintragungen in das Gewässer. Aufgrund der notwendigen Konditionierungszeit der ionensensitiven Elektroden, welche zwischen 30 Minuten und zwei Stunden je nach Elektrode beträgt, sollte diese Gruppe durch Vorbereitung der Konditionierung zeitlich entlastet werden.

Abweichend von der Arbeitsweise der Gruppen eins bis drei bestimmt Gruppe 4 grundlegende biologische Parameter der Gewässergüte. Neben der korrekten Probenahme ist hier eine Ermittlung von Anzahl beziehungsweise Häufigkeit der Kleinstlebewesen in der Gewässerprobe ausschlaggebend. Im weiteren Verlauf können einzelne Lebewesen sodann mit Hilfe eines digitalen Bestimmungsschlüssels über das Portal *FLUVIDAT* mit wenigen Klicks bestimmt werden (<http://www.fluvidat-saar.de/bioindikatoren/bestimmungsschluessel/>). Aufgrund des zeitlichen Mehraufwandes für Auszählungen und Bestimmungen wird der Umfang der biologischen Erhebung auf Summenparameter und grobe Bestimmung beschränkt.

Letztlich befasst sich Gruppe 5 mit der Gewässerstrukturgüte des untersuchten Gewässers. Hierzu dient ein Bewertungsbogen (siehe digitale Anlagen), mit welchem lokale Besonderheiten erfasst werden, weiterhin ist das Einholen von Informationen anderer Gruppen wie auch die eigenständige Recherche – etwa mit Kartenmaterial oder durch Ortsbesichtigung – erforderlich. Als messbare Größe wird der Verlauf der Fließgeschwindigkeit erfasst. Dieser kann tiefenabhängig und ortsvariabel untersucht werden. Die Messung oder Abschätzung von Tiefe, Breite und Fließgeschwindigkeit erlaubt im späteren Verlauf das Skizzieren eines Gewässerprofils sowie eine Abschätzung der Abflussverhältnisse.

In der durchgeführten Erprobung wurde die Gruppe der biologischen Parameter in Absprache mit dem betreuenden Fachlehrer nicht zugeteilt, da die Passung in den Kontext des Chemie-Unterrichts an dieser Stelle nur bedingt möglich gewesen wäre. In der Folge wurden biologische Mess- und Beobachtungsergebnisse nicht mit aufgenommen und als vierte Gruppe die Bestimmung der Gewässerstrukturgüte zugeordnet.

Abschließend werden die erhobenen Daten und Informationen durch Notieren und Eingabe in *FLUVIDAT* gesichert. Durch die Möglichkeit der Ausgabe eines Gewässergüte-Indexes durch das Online-Portal kann die zu Anfang aufgeworfene Problemstellung beantwortet werden.

Sofern die Besprechung und Beurteilung der Ergebnisse in einem Klassenraum oder anderer fester Struktur mit technologischer Ausstattung stattfinden kann, empfiehlt sich die Darstellung der Ergebnisse im Portal mittels Beamer, Smartboard oder vergleichbaren Medien, sodass die Schüler alle Schritte nachvollziehen können.

Zusammenfassend sieht die konzipierte Einheit somit vier Phasen vor. Zunächst erfolgt die Einleitung, welche die Vorstellung des *einstein*-Messsystems, die Vorgehensweise und Gruppeneinteilung umfasst. Im zweiten Schritt folgt die Erarbeitung durch die Schüler. Da die Arbeit eigenständig in Gruppen stattfindet und eine neue Kompetenz, die der Datenerhebung mittels der Messgeräte, verlangt wird, ist hierfür der überwiegende Zeitfaktor zu veranschlagen. Nach erfolgter Arbeitsphase werden die Ergebnisse in der Sicherungsphase gesammelt und gemeinsam bewertet. Abschließend erfolgt eine Vertiefung, welche die Einordnung der Messergebnisse in den Gesamtkontext und die kritische Reflexion der Erhebungen zum Inhalt hat.

Eine strenge zeitliche Vorgabe ist aufgrund der hohen Variabilität der Einheit nicht vorgesehen. Jedoch zeigte sich die Einheit mit einer Einleitung von rund zehn Minuten, einem Zeitaufwand von etwa 25 Minuten für Sicherung und Vertiefung und den verbleibenden 55 Minuten als Arbeitsphase, inklusive Auf- und Abbau sowie Reinigen der Materialien im Rahmen einer Doppelstunde als durchführbar.

Die Konzeption rückt aktuelle Forderungen nach einem hohen Alltags- und Naturbezug des experimentell gestützten Chemieunterrichts (Kranz, 2008c, S. 113–114) in den Vordergrund des pädagogischen Handelns.

3.3 Alternatives Vorgehen bei fehlendem Zugang zum Online-Portal

Die Auswertung und Erfassung der Messergebnisse in *FLUVIDAT* zur Dokumentation und Beurteilung erscheint sinnvoll, dennoch ist doch davon auszugehen, dass es nicht an allen Standorten oder zu allen Zeiten möglich sein wird, parallel zur Freilandarbeit einen Internet-Zugang zu schaffen. Für diesen Fall bietet sich eine Auswertungstabelle an, aus welcher die den Werten zugeordneten Güteklassen schnell und einfach ersichtlich sind (siehe Anhang IX). Bei Verwendung sollte diese Tabelle mindestens einmal je Gruppe vorliegen, sodass eine gesammelte Bewertung in der Besprechungsphase direkt ermöglicht wird. Weiterhin empfiehlt

es sich aus praktischen Gründen, diese Unterlage in laminierte Form zur Verfügung zu stellen.

Wenngleich die Erfassung in *FLUVIDAT* die favorisierte Möglichkeit darstellt, so sollte eine Konzeption für das Freiland, insbesondere da sie auf jedes beliebige Gewässer übertragbar ist, doch zumindest für die Dauer der Einheit ohne feste Anbindung an Strom- oder Telekommunikationsnetz auskommen können.

Dies gelingt in Anbetracht der Messgeräte und Tablets durch eine gründliche Vorbereitung: sind alle Akkus im Vorfeld ausreichend geladen, steht einer ausgiebigen Messreihe nichts im Weg. Bei Bedarf können mobile Akkupacks (Powerbank) zur Absicherung der Stromversorgung mitgeführt werden.

Ungleich schwieriger erscheint dagegen der Anspruch, die Ergebnisse der Messreihen im Klassenplenum zusammen zu tragen und gemeinsam einzuordnen. Hierzu bedarf es einer geeigneten Visualisierungs- und Skizzenfläche. Als praktikable Option stellte sich diesbezüglich eine beschreibbare, elektrostatisch selbsthaftende Folie dar, welche im Format eines Flipcharts mit ein oder mehreren Blättern eine ausreichend große Fläche bietet und frei beschreibungsbeziehungsweise trocken abwischbar ist. Durch die rein elektrostatische Haftung ist keinerlei Beschädigung auch bei Befestigung an Bäumen, Gebäuden oder Fahrzeugen zu befürchten. Durch die Möglichkeit der Vorstrukturierung mittels Permanentmarker kann – wie in Abbildung 3 gezeigt – eine Folie auch mehrfach verwendet werden, um so dem Umweltschutzgedanken nicht nur thematisch gerecht zu werden. Konkret wurden Produkte der Firma *Taktifol* (Typ *Education / Universal*) verwendet. Sowohl die Gruppenzuteilung als Bezugspunkt während der Arbeitsphase als auch die Ergebnisse (siehe Abbildung 2) ließen sich so übersichtlich präsentieren und sichern.

The image shows a handwritten data sheet on a laminated flipchart. The title is 'Gewässeranalyse Queich ESG' and 'Physikalische Parameter'. It contains two tables. The first table lists physical parameters: Lufttemperatur (21°C), Luftdruck (101,2 kPa), Beleuchtung (31 lux), Wassertemperatur (22,98°C), and Leitfähigkeit (500 µS/cm). The second table lists general chemical parameters: Sauerstoffsättigung (5,6 mg/l), pH-Wert (8,2), Farbe (visuell) (färblos), Geruch (geruchlos), and Trübung (visuell) (klar). A 'Summe Gewässergüte' box is empty. The flipchart is attached to a wooden surface with red binder rings on the left.

	Messwert	Güte
Lufttemperatur	21°C	
Luftdruck	101,2 kPa	
Beleuchtung	31 lux	
Wassertemperatur	22,98°C	4
Leitfähigkeit	500 µS/cm	2

	Messwert	Güte
Sauerstoffsättigung	5,6 mg/l	
pH-Wert	8,2	2-3
Farbe (visuell)	färblos	1
Geruch	geruchlos	1
Trübung (visuell)	klar	1
Summe Gewässergüte		

Abbildung 2: Die Messergebnisse und Beobachtungen wurden zentral gesammelt zur gemeinsamen Diskussion.



Abbildung 3: Vorstrukturierte Übersicht der Gruppen. Hier lassen sich vor Ort die zu erhebenden Parameter und Namen der Gruppenmitglieder eintragen.

3.4 Vorschläge zur methodisch-inhaltlichen Vertiefung

Im Nachgang zur vorliegenden Unterrichtseinheit lassen sich diverse Themen als Vertiefung(en) anstreben. Hierbei kann die eigene Schülererfahrung durch eine Bewusstmachung der methodischen wie auch inhaltlichen Erkenntnisse der Freiland-Einheit mehrfach genutzt werden.

Vorschlag 1 – Mehrkomponenten-Systeme

Denkbar ist eine Gegenüberstellung der durch die Schüler erhobenen Messdaten mit weiteren Messwerten. Als geeignet können sich etwa Daten der Wasserwirtschaftsverwaltungen (z.B. Geodaten-Server Wasser RLP mit Datenassistent: <http://www.geoportal-wasser.rlp.de/servlet/is/8722/>) zeigen. Eine gezielte Korrelation der Messwerte mit Umgebungsparametern oder –Einflüssen sowie der Messwerte untereinander kann die gegenseitige Beeinflussung derselben innerhalb eines komplexen Systems aufzeigen. So bieten sich beispielhaft an: Sauerstoff-Sättigung in Abhängigkeit von der Temperatur und Wasserbewegung; Ammonium-Konzentration in Abhängigkeit vom pH-Wert. Gegebenenfalls können zur Verdeutlichung der Problematisierung Extrembeispiele der Gewässerbelastung herangezogen werden.

Vorschlag 2 – Thermodynamische Grundlagen

Der Auswahl der zu untersuchenden Parameter liegen physikalisch-chemische Annahmen zugrunde, welche im Unterrichtsverlauf eine eingehendere Betrachtung ermöglichen. So lassen sich die Zusammenhänge zwischen Umgebungsparametern und erhobenen Messwerten detailliert aufarbeiten, wie etwa der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke, Luft- und Wassertemperatur. Absorption, Reflexion, thermische Gleichgewichte und Wärmekapazität zeigen sich hier als relevante Ansatzpunkte zur Erläuterung. Ferner kann im Labormaßstab die Relevanz dieser Betrachtungen anhand der Löslichkeitsgleichgewichte und deren Verschiebung aufgezeigt werden. Dieser Ansatz eignet sich für eine fächerübergreifende Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Physik.

Vorschlag 3 – Rechercheansatz

Zweifellos zählt die Frage nach dem „wieso“ der erfassten Daten zu den zu erwartenden Schülerfragen. Dies bietet die Gelegenheit, die Werte nicht nur allgemein zu interpretieren, etwa welche Ionenkonzentrationen durch eine mögliche Eintragung von Düngemitteln beeinflusst sein könnten. Vielmehr kann für die gewählte Messstelle exemplarisch recherchiert werden. Leitfragen können hierzu exemplarisch sein:

- Welchem Gestein entspringt das Gewässer/ welche Gesteinsformationen durchfließt es?
- Welche Flächennutzung prägt die Auen von der Quelle bis zur Messstelle?
- Welche zivilisatorischen Einträge sind bekannt oder denkbar (Kläranlagen, Kraftwerke, Industrieanlagen,...)

Bedeutend ist in diesem Zusammenhang die Herausstellung der möglichen Konsequenzen der jeweiligen Einflüsse, und die weitere Korrelation mit den Messdaten zur Überprüfung der Hypothesen. Gleichwohl mag eine Relativierung der Erkenntnisse notwendig sein, um der Komplexität des Systems Gewässer gerecht zu werden. Schülervorstellungen wie etwa „Landwirt XY ist dafür verantwortlich, dass es in unserem Bach zu viel Nitrat gibt“, dürfen nicht zur vereinfachten Folge-Erkenntnis erhoben werden.

4 Methodisches Vorgehen

Die vorliegende Masterarbeit wurde im Zeitraum Juli 2017 bis Januar 2018 angefertigt. Die Konzeption wurde bis September 2017 erarbeitet und am 22. September 2017 im Kursverband pilotiert. Gleichzeitig wurden die Daten der Videoanalyse und Fragebogenerhebung an diesem Tag gesammelt. Am 04. Oktober 2017 wurde die Einheit in der Eins-zu-eins-Situation durch eine Schülerin durchgeführt, dies wurde ebenfalls parallel videografiert. Im Anschluss wurde die Evaluation ausgewertet und die Ergebnisse schriftlich dargelegt.

4.1 Methoden der Datenerhebung

Die Konzeption wurde im Rahmen der Durchführung der zuvor beschriebenen Einheit evaluiert. Die Versuchsgruppe bestand aus 20 Personen eines Chemie-Leistungskurses der elften Jahrgangsstufe des Eduard-Spranger-Gymnasiums Landau. An der Befragung nahmen alle 20 Schüler teil. Die Geschlechterverteilung war mit jeweils zehn männlichen und zehn weiblichen Teilnehmenden ausgewogen.

Als abhängige Variable zur Bewertung der Konzeption dienten die Konstrukte der kognitiven Belastung – sowohl als Summenparameter als auch differenziert in *intrinsic cognitive load*, *extraneous cognitive load* und *germane cognitive load* – und das aktuelle Interesse mit den Subskalen der emotionalen, wertbezogenen und epistemischen Komponente der Teilnehmer. Darüber hinaus wurden Ausschnitte der Durchführung videografiert, welche zur Identifikation und Präzisierung möglicher auftretender Probleme herangezogen werden kann. Ziel der Untersuchung war unter anderem die Erhebung des Schülerinteresses als dem klassischen Chemieunterricht häufig entgegenstehender Faktor (Engeln, 2004, S. 12). Insbesondere die Erhebung der kognitiven Beanspruchung durch die erstellten Lernmaterialien als Einflussgröße der Interessenslage im Sinne guter Instruktionsqualität (Engeln, 2004, S. 63) ist in diesem Bedingungsgefüge relevant.

Zum Zweck der Datenerhebung wurde die Einheit direkt im Anschluss mittels eines Fragebogens (siehe digitale Anlagen) durch die teilnehmenden Schüler beurteilt. Die Teilnahme an der Befragung erfolgte auf freiwilliger Basis und anonym. Die erhobenen personenbezogenen Daten dienten ausschließlich der möglichen Zuordnung im Rahmen der Auswertung und sind nicht geeignet Rückschlüsse auf die einzelnen Teilnehmer zu ziehen. Zur Wahrung der Integrität der Befragung wurde darüber hinaus die Abkopplung der Befragung von der Unterrichtssituation durch den Durchführenden sowie den anwesenden Fachlehrer bestätigt, um Verzerrungen durch eine möglicherweise befürchtete Auswirkung auf schulische Bewertung ausschließen zu können.

Zur videografischen Erfassung der Einheit wurde eine Action-Kamera verwendet. Diese wurde mittels Stirnband-Halterung jeweils auf dem Kopf getragen, wodurch die Ego-Perspektive realisiert werden konnte, ohne die betreffende Person in der aktiven Teilnahme zu behindern. Die Aufnahmequalität der Audiospur wurde durch ein zusätzlich gekoppeltes externes Funkmikrofon optimiert. Die Kamera wurde während der Durchführung mehrfach weitergereicht, um einen Einblick in mehrere Gruppen zu ermöglichen. Dieses Vorgehen wurde von den Teilnehmern im Vorfeld angeregt und mit ihnen abgestimmt.

4.2 Methodenwerkzeuge

Grundlage der vorliegenden Daten sind eine Fragebogen-Erhebung sowie mitgeschnittene Videosequenzen der Durchführung.

4.2.1 Fragebogen

Die Datenerhebung fand mittels eines Fragebogens gemischten Typs statt. Neben verfahrensrelevanten Informationen wie Geschlecht, Zugehörigkeit zu einer thematischen Gruppe und einer Codierung, welche die Identifikation im Falle einer möglichen Nach-Erhebung sicherstellen sollte, stützte sich der Fragebogen überwiegend auf literaturbasierte und erprobte Ratingskalen. Einführend wurde auf die Anonymität der Erhebung verwiesen. Ebenso wurden die Befragten schriftlich aufgefordert ihre jeweilige persönliche Meinung spontan, gewissenhaft, sowie eigenständig als Grundlage ihrer Angaben zu nutzen und den Fragebogen vollständig auszufüllen. Die Auswahl von Ratingskalen ermöglichte eine Befragung kurzer Dauer, wodurch eine umfassende Datenbasis der befragten Personen zu erwarten war. Die zur Bearbeitung benötigte Zeitdauer betrug knapp fünf bis maximal zehn Minuten.

Ergänzend zu den Ratingskalen mit insgesamt 28 geschlossenen Items wurden zwei offene Fragestellungen eingesetzt. Die erste offene Frage bot den Befragten die Möglichkeit den persönlichen Eindruck der Einheit schriftlich zusammenzufassen, angeleitet durch den Satzanfang „Für mich stand heute im Fokus...“. Weiterhin wurde durch ein leeres Textfeld mit der Beschriftung „Platz für sonstige Anmerkungen“ die Gelegenheit zu weiteren Anregungen eröffnet.

Der Fragebogen setzte sich aus mehreren Abschnitten mit jeweils separaten Skalen zusammen. Die zu erfassenden Parameter *cognitive load* und aktuelles Interesse wurden nicht explizit benannt, diese Zuordnung fand erst im Rahmen der Auswertung statt.

Als erste Items kamen zwei allgemeine Fragen zur Erhebung des *cognitive load* zum Einsatz. Da nach Paas (1992) die Korrelation zwischen subjektiver und objektiver Schwierigkeit einer

Aufgabe sehr hoch ist, kann diese durch eine Abfrage der Wahrnehmung sehr leicht erhoben und als objektive Schwierigkeit transferiert werden. Die Feststellung, dass weder die Art der Skala, noch die Wahl zwischen schriftlichen oder zahlenmäßigen Abstufungen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben (Paas, 1992, S. 429), ließ die Verwendung einer Skala von Bratfisch et al. (1972) zu, welche jedoch hinsichtlich der Abstufung von neun auf die in Abbildung 4 gezeigten sieben Ratingoptionen sowie in der Formulierung der Bezeichnungen der einzelnen Ratings leicht modifiziert worden war (Bratfisch et al., 1972, S. 3). Die Itemformulierungen wurden nach (Koenen, 2014, S. 79) übernommen.

Wie sehr musstest du dich bei der Lerneinheit anstrengen?

CL_K1	Setze das passende Kreuz!	Sehr gering	Ziemlich gering	Eher gering	Angemessen	Eher hoch	Ziemlich hoch	Sehr hoch
	Bei der Bearbeitung der Lerneinheit war meine geistige Denk-Anstrengung insgesamt ...	<input type="radio"/>						

CL_K2	Setze das passende Kreuz!	Sehr leicht	Ziemlich leicht	Eher leicht	Angemessen	Eher schwer	Ziemlich schwer	Sehr schwer
	Wie leicht oder schwer war das Lernmaterial insgesamt zu verstehen?	<input type="radio"/>						

Abbildung 4: Eine siebenstufige Skala zur Erfassung des *cognitive load* bestehend aus zwei Items nach Koenen (2014, S. 79).

Die zweite verwendete Skala zum *cognitive load* ist der Zusammenstellung von Leppink et al. (2013) entnommen. Dabei gründet sich die aus vier Items bestehende Skala mit je neun bezeichneten Ratingoptionen auf die Skala zum *cognitive load* nach Paas (1992, S. 430), welche durch Item 1 repräsentiert wird. Item 2 folgte dem Design von Ayres (2006, S. 291) zur Bewertung des *intrinsic cognitive load*. Zur Bewertung des *extraneous cognitive load* wurde Item Nummer 3, basiert auf dem Entwurf von Cierniak et al. (2009, S. 319) genutzt. Für die Erfassung des *germane cognitive load* fand letztlich Item Nummer 4 nach Salomon Eingang in die Skala. Dieses Item wurde ebenfalls unter Berufung auf Paas (1992) von einer vierstufigen auf eine neunstufige Ratingskala angepasst (Salomon, 1984, S. 652). Somit ergab sich die in Abbildung 5 einsehbare Skala.

Wie anspruchsvoll fandest du die Lerneinheit?

Setze das passende Kreuz!		Extrem gering	Sehr gering	Ziemlich gering	Eher gering	Angemessen	Eher hoch	Ziemlich hoch	Sehr hoch	Extrem hoch
1) cl	Bei der Bearbeitung des Lernmaterials war meine geistige Denkanstrengung insgesamt ...	<input type="radio"/>								
Setze das passende Kreuz!		Extrem leicht	Sehr leicht	Ziemlich leicht	Eher leicht	Angemessen	Eher schwer	Ziemlich schwer	Sehr schwer	Extrem schwer
2) il	Die Bearbeitung des Lernmaterials fiel mir insgesamt ...	<input type="radio"/>								
Setze das passende Kreuz!		Extrem leicht	Sehr leicht	Ziemlich leicht	Eher leicht	Angemessen	Eher schwer	Ziemlich schwer	Sehr schwer	Extrem schwer
3) el	Aus dem bearbeiteten Material zu lernen, fiel mir insgesamt ...	<input type="radio"/>								
Setze das passende Kreuz!		Extrem wenig	Sehr wenig	Ziemlich wenig	Eher wenig	Angemessen	Eher stark	Ziemlich stark	Sehr stark	Extrem stark
4) gl	Wie sehr musstest du dich während der Bearbeitung des Lernmaterials konzentrieren?	<input type="radio"/>								

Abbildung 5: Die verwendete Skala zur Einschätzung des *cognitive load* und dessen Subskalen *intrinsic*, *extraneous* und *germane cognitive load*.

Die am stärksten differenzierte Skala zur Einschätzung des *cognitive load* wurde der Arbeit von Leppink et al. (2013) entnommen. Sie bildet in Summe zehn Items ab, davon jeweils drei zu den Subskalen *intrinsic* und *extraneous cognitive load* sowie vier Items zur Messung des *germane cognitive load* (Scheiter, 2014, S. 328). Die Zuordnung erfolgt wie aus Abbildung 6 ersichtlich durch Auswahl einer der Optionen 0 bis 10 mit den den Skalenendwerten zugeordneten Beschreibungen „0 = stimmt überhaupt nicht“ und „10 = stimmt genau“. (Leppink et al., 2013, S. 1070)

In der Konzeptionsphase der Evaluation fiel die Entscheidung auf den Einsatz aller drei vorgestellten Skalen zur kognitiven Beanspruchung. Dies geschah einerseits in der Absicht, die Ergebnisse im Rahmen der Auswertung verifizieren und Ratingdifferenzen aufgrund der Itemformulierungen reduzieren zu können. Andererseits wurde durch den steigenden Detailgrad der Skalen eine verstärkte Aussagekraft insbesondere hinsichtlich des *extraneous cognitive load*, verursacht durch mangelnde Klarheit der Instruktionen, erwartet. Um die Befragung durch einen Überschuss an Items zur Beanspruchung durch diesen Faktor nicht zu verzerren, wurden alle Subskalen des *cognitive load* zahlenmäßig nahezu identisch gehalten.

Bitte beantworte jede Frage anhand mit einer Zahl von 0 bis 10 (0=“stimmt überhaupt nicht“ bis 10=“stimmt genau“).

Setze das passende Kreuz!		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1) il1	Das Thema der Lerneinheit war sehr kompliziert.	<input type="radio"/>										
2) il2	Die Lerneinheit enthielt <i>Dinge (formulas)</i> , die ich als sehr kompliziert empfunden habe.	<input type="radio"/>										
3) il3	Die Lerneinheit enthielt Begriffe und Definitionen, die ich als sehr kompliziert empfunden habe.	<input type="radio"/>										
4) el1	Die Anweisungen und/oder Erklärungen waren sehr unklar.	<input type="radio"/>										
5) el2	Die Anweisungen und/oder Erklärungen waren - in Bezug auf das Lernen - völlig nutzlos.	<input type="radio"/>										
6) el3	Die Anweisungen und/oder Erklärungen waren voller unklarer Ausdrücke.	<input type="radio"/>										
7) gl1	Die Lerneinheit verbesserte mein Verständnis zum behandelten Thema sehr.	<input type="radio"/>										
8) gl2	Die Lerneinheit verbesserte mein Wissen und Verständnis von Umweltauswirkungen sehr.	<input type="radio"/>										
9) gl3	Die Lerneinheit verbesserte mein Verständnis der behandelten Umweltphänomene.	<input type="radio"/>										
10) gl4	Die Lerneinheit verbesserte mein Verständnis der benutzten Begriffe und Definitionen sehr.	<input type="radio"/>										

Abbildung 6: Zehnstufige zehn-Item-Skala zur Erhebung des *cognitive load* differenziert in Subskalen. Items 1-3 beziehen sich auf den intrinsic *cognitive load*, Items 4-6 auf den extraneous *cognitive load* und Items 8-10 auf den germane *cognitive load*.

Die aus einem Item bestehende, sechsstufige Skala in Abbildung 7 zur Abschätzung der Befindlichkeit bei der Freilandarbeit ist durch sechs verbale Beschriftungen gekennzeichnet.

Wie war für dich heute der Aufenthalt im Freiland?

W_A1	Setze das passende Kreuz!					
	Sehr unangenehm	Ziemlich unangenehm	Eher unangenehm	Eher angenehm	Ziemlich angenehm	Sehr angenehm
Ich habe den Aufenthalt im Freiland heute empfunden als ...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 7: Skala zur Erhebung der Befindlichkeit der Teilnehmer während der Freilandarbeit. Insbesondere äußere Einflüsse der gegenüber dem Klassenraum veränderten Umgebungsbedingungen kamen hier zum Tragen.

Die differenzierte Skala weist insgesamt elf Items auf, welche eine Zusammenstellung aus Arbeiten verschiedener Autoren darstellen. Alle Skalen wurden vereinheitlicht auf vier Labels. Items Nummer 2, 3, 4 und 6 entstammen den Arbeiten von Engeln (2004) und Pawek (2009). Dabei nimmt Item Nummer 6 auf die emotionale Komponente des aktuellen Interesses Bezug, Item Nummer 2 auf die wertbezogene Komponente (Engeln, 2004, S. 159–160 & Pawek, 2009, S. 200). Items Nummer 3, 4 und 7 beziehen sich auf die „epistemische Komponente des aktuellen Interesses“ (Pawek, 2009, S. 201 & Engeln, 2004, S. 160). Item 5 wurde nach Laukenmann et al. (2000) ausformuliert und bildet die wertende Komponenten zum „situativen Interesse“ (Laukenmann et al., 2000, S. 143) ab. Item Nummer 10 ist einem Fragebogen zur Motivation in Lernsituationen nach Rheinberg et al. (Rheinberg et al., 2001, S. 66) entnommen. Abbildung 8 zeigt die eingesetzte Ratingskala zur Erhebung des aktuellen Interesses.

Wie interessant findest du die Lerneinheit?

Bitte gib an, inwiefern folgende Aussagen auf dich zutreffen.		Stimmt gar nicht	Stimmt wenig	Stimmt ziemlich	Stimmt völlig
1) AI_U_F12	Ich finde es schade, dass die Lerneinheit jetzt vorbei ist.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
2) AI_W_P29	Dass wir in der Natur Experimente durchgeführt haben, erscheint mir sinnvoll.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
3) AI_E_P36	Die Lerneinheit, wie wir sie in der Natur durchgeführt haben, würde ich auch in meiner Freizeit bearbeiten.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
4) AI_E_P35	Ich würde gerne mehr über die Experimente lernen, die wir in der Natur durchgeführt haben.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
5) AI_W_F14	Ich finde es wichtig, solche Themen wie heute kennen zu lernen.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
6) AI_M_P27	Die Durchführung der Lerneinheit war langweilig.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
7) AI_E_P37	Beim Experimentieren habe ich interessante Anregungen erhalten.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
8) AI_W_F19	Das Thema heute fand ich gut, weil ich es auch außerhalb der Schule benötige.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
9) AI_W_F17	Das Thema heute war für mich wichtig, da ich einen Einblick bekommen habe, wo Chemie in der Natur vorkommt.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
10) AI_U_R7	Bei der Lerneinheit mochte ich die Rolle des Wissenschaftlers, der Zusammenhänge entdeckt.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>
11) AI_U_F11	Ich freue mich auf die nächste Lerneinheit.	Stimmt gar nicht <input type="radio"/>	Stimmt wenig <input type="radio"/>	Stimmt ziemlich <input type="radio"/>	Stimmt völlig <input type="radio"/>

Abbildung 8: Skala aus elf Items zur Erfassung des aktuellen Interesses. Die Unterteilung erfolgt vierstufig.

4.2.2 Videoaufzeichnung

Zur Aufzeichnung der Videosequenzen wurde eine Action-Kamera des Typs GoPro Hero 3 mit Stirnbandhalterung verwendet. Ergänzend kam das zuvor bereits erwähnte drahtlos gekoppelte Ansteckmikrofon zum Einsatz. Die Auswahl der videografierten Sequenzen richtete sich nach der aktuellen Bereitschaft und dem damit verbundenen Einverständnis der Teilnehmer, ihre Tätigkeit aufzeichnen zu dürfen.

4.3 Erhebung in der Einzelsituation

Zusätzlich zur beschriebenen Erhebung in der Gruppe erfolgte darüber hinaus eine Durchführung der Einheit in einer Eins-zu-Eins-Situation. Diese Gelegenheit ergab sich durch das bekundete Interesse einer Schülerin eine „besondere Lernleistung“ im Rahmen der Vorqualifikation zur allgemeinen Hochschulreife anzufertigen. Die betreffende Schülerin zeigte vergleichbare inhaltliche Voraussetzungen, insofern sie an den vorbereitenden Unterrichtsstunden teilweise teilgenommen hatte. Ferner war sie vor der Einzeldurchführung bei der Gruppendurchführung anwesend und sammelte erste Eindrücke, ohne jedoch aktiv und fest in einer Gruppe eingebunden zu sein. Dadurch wurde eine nahezu unabhängige Betrachtung der Einzelsituation möglich. Diese wurde ebenfalls durch die bezeichnete Videografie begleitet. Das Hauptaugenmerk lag hier auf dem Vergleich der Arbeitsweisen und Problemstellungen der heterogenen Gruppe mit der aus intrinsischer Motivation teilnehmenden Einzelperson. Wenngleich aufgrund der Variation etlicher Variablen (andere Umgebungsbedingungen, verändertes Vorwissen, ...) kein direkter Vergleich möglich ist, so soll durch den Vergleich der beiden Durchführungen doch die Verifikation oder Falsifikation von Problemstellungen ermöglicht werden, welche auf unzulängliche Informationen oder fehler-/ mangelhafte Materialien zurückzuführen wären.

4.4 Methoden der Datenauswertung

4.4.1 Auswertung der Fragebögen

Die 20 abgegebenen Fragebögen wurden zunächst auf Vollständigkeit und Eindeutigkeit der Bearbeitung überprüft. In der Folge mussten zwei Fragebögen in Teilen ausgeschlossen werden. Fragebogen Nummer 8 wies eine nicht vollständig ausgefüllte Skala zum *cognitive load* auf, was diesen für den betreffenden Teil der Auswertung unbrauchbar machte. Gleiches galt für Fragebogen Nummer 15. Fragebogen Nummer 16 war in Teilen nicht eindeutig bearbeitet, hier hatte die befragte Person Kreuze zwischen den dafür vorgesehenen Feldern platziert, was zum Ausschluss aus der Betrachtung der Interessenslage führte.

Anschließend wurden alle Itemformulierungen unter Verwendung von Microsoft Excel tabellarisch aufgelistet und die Angaben der Befragten in dieses Raster übernommen. Weiter wurden die linguistischen Ratingoptionen in Zahlenwerte überführt. Dabei wurde der linken Ratingoption der Wert 0 zugeordnet, jede weitere Option wurde in Einer-Schritten ergänzt. Unter Berücksichtigung der positiven und negativen Verankerungen der einzelnen Itemformulierungen wurden die Zahlenwerte einzelner Items zur Auswertung invertiert. Für den Parameter aktuelles Interesse traf diese Transformation auf Item 6 „Die Durchführung der

Lerneinheit war langweilig“ zu, da diese Formulierung als einzige der erhobenen Interessens-Ratingskala eine negative Grundhaltung suggerierte.

Durch dieses Vorgehen wurde im weiteren Verlauf die Bildung eines Skalenmittelwertes ermöglicht. Im weiteren Vorgehen wurden nun Skalenmittelwerte der Parameter *aktuelles Interesse* und *cognitive load* für jeden Schüler gebildet. Der Parameter *cognitive load* wurde gemäß der Itemformulierungen in den Subskalen *intrinsic cognitive load*, *extraneous cognitive load* und *germane cognitive load* subsummiert. Somit war es möglich jeder befragten Person jeweils einen Mittelwert pro erhobener Skala zuzuordnen und grafisch abzubilden. Die Bildung von Subskalen des *cognitive load* aus den insgesamt zehn Items der Langskala erfolgte auf Grundlage der theoriegeleiteten Zuordnung einzelner Items im Einklang mit der gängigen Praxis der Indexbildung (Raithel, 2008, S. 41). Zur Abbildung der ursprünglichen Abstufung der Skalen wurden die Zahlenwerte sofern nötig wieder in verbale Beschreibungen überführt, welche der Beschreibung im Kapitel 5.1 Ergebnisse der Fragebogen-Erhebung zu entnehmen sind. Darüber hinaus war es möglich einen Gesamtmittelwert der einzelnen Parameter über die gesamte Versuchsgruppe anzugeben.

Die Skalenmittelwerte wurden als Balkendiagramme grafisch dargestellt und interpretiert. Sofern möglich wurden die Werte mit der jeweiligen Standardabweichung dargestellt. Zur Berechnung der Standardabweichung und Abbildung als Fehlerbalken wurde Microsoft Excel (Version 2007) eingesetzt. Die Standardabweichung wurde mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms gemäß Formel 1 berechnet (o.J.).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}}$$

Formel 1: Berechnung der Standardabweichung nach Beller (2016, S. 77)

Da für jeden erfassten Parameter mindestens zwei Skalen abgefragt worden waren, wurden die jeweils zusammengehörigen Skalenmittelwerte als prozentuale Mittelwerte in Punktdiagrammen aufgetragen. Dieses Vorgehen erlaubte die Referenzierung der Skalen gegeneinander. Daraus abgeleitet wurde die Übereinstimmung der Skalen verdeutlicht. Angegeben waren jeweils die erzielten Skalenmittelwerte als prozentuale Anteile der Maximalausprägung der jeweiligen Skala.

4.4.2 Auswertung der Videosequenzen

Die gesammelten Videosequenzen wurden zunächst von der Speicherkarte der Kamera zur Bearbeitung auf einen PC übertragen und die Dateigröße unter Verwendung eines Rendering-Programms zum Zwecke optimierten Handlings stark reduziert. Im Anschluss wurden alle Videosequenzen vollständig gesichtet, um die Verwertbarkeit des Videomaterials beurteilen zu können und technische Fehler in der Aufzeichnung auszuschließen. Da keinerlei technische Probleme identifiziert werden konnten, welche die Auswertbarkeit massiv beeinträchtigt hätten, wurde das gesamte Videomaterial in die Auswertung mit einbezogen.

In der Folge wurden die Videos unter Verwendung des in Tabelle 2: intentionale Kategorien der Videoanalyse aufgeführten Codiersystems ausgewertet. Jeder als Frage oder frageähnliche linguistische Konstruktion identifizierbare Abschnitt der Aufzeichnungen wurde gemäß des theoriegeleiteten Codiersystems (Niegemann & Stadler, 2001, S. 176–177) zunächst kategorisiert und anschließend transkribiert. Die Codierung erfolgte somit event-basiert (Börlin, 2012, S. 29). Die Transkription wurde wann immer möglich durch die Antworten oder einen inhaltlich zugehörigen Ausschnitt ergänzt, um so den Zusammenhang zu verdeutlichen. Im Rahmen der Transkription wurden sprachliche Glättungen und redaktionelle Ergänzungen vorgenommen, um das allgemeine sprachliche Verständnis sowie die kontextuelle Einbindung sicherzustellen. Dieser Schritt war insbesondere zur Kompensation der häufigen und ausgeprägten Verwendung des regionalen (pfälzischen) Dialekts zwingend notwendig. Die so kategorisierten Videomitschnitte konnten im weiteren Verlauf der Auswertung zur Darstellung der Häufigkeiten einzelner Fragekategorien herangezogen werden. Durch die teilweise Transkription wurde eine Bezugnahme auf spezifische inhaltliche Fragestellungen und deren Auswirkung auf das Verständnis der Schüler ermöglicht.

Erstellung eines Codierleitfadens zur Auswertung der videografisch gewonnenen deskriptiv-qualitativen Daten

Nach Erhebung der Videodaten stellte sich die Frage nach einer geeigneten Methode zur Auswertung. Hierzu wurde zunächst das gesamte Material gesichtet, um das inhaltliche Angebot der Videosequenzen festzustellen (Brückmann & Duit, 2014, S. 196).

Hierbei traten bereits erste Problematiken hinsichtlich der Aufnahme auf. So waren teils akustisch schwer verständliche Sequenzen enthalten, welche durch Hall-Effekte, vor allem aber durch massive Umgebungsgeräusche angesichts der Ortslage und Gruppengröße zustande gekommen waren. Eine vollständige Transkription zur anschließenden Auswertung im Sinne der qualitativen Inhaltsanalyse war somit nicht ohne weiteres möglich. Aus diesem Grund

wurde die Konstruktion eines inhaltsbasierten Kategoriensystems bevorzugt, welches sodann als Codieranleitung zur Verwendung kommen sollte. Diese methodische Einschränkung gängiger Transkriptionspraxis, welche exakte zeitliche Abläufe dokumentiert und auch non- und paraverbale Mittel umfasst (Tuma et al., 2013, S. 81–84), kann aufgrund der vorangegangenen inhaltlichen Selektion nur Frage- oder Problemstellungen zu erfassen, als nicht negativ angesehen werden.

Neben der direkt formulierten Frage wurden auch Aussagen und Gespräche erfasst, welche implizit weitere Informationen einforderten, wie etwa suggestive Aussagen oder intonierte Fragen (Kearsley, 1976, S. 369).

Die Codierung erfolgte mit Hilfe intentionaler Fragekategorien orientiert an Niegemann & Stadler (2001) und Graesser & Person (1994) wie in Tabelle 1 dargestellt. Aufgrund der in der ersten vollständigen Sichtung der Videodaten gewonnenen Einblicke wurde auf einige Kategorien bewusst verzichtet, da sie als nicht zielführend im Sinne der Fragestellung erschienen, wohingegen die Konkretisierung der Fragen in Subkategorien im Verfahren der induktiven Kategorienbildung in Anlehnung an Groß (2013, S. 157–158) nach Mayring (2000, S. 5) sowie an (Hosenfeld et al., 2007, S. 306) explizit ergänzt wurde, um die im Vordergrund stehende Auswertung der Konzeption und Materialien zu stützen. Es handelt sich somit um eine Mischform theoriegeleiteter und induktiv entwickelter Kategorien (Platova, 2017, S. 39). Die Kategorisierung fand in drei Stufen statt. Im ersten Schritt wurde die Wahl des Adressaten erfasst, auf welche später vergleichend eingegangen werden soll.

Tabelle 1: Ausgewählte Fragekategorien nach Niegemann et al, 2001.

Kategorie	Funktion	Subkategorien	Beispiel
Informationsfragen	Einforderung lernrelevanter, lehrstoffbezogener oder außerfachlicher Informationen zur Beseitigung von Informationsdefiziten.	a) Fachlich	Wie stehen Temperatur und Sauerstoffsättigung in Zusammenhang?
		b) Außerfachlich	Aus wie vielen Personen soll jede Gruppe bestehen?
Konfirmationsfragen	Vorbeugung von Missverständnissen und Abbau von Unsicherheiten.	-	Also muss man die Temperatur schnellstmöglich nach der Probenahme messen?
Verfahrensfragen	Die organisatorischen Rahmenbedingungen betreffende Fragen.	-	Wie viel Zeit haben wir noch?
Fragen aus anderen Intentionen	Semantisch erkennbare Fragen, noch nicht kategorisiert	-	Hast du verstanden, wie das geht?

Die jeweiligen Fragen oder Aussagen wurden dann in einer ersten Kategorisierung den Bereichen Kategorien *Informationsfrage*, *Konfirmationsfrage*, *Verfahrensfrage* oder *andere Intention* zugeordnet. Eine Zuordnung zu Subkategorien erhöhte die Auflösung der inhaltlichen Belange.

Die Informationsfrage stellt dabei die Aufforderung zur Lieferung von Informationen zur Beseitigung von Informationsdefiziten dar. Hierbei ist es zunächst nebensächlich, ob mit diesem Wissensdefizit die Frage nach Umgebungsgrößen oder einem inhaltlichen Schwerpunkt gemeint ist. Weiterhin wurden die so kategorisierten Fragen in die drei Subkategorien *schriftliche Lehr-Materialien*, *Arbeitsmittel* und *Inhalte* unterteilt. Durch diese induktiv ergänzten Subkategorien ist eine detailliertere Evaluation der Konzeptinheit zu erwarten.

Der Subkategorie *schriftliche Lehr-Materialien* wurden all jene Fragen zugeordnet, welche eindeutig dem Inhalt, dem Aufbau oder der Formulierung der Lehrmaterialien geschuldet waren. Somit wurden Klarheit und Verständlichkeit der Anleitungen in den Vordergrund ge-

rückt. Im weiteren Verlauf sollen diese Fragen Anhaltspunkte für eine Überarbeitung der Materialien, etwa hinsichtlich fehlender Angaben oder unklarer Formulierungen, liefern.

Eine Kategorisierung im Bereich *Arbeitsmittel* zielte auf Fragen zu Geräten und Chemikalien ab, wobei in dieser Konzepteinheit insbesondere Fragen zur Bedienung der Messsysteme und Software zu erwarten waren. Auch hieraus sollten sich mögliche Optimierungen der beschriebenen Vorgehensweise zur Bedienung beziehungsweise dem Handling der Geräte ergeben. Zugleich konnten möglicherweise benötigte zusätzliche Materialien erfasst werden.

Letztlich diente die Subkategorie *Inhalte* der systematischen Kategorisierung all jener inhaltlicher Fragen, welche wünschenswerter und immanenter Bestandteil von Unterricht sein sollen. Exemplarisch waren hier Fragestellungen zu Löslichkeitsgleichgewicht, Sauerstoffsättigung oder den Eintragungswegen von Verunreinigungen des Gewässers zu erwarten. Diese Kategorie konnte gegebenenfalls auch fehlende theoretische Grundlagen beziehungsweise Schwierigkeiten der Interpretation der Messergebnisse abbilden.

Als Konfirmationsfragen wurden weiterhin nach Niegemann & Stadler (2001) Fragestellungen kategorisiert, welche „mit der Intention, Missverständnissen vorzubeugen oder wahrgenommene Unsicherheiten des Fragenden zu reduzieren“ einhergehen und somit „eine Rückmeldung hinsichtlich der Angemessenheit beziehungsweise Korrektheit der Interpretation eines Sachverhalts“ erwarten (Niegemann & Stadler, 2001, S. 176). Die detaillierte Zuordnung zu den Subkategorien *schriftliche Lehr-Materialien*, *Arbeitsmittel* und *Inhalte* erfolgte wiederum wie bereits zuvor beschrieben.

Verfahrensfragen im Sinne der Rückfrage nach Abläufen wurden der *inhaltlichen Struktur* oder den *organisatorischen Rahmenbedingungen* zugeordnet. Hierdurch wurde eine klare Trennung der gelegentlich auftauchenden Fragen nach Zeit, Gruppeneinteilung oder ähnlichem von Fragen nach der inhaltlichen Struktur wie etwa der Reihenfolge der Versuchsdurchführung ermöglicht.

Abschließend war es möglich, verbleibende Fragen der Kategorie *andere Intentionen* zuzuordnen. Somit mussten bei unklarer Zuordnung keine Fragen unkategorisiert und unerfasst bleiben.

Somit ergaben sich letztlich die in Tabelle 2 dargestellten Fragekategorien. Zur Vereinfachung des Handlings wurden die Kategorien und Subkategorien sowie Adressatenauswahl alphanumerisch gekennzeichnet, sodass jede Kombination mit einem Kürzel abgebildet wer-

den kann. In untenstehender Tabelle sind diese als fett gedruckte Zeichen erkennbar. Somit wäre eine fiktive Fragestellung, welche an einen Mitschüler gerichtet, als Konfirmationsfrage kategorisiert und dem Bezug zur Subkategorie Inhalte zugeordnet wäre, als „M2c“ in Kurzform abzubilden.

Die Darstellung der so aufbereiteten Videodaten erfolgte deskriptiv sowie durch textförmige Beschreibungen und Transkriptauszüge (Tuma et al., 2013, S. 106–108).

Tabelle 2: intentionale Kategorien der Videoanalyse

<u>Stufe 0 – Adressatenwahl</u>	<u>Stufe 1 – Codierungs-Kategorie</u>	<u>Stufe 2 – Subkategorie</u>
<p>Wurden Fragen an Mitschüler gestellt?/ Wurde eine Frage an Mitschüler sprachlich impliziert?</p> <p style="text-align: center;">M</p>	<p>1) Informationsfragen</p>	a) schriftliche Lehr-Materialien
		b) Arbeitsmittel / Geräte
		c) Inhalte
	<p>2) Konfirmationsfragen</p>	a) schriftliche Lehr-Materialien
		b) Arbeitsmittel / Geräte
		c) Inhalte
	<p>3) Verfahrensfragen</p>	d) inhaltliche Struktur
		e) organisatorische Rahmenbedingungen
	<p>4) Andere Intentionen</p>	-
	<p>Wurden Fragen an Lehrkräfte gestellt?/ Wurde eine Frage an Lehrkräfte sprachlich impliziert?</p> <p style="text-align: center;">L</p>	<p>1) Informationsfragen</p>
b) Arbeitsmittel / Geräte		
c) Inhalte		
<p>2) Konfirmationsfragen</p>		a) schriftliche Lehr-Materialien
		b) Arbeitsmittel / Geräte
		c) Inhalte
<p>3) Verfahrensfragen</p>		d) inhaltliche Struktur
		e) organisatorische Rahmenbedingungen
<p>4) Andere Intentionen</p>		-

4.4.3 Lesbarkeitsindex (LIX)

Hinsichtlich des *extraneous cognitive load*, welcher maßgeblich durch die Konzeption der Lehrmaterialien beeinflusst ist, wurden die Materialien mit Hilfe des Lesbarkeitsindex als vereinfachtes Maß für die Komplexität der Texte untersucht. Dies stellt ein in Aufwand und Aussagekraft gegenüber der vollständigen Textoberflächenanalyse reduziertes Vorgehen dar, welches gut geeignet erscheint, die grundlegende Komplexität der Instruktionen abzuschätzen. Zur praktischen Anwendung kam in diesem Zusammenhang der Online-LIX-Rechner, welcher unter <https://www.psychometrica.de/lix.html> frei zugänglich ist. Ausgehend von der Skala zur Erfassung der Komplexität eines Textes nach Renström (1980, S. 153) wurde der Einschätzung, dass es „nicht per se wünschenswert [ist], Texte ausschließlich in Richtung niedriger Textkomplexität zu optimieren“ (Lenhard & Lenhard, 2014) Rechnung getragen. Da stattdessen „versucht werden [sollte], eine möglichst gute Passung zwischen der Textkomplexität und der Leserschaft herzustellen, auf die der betreffende Text abzielt“ (Lenhard & Lenhard, 2014), wurden dem LIX Sollwerte im mittleren Bereich von rund 40 bis 60 zugeordnet. Diese dürften der Leserschaft, in diesem Fall Angehörige der gymnasialen Oberstufe, gerecht werden. Ein zu geringer LIX-Wert könnte unter Umständen eine Unterforderung und Demotivation mit sich bringen (Lenhard, 2013, S. 31). Zur Erzielung verlässlicher Werte wurden Nummerierungen aus dem Text entfernt, sowie die Materiallisten nicht in die Analyse mit einbezogen.

5 Ergebnis und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Datenauswertung dargestellt, beschrieben und diskutiert. Die in Diagramm 1 visualisierten Werte werden hierzu ausführlich erläutert und durch weitere Skalen vergleichend ergänzt. Weiter werden die Ergebnisse der Videoanalyse in ähnlicher Form wiedergegeben und kontextualisiert. Letztlich wird der Lesbarkeitsindex vor und nach der Überarbeitung der jeweiligen Texte vorgestellt.

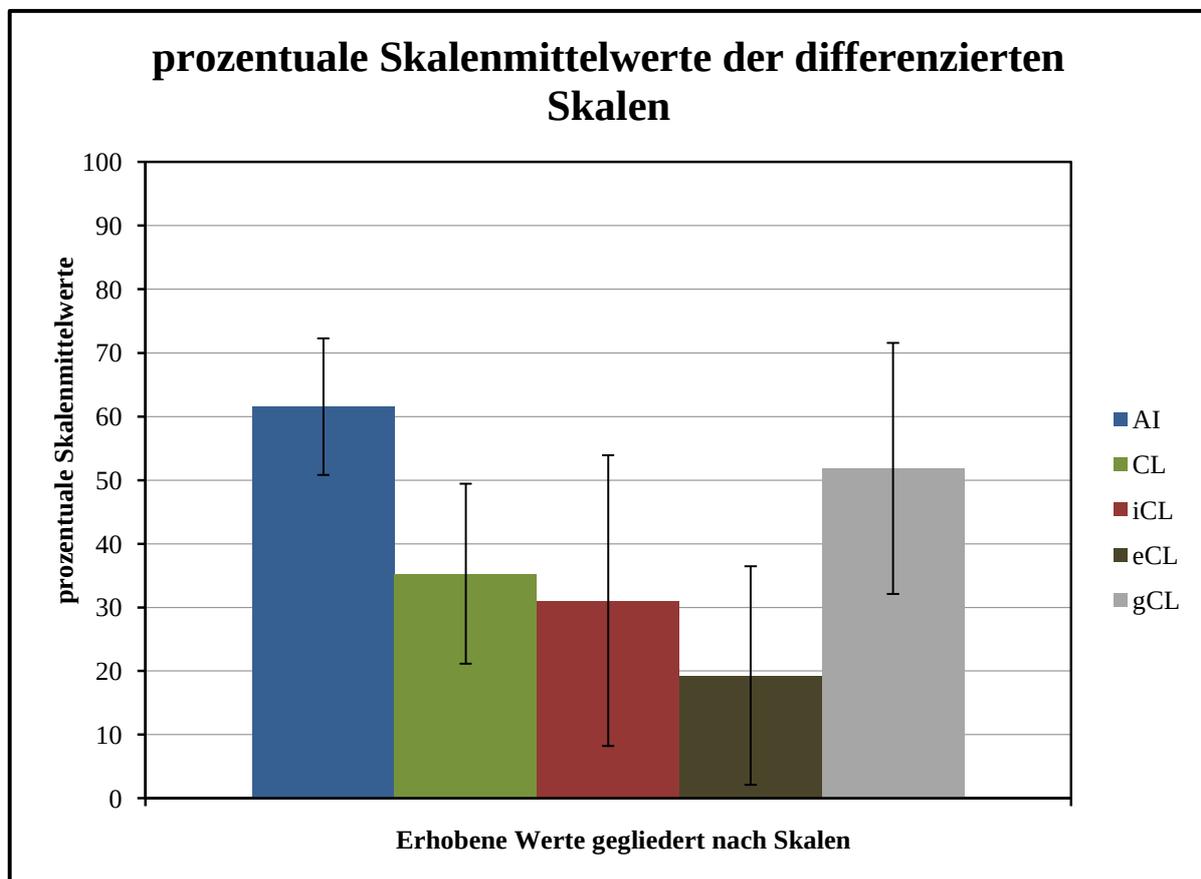


Diagramm 1: Übersicht über alle stärker differenzierten Skalenmittelwerte als prozentuale Anteile am Maximalwert der Skala. Hierzu wurden die einzelnen Skalen über alle Teilnehmenden gemittelt. Deutlich erkennbar ist ein aktuelles Interesse im Bereich der oberen Hälfte. Die kognitive Beanspruchung durch die Instruktionen bewegt sich im Bereich bis 40%. Die jeweilige Standardabweichung ist als Fehlerbalken wiedergegeben.

5.1 Ergebnisse der Fragebogen-Erhebung

Nachstehend werden die Ergebnisse der Fragebogen-Erhebung aufgezeigt und erörtert. Hierbei wurden die einzelnen Skalen konsekutiv abgearbeitet.

5.1.1 Skala zum aktuellen Interesse

Anhand der erfassten Skalenmittelwerte der befragten Schüler lässt sich das Interesse als eher hoch einschätzen. Während die Befragten zwischen den Ratings „stimmt gar nicht“, „stimmt wenig“, „stimmt ziemlich“ und „stimmt völlig“ für jedes abgefragte Item auswählen konnten,

liegt das arithmetische Mittel aller Skalenmittelwerte der aus elf Items bestehenden Skala bei rund 1,85 und somit im Bereich der Ausprägung „stimmt ziemlich“. Wie in Diagramm 2 ersichtlich wird, weisen bei N = 19 lediglich drei Skalenmittelwerte eine Ausprägung kleiner als 1,5, und damit dem Rating „stimmt wenig“ zuzuordnen, auf. Gleichzeitig weist keines der Skalenmittel einen Wert größer 2,5 („stimmt völlig“) auf. Von einem mittleren bis hohen aktuellen Interesse ist auszugehen. Dieser Befund steht der kategorischen Forderung von Pütz et al. (2012), Freilandarbeit auf die Grundschule und Sekundarstufe I bis maximal Klasse 6 zu begrenzen, kritisch gegenüber, wenngleich Aussagen der genannten Autoren keine explizite Zuordnung der Rolle der Freilandarbeit in der Sekundarstufe II vornahmen (Pütz et al., 2012, S. 93). Als einen das Interesse an der Einheit bedingenden Faktor lässt sich die zielorientierte unterrichtliche Nutzung zeitgemäßer Technologien wie Tablet, Bluetooth-Verbindung und Messsensorik vermuten. Im Gegensatz zu vielen in Schulen verbreiteten Messsystemen kann so auf die aktuelle Medienkompetenz der Teilnehmenden zurückgegriffen werden, ohne komplexe Datenschreiber, serielle Verbindungen und dergleichen (Steiner, 2002, S. 337–343) erläutern zu müssen.

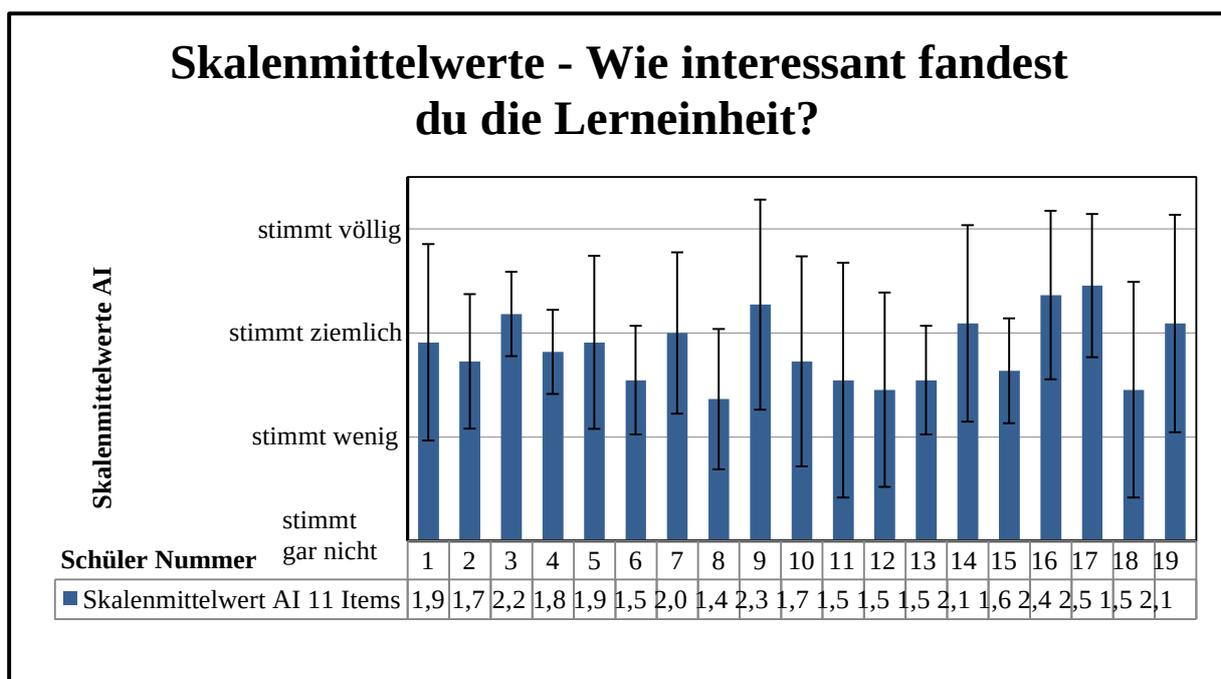


Diagramm 2: Skalenmittelwerte aktuelles Interesse erhoben mit 11 jeweils vierstufigen Items. Die Standardabweichung wurde für jeden Schüler ermittelt und als Fehlerbalken aufgetragen. Eine mittlere bis überdurchschnittliche Ausprägung ist durchweg erkennbar.

Bei Betrachtung der Erhebung zur Befindlichkeit der Teilnehmenden mittels des einzelnen Items „Ich habe den Aufenthalt im Freiland heute empfunden als...“ zeigen sich deutliche persönliche Präferenzen, das Gesamtbild erscheint jedoch erneut recht positiv. Wie Diagramm 3 zu entnehmen ist, beurteilte jeweils eine befragte Person die Empfindung als „sehr unange-

nehm“ beziehungsweise „eher unangenehm“. Ungeachtet dessen beträgt der Mittelwert aller Skalenmittel mit dem Wert 4,2 eine „ziemlich angenehme“ Ausprägung.

In Anbetracht der Quote von gut 10% unangenehmer Wahrnehmungen bei N = 19 auswertbaren Fragebögen sind die beiden negativen Bewertungen nicht gänzlich zu vernachlässigen. Möglicherweise sind diese jedoch auf persönliche Befindlichkeiten zurückzuführen, welche nicht näher mit den Gegebenheiten der Einheit in Zusammenhang stehen. Die Freitext-Antworten lieferten hierauf keinen Hinweis. Weitere Möglichkeiten der ergänzenden Erhebung von Antwortmotiven werden in Kapitel 6.1 Kritische Betrachtung der Fragebogen-Erhebung erörtert.

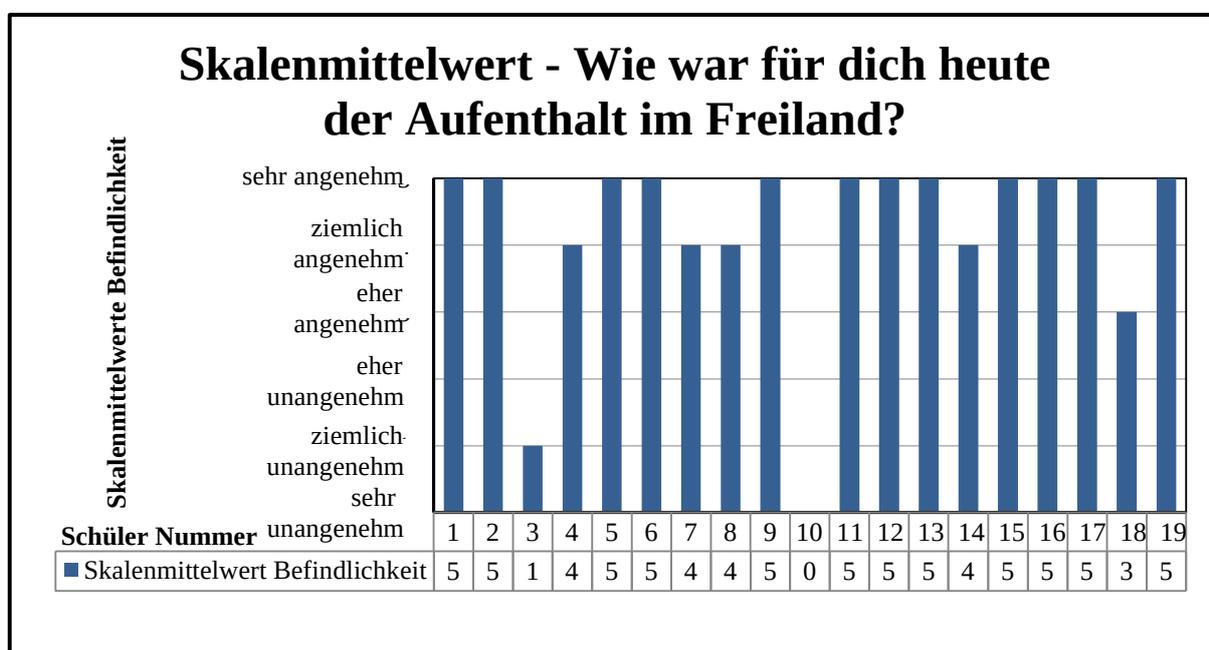


Diagramm 3: Skalenmittelwert Befindlichkeit, erfasst durch ein sechsstufiges Item. Bis auf zwei Teilnehmer ist bei allen eine positive Wahrnehmung der Freilandarbeit erkennbar.

5.1.2 Cognitive load

Die erfassten Skalenmittelwerte zum *cognitive load*, zusammengesetzt aus insgesamt zehn Items der Subskalen *intrinsic*, *extraneous* und *germane cognitive load*, zeigen eine Verortung der erhobenen Variable über nahezu alle Versuchspersonen hinweg in der unteren Hälfte der Ratingskala. Lediglich drei Mittelwerte überschreiten die Mitte der Ratingskala. Bei Betrachtung der in Diagramm 4 dargestellten Skalenmittelwerte zeigt sich, dass mehr als ein Drittel aller Befragten einen Wert kleiner 30% des maximal möglichen *cognitive load* aufweisen. Diese Einordnung der Einheit als eher geringe geistige Anforderung abfordernd, lässt zunächst den Schluss zu, die Einheit sei zu einfach und wenig tiefgreifend gestaltet. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.1 Relevantes Vorwissen benannten Kenntnisse und Kompetenzen, sowie die intensive inhaltliche Heranführung der Schüler in vorbereitenden Unter-

richtsstunden, so ist dies neu zu bewerten. Unter Beachtung der Grundlage und der gewünschten Modifikation des *cognitive load* hin zu einer angemessenen geistigen Herausforderung, mag das Ergebnis letztlich weniger Anlass zur „Erhöhung des Schwierigkeitsgrades“ bieten. Vielmehr lässt sich hieraus ableiten, dass eine weniger aufwändige Vorbereitung auf das Thema und dessen Kompetenzbereiche notwendig erscheint als zunächst angenommen. Gleichzeitig dürfte nebenbefundlich eine gute Experimentierkompetenz vorgelegen haben, die es den Teilnehmenden möglich machte, Zusammenhänge von Naturvorgängen zu überprüfen und nachzuvollziehen (Arndt, 2016, S. 5). Für eine statistisch untermauerte Aussage hierzu bedürfte es jedoch entsprechend adaptierter Erhebungen. Ungeachtet dessen bietet sich eine Überprüfung der vertiefenden Inhalte im Hinblick auf eine Binnendifferenzierung an, um durch eine geeignete Anpassung die Schwankungsbreite der Werte zu reduzieren und in der Folge alle Teilnehmer gleichermaßen zu fordern. Die Einflüsse der genannten Vorbereitung auf das Testergebnis werden in Kapitel 6.1 Kritische Betrachtung der Fragebogen-Erhebung erneut aufgegriffen werden.

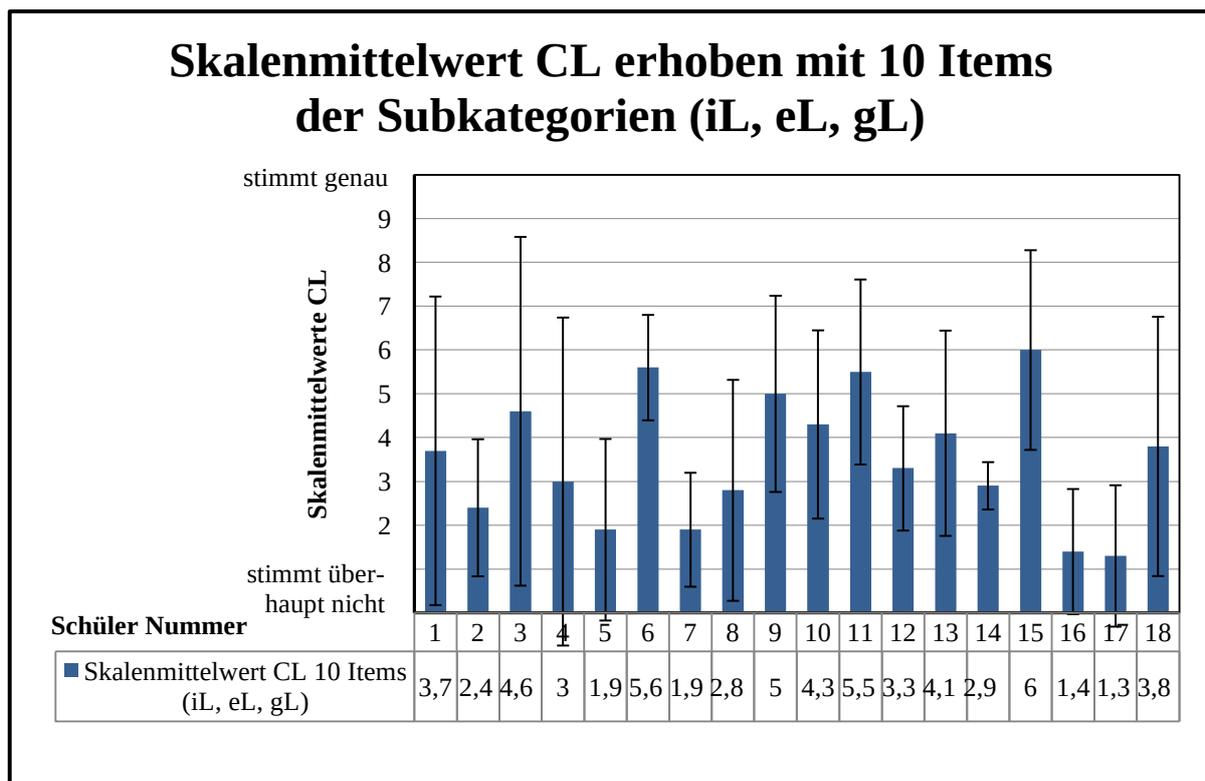


Diagramm 4: Skalenmittelwerte zum *cognitive load*, erhoben durch elf elfstufige Items der Subskalen *intrinsic*, *extraneous* und *germane cognitive load*. Die jeweiligen Standardabweichungen sind mit angegeben.

Vergleichbar mit den zuvor beschriebenen Ergebnissen weist auch der aus zwei Items, welcher jeweils den *cognitive load* als übergeordnetes Konzept erfasst, errechnete Skalenmittelwert eine Überschreitung der Skalenmitte in lediglich drei Fällen auf. Konkret stimmen zwei

dieser Fälle mit den Ergebnissen der ersten Skalenmittel überein. Explizit sind dies in Diagramm 5 Schüler Nummer 6 und 11. Erneut erneut wurden für mehr als ein Drittel der Befragten Werte im Bereich bis 30% der Ratingskala erfasst.

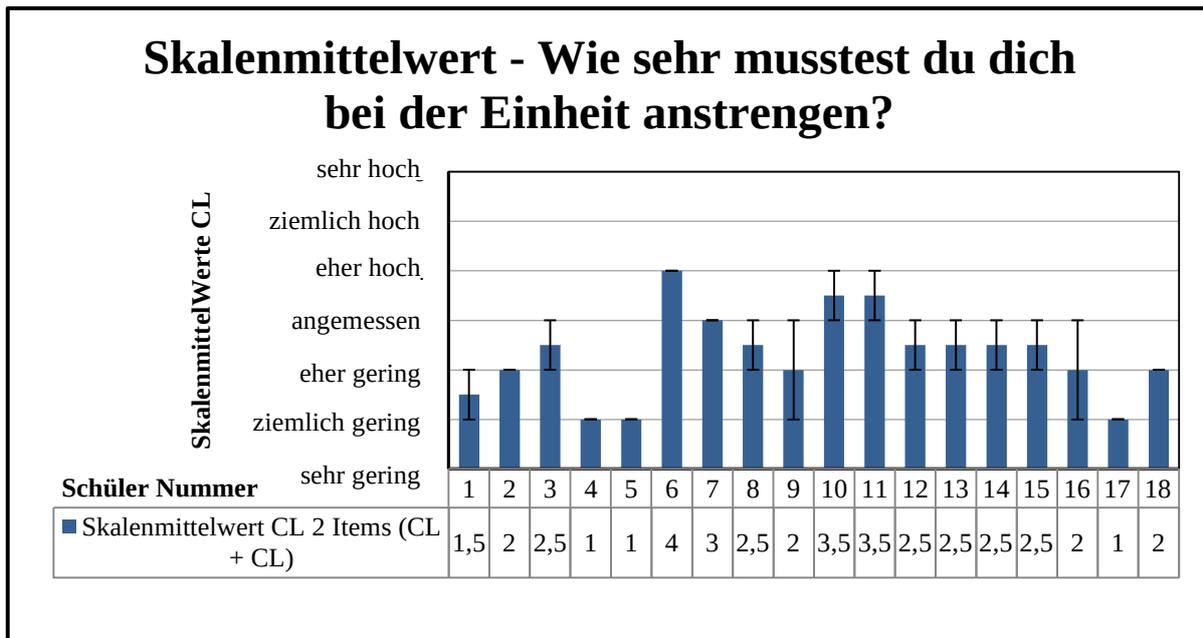


Diagramm 5: Skalenmittelwerte zum *cognitive load*, erfasst durch 2 Items zum allgemeinen *cognitive load*.

Die zuvor beschriebenen Übereinstimmungen setzen sich ähnlich fort. So ergeben sich aus Diagramm 6 Überschreitungen der Mitte der Skala in drei Fällen, wovon zwei auf die Schüler Nummer 6 und 11 entfallen. In Diagramm 7 rückt der Grad der Übereinstimmung in den Fokus. Da dieser nicht zuletzt bei höheren und niedrigeren Werten, sehr stark ausgeprägt ist, scheint eine gute Übereinstimmung der Skalen gegeben zu sein.

Skalenmittelwert - Wie anspruchsvoll fandest du die Einheit?

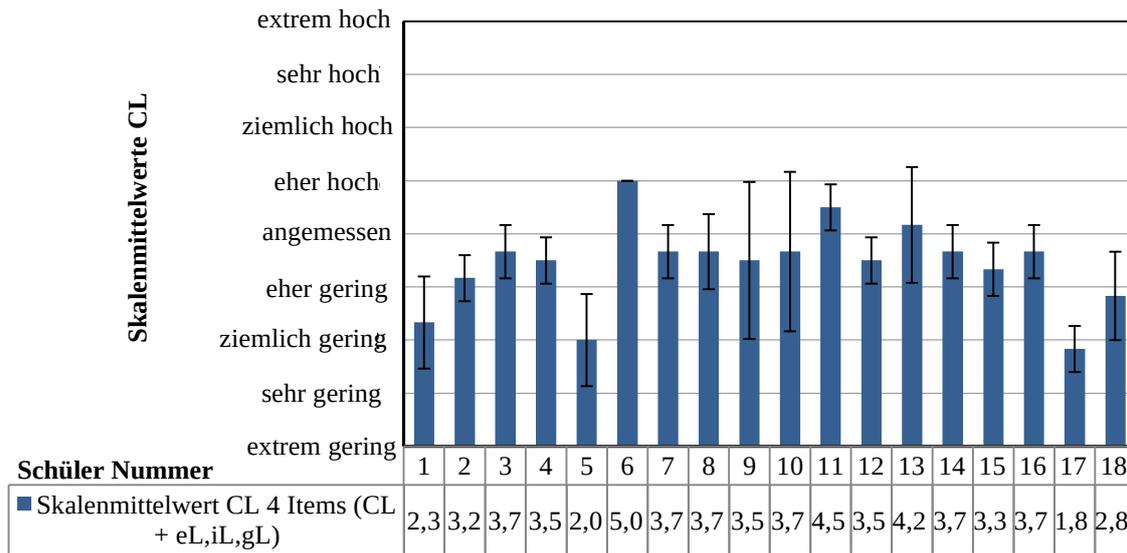


Diagramm 6: Skalenmittelwerte zum *cognitive load* als kombinierte Werte übergeordneter sowie subkategorisierter Items. Die neunstufige Skala zur kognitiven Belastung wurde in Summe ausgewertet. Zur Mittelwertbildung wurde der Mittelwert der drei *Items intrinsic, extraneous* und *germane cognitive load* mit dem Item zur übergeordneten Kategorie *cognitive load* subsummiert. Der Mittelwert dieser beiden Werte ist hier abgebildet.

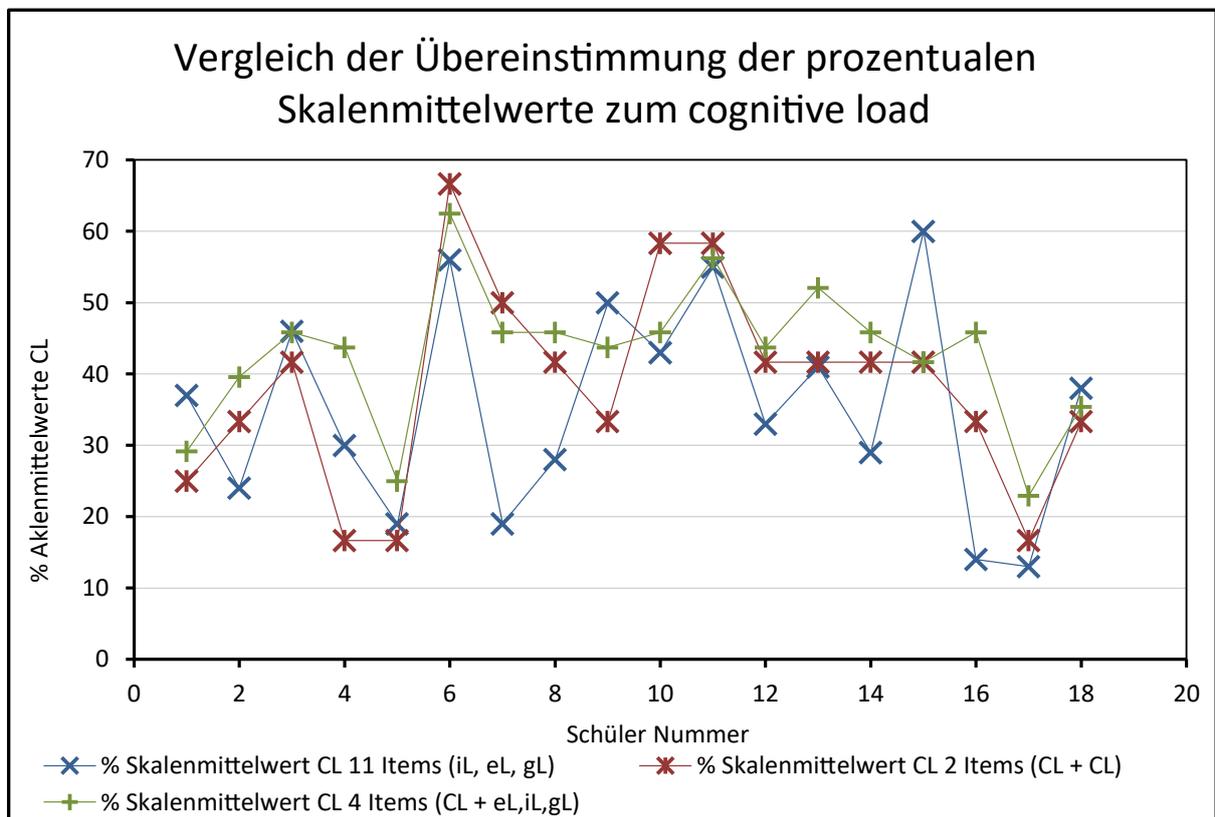


Diagramm 7: Darstellung der Übereinstimmungen der drei Skalenmittelwerte zum *cognitive load*. Dargestellt sind die prozentualen Skalenmittelwerte als prozentualer Anteil des Maximalwerts der einzelnen Skalen. Auf Standardabweichungen wurde hier zwecks Übersichtlichkeit verzichtet. Die insgesamt erkennbare Passung der Skalen gegeneinander lässt die Validität der Items erkennen.

5.1.3 Intrinsic cognitive load

Der als Teilmenge des *cognitive load* erfasste *intrinsic cognitive load* ist, gemittelt über alle in Diagramm 8 veranschaulichten Skalenmittelwerte, mit dem Wert 3,1 im unteren Bereich der zehnstufigen Skala einzuordnen. Gleichwohl sortiert mehr als ein Viertel der Befragten die Beanspruchung der geistigen Ressourcen durch die Lerninhalte oberhalb der Skalenmitte ein. Dem gegenüber stehen mehr als 50% der Teilnehmer, welche die intrinsische kognitive Belastung im unteren Drittel der Skala verorten. Es lässt sich somit festhalten, dass die Schwierigkeit der Inhalte trotz personenabhängiger Differenzen im Allgemeinen nicht zu kompliziert scheint. Die dargestellten Skalenmittelwerte zur kognitiven Beanspruchung lassen den Rückschluss auf eine leistungsheterogene Lerngruppe zu.

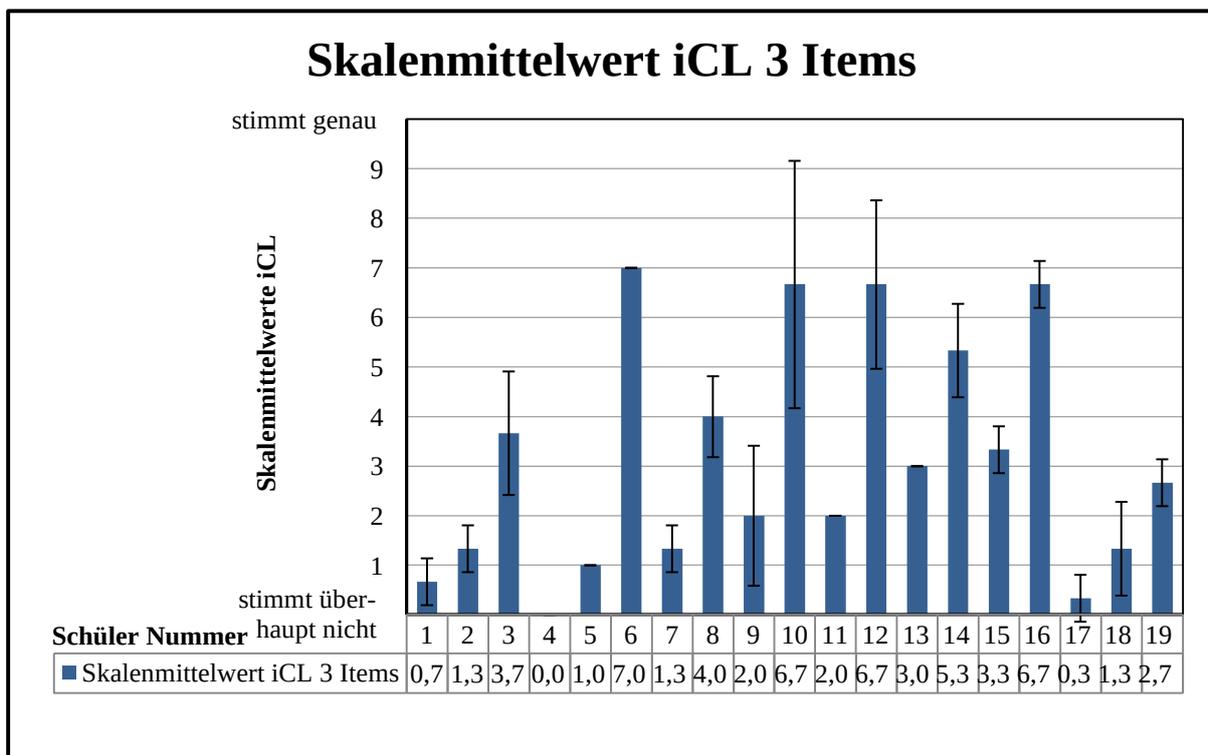


Diagramm 8: *intrinsic cognitive load*, erfasst durch drei Items. Die Einschätzung der thematischen Schwierigkeit polarisiert erkennbar.

Wie erwartet zeigt die Erfassung des *intrinsic cognitive load* mit nur einem Item ein weniger stark differenziertes Bild (siehe Diagramm 9). In der Beschreibung mittels einer Ratingskala, welche die Ausprägungen null „extrem gering“ bis acht „extrem hoch“ umfasste, lagen über drei Viertel der Bewertungen im Bereich drei bis fünf, und damit im mittleren Bereich der Skala. Gemäß der verbalen Formulierung der Ratingskala stellt sich die intrinsische kognitive Belastung somit als „angemessen“ dar. Knapp ein Drittel der Schüler bewertete diesen Parameter genau mit dem Wert 4 „angemessen“.

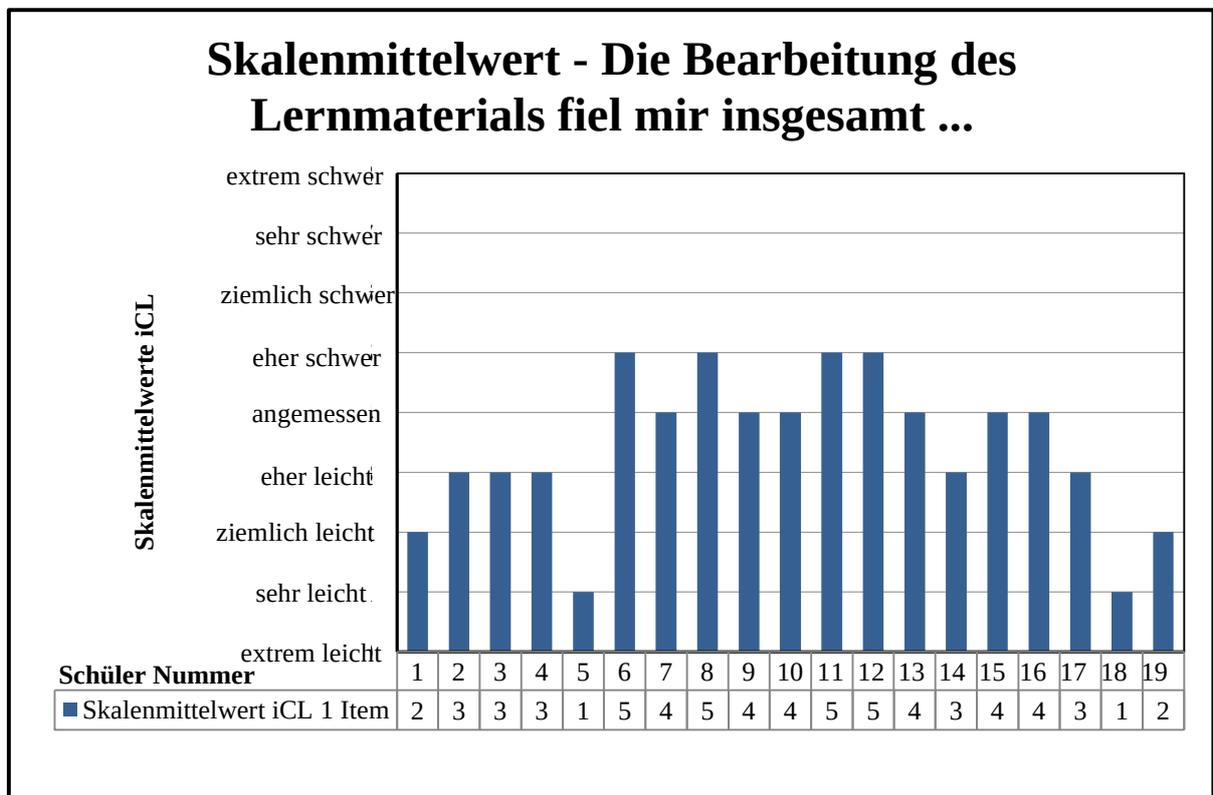


Diagramm 9: Skalenmittelwerte des *intrinsic cognitive load*, erhoben mit einem neunstufigen Item. Die Einschätzung erscheint hier etwas weniger heterogen als in der differenzierten Erfassung, mit einer Tendenz zur Mitte.

Die starke Schwankungsbreite der erhobenen Werte gibt Anlass zur näheren Betrachtung. Während das Ergebnis mit einem Mittelwert über alle Skalenmittel von 3,4 durchaus wünschenswert ist, so ist in diesem Fall dennoch zur kritischen Betrachtung anzuregen. Neben der möglichen klassischen Tendenz zur Mitte lässt insbesondere die starke Abweichung der differenzierteren Befragung, wie in Diagramm 10 abgebildet, gegenüber der sehr geringen Schwankungen der 1-Item-Befragung die Frage nach der Güte und Auflösung der Messskalen auftreten, ein Punkt welcher in Kapitel 6.1 Kritische Betrachtung der Fragebogen-Erhebung Eingang finden wird.

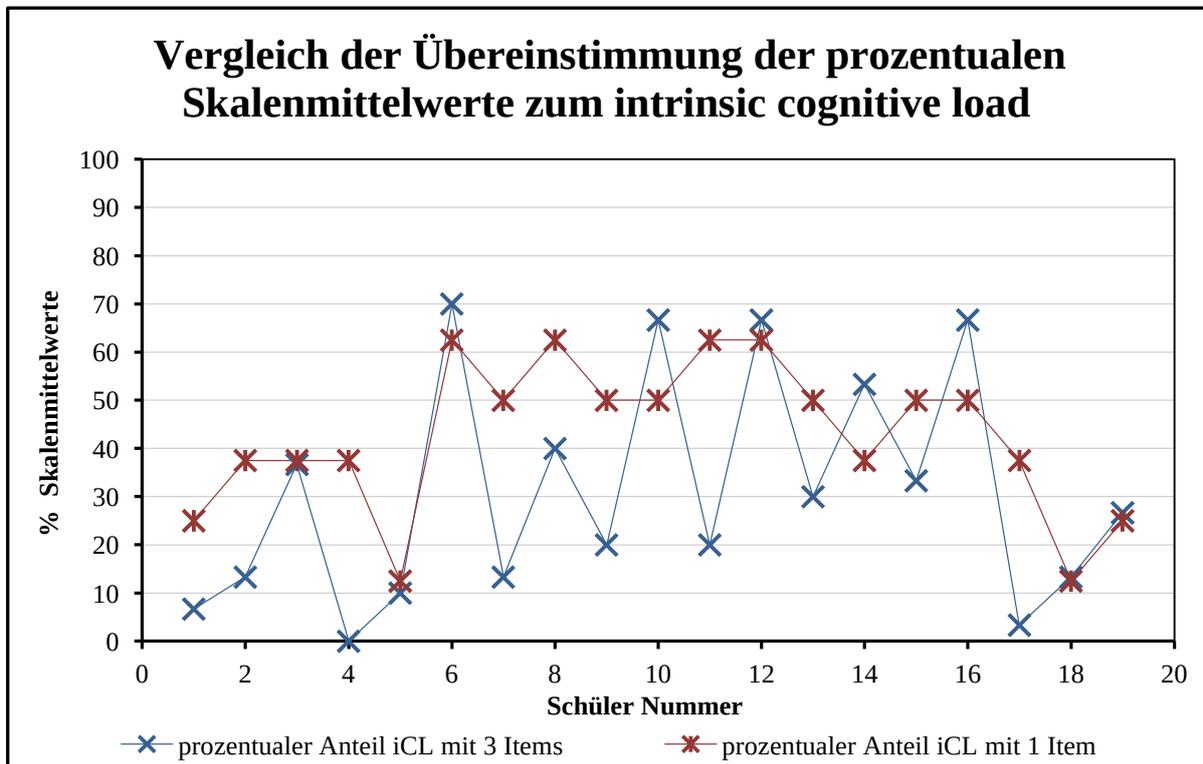


Diagramm 10: Vergleich der Skalenmittelwerte des *intrinsic cognitive load*.

5.1.4 Extraneous cognitive load

Der *extraneous cognitive load* als Anhaltspunkt für die gestalterische Schwierigkeit der Lehrmaterialien fällt mit einem Mittelwert über alle Fragebögen von 1,9 auf der elfstufigen Skala als recht gering aus. Im Mittel scheinen somit keine größeren Schwierigkeiten in Deutung und Verständnis der Lehrmaterialien aus gestalterischer Sicht aufgetreten zu sein. Die fünf Personen der Lerngruppe, welche gemäß Diagramm 11 einen Wert deutlich über dem Mittelwert aller Skalenmittel zugeordnet hat, teilte den *extraneous cognitive load* dennoch der unteren Hälfte der Skala zu. Eine mögliche Schwierigkeit im gestalterischen Verständnis könnte sich aus der Schnittstelle Papier – neue Medien ergeben haben. Eine genauere Einschätzung der kognitiven Beanspruchung durch die Lernmaterialien wird nach der Textoberflächenanalyse möglich sein.

Aus der Betrachtung mit nur einem Item resultiert, wie aus Diagramm 12 hervor geht, erneut eine weniger stark differenzierte und insgesamt geringfügig höhere Wahrnehmung des *extraneous cognitive load*. Ungeachtet dieser im Vergleich deutlich werdenden Verschiebung der Kurven bei prozentualer Betrachtung (Diagramm 13) rangiert der Mittelwert aller Skalenmittel mit 3,3 bei möglicher maximaler Ausprägung von acht in einem als gut zu bezeichnenden Rahmen.

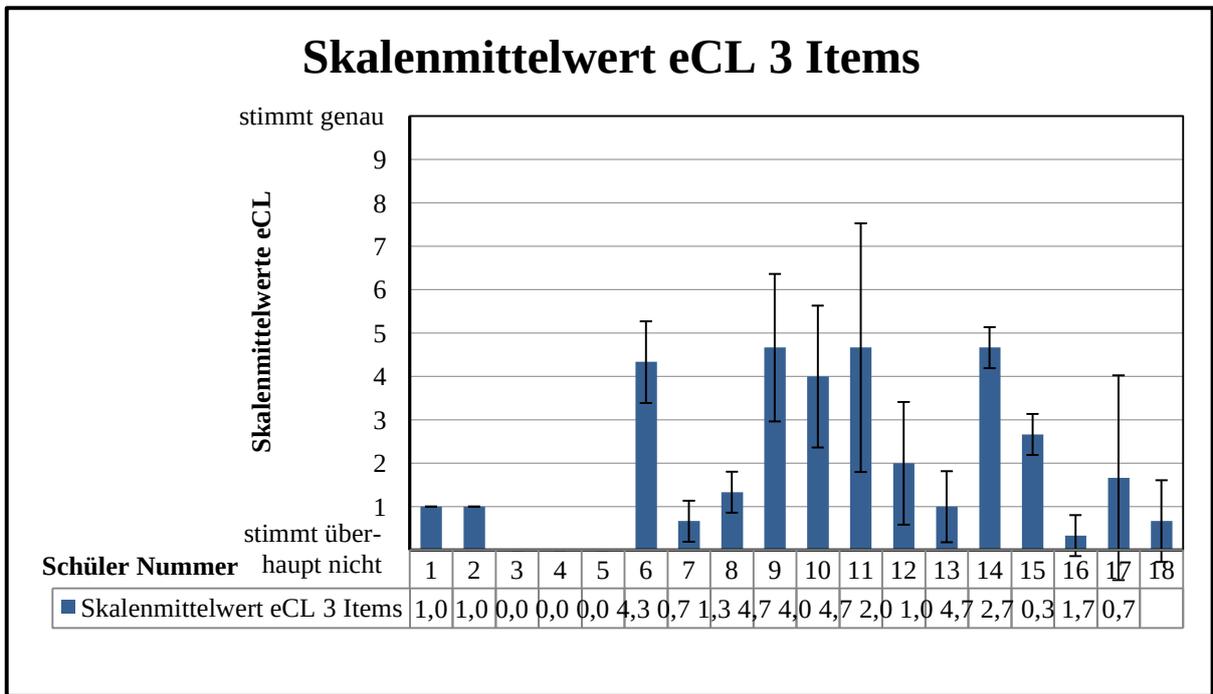


Diagramm 11: Skalenmittelwerte des *extraneous cognitive load* nach Erhebung mit Hilfe von drei elfstufigen Items. Bei zumeist geringer bis mittlerer Streuung zeigen sich niedrige Werte. Ein niedriger Zahlenwert bildet gemäß der eingesetzten Items eine große Unklarheit und mangelnden Nutzen der Instruktionen ab.

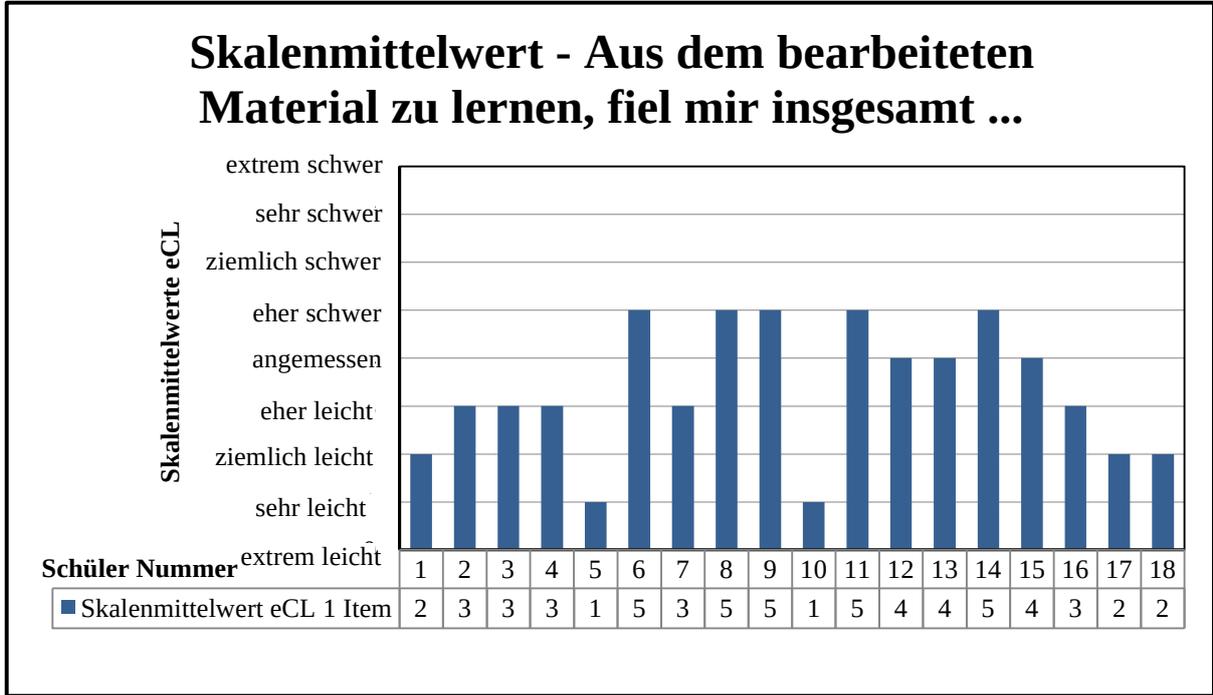


Diagramm 12: Skalenmittelwerte *extraneous cognitive load* nach Erfassung mit einem neunstufigen Item. Hier fällt die weniger differenzierte Betrachtung wertemäßig etwas höher aus als in der vorherigen Skala.

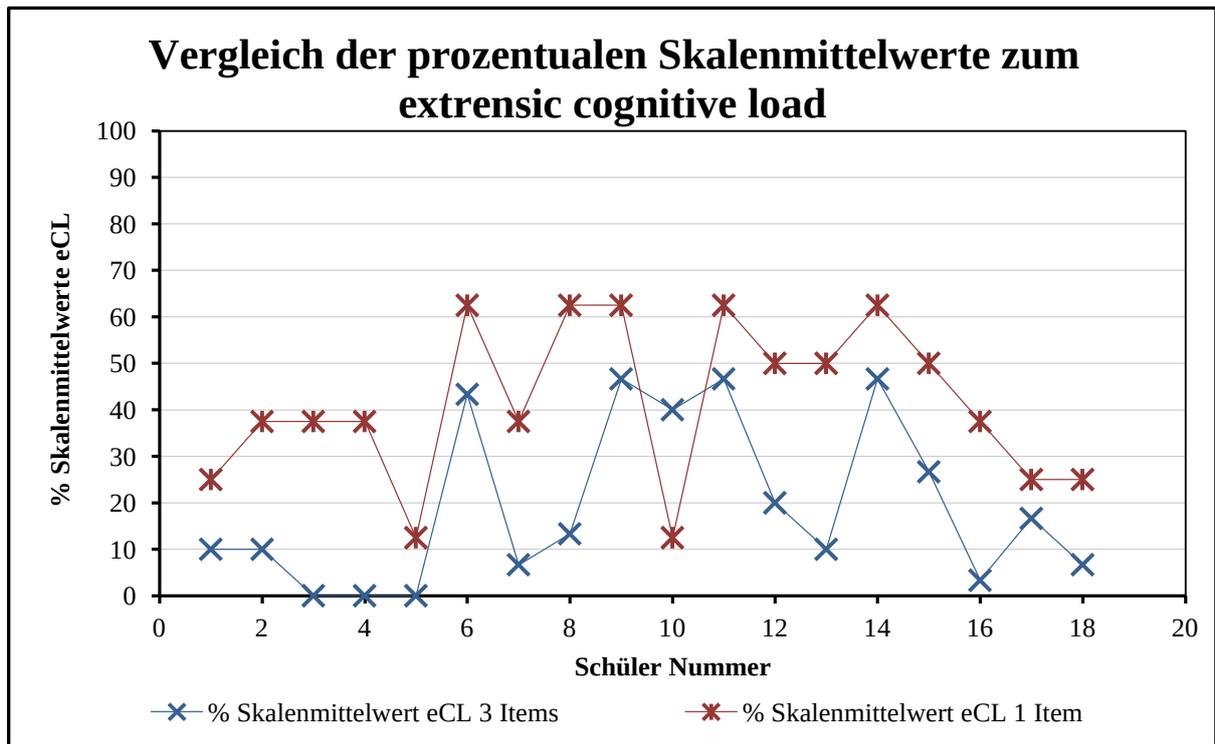


Diagramm 13: Vergleich der Skalenmittelwerte des *extraneous cognitive load*. Die Passung ist hier nur in Teilen gegeben.

5.1.5 Germane cognitive load

Der *germane cognitive load* als Wert der lernbezogenen kognitiven Belastung stellt sich mit einem arithmetischen Mittel über alle Skalenmittelwerte von 5,2 als in der Mitte der Skala gelegen dar. Nach Diagramm 14 wird in der detaillierten Betrachtung deutlich, dass die Wahrnehmung dieser Komponente einer starken schülerspezifischen Schwankung, mit Werten von eins bis größer acht auf der zehnstufigen Skala, unterworfen ist.

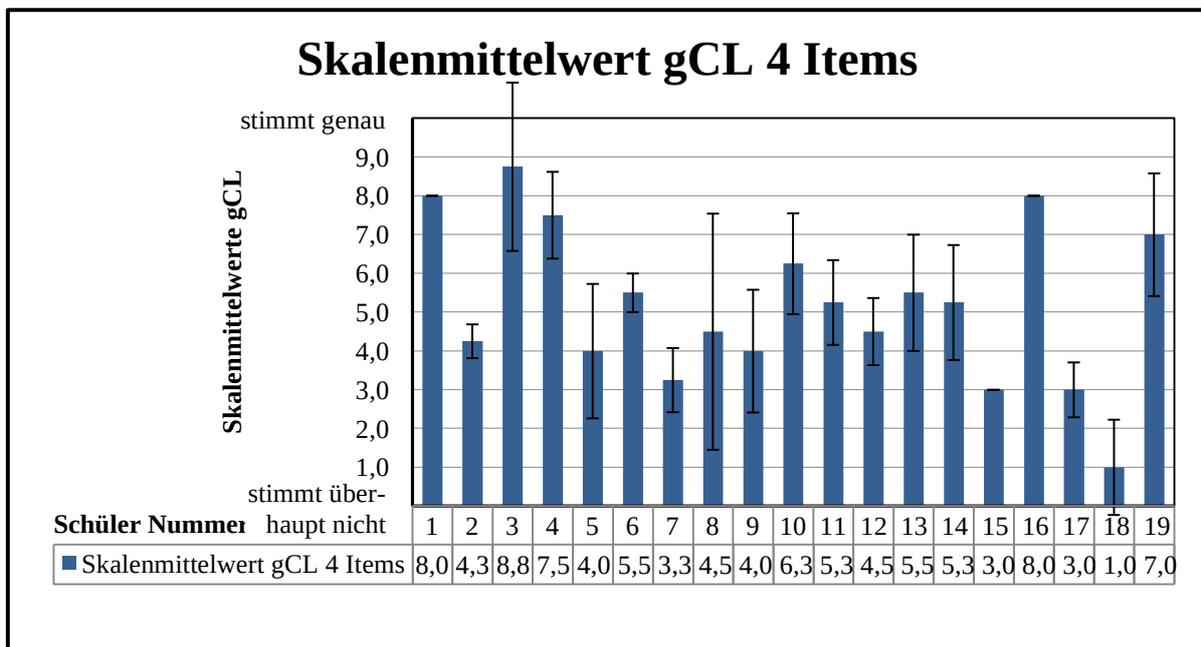


Diagramm 14: Skalenmittelwerte des mit vier elfstufigen Items erhobenen *germane cognitive load*. Bei gemäßigter Streuung rangieren die Werte überwiegend im mittleren Bereich.

Die mittels einstufiger Skala erfassten Werte weisen in Diagramm 15 ebenfalls eine Schwankung der Werte von eins bis sechs auf. Der Mittelwert ist hier mit 3,8 knapp unterhalb der Mitte der achtstufigen Skala im Bereich der Ratingoption 4 „angemessen“ zu finden. Aufgrund der Bedeutsamkeit des *germane cognitive load* als Variable der lernbezogenen geistig-kognitiven Belastung für das Lernen und den Erkenntnis- sowie Kompetenzgewinn, erscheinen die erzielten Werte als überwiegend im Mittelfeld der Skala verzeichnet. Die starke Streuung lässt möglicherweise auf die personalen Eigenschaften, insbesondere die kognitive Leistungsfähigkeit oder Engagement im Sinne der Lerneinheit, der einzelnen Teilnehmer schließen.

Skalenmittelwert - Wie sehr musstest du dich während der Bearbeitung des Lernmaterials konzentrieren?

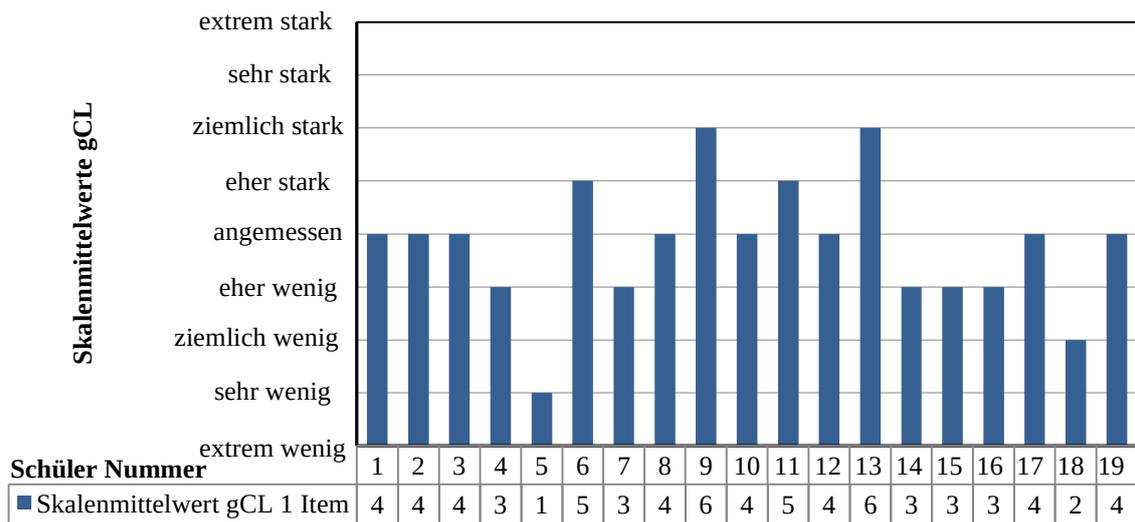


Diagramm 15: Skalenmittelwerte zum *germane cognitive load*, erhoben mit einem Item. Der überwiegende Teil der Schüler ordnete die erforderliche Konzentration zur Bearbeitung den mittleren Ratingoptionen zu.

Bei Vergleich beider Skalen des *germane cognitive load* anhand der prozentual erzielten Skalenwerte bezogen auf den Maximalwert, ist eine in weiten Teilen gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Skalen erkennbar (siehe hierzu Diagramm 16). So weisen knapp zwei Drittel der Wertepaare eine Abweichung kleiner 20% voneinander auf.

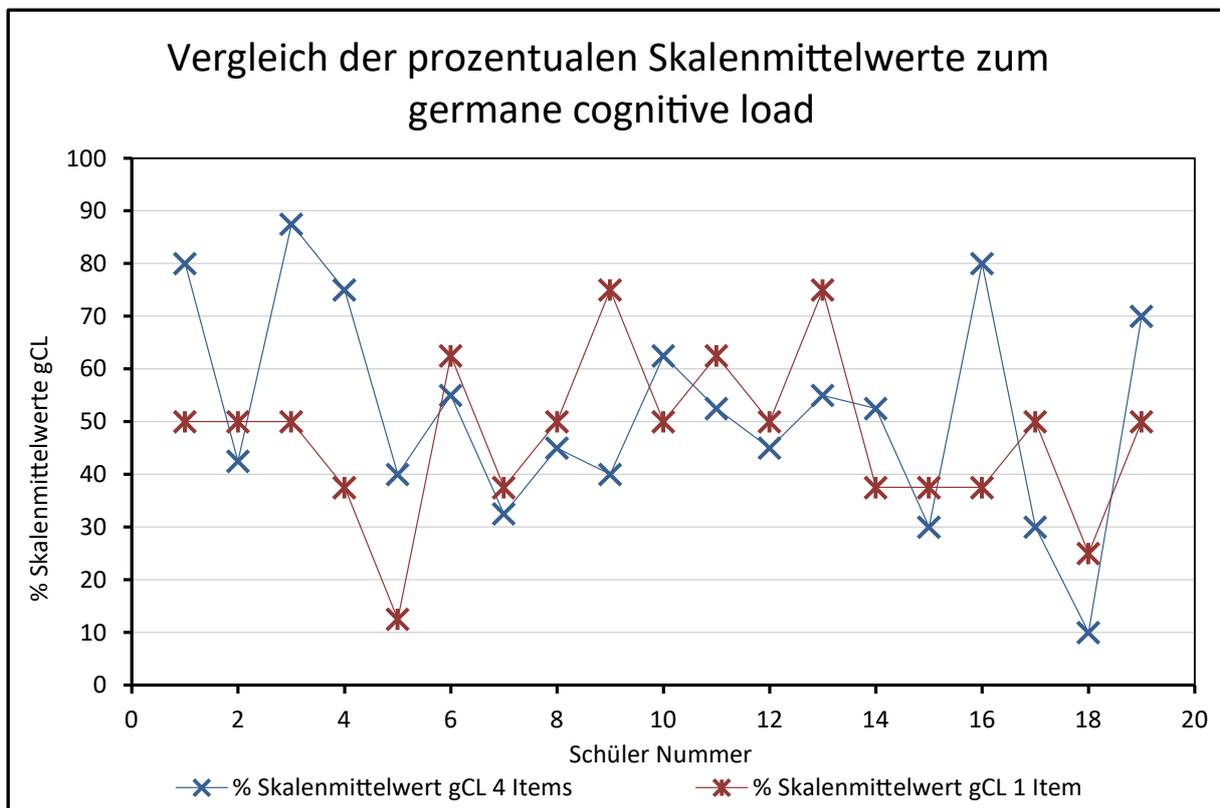


Diagramm 16: Vergleich der prozentualen Skalenmittelwerte der erhobenen Skalen des *germane cognitive load*. In weiten Teilen ist die Passung der Skalen zueinander als gut anzusehen.

5.1.6 Gesamtbetrachtung

Aufgrund der niedrigen Skalenmittelwerte den *intrinsic cognitive load* betreffend, ist hieraus eine geringe „Komplexität der zu lernenden Inhaltsdomäne“ (Scheiter, 2014, S. 328) beziehungsweise ein „in diesem Bereich vorhandene[s] Vorwissen eines Lernenden“ (Scheiter, 2014, S. 328) abzuleiten. Die resultierende Elementinteraktivität ist damit letztlich geringer, die Inhalte werden ohne größere Hindernisse erfasst. Somit ist ein geringer Wert für den *intrinsic cognitive load* anzustreben. Dieses Ziel wurde nicht bei allen Schülern gleichermaßen erreicht. Schlussendlich bleibt die Frage, ob der *intrinsic cognitive load* im Sinne einer wie hier vorgestellt geplanten Einheit, welche die Einführung neuen Wissens und neuer Kompetenzen abbilden soll, tatsächlich noch stärker reduziert werden könnte. Als neues Verfahren mit einhergehendem Kompetenzerwerb scheint die Implementation der neuen digitalen Messverfahren dem entgegen zu stehen. Dies als Hindernis der vollständigen Reduzierung des *intrinsic cognitive load* angenommen, resultiert daraus ein schadhafter Einfluss auf den übergeordneten *cognitive load*. Durch die vorgenannte geringe Ausprägung im Mittel sowie die Zielsetzung der Einheit und den beabsichtigten hohen Grad der Interaktivität (Jong, 2010, S. 106) ist dies zu erklären.

Die geringen bis sehr geringen (Erhebung mit 3 Items) Skalenmittelwerte zum *extraneous cognitive load* stellen ein überaus wünschenswertes Ergebnis dar. Als Instrument zur Erfassung der durch die Materialien und Anweisungen selbst erzeugten kognitiven Beanspruchung stellt dieser keinerlei zuträglichen Mehrwert dar (Jong, 2010, S. 108). Gängige, aus der *cognitive load theory* abgeleitete, lernhinderliche Effekte werden nachfolgend beschrieben und auf die Auswertung angewendet. Das Redundanz-Prinzip, nach welchem durch redundant präsentierte Informationen, etwa schriftliche Informationen gedoppelt mit einem Video, eine erhöhte kognitive Belastung entsteht, scheint aufgrund der Konzeption keine Rolle zu spielen (Jong, 2010, S. 108). Im Zuge der Konzeption wurde ausschließlich schriftlich instruiert, wodurch dieser Einfluss entfiel.

Da weiterhin in der Konstruktion der Materialien großer Wert auf die Integration von Bild und Text gelegt wurde, insbesondere die Anleitungen zur Bedienung der Messgeräte und der App wurden bebildert beschrieben, ist auch von einer grundlegend geringen Beeinflussung durch den split-attention-Effekt auszugehen. Dieser käme entsprechend zum Tragen, wenn Bilder und Text räumlich oder zeitlich voneinander separiert präsentiert würden. (Gerjets et al., 2009, S. 52) Da dies nicht der Fall ist, kann dieser Einfluss vernachlässigt werden, gleichwohl er als Kriterium zur Überprüfung der vollständigen Integration von Bild und Text in der Überarbeitung dienen kann.

Die erhobenen Skalenmittelwerte für den Parameter *germane cognitive load* liegen im Gesamtmittel im mittleren Bereich der Skala. Dies stellt eine wünschenswerte Abbildung der Zielstellung dar, derzufolge ein hoher mittlerer bis hoher Wert für den *germane cognitive load* anzustreben ist (Scheiter, 2014, S. 328). Hinsichtlich dieser Forderung scheint die Konzeption noch optimiert werden zu können, da lediglich Werte im mittleren Skalenbereich zu berichten sind. Dennoch sollte das gesamte Spektrum des *cognitive load* nicht vergessen werden. Da der *cognitive load* als Belastung des Arbeitsgedächtnisses angesehen wird, kann eine Erhöhung dieser Belastungen nur bedingt erfolgen. Während *intrinsic* und *extraneous cognitive load* im Sinne der *cognitive load theory* zu reduzieren sind, sind in der Folge Kapazitäten für kognitive Prozesse der Bildung und Abstraktion von Schemata und der bewussten kognitiven Bearbeitung (*germane cognitive load*) freizugeben (van Merriënboer et al., 1998, S. 264). Dennoch ist die Frage, ob eine Maximierung des *germane cognitive load* zu favorisieren sei, nicht eindeutig geklärt. So schlagen van Merriënboer et al. etwa die Reduzierung von *extraneous cognitive load* und die Erhöhung des *germane cognitive load* „innerhalb der Grenzen der insgesamt verfügbaren kognitiven Kapazität [übertragen aus dem Englischen]“ (van Merriënboer et al., 2002, S. 12) vor. Eine Austestung der Grenzen des Arbeitsgedächtnisses

erscheint jedoch wenig erstrebenswert, da sich bei einer Überlastung desselben der angestrebte *germane cognitive load* effektiv als der nicht produktive *extraneous cognitive load* darstellen und die Lernprozesse negativ beeinflussen kann (Kalyuga, 2007, S. 527). Somit erscheint im ersten Schritt eine mittlere oder angemessene Ausprägung dieser Variable als sinnvoll.

Als zweite getestete Variable lässt sich das aktuelle Interesse als überdurchschnittlich (Skala mit 11 Items, Mittelwert 1,85 auf vierstufiger Skala mit Ratingoptionen 0 - 3) bei überdurchschnittlich positiver Befindlichkeit der Teilnehmer (Skala mit einem Item, Mittelwert 4,2 auf sechsstufiger Skala mit Ratingoptionen 0 - 5) beschreiben. Die Interessenslage ist folglich als akzeptabel, aber noch optimierbar anzusehen. Gleichwohl sollten zum aktuellen Interesse auch die Rahmenbedingungen der Testung berücksichtigt werden. Da die Einheit am späteren Freitagnachmittag stattfand und zeitlich als Hürde zwischen den teilnehmenden Schülern und dem verdienten Wochenende angesehen werden kann, sollte dies mit in die Betrachtung einfließen.

Die Auswertung der offenen Items zeigte die in Tabelle 3 wiedergegebenen Äußerungen. Insgesamt sechs Mal wurde das Item nicht beantwortet.

Tabelle 3: Antworten zum offenen Item der Frage nach dem Fokus des Tages. Die Messungen und Arbeit an der Queich wurden häufig als Hauptpunkt genannt.

"Erkenntnisse über die Queich zu erlangen"
"Sauerstoffgehalt messen..."
"technische Umsetzung der Messung"
"Das Lernen des Bedienens der Geräte"
"Sauerstoffgehalt des Wassers + Kalibrierung bei Problemen mit Elektroden"
"Kalibrierung, Sauerstoffgehalt d. Wassers"
"die Queich"
"Messungen durchführen, Queich"
"Queichwasser"
"die Queich"
"Erlangen eigener Erkenntnisse" (durchgestrichen: "die angewandte Entdeckung eigener Erke")
"Gewässer besser kennen zu lernen und zu untersuchen was man im "normalen Unterricht" sonst nicht macht"
"die Arbeit in der Natur"
"die praktische Arbeit"

Das Freitextfeld „Platz für sonstige Anmerkungen“ wurde von 15 Teilnehmenden nicht ausgefüllt und von vier Personen mit einer Markierung zur Indikation keiner Anmerkungen

(Schräg- oder Querstrich) versehen. Die einzige zum Ausdruck gebrachte Anmerkung war positiver Natur: "keine, gerne nochmal".

5.2 Ergebnisse der Videoanalyse

Bei Betrachtung der Daten der Videoanalyse zeigte sich, wie in Diagramm 17 grafisch verdeutlicht, zunächst eine deutliche Diskrepanz hinsichtlich der Wahl des Adressaten auftauchender Frage- oder Problemstellungen. So wurden von 108 insgesamt erfassten Fragestellungen der Schüler lediglich acht an die anwesenden Lehrkräfte gerichtet, wohingegen die überwiegende Mehrzahl von 100 Fragen an die übrigen Gruppenmitglieder gerichtet wurde. Als Lehrkräfte wurden in diesem Zusammenhang die Chemie-Lehrkraft sowie der Durchführende der Lerneinheit angesehen.

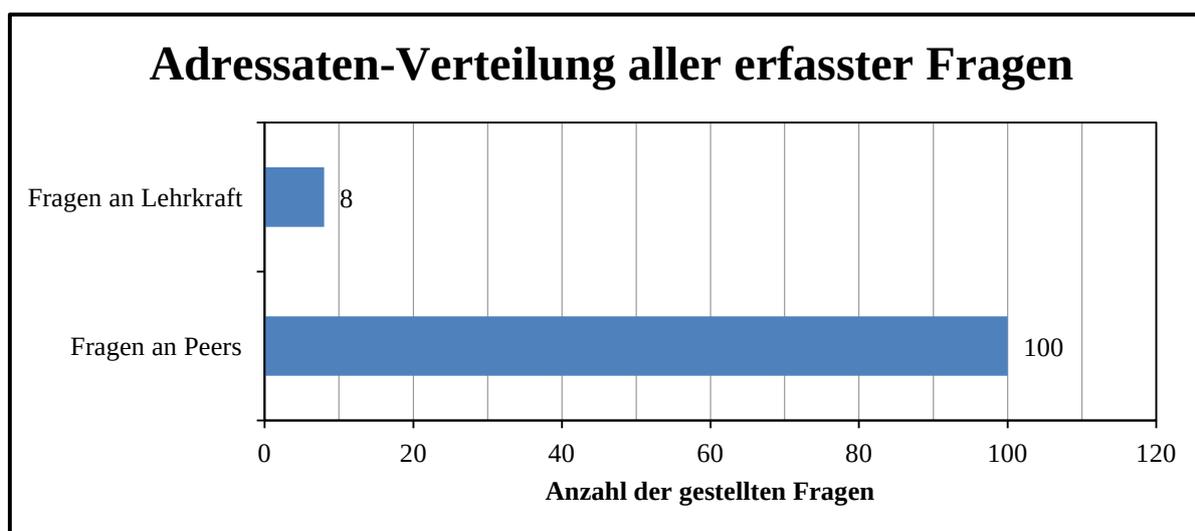


Diagramm 17: Häufigkeitsverteilung der kategorisierten Fragen in Bezug auf die Adressatenwahl. Von insgesamt 108 erfassten Fragen wurden 100 an übrige Teilnehmende gerichtet. Demgegenüber stehen acht an Lehrkräfte gerichtete Fragen.

Die möglichen Gründe für die jeweilige Wahl des Adressaten mögen vielfältig sein. Zunächst einmal sei auf das eindeutige personelle Ungleichgewicht von zwei Lehrkräften für die gesamte Lerngruppe zu sechs oder mehr Schülern je Gruppe hingewiesen, woraus sich eine Verschiebung der Redeanteile hin zu den Teilnehmern, wie im Unterricht auch durchaus erstrebenswert, logisch erschließen lässt. Desweiteren kam insbesondere bei der für längere Zeit videografierten Gruppe die räumliche Aufteilung in der Freilandarbeit zum Tragen, wodurch über längere Zeiträume als im Rahmen einer Gruppenarbeit im Klassensaal üblich, keine Lehrkraft lokal greifbar war. Ebenfalls dürften die Prägungen der gesprochenen Sprache und Kommunikationskultur sich hier widerspiegeln, da Frage und Antwort strukturell immanente Komponenten der gesprochenen Sprache sind.

Von diesen üblichen ersichtlichen Faktoren abgesehen, zeigt sich ein beeinflussender Faktor in der Gesprächsführung im Setting Unterricht, welche bei auftretenden Problemstellungen meist durch eine fragend-entwickelnde Herangehensweise der Lehrkraft gelenkt wird (Gonschorek & Schneider, 2010, S. 254). Dies trägt der klassischen Rollenverteilung zwischen Lehrkraft und Schülern Rechnung, sowie dem damit verbundenen vertiefenden Wissen, welches die Lehrkraft meist zu vermitteln sucht. Gleichzeitig kann die Herangehensweise der Schüler als fortgeschrittene Methode zum Umgang mit fachlichen Unklarheiten angesehen werden. Demnach werden zunächst die Mitglieder der Peer-Gruppe befragt, bevor gegebenenfalls die Lehrkraft um Rat gefragt wird. Wie bereits Obst et al. (2000) feststellten, weichen Schüler in eigenständigen Arbeitsphasen von vorgegebenen Anleitungen ab und versuchen Variationen und Neuerungen zu testen, woraus vermehrte Fragen resultieren können (Obst et al., 2000, S. 52). Insgesamt ist dieses Ergebnis – wenngleich die deutlichen zahlenmäßigen Unterschiede erstaunen mögen – als wenig überraschend, und mehr noch als positiv einzuschätzen, da es auf eine gesteigerte Problemlösekompetenz hinweist.

Bei Betrachtung der in Diagramm 18 abgebildeten Häufigkeitsverteilung hinsichtlich der vier Hauptkategorien Informations-, Konfirmations-, Verfahrens- und anderer Fragen, zeigt sich bei insgesamt 108 kategorisierten Fragen die Verfahrensfrage mit über 50% Anteil als hauptsächlich repräsentierte Fragekategorie. Mit rund einem Drittel Anteil an der Summe aller erfassten Fragen sind die Informationsfragen vertreten. Die Häufigkeiten der Konfirmationsfragen (zwölf Stück) und der anderen Fragestellungen (fünf Stück) erscheinen dagegen weniger relevant.

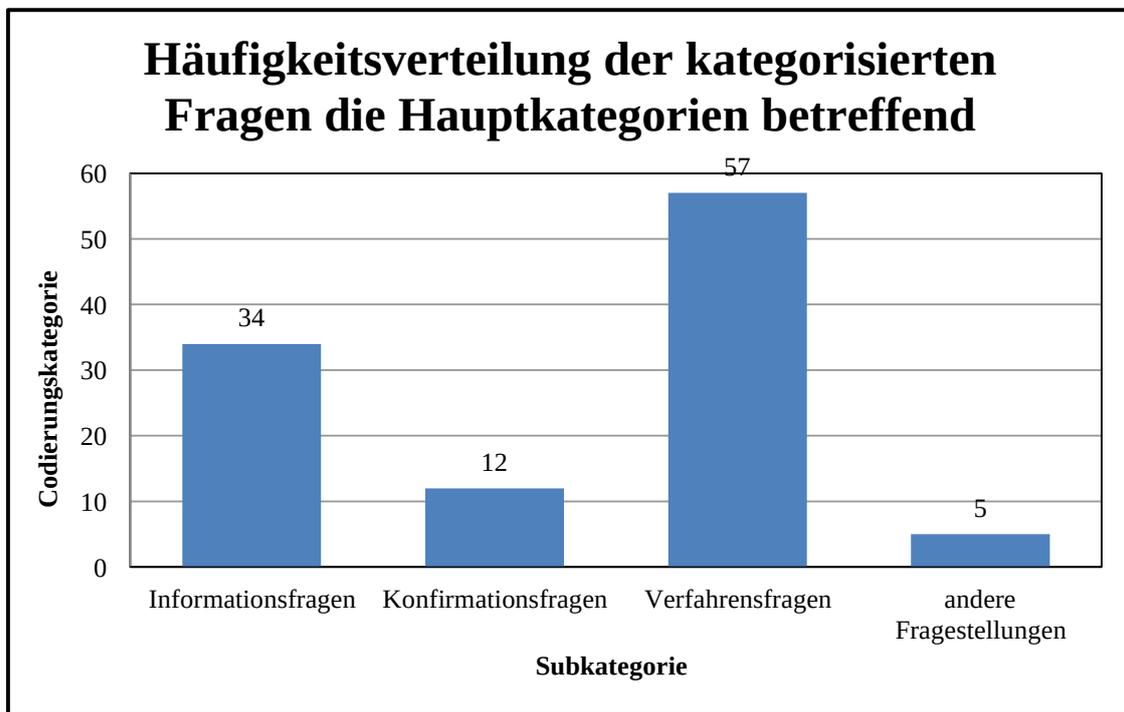


Diagramm 18: Häufigkeitsverteilung der erfassten Hauptkategorien der Videoanalyse. Eine deutliche Diskrepanz zwischen Verfahrensfragen als meist aufgetretenen und Konfirmations- oder anderen Fragen als am seltensten codierte Frageformate wird erkennbar.

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich ein hoher Klärungsbedarf auf die verfahrenstechnischen Fragen der Einheit seitens der Schüler ableiten. Dies mag einerseits mangelnder Klarheit der Instruktionen und Anleitungen geschuldet sein, jedoch gilt es gleichermaßen die fehlenden Vorerfahrungen der Schüler die Arbeit im Freiland betreffend zu berücksichtigen. Durch letztgenannten Punkt traten einige Fragestellungen auf, welche hier als Verfahrensfrage auftauchen, jedoch einer weiteren Betrachtung durch die Subkategorien sowie gegebenenfalls das Teiltranskript bedürfen, um eine klare Zuordnung zur Art der Verfahrensfragen zuzulassen. Ähnliches gilt für die Bedeutsamkeit der Häufigkeit der Informationsfragen. Unstrittig lässt sich hingegen festhalten, dass angesichts des geringen Anteils an Konfirmationsfragen von knapp über 10% nur wenige Rückfragen auftraten, welche im Ansatz oder gar im Kern von den Schülern bereits beantwortet werden konnten und lediglich der Verifikation bedurften. Folglich ließe sich ableiten, dass, eingedenk der thematischen Vorbereitung der Test-Stunde im Unterricht, die Schüler sich dennoch mit einer neu orientierten Fragestellung und Arbeitsweise konfrontiert sahen, welche sie zu Rückfragen hinsichtlich des genauen Vorgehens (Verfahrensfragen) oder zum Einfordern kompletter Ansätze (Informationsfragen) verleiteten. Bei der Auswertung der Kategorie „andere Fragestellungen“ unter Zuhilfenahme des Transkripts wurde deutlich, dass diese Fragen überwiegend nicht geeignet sind, den Unterrichtsverlauf inhaltlich zu beeinflussen und größtenteils als Ablenkung durch äußere Einflüsse oder private Gesprächsfetzen zu erfassen sind.

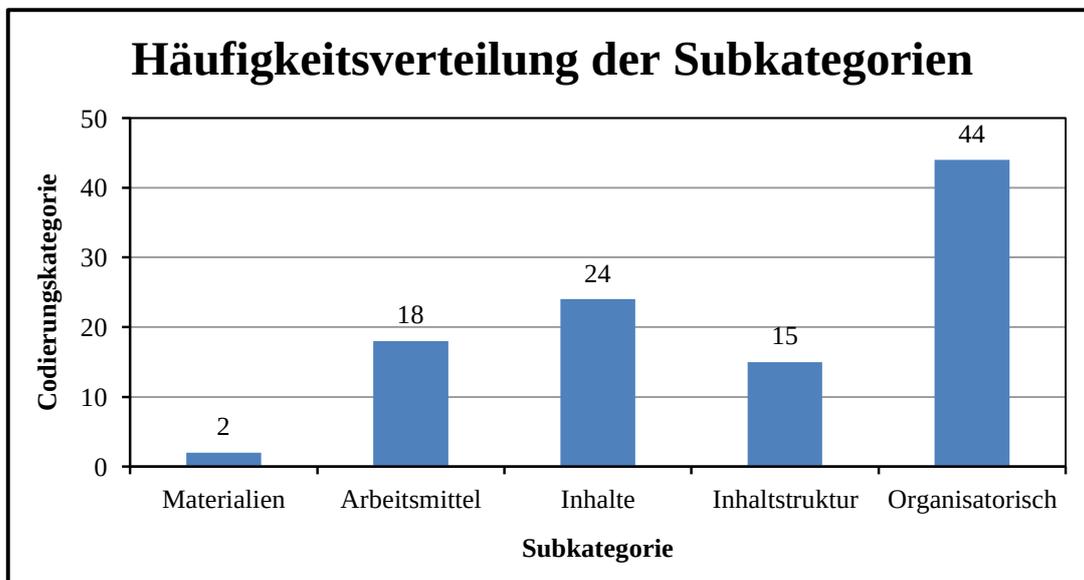


Diagramm 19: Häufigkeitsverteilung aller Fragen über die Subkategorien. Der überwiegende Teil der aufgetretenen Probleme war organisatorischer Natur, in deutlichem Abstand gefolgt von Fragen zu Inhalten.

Eine nähere Betrachtung der Transkripte hinsichtlich der Fragen zu den Arbeitsmitteln macht deutlich, dass den Schülern allen voran der Zusammenbau der Arbeitsmittel teilweise unklar war. So kam beispielsweise die Frage auf: „Diese Abstandshalter, wie viele sollen wir da dran bauen?“. Da der Zusammenbau der Messgeräte als selbsterklärend durch die Lehrkraft eingestuft wurde, wurde auf eine Anleitung zum mechanischen Zusammenbau der Messgeräte verzichtet. An dieser Stelle gilt es zu überlegen den Schülern eine ausführlichere Beschreibung zur Verfügung zu stellen.

Ebenso erwies sich, dass die zuvor ausgehändigten Arbeitsblätter bezüglich der Messverfahren einige Fragen offen ließen. Insbesondere die Verfahrensabläufe waren den Fragen der Schüler nach zu urteilen nicht eindeutig, beziehungsweise zu komplex, formuliert. Ein Dialog zwischen zwei Schülern zeigte zum Beispiel, dass die Tabelle zur Berechnung der Sauerstoffsättigung nicht ausreichend erläutert ist:

Schüler A: „Ja gut, wie mach ich das jetzt zur Sättigung?“

Schüler B: „Keine Ahnung, mit der Tabelle.“

Hauptausgangspunkt der Unklarheiten war die Kalibrierung der Messgeräte. Besonders aussagekräftig war hierbei ein Dialog zwischen zwei Schülern, der dieses Problem kurz und bündig aufgreift.

Schüler A: „Woher weißt du jetzt, dass du da Null eingeben musst?“

Schüler B: „Damit s kalibriert“

Schüler A: „Also gibst einfach Null ein? Weil bei den andern stand ne bestimmte... ah ja stimmt! Da stand n bestimmter Messwert drauf, den Sie eingeben müssen.“

Weitere auftretende Fragen seitens der Schüler belegten, dass zu wenige Informationen der Arbeitsblätter verarbeitet wurden. Oftmals wussten die Schüler nach durchgeführter Messung nicht, was genau sie eben gemessen oder ob sie die Messung korrekt durchgeführt hatten.

Schüler A: "Das Blöde is halt, dass ich nie hab was ähm ... also ich hab zwar jetzt die Werte und so gespeichert, aber ich weiß nicht worums da ging. Das is blöd."

Sinnstiftende und kognitiv aktivierende Unterhaltungen kamen exemplarisch durch den Austausch über Gewässerbedingungen und Messstelle zustande. Die Unterhaltung fand in diesem Fall innerhalb einer Schülergruppe statt. Auf die Personenzuordnung wird hier verzichtet.

"Hä das ist doch nicht das Rückkehr-Ding oder? [meint Kehrwasser/ Rückströmung]"

"Da ist doch Rückkehr oder nicht?"

"Daaaa, hier ist Rückkehr. Ich weiß es nicht." - "Ist da die Rückkehr?"

"Stop, wie viel war s jetzt, [Name der Schülerin]?"

"Hä nein, da ist doch die Rückkehr, hier der Strudel."

"Hä, wo sollen wir denn? Da is aber nix." - "Ja da wo s zurück kommt, s Wasser. Bisschen näher an den Strudel."

"Seht ihr das nich?" - "Nää. Da?" - "Nein, bisschen weiter nach links noch. Links und tiefer. Genau da. Oder [Name der Schülerin]?" - "Keine Ahnung!" - "Ja natürlich! Kuck, hier und dann geht das doch so wieder raus." - "Ja hier is ja die Linie." - "Mess einfach mal."

"Sau schwach, 0,1. 0,01 soar." - "Plus oder Minus?" - "Plus." - "Heb mal in die andere Richtung." - "und jetzt?" - "Mhh bisschen höher aber immer noch 0, ... nee geht wieder runter auf 0,1. 0,01."

"Des gäb doch keinen Sinn, warum soll s n Minus-Strömung geben?" - "Hä natürlich gibt des Sinn"

"Mach mal hier, ob hier Null is." - "Da wird's ja auch wieder so n mini mini mini" -
"STOP, Kabel verheddert sich!" - "Der hat doch überhaupt kein... geh mal wirklich da
an den Rand." "Bin ich doch." - "Ne, richtig noch eins." - "ha da is ja gar nichts." - "Ja
deshalb will ichs ja." - "Da is ja auch nix." - "Weil ich will *auf Null* kommen."

"Was zeigt es an?" - "Des Ding dreht sich nicht."

"Hä da is doch gar kein Strom." - "Wie viel zeigtn des an?" - "0,1 ... 0,01"

"Ne wir müssen ja andersrum rein heben." - "Ja." - "Ja. Guck, wir steigen jetzt auf.oah
oah oah oah oah oah." - "Wie viel ham wer?" - " Jetzt geht's ab." - "Warte, es steigt
noch, es steigt noch es steigt noch."

Auch durch gegenseitige Instruktion und Erörterung konnten Unklarheiten so aufgelöst werden. Exemplarisch an der Kalibrierung des Sauerstoff-Sensors.

"Wie bist du jetzt auf den Wert gekommen, den du da rein machst?" - "Der steht da in
der Tabelle drin" - "Bei 26 Grad, ah ja [erkennend]. Ah ja, und wenn des ... des heißt
du gibst den Wert hier ein, den er bei 26 Grad hat [intonierte Frage]. Waren die
[Kalibrierstandards] da mit drin?" - "ja" - "gut"

"Ne, der [O₂-Gehalt] steigt noch [Name der Schülerin], der steigt grad noch n bisschen.
Jetzt hat er s. Ah doch. Bei genau 3." - "3 Prozent [korrekt wäre mg/L]." - "und
fällt wieder. - - - wie viel Grad sinds denn?" - "So ... - 15? Dann sinds glaub ich 14...
14 Grad."

"Wie viel Grad hat denn das Wasser?"

"Hä, aber jetzt ist der Wert wieder höher, was macht n des für n Sinn?" - "Der is
Wieder weiter runter, der ist jetzt bei zweieinhalb, nicht mehr bei dreieinhalb. Weil die
Sauerstoff-Sättigung sobald des Wasser steht nicht mehr ganz so hoch ist. Deshalb
macht des fast mehr Sinn, wenn wir da mit allem an die Queich latschen und des rein
halten." - "[seufzen] jaa, dann latschen wir halt an die Queich, was soooolllls."

Letztlich waren technische Schwierigkeiten der größte Unsicherheitsfaktor für die Teilnehmenden. Dies zeigte sich auch in der Eins-zu-eins-Situation:

"Jetzt muss nur noch die App wollen"

5.3 Lesbarkeitindex (LIX)

Tabelle 4 stellt die Kennwerte, welche die Grundlage der Berechnung des LIX bilden, sowie die jeweiligen LIX der einzelnen Instruktionstexte der Lehrmaterialien dar.

Tabelle 4: Kennwerte der Textoberflächen und LIX der einzelnen Instruktionstexte.

Text	Wörter	Sätze	Satzlänge	% lange Wörter	LIX
Bedienung MiLab	217	20	10,9	39,6	50,5
Messung Fließgeschwindigkeit	375	28	13,4	38,4	51,8
Messung Ionen	604	47	12,9	36,1	48,9
Messung Leitfähigkeit	349	27	12,9	35	47,9
Messung Sauerstoff	464	36	12,9	39	51,9
Messung pH	320	23	13,9	36,9	50,8
Sensorische Beurteilung	427	33	12,9	41,7	54,6

Diagramm 20 zeigt die Lage der LIX-Werte der Instruktionstexte vor der Überarbeitung. Alle Texte liegen im mittleren Schwierigkeitsbereich, Die höchste Schwierigkeit gemessen am LIX weist der Text zur sensorischen Beurteilung auf, die niedrigste derjenige zur Messung der Leitfähigkeit. Alle Texte sind somit im mittleren Bereich (siehe Abbildung 9) den Schwierigkeitsgrad betreffend. Veränderungen der Textstruktur sind somit aus Sicht der Oberflächeneigenschaften als nicht bis marginal notwendig zu betrachten, da gemäß den LIX-Werten die Text für die Zielgruppe der Oberstufe adressatengerecht formuliert wurden.

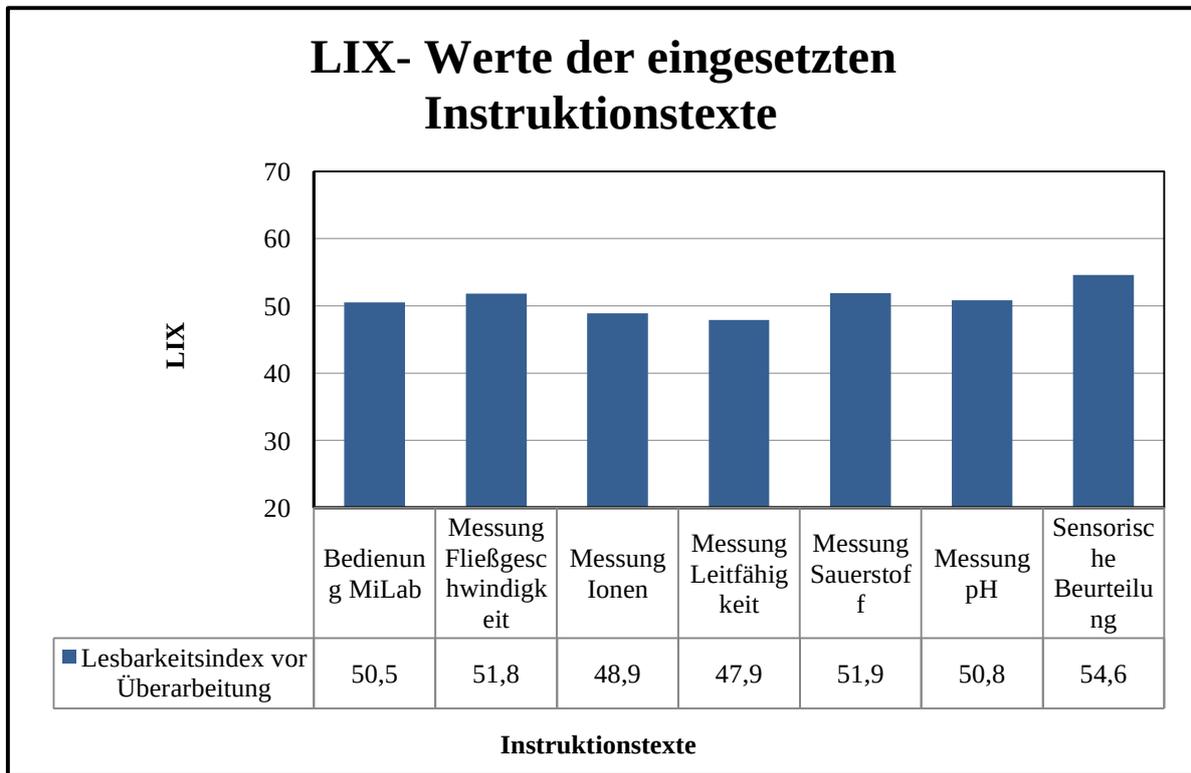


Diagramm 20: Lesbarkeitsindex der Instruktionstexte vor Überarbeitung. Mit nur geringer Schwankungsbreite liegen alle Texte im mittleren Schwierigkeitsbereich.

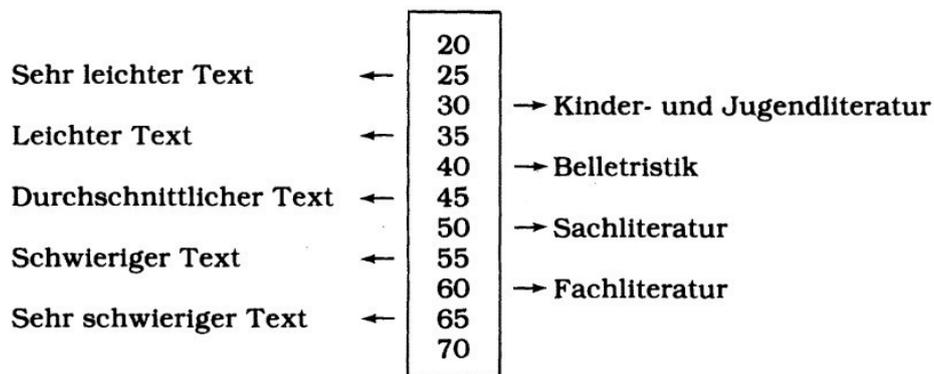


Abbildung 9: Schwierigkeits-Skala des Lesbarkeitsindex (LIX) nach (Renström, 1980, S. 153)

5.4 Überarbeitung der erprobten Einheit

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Ergebnisse aus der Erprobungsphase wurde die Konzeptinheit anschließend überarbeitet. Als zentral wurden diesbezüglich die Lehrmaterialien betrachtet. Im Fokus stand einerseits die weitere Reduzierung des *extraneous cognitive load*, wodurch einer Bindung kognitiver Kapazitäten für das reine Verstehen der Instruktionen und Anleitungen entgegengewirkt werden sollte (Kölbach, 2011, S. 36–37). Andererseits wurde

eine optimierte Problematisierung und die Darlegung eines Alltagsbezug der Inhalte angestrebt, um so die Interessenslage der Schüler weiter zu verbessern. Die so erzeugte Interessenslage soll die „synthetische Wirklichkeit“ (Müller, 2006, S. 1) durchbrechen und einen Zugang zu den Inhalten erleichtern. Als konkrete Bezugspunkte diente neben den videografierten Problemstellungen während der Bearbeitung die in Abbildung 10 gezeigte „Checkliste zur Optimierung von multimedialen Arbeitsblättern“ (Emden, 2016, S. 55).

Datum:	Checkliste zur Optimierung von multimedialen Arbeitsblättern			Arbeitsblatt:
Klasse:				
	+	0	-	Mögliche Konsequenzen
Multimediaprinzip				
(1) Sind <u>auf den Inhalt bezogene</u> Abbildungen vorhanden?				0: Abb. prüfen auf Alternativen -: Abbildungen entfernen
(2) Sind Abbildungen bekannt, die auf den Inhalt bezogen werden können?				+: Abbildungen einbinden 0: ggf. neue Abb. recherchieren
Kohärenzprinzip				
(3) Sind Text- und Bildinformation aufeinander bezogen?				0: Bezüge deutlicher herstellen, Information ggf. tilgen -: Bezüge herstellen/Information tilgen (<i>seductive detail</i>)
(4) Gibt es unnötige/ablenkende Information in Text- oder Bildform? (<i>seductive detail</i>)				+: Ablenkende/unnötige Information tilgen 0: Information prüfen, ggf. tilgen
Prinzip der räumlichen Nähe				
(5) Stehen aufeinander bezogene Bild- und Textinformation dicht beieinander?				0: Räumliche Nähe deutlicher herstellen -: Räumliche Nähe herstellen
(6) Sind Bildinformationen durch erläuternde Einträge im Bild ergänzt? (<i>split attention</i>)				0: Möglichkeit f. bessere Integration prüfen/ergänzen -: Legende anlegen / in Abbildung hineinschreiben
Signalgeberprinzip				
(7) Ist der Arbeitstext in Sinneinheiten gegliedert?				0: Gliederung ausschärfen -: Gliederung vornehmen
(8) Sind die Gliederungsebenen mit sinnvollen Überschriften versehen?				0: Überschriften an eigene SuS anpassen -: Überschriften ergänzen
(9) Sind wichtige Fachbegriffe und/oder Zusammenhänge kenntlich gemacht? (Emphase)				0: f. eigene SuS unnötige Emphase tilgen, wesentliche Emphase ergänzen; -: f. eigene SuS wesentliche Emphase ergänzen
(10) Ist der Umfang an gewählten Signalgebern überschaubar?				0: Signalgeber reduzieren -: Signalgeber neu konzipieren
Segmentierungsprinzip				
(11) Werden komplexe Abläufe in Einzelschritten dargestellt?				0: Prüfen, ob entsprechende Darstellung notwendig ist, ggf. ergänzen -: Darstellung ergänzen
Personalisierungsprinzip				
(12) Werden Lernende direkt angesprochen?				-: Man-Formulierungen → Du-Ansprachen
(13) Werden dialogische Redemittel eingesetzt?				-: Ggf. adaptieren, bei Verzicht auf Du-Ansprache

Abbildung 10: "Checkliste zur Optimierung von multimedialen Arbeitsblättern" nach (Emden, 2016, S. 55)

Arbeitsblatt zur Messung der Fließgeschwindigkeit

Die multimediale Ausrichtung des Arbeitsblattes zur Fließgeschwindigkeits-Messung wurde durch die Ergänzung weiterer inhaltsbezogener Abbildungen gestärkt. Insbesondere die aufgetretene Frage nach der Auswahlmöglichkeit für den jeweiligen Sensor wurde dabei berücksichtigt. Wenige nicht erforderliche Informationsteile wurden getilgt, um so eine höhere Kohärenz zu erreichen. Das Prinzip der räumlichen Nähe wurde auch bei den neu eingefügten Abbildungen berücksichtigt. Die Segmentierung der Durchführungs-Anleitung wurde geschärft und die Reihenfolge des Aufbaus korrigiert. Die zuvor erstgenannte Auswahl des Sensors kann korrekterweise erst nach Verbindung mit dem Messsystem erfolgen. Signalgeber wurden wie mit der Checkliste in Koenen et al. (2016, S. 75) erfasst, reduziert (allgemeiner Hinweis zu Arbeiten am Wasser) und selektiver eingesetzt (Hervorhebung von Stichworten, welche häufig nicht ausreichend wahrgenommen wurden). Der Personalisierung schien mit Ausnahme der Problematisierung bereits ausreichend Rechnung getragen. Ferner wurden Sachinformationen zur Deutung und Vertiefung ergänzt. Durch die Einbeziehung der Umrechnung der Einheiten kann ein stärker vergleichbarer Alltagsbezug geschaffen werden. Fachinformationen zum natürlichen Verlauf eines Gewässers wurden multimedial ergänzt. Vorhandenen Abbildungen wurde durch Einfügen von Beschriftungen und Markierungen eine größere räumliche Nähe zu teil. Ausgehend von den aufgetauchten Schülerfragen wurden desweiteren die Informationen zur Auswahl eines Abstandshalters für das Messgerät schriftlich konkretisiert sowie bildlich gekennzeichnet. Letztlich wurde aufgrund des beobachteten hohen Zeitbedarfs für den Aufbau der Apparatur durch die Schüler der Zeitansatz auf 20 Minuten erhöht. Die überarbeitete Instruktion ist in Anhang III zu finden.

Arbeitsblatt zur Messung der Leitfähigkeit

Zunächst wurde die Materialienliste um die Leitfähigkeitsstandards ergänzt. Einige „seductive details“ (Koenen & Emden, 2016, S. 43) wurden entfernt, während im Sinne einer gesteigerten Kohärenz Abbildungen in räumlicher Nähe zum betreffenden Text ergänzt wurden. Eine Abbildung (Nahaufnahme Sensor) wurde zur Stärkung des Bezugs mittels Beschriftung in der Grafik versehen. Inhaltlich wurde der Zugang zur Relevanz der Temperaturerfassung exemplarisch und multimedial zugänglich gemacht. Signalgeber wurden stärker auf aufgetretene Probleme und Fragestellungen der Erprobung angepasst (siehe Anhang V). Dies betraf insbesondere die Anweisungen zur Kalibration.

Arbeitsblatt zur Messung des Sauerstoffgehalts

Für die Schüler in der Erprobung fehlende Emphasen wurden ergänzt. So wurden beispielsweise das Vorgehen zum Erhalt des zweiten Kalibrationspunktes und die Einstellung des Sensors auf die Messung von Sauerstoff in Flüssigkeiten optisch hervorgehoben. Insbesondere die Anweisung zur Überprüfung der Elektrodenmembran auf Beschädigungen oder Lufteinströme wurde ergänzt beziehungsweise hervorgehoben, da dies in der Erprobung zunächst als Fehler unerkannt blieb und dadurch zu zeitlichen Verzögerungen führte. Desweiteren wurde zur Verdeutlichung der Relevanz und Alltagsbedeutsamkeit ein aktuelles und lokales Beispiel multimedial ergänzt (siehe Anhang VI).

Arbeitsblatt zur Messung des pH-Werts

Gemäß dem Prinzip der räumlichen Nähe wurde diese intensiviert. Hervorhebungen wurden ergänzt und verändert, um den in der Erprobung aufgetretenen Fragen zur Kalibration Rechnung zu tragen. Eine Abbildung wurde als „seductive detail“ eingestuft und in der Folge entfernt, da ein konkreter Bezug zum Text fehlte. Fachlich vertiefende Informationen zum Kohlensäure-Gleichgewicht wurden ergänzt, wodurch der Sinngehalt ebenfalls erhöht wurde (siehe Anhang IV).

Arbeitsblatt zur Messung der Ionen-Gehalte

Zunächst wurden weitere Bilder zur Erhöhung der Multimedialität und zur Verbesserung der Verständlichkeit ergänzt (siehe Anhang VII). Gleichzeitig wurden die Strukturierung optimiert und unnötige Informationen getilgt. Die relevanten Emphasen wurden durch optische Hervorhebung ergänzt. Inhaltlich wurden die ISA-Lösungen in der Materialliste ergänzt, sowie die erläuternden und vertiefenden Informationen geringfügig erweitert und konkretisiert.

Arbeitsblatt zur sensorischen Beurteilung

Die Anleitung zur sensorischen Beurteilung wurde in der Überarbeitung stärker strukturiert und mit einigen vertiefenden Informationen versehen. Insgesamt wurde die Emphase adressatengerecht eingeführt beziehungsweise erweitert. Durch Einfügen von Bildern wurde ein multimedialer Zugang geschaffen (siehe Anhang VIII).

Arbeitsblatt zur Bedienung der Messgeräte

In der Gestaltung der Arbeitsanweisung zur Bedienung der Messgeräte wurde zugunsten der Übersichtlichkeit und Aufmerksamkeitslenkung auf einige Signalgeber verzichtet. Bilder wurden ergänzt, um die Erläuterungen eindeutig zuzuordnen. Insbesondere die Einstellung

der Messrate und die weiteren Funktionen der App wurden übersichtlich festgehalten (siehe Anhang II).

5.5 LIX nach Überarbeitung – Gegenüberstellung

Nach erfolgter Überarbeitung der Instruktionstexte erfolgte eine erneute Überprüfung der Komplexität in Form des Lesbarkeitsindex LIX. Die Werte stellten sich hierbei wie in Tabelle 5 gezeigt dar.

Tabelle 5: LIX und Kennzahlen der überarbeiteten Texte.

Text	Wörter	Sätze	Satzlänge	% lange Wörter	Lesbarkeitsindex nach Überarbeitung
Bedienung MiLab	211	18	11,7	33,2	44,9
Messung Fließgeschwindigkeit	529	37	14,3	35,9	50,2
Messung Ionen	597	45	13,3	36,3	49,6
Messung Leitfähigkeit	394	32	12,3	34,8	47,1
Messung Sauerstoff	504	38	13,3	38,9	52,2
Messung pH	394	27	14,6	35,3	49,9
Sensorische Beurteilung	460	35	13,1	41,3	54,4

Während die Texte im Allgemeinen länger wurden, blieb die Komplexität annähernd gleich. Wie Diagramm 21 aufzeigt, wurde die Komplexität in einem Fall sichtbar geringer, bei den übrigen Texten ergaben sich nur geringfügige Verschiebungen nach oben oder unten. Somit ist die Schwierigkeit nahezu gleich geblieben. Dies ist positiv zu betrachten, da entsprechend der Prämisse des Textverständnisses ein Text nicht durch möglichst geringe Schwierigkeit, sondern durch adressatengerechte Komplexität bestehen sollte.

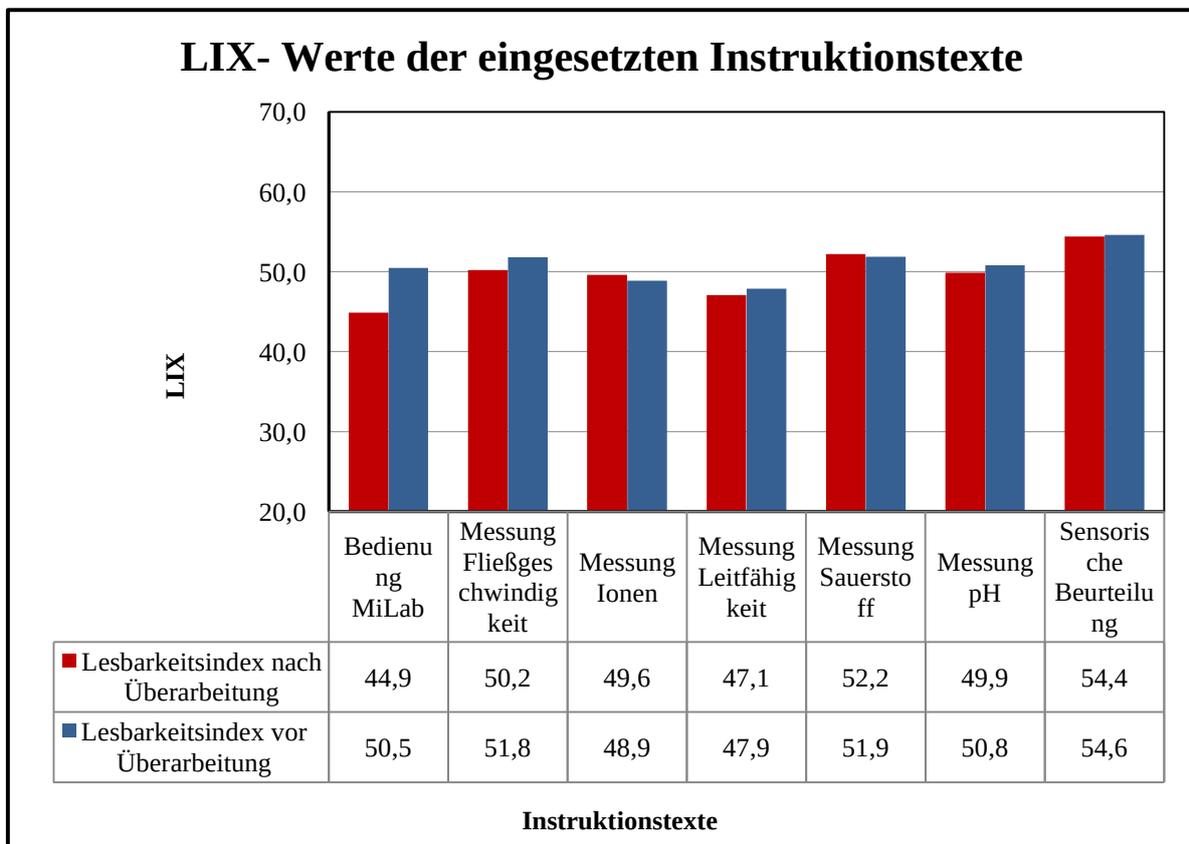


Diagramm 21: Vergleich der LIX-Kennwerte vor und nach Überarbeitung der Instruktionstexte. Es ist ersichtlich, dass keine maßgebliche Veränderung der schwierigkeitsgenerierende Merkmale stattfand.

6 Methodenkritik

Im Folgenden werden die durchgeführten Erhebungen einzeln sowie das Design der Untersuchung insgesamt kritisch reflektiert.

6.1 Kritische Betrachtung der Fragebogen-Erhebung

Die beschriebene Erhebung stützt sich auf literaturbasierte und erprobte Items zur Erhebung des aktuellen Interesses sowie des *cognitive load*, welche jedoch nicht in der hier dargestellten Kombination erprobt und evaluiert wurden.

Das Item zur Abfrage der Befindlichkeit der Teilnehmenden wäre sinnvoll durch ein Freitextfeld zu ergänzen, welches zur Äußerung als negativ empfundener Gegebenheiten genutzt werden könnte. Da die vorhandenen offenen Items wenig aussagekräftig genutzt wurden, wäre eine konkrete Frage nach eigenen das Wohlbefinden beeinflussenden Faktoren erforderlich. Eine Interview-Sequenz wäre alternativ möglich, wäre jedoch aufgrund möglicherweise sehr persönlicher Einflussfaktoren in ihrer Angemessenheit abzuwägen.

6.2 Kritische Betrachtung der Videoanalyse

Die hier durchgeführte kategoriengeleitete Videoanalyse bot einen detaillierten und aufschlussreichen Einblick in die aufgetretenen Problemstellungen bei der Bearbeitung der Einheit. Dennoch wäre eine Optimierung der Videoanalyse anzuraten. Durch das methodische Vorgehen der arbeitsteiligen Gruppenarbeit war es nicht möglich die Arbeitsweise aller Gruppen mittels Videoaufnahme auszuwerten. Stattdessen kamen nur selektive Ausschnitte einzelner Gruppen zur Auswertung. Eine videografische Beobachtung aller Gruppen erscheint wünschenswert. Nach Tuma et al. (2013) wäre eine Videografie aller Gruppen durch eine oder mehrere Kameras aus eigener Perspektive zu bevorzugen, um so den Einfluss des Filmmenden zu reduzieren (Tuma et al., 2013, S. 12–13). Eine kombinierte Aufnahme durch stationäre Totalenkameras zur Beobachtung der Gruppen an den Arbeitstischen, und eine (kopfgetragene) Aktionskamera in Anlehnung an Cauet (2016, S. 87) und Zander (2016, S. 43) wäre zur Reduzierung der benötigten technischen Ausstattung jedoch ebenfalls denkbar. Aufgrund der bekannten Problematik eine Totale in geschlossenen Räumen zu erfassen (Bley, 2013, S. 83), ist nicht davon auszugehen, dass diese im Freiland mit mehreren potentiellen Störgrößen wie etwa wechselnder Beleuchtungssituationen problemlos realisiert werden kann. Aus diesem Grund wäre die Wahl mehrerer personengebundener Kameras zu bevorzugen. Da dieses Vorgehen mit einem erheblichen Mehraufwand zu verarbeitender Videodaten einherginge, wäre gleichfalls eine technische Optimierung der Auswertung anzuraten. Empfehlenswert wäre die Prüfung der Eignung verschiedener Softwarelösungen zur Videoanalyse (Efing & Sommer, 2017, S. 340). Mit Hilfe einer solchen Software wäre die Auswertung steigender Datenmengen und des damit verbundenen Aufwandes für Kategorisierung und Transkription adäquat zu kompensieren. Gleichzeitig gilt es jedoch bei videografischer Aufzeichnung aller Gruppen den organisatorischen Mehraufwand, nebst dem materiellen, zu berücksichtigen. Eine Arbeitsteilung seitens der Durchführenden wäre in diesem Fall erforderlich. Ein gesteigerter zeitlicher Mehraufwand in der Überwachung der Aufzeichnung würde sich andernfalls möglicherweise negativ auf die eigentliche Durchführung der Einheit auswirken.

6.3 Gesamtbetrachtung

Als Hauptkritik sei zunächst der nicht repräsentative Umfang der Untersuchung genannt. Wenngleich die Testgruppe zufällig gewählt wurde und keine Kenntnisse im Umgang mit den verwendeten Messsystemen vorwies, so sei doch auf die starke Selektivität hingewiesen. Insbesondere die Voraussetzungen wären für Kurse anderer Schulen aufgrund der modularen Strukturierung des Oberstufenunterrichts im Fach Chemie zum Zeitpunkt der Erhebung nicht zwingend identisch. Somit kann sich eine Konzeption für die Oberstufe nur auf die zum Ende

der zehnten Klasse angesetzten Bildungsstandards berufen. Eine Überschreitung der Grenzen des Bundeslandes würde gegebenenfalls noch weitere Anpassungen erforderlich machen. Eine repräsentative Untersuchung bedürfte folglich der Erprobung der Einheit unter Einbeziehung einer deutlich erweiterten Stichprobe.

Ebenso wäre eine Erhebung des relevanten Vorwissens der Schüler anzustreben, um Empfehlungen für den die Einheit vorbereitenden Unterricht festlegen zu können. Die Erarbeitung dieses Vorwissens fand im Rahmen der beschriebenen Erprobung in Absprache mit dem zuständigen Fachlehrer statt, jedoch ohne konkrete Lernziele oder andersartig überprüfbare Vorbedingungen zu formulieren.

Zur Stärkung der Aussagekraft der Untersuchung ist desweiteren eine mehrstufige Testung vorzusehen. Eine klassisch strukturierte Untersuchung gegliedert in pre-, while-, post-, und follow-up-Test ließe insbesondere im Hinblick auf die untersuchte Interessenslage eine stärkere Interpretierbarkeit des Stellenwertes der Einheit zu. Somit ließe sich der „Impact“ der Einheit in Bezug auf das Schülerinteresse herausstellen.

Wie bereits in Kapitel 6.2 Kritische Betrachtung der Videoanalyse beschrieben, fand keine personelle Trennung zwischen inhaltlich-organisatorisch Durchführendem („Lehrkraft“) und Beobachter („Forscher“) statt. Dies hatte zur Folge, dass die videografische Aufzeichnung während der Durchführung nicht frei von Einflüssen blieb. So kann exemplarisch etwa das Weiterreichen der Kamera durch die „Lehrkraft“ bereits einen ungewollten Einfluss auf den Ablauf der Unterrichtseinheit darstellen. Gleiches gilt für die Behebung gegebenenfalls auftretender technischer Probleme oder vergleichbarer Punkte.

Die Auswertung der schwierigkeitsgenerierenden Merkmale auf der Textoberfläche hat sich als sehr praktikabel erwiesen. Dennoch gilt es zu berücksichtigen, dass der Lesbarkeitsindex (LIX) lediglich die durchschnittliche Satzlänge und den prozentualen Anteil an Wörtern mit mehr als sechs Buchstaben wiedergibt (Lenhard, 2013, S. 31). Für eine detailliertere Erfassung wäre eine aufwändigere Textoberflächenanalyse, insbesondere unter Berücksichtigung der Fachterminologie erforderlich.

Optimierungsbedarf ist auch hinsichtlich der Organisationsform zu sehen. Die Großmethode der Gruppenarbeit soll hierbei nicht abgewandelt werden, vielmehr soll sie durch Schritte der Zwischensicherung und klareren Verteilung von Aufgaben innerhalb der Gruppe einen höheren Ertrag bieten können (Schorn, 2008, S. 43–44). Konkret wäre hierzu eine Zuordnung personenbezogener Aufgaben als beispielhafte Untergliederung einer Gruppe in Probenehmer,

Kalibrator, Probenvorbereiter und Messwerterfasser vorstellbar, welche gruppenintern nach jeder Messreihe neu verteilt werden könnte.

7 Fazit

Die Lehre an außerschulischen Lernorten im Freiland, sogenannten Reallaboren, stellt insbesondere in der Lehre zu Umweltprozessen und –parametern einen aktuellen Forschungsgegenstand dar. Im Sinne der originalen Begegnung mit Umweltprozessen und der Problematik des Umweltschutzes stellte sich die Erarbeitung und Erprobung einer Einheit zum Thema Gewässeranalyse im Freiland als aktueller und bedeutsamer Forschungsgegenstand dar.

Anhand der Konzeption einer solchen Einheit wird deutlich, dass auch bei der Arbeit im Freiland nicht auf technische Neuerungen und Gerätschaften, welche bisher hauptsächlich dem Labor vorbehalten waren, verzichtet werden muss. Neben den quantitativen Daten der Skala zum aktuellen Interesse ließen insbesondere dokumentierte mündliche Äußerungen der Teilnehmenden eine positive Interessenslage erkennen: „Kann bitte jede Chemie-Stunde so sein?“(transkribierte Schüler-Äußerung).

Die Ergebnisse der ausgewerteten Daten zum *cognitive load* lassen weiterhin den Schluss zu, dass eine entsprechend vorbereitete Einheit die Schüler nicht kognitiv überlastet – oder umgekehrt unterfordert. Die Vorbereitung scheint an dieser Stelle der Schlüssel zur Bewältigung zu sein, da ein nicht unbeträchtlicher Arbeits- und Abstimmungsaufwand vonnöten war. Neben der Vorbereitung der Konzeption bedurfte es ausgiebiger Erprobung der Messgeräte und der Herstellung der Standard-Lösungen. Darüber hinaus galt es den vorbereitenden Unterricht hinsichtlich der Voraussetzungen zu überprüfen.

Letztendlich lässt sich festhalten, dass eine Einheit wie die vorliegende geeignet erscheint, Themen an realen Problemstellungen der Gegenwart zu verankern und zugänglich zu machen.

8 Ausblick

8.1 Anpassung der Inhalte an die Mittelstufe

Durch Anpassung der Analyse-Methoden und Reduktion der erfassten Parameter in Detailtreue und Anzahl kann eine Angleichung an die Mittelstufe erfolgen. Dies ist in erster Linie durch Anwendung von Test-Stäbchen und vereinfachten Parametern, etwa Summenparametern der biologischen Gewässergüte möglich. Da für nahezu alle chemischen Messgrößen

entsprechende Schnelltests möglich und vorhanden sind, wäre diese Anpassung aus Sicht der Experimentier-Materialien vergleichsweise einfach umsetzen. Konzeptionell wäre an dieser Stelle sicherlich eine verstärkte Berücksichtigung der Vorkenntnisse erforderlich.

8.2 Transformation der Inhalte als Citizen-Science Ansatz

Eine Abwandlung des Konzeptes soll die Verstetigung des Forschungsansatzes unter Einbeziehung der Bevölkerung und Schülerschaft des Einzugsgebietes Queich/ Landau nach sich ziehen. Dies könnte durch die Einrichtung eines Blue Cache im Sinne einer GPS-Bildungsrouten (Lude et al., 2013, S. 19) erreicht werden. Die benötigten Materialien und Anweisungen zum Start in das Geocaching könnten hierbei perspektivisch durch die Universität Koblenz-Landau in Kooperation mit dem Eduard-Spranger-Gymnasium Landau zur Verfügung gestellt. Der „Water-Backpack“ könnte alle Gerätschaften, welche im Verlauf des Caching erforderlich werden und nicht vor Ort platziert werden können, enthalten. So ausgestattet können alle interessierten Einzelpersonen oder Gruppen das Caching aufnehmen. Aufgrund der Vorbereitung der Materialien wäre eine kurze Voranmeldung zwingend erforderlich.

8.3 Einbindung in eine Reihenplanung

Während die vorliegende Konzeption stark auf eine einzelne Unterrichtseinheit hin ausgerichtet ist, ohne jedoch die Rahmenbedingungen und Anknüpfungspunkte aus den Augen zu verlieren, kann eine solche Konzeption mehr leisten. Zunächst wäre eine Einbindung der theoretischen Grundlagen, welche zur Bearbeitung notwendig sind, erforderlich. Zu diesem Zweck könnte die Konzeption auf die in Kapitel 3.1 Relevantes Vorwissen erweitert werden. Gleichfalls wäre die Anknüpfung an vertiefende Inhalte (siehe hierzu 3.4 Vorschläge zur methodisch-inhaltlichen Vertiefung) wünschenswert. Aufgrund der weitgefassten inhaltlichen und methodischen Kompetenzen, welche der Einheit zugrunde liegen, ist hier von einigen wenigen weiterführenden Stunden bis hin zur Projektarbeit oder – wie eingangs beschrieben teilweise begleitet – einer besonderen Lernleistung beziehungsweise Facharbeit zur individuellen Vertiefung denkbar. In Anhang X sind die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erhobenen Messwerte als Referenzwerte dargestellt. So können bei weiteren Einheiten Vergleiche gezogen werden. Gleiches trifft auf die in Anhang XI gezeigten Ergebnisse einer professionellen Analyse zu.

9 Verzeichnis der Literatur

- Aas, Wenche. (2010). Analytical Procedures for Measuring Precipitation Quality Used within the EMEP Monitoring Program. In J. Namieśnik & P. Szefer (Eds.), *Analytical chemistry series. Analytical measurements in aquatic environments* (S.399–412). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Adolph, H. (o.J.). *FLUVIDAT - Bestimmung der biologischen und chemischen Gewässergüte*. Retrieved from <http://www.fluvidat-saar.de/methodik/die-bestimmung-der-gewasserguete-nach-bach/>
- Anton, Michael A. (2008). *Kompendium Chemiedidaktik*. Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt. Retrieved from http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783781552722
- Arndt, Kerstin. (2016). *Experimentierkompetenz erfassen: Analyse von Prozessen und Mustern am Beispiel von Lehramtsstudierenden der Chemie*. Dissertation. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 202*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.
- Atkins, Peter W. & de Paula, Julio. (2013). *Physikalische Chemie* (5. Auflage). Wiley-VCH-Lehrbuchkollektion 1. Weinheim: Wiley-VCH. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/3527682899>
- Aydin, Adnan. (2014). Nitrites and Nitrates. In L. M. L. Nollet & L. de Gelder (Eds.), *Handbook of water analysis* (3rd ed., S.283–326). Boca Raton: CRC Press.
- Ayres, Paul. (2006). Impact of reducing intrinsic cognitive load on learning in a mathematical domain. *Applied Cognitive Psychology*, 20(3), S.287–298. <https://doi.org/10.1002/acp.1245>
- Bach, Erwin. (1980). Ein chemischer Index zur Überwachung der Wasserqualität von Fließgewässern. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 24, S.102–106.
- Baur, Werner H. (1987). *Gewässergüte bestimmen und beurteilen: Praktische Anleitung für Gewässerwarte und alle an der Qualität unserer Gewässer interessierten Kreise* (2., völlig Neubearb. Aufl.). Hamburg, Berlin: Parey.
- Beller, Sieghard. (2016). *Empirisch forschen lernen: Konzepte, Methoden, Fallbeispiele, Tipps* (3., überarbeitete und erweiterte Auflage). Bern: Hogrefe Verlag. Retrieved from <http://elibrary.hogrefe.de/9783456956152/>
- Bley, Susanne. (2013). *Förderung von Transferprozessen im Chemieunterricht. Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 147*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.

- Bohn, C.; Gretschel, O.; Hirschfeld, J.; Nischwitz, G.; Pöpperl, R. & Schmidt, G. (2003). *FLUMAGIS - TN 2: Methoden und Modelle*. Retrieved from <http://www.flumagis.de/download/Anhang%202%20TN%20Methoden%20und%20Modelle%2029-04-03.pdf>
- Bölts, Hartmut. (2014). *Umweltbildung: Eine kritische Bilanz*. Darmstadt: WBG (Wiss. Buchges.).
- Börlin, Johannes. (2012). *Das Experiment als Lerngelegenheit: Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität. Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 132*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.
- Brandt, Alexander; Möller, Jens & Kohse-Höinghaus, Katharina. (2008). Was bewirken außerschulische Experimentierlabors? *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 22(1), S.5–12. <https://doi.org/10.1024/1010-0652.22.1.5>
- Bratfisch, Oswald; Borg, Gunnar & Dornic, Stanislav. (1972). Perceived Item-difficulty in three tests of intellectual performance capacity. *Reports from the Institute of Applied psychology, University of Sweden*. (29), S.1–12. Retrieved from <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED080552.pdf>
- Brown, Theodore L.; LeMay, Harold E.; Bursten, Bruce E. & Robl, Christian. (2011). *Chemie: Studieren kompakt* (10., aktualisierte Aufl.). *che - Chemie*. München: Pearson. Retrieved from <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=404896>
- Brückmann, Maja & Duit, Reinders. (2014). Videobasierte Analyse unterrichtlicher Sachstrukturen. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Eds.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S.189–202). Heidelberg: Springer Spektrum.
- Bundesministerium für Gesundheit; Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz; Bundesrat Reaktorsicherheit (Mai 2001). *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch- Trinkwasserverordnung*.
- Cauet, Eva. (2016). *Testen wir relevantes Wissen? Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten*. Dissertation. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 204*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.
- Churgin, C. (o.J.). *einstein pH Sensor*. Retrieved from <https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiJrJLOi6rYAhXECewKHc2iBdkQFghMMAI&url=http%3A%2F%2F>

steinworld.com%2Fwp-content%2Fuploads%2FpH-Sensor-1.pdf&usg=AOvVaw3OpF3bdXPwsdE1SIFs2362

Cierniak, Gabriele; Scheiter, Katharina & Gerjets, Peter. (2009). Cierniak, Gabriele, Katharina Scheiter, and Peter Gerjets. "Explaining the split-attention effect: Is the reduction of extraneous cognitive load accompanied by an increase in germane cognitive load? *Computers in Human Behavior*, 25(2), S.315–324.

Darimont, Thomas. (1983). *Analyse und Bewertung von Nitrat im Trinkwasser: Eine ionenchromatographische Studie über die Auswirkungen der N-Düngung in Weinbaugebieten. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis: Vol. 18*. Bielefeld: Schmidt.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (März 2017). *DGUV Information 213-098 Stoffliste zur DGUV Regel 113-018 „Unterricht in Schulen mit gefährlichen Stoffen“*.

Efing, Nicolas & Sommer, Katrin. (2017). Qualitative Inhaltsanalyse von Gesprächen - ohne Transkription. In C. Maurer (Ed.), *Implementation fachdidaktischer Innovationen im Spiegel von Forschung und Praxis. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Zürich 2016* (S.340–343). Regensburg: Universität Regensburg. Retrieved from http://www.pedocs.de/volltexte/2017/12912/pdf/Maurer_2016_Implementation_fachdidaktischer_Innovation.pdf#page=363

Emden, Markus. (2016). Exkurs: Adaption von Arbeitsblättern. In J. Koenen, M. Emden, & E. Sumfleth (Eds.), *Ganz In - Materialien für die Praxis. Chemieunterricht im Zeichen der Erkenntnisgewinnung: Ganz In - Materialien für die Praxis* (S.52–57). Münster: Waxmann. Retrieved from <http://www.ganzin.de/wp-content/uploads/2015/10/Chemieunterricht-im-Zeichen-der-Erkentnisgewinnung-1.pdf>

Engeln, Katrin. (2004). *Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken*. Dissertation. *Studien zum Physikkernen: Band 36*. Berlin: Logos Verlag Berlin.

Freier, Rolf K. & Neeb, Karl H. (1974). *Wasseranalyse: Chemische, physikochemische und radiochemische Untersuchungsverfahren wichtiger Inhaltsstoffe* (2., neubearb. und erw. Aufl.). *Arbeitsmethoden der modernen Naturwissenschaften*. Berlin: de Gruyter.

Fries, D.; Leisen, J.; Luggen-Hölscher, J. Dr. & Euteneuer, A. (o.J.). *Lehrplan Physik*.

Galvão, Juliana Antunes; Matthiensen, Alexandre; Oetterer, Marília; Moliner-Martínez, Y.; Gonzalez-Fuenzalida, R. A.; Muñoz-Ortuño, M.; Herráez-Hernández, R.; Verdú- Andrés, J.; Molins-Legua, C. & Camoíns Falcó, P. (2014). Determination of Ammonia in Water

- Samples. In L. M. L. Nollet & L. de Gelder (Eds.), *Handbook of water analysis* (3rd ed., S.249–282). Boca Raton: CRC Press.
- Gerjets, Peter; Scheiter, Katharina & Cierniak, Gabriele. (2009). The Scientific Value of Cognitive Load Theory: A Research Agenda Based on the Structuralist View of Theories. *Educational Psychology Review*, 21(1), S.43–54. <https://doi.org/10.1007/s10648-008-9096-1>
- Gonschorek, Gernot & Schneider, Susanne. (2010). *Einführung in die Schulpädagogik und die Unterrichtsplanung* (7., überarb. und aktualisierte Aufl.). *Immer besser unterrichten Grundschule/Sekundarstufe I+II*. Donauwörth: Auer Verlag.
- Górecki, Tadeusz & El-Hussieny Mohamed, Heba Shaaban. (2010). Total Parameters as a Tool for the Evaluation of the Load of Xenobiotics in the Environment. In J. Namieśnik & P. Szefer (Eds.), *Analytical chemistry series. Analytical measurements in aquatic environments* (S.223–240). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Graesser, Arthur C. & Person, Natalie K. (1994). Question Asking During Tutoring. *American Educational Research Journal*, 31(1), S.104–137. Retrieved from <https://www.gwern.net/docs/spacedrepetition/1994-graesser.pdf>
- Grasshoff, K.; Kremling, K. & Ehrhardt, M. (Eds.). (1999). *Methods of Seawater Analysis* (3. Auflage). Weinheim: Wiley-VCH. Retrieved from <http://lib.myilibrary.com/ProductDetail.aspx?id=227907>
- Groß, Katharina. (2013). *Experimente alternativ dokumentieren: Eine qualitative Studie zur Förderung der Diagnose- und Differenzierungskompetenz in der Chemielehrerbildung*. Zugl.: Köln, Univ. Diss. 2013. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 154*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.
- Hansen, H. P. (1999a). Determination of oxygen. In K. Grasshoff, K. Kremling, & M. Ehrhardt (Eds.), *Methods of Seawater Analysis* (3rd ed., S.75–90). Weinheim: Wiley-VCH.
- Hansen, H. P. (1999b). In situ determination of pH and oxygen. In K. Grasshoff, K. Kremling, & M. Ehrhardt (Eds.), *Methods of Seawater Analysis* (3rd ed., S.399–406). Weinheim: Wiley-VCH.
- Hansen, H. P. & Koroleff, F. (1999). Determination of nutrients. In K. Grasshoff, K. Kremling, & M. Ehrhardt (Eds.), *Methods of Seawater Analysis* (3rd ed., S.159–228). Weinheim: Wiley-VCH.

- Haß, H. Dr.; Hamann, K.; Dekant-Klingmann, R.; Baumgartner, I. & Bade, L. (1998). *Lehrplan Biologie: Grund- und Leistungsfach Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe* (Mainzer Studienstufe).
- Heil, K.; Bremm, B.; Gerner, H. Dr.; Helfrich, W.; München, W. H.; Serfas, G. Dr. et al. Walter, K. (1998). *Lehrplan Gemeinschaftskunde: Grundfach und Leistungsfach -mit Schwerpunkt Geschichte -mit Schwerpunkt Sozialkunde -mit Schwerpunkt Erdkunde in den Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe* (Mainzer Studienstufe).
- Heim, Harald Dr.; Kallfelz, Monika; Klinger, Udo; Wolf, Hans Dr.; Heim, Irmtraud Dr. & Jung, Thomas. (1998). *Lehrplan Chemie Sekundarstufe II*. Mainz.
- Hellmann, Hubert. (1986). *Analytik von Oberflächengewässern. Analytische Chemie für die Praxis*. Stuttgart: Thieme.
- Höll, Karl. (1986). *Wasser: Untersuchung, Beurteilung, Aufbereitung, Chemie, Bakteriologie, Virologie, Biologie* (7., völlig neu bearb. Aufl.). Berlin: de Gruyter.
- Hosenfeld, Annette; Helmke, Andreas; Heyne, Nora & Lipowsky, Frank. (2007). Praxisworkshop: Videostudien in der empirischen Unterrichtsforschung. In K. Möller, P. Hanke, C. Beinbrech, A. K. Hein, T. Kleickmann, & R. Schages (Eds.), *Qualität von Grundschulunterricht: entwickeln, erfassen und bewerten* (S.305–311). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften | GWV Fachverlage GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-531-90755-0_60
- Hütter, Leonhard A. (1994). *Wasser und Wasseruntersuchung: Methodik, Theorie und Praxis chemischer, chemisch-physikalischer, biologischer und bakteriologischer Untersuchungsverfahren* (6., erw. und aktualisierte Aufl.). *Laborbücher Chemie*. Frankfurt am Main: Salle.
- Jander, Gerhart; Blasius, Ewald; Strähle, Joachim; Schweda, Eberhard & Rossi, Rolando. (2005). *Einführung in das anorganisch-chemische Praktikum: (einschließlich der quantitativen Analyse) ; mit 69 Tabellen* (15., neu bearb. Aufl.). Stuttgart: Hirzel. Retrieved from http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2690025&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm
- Jong, Ton de. (2010). Cognitive load theory, educational research, and instructional design: Some food for thought. *Instructional Science*, 38(2), S.105–134. <https://doi.org/10.1007/s11251-009-9110-0>
- Kalyuga, Slava. (2007). Expertise Reversal Effect and Its Implications for Learner-Tailored Instruction. *Educational Psychology Review*, 19(4), S.509–539. Retrieved from <http://www.academia.edu/download/9388356/kalyuga2007.pdf>

- Kaur, Kanwaljit. (2007). *Handbook of water and wastewater analysis*. New Delhi: Atlantic Publ. & Distributors.
- Kearsley, Greg P. (1976). Questions and question asking in verbal discourse: A cross-disciplinary review. *Journal of Psycholinguistic Research*. (5), S.355–375.
<https://doi.org/10.1007/BF01079934>
- Keller, Peter. (2013). *Die Queichniederung: Porträt einer Landschaft ; europäisches Naturerbe, lebendige Kulturlandschaft, traditionelle Wiesenbewässerung, schützenswerter Lebensraum. Fauna und Flora in Rheinland-Pfalz: Vol. 45*. Mainz: Ges. für Naturschutz und Ornithologie Rheinland-Pfalz.
- Klee, Otto. (1990). *Wasser untersuchen: Einfache Analysenmethoden und Beurteilungskriterien* (1. Aufl.). *Biologische Arbeitsbücher: Vol. 42*. Heidelberg: Quelle & Meyer.
- Koelle, Walter. (2010). *Wasseranalysen - richtig beurteilt: Grundlagen, Parameter, Wassertypen, Inhaltsstoffe, Grenzwerte nach Trinkwasserverordnung und EU-Trinkwasserrichtlinie* (3. Auflage). Weinheim: Wiley-VCH. Retrieved from <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=496087>
- Koenen, Jenna. (2014). *Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen*. Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2014. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 171*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.
- Koenen, Jenna & Emden, Markus. (2016). Gestaltung von Lösungsbeispielen. In J. Koenen, M. Emden, & E. Sumfleth (Eds.), *Ganz In - Materialien für die Praxis. Chemieunterricht im Zeichen der Erkenntnisgewinnung: Ganz In - Materialien für die Praxis* (S.40–51). Münster: Waxmann. Retrieved from <http://www.ganzin.de/wp-content/uploads/2015/10/Chemieunterricht-im-Zeichen-der-Erkennntnisgewinnung-1.pdf>
- Koenen, J.; Emden, M. & Sumfleth, E. (Eds.). (2016). *Chemieunterricht im Zeichen der Erkenntnisgewinnung: Ganz In - Materialien für die Praxis. Ganz In - Materialien für die Praxis*. Münster: Waxmann. Retrieved from http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783830984474
- Kölbach, Eva. (2011). *Kontexteinflüsse beim Lernen mit Lösungsbeispielen. Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 123*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.
- Kranz, Joachim. (2008a). Außerschulische Lernorte. In J. Kranz & J. Schorn (Eds.), *Chemie-Methodik: Handbuch für die Sekundarstufe I und II* (1st ed., S.147–152). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG.

- Kranz, Joachim. (2008b). Computer im experimentellen Unterricht. In J. Kranz & J. Schorn (Eds.), *Chemie-Methodik: Handbuch für die Sekundarstufe I und II* (1st ed., S.155–156). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG.
- Kranz, Joachim. (2008c). Experimente im Chemieunterricht. In J. Kranz & J. Schorn (Eds.), *Chemie-Methodik: Handbuch für die Sekundarstufe I und II* (1st ed., S.112–118). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG.
- Kremling, Klaus. (1999). Determination of the major constituents. In K. Grasshoff, K. Kremling, & M. Ehrhardt (Eds.), *Methods of Seawater Analysis* (3rd ed., S.229–252). Weinheim: Wiley-VCH.
- Kunze, Udo R. & Schwedt, Georg. (2009). *Grundlagen der quantitativen Analyse* (6., aktualisierte und erg. Aufl.). Weinheim: Wiley-VCH.
- Laukenmann, Matthias; Bleicher, Michael; Fuß, Stefan; Gläser-Zikuda, Michaela; Mayring, Philipp & von Rhöneck, Christoph. (2000). Eine Untersuchung zum Einfluss emotionaler Faktoren auf das Lernen im Physikunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 6, S.139–155.
- Leithe, Wolfgang. (1972). *Die Analyse der organischen Verunreinigungen in Trink-, Brauch- und Abwässern*. Stuttgart: Wiss. Verl.-Ges.
- Lenhard, W. & Lenhard, A. (2014). *Berechnung des Lesbarkeitsindex LIX nach Björnson*. Retrieved from <http://www.psychometrica.de/lix.html>
- Lenhard, Wolfgang. (2013). *Leseverständnis und Lesekompetenz: Grundlagen - Diagnostik - Förderung* (1. Auflage). *Psychologie 2014*. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH. Retrieved from <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1774036>
- Leppink, Jimmie; Paas, Fred; van der Vleuten, Cees P. M.; van Gog, Tamara & van Merriënboer, Jeroen J. G. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior research methods*, 45(4), S.1058–1072. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0334-1>
- Lude, A.; Schaal, S.; Bullinger, M. & Bleck, S. (Eds.). (2013). *Mobiles, ortsbezogenes Lernen in der Umweltbildung und Bildung für nachhaltige Entwicklung: Der erfolgreiche Einsatz von Smartphone und Co. in Bildungsangeboten in der Natur*. Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren GmbH.
- Mayring, PhilipS.(2000). Qualitative Content Analysis. *Forum Qualitative Sozialforschung*, 1(2), S.1–10. <https://doi.org/10.17169/fqs-1.2.1089>

- Microsoft Corporation. (o.J.). *STABW.N (Funktion)*. Retrieved from <https://support.office.com/de-de/article/STABW-N-Funktion-6e917c05-31a0-496f-ade7-4f4e7462f285?ui=de-DE&rs=de-DE&ad=DE>
- Mortimer, Munro; Müller, Jochen F. & Liess, Matthias. (2014). Sampling Methods in Surface Waters. In L. M. L. Nollet & L. de Gelder (Eds.), *Handbook of water analysis* (3rd ed., S.3–46). Boca Raton: CRC Press.
- Müller, R. (2006). *Kontextorientierung und Alltagsbezug*. Retrieved from http://www.mathphys.uni-freiburg.de/physik/filk/public_html/InfoLehramt/FD17_QhxBz/RainerMueller.pdf
- Nagy, Géza & Nagy, Livia. (2014). Halogens. In L. M. L. Nollet & L. de Gelder (Eds.), *Handbook of water analysis* (3rd ed., S.189–232). Boca Raton: CRC Press.
- Niegemann, Helmut & Stadler, Silke. (2001). Hat noch jemand eine Frage? Systematische Unterrichtsbeobachtung zu Häufigkeit und kognitivem Niveau von Fragen im Unterricht. *Unterrichtswissenschaft*, 29(2), S.171–192. Retrieved from http://www.pedocs.de/volltexte/2013/7716/pdf/UnterWiss_2001_2_Niegemann_Stadler_Hat_noch_jemand_eine_Frage.pdf
- Nießeler, Andreas. (2015). Den Sachen begegnen: Die "originale Begegnung" im Sachunterricht. In J. Kahlert, M. Fölling-Albers, M. Götz, A. Hartinger, S. Miller, & S. Wittkowske (Eds.), *UTB: Vol. 8621. Handbuch Didaktik des Sachunterrichts* (2nd ed., S.27–31). Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Obst, Heinz; Ziegler, Christine & Lichtfeldt, Michael. (2000). Fachdidaktik Physik und Chemie. In M. A. Meyer & R. Schmidt (Eds.), *Reihe Schule und Gesellschaft: Vol. 22. Schülermitbeteiligung im Fachunterricht: Englisch, Geschichte, Physik und Chemie im Blickfeld von Lehrern, Schülern und Unterrichtsforschern* (S.49–55). Opladen: Leske + Budrich.
- Paas, Fred G. W. C. (1992). Training Strategies for Attaining Transfer of Problem-Solving Skill in Statistics: A Cognitive-Load Approach. *Journal of Educational Psychology*, 84(4), S.429–434.
- Pawek, Christoph. (2009). *Schülerlabore als interessefördernde außerschulische Lernumgebungen für Schülerinnen und Schüler aus der Mittel- und Oberstufe*. Kiel.
- Platova, Elina. (2017). *Optimierung eines Laborpraktikums durch kognitive Aktivierung. Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 225*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.

- Pütz, Norbert; Wittowske, Steffen & Weusmann, Birgit. (2012). Freilandarbeit im Sachunterricht und in der Biologie der Sekundarstufe I. In N. Pütz & S. Wittowske (Eds.), *Schulgarten- und Freilandarbeit: Lernen, studieren und forschen* (S.85–99). Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Raithel, Jürgen. (2008). *Quantitative Forschung: Ein Praxiskurs* (2., durchgesehene Auflage). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-531-91148-9>
- Renström, Jan. (1980). Texte und Textbehandlung im Deutschunterricht. *Die Unterrichtspraxis / Teaching German*, 13(2), S.150–155. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/3530659>
- Rheinberg, Falko; Vollmeyer, Regina & Burns, Bruce D. (2001). FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen (Langversion, 2001). *Diagnostica*, 47(2), S.57–66. Retrieved from <http://econtent.hogrefe.com/doi/full/10.1026//0012-1924.47.2.57>
- Salomon, Gavriel. (1984). Television is "easy" and print is "tough": The differential investment of mental effort in learning as a function of perceptions and attributions. *Journal of Educational Psychology*, 76(4), S.647–658.
- Scheiter, Katharina. (2014). Cognitive load theory (CLT). In M. A. Wirtz (Ed.), *Dorsch - Lexikon der Psychologie* (18th ed., S.328). Bern: Hogrefe Verlag. Retrieved from <https://m.portal.hogrefe.com/dorsch/cognitive-load-theory-clt/>
- Schorn, Jens. (2008). Gruppenarbeit. In J. Kranz & J. Schorn (Eds.), *Chemie-Methodik: Handbuch für die Sekundarstufe I und II* (1st ed., S.41–46). Berlin: Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG.
- Schwevers, Ulrich & Adam, Beate. (1999). Gewässerstrukturgüte und Fischfauna: Structural quality mapping of streams and fish fauna. *Natur und Landschaft*, 74(9), S.355–360. Retrieved from http://www.ifo.eu/pdf/Schwevers&Adam-1999_Gew%C3%A4sserstrukturg%C3%BCte&Fischfauna.pdf
- Shen-Orr. Ammonium Sealed Electrode Sensor Bundle. (o.J.) [Special issue].
- Smol, John P. (2008). *Pollution of lakes and rivers: A paleoenvironmental perspective* (2nd ed.). Malden, MA: Blackwell Pub. Retrieved from <http://site.ebrary.com/lib/academiccompletetitles/home.action>
- Steiner, Dagmar. (2002). Multimedia-Chemieunterricht - digitale Medien und Computeranwendungen: Digitales Aufzeichnen von Experimenten. In P. Pfeifer, B. Lutz, & H. J. Bader

- (Eds.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie: Neubearbeitung* (3rd ed., S.328–346). München: Oldenbourg Schulbuchverlag GmbH.
- Tuma, René; Schnettler, Bernt & Knoblauch, Hubert. (2013). *Videographie: Einführung in die interpretative Videoanalyse sozialer Situationen. Lehrbuch*. Wiesbaden: Springer VS.
- van Merriënboer, Jeroen J. G.; Paas, Fred & Sweller, John. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, 10(3), S.251–296. Retrieved from <http://mrbartonmaths.com/resourcesnew/8.%20Research/Explicit%20Instruction/Cognitive%20Architecture%20and%20Instructional%20Design.pdf>
- van Merriënboer, Jeroen J. G.; Schuurman, J. G.; de Croock, M. B. M. & Paas, F. G. W. C. (2002). Redirecting learners' attention during training: effects on cognitive load, transfer test performance and training efficiency. *Learning and Instruction*, 12(1), S.11–37. Retrieved from https://ac.els-cdn.com/S0959475201000202/1-s2.0-S0959475201000202-main.pdf?_tid=a4a279ee-dda2-11e7-b1df-0000aacb35e&acdnat=1512907808_4070623229cc726e80940f79a01ae0d2
- Vereinigung Deutscher Gewässerschutz (Ed.). (2011). *Ökologische Bewertung von Fließgewässern* (5. Auflage, Vol. 64). Bonn.
- Vidal, Lorena; Domini, Claudia E. & Canals, Antonio. (2014). Main parameters and assays involved with the organic pollution of water. In L. M. L. Nollet & L. de Gelder (Eds.), *Handbook of water analysis* (3rd ed., S.459–492). Boca Raton: CRC Press.
- Völker, Jeanette & Mohaupt, Volker. (2015). *Die Wasserrahmenrichtlinie- Deutschlands Gewässer 2015*. Bonn, Dessau. Retrieved from https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/final_broschure_wasserrahm_enrichtlinie_bf_112116.pdf
- von Niederhäusern, Raffael; Brovelli, Dorothee; Fuchs, Karin & Rempfler, Armin. (o.J.). Kompetenzorientierung an außerschulischen Lernorten aus unterschiedlichen Fachperspektiven, S.143–162.
- Wedborg, M.; Turner, D. R.; Anderson, L. G. & Dyrssen, D. (1999). Determination of pH. In K. Grasshoff, K. Kremling, & M. Ehrhardt (Eds.), *Methods of Seawater Analysis* (3rd ed., S.109–126). Weinheim: Wiley-VCH.
- Zander, Simon. (2016). *Lehrerfortbildung zu Basismodellen und Zusammenhänge zum Fachwissen*. Dissertation. *Studien zum Physik- und Chemielernen: Vol. 201*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.

Zygmunt, Bogdan & Banel, Anna. (2010). Strategy of Collecting Samples from an Aquatic Environment. In J. Namieśnik & P. Szefer (Eds.), *Analytical chemistry series. Analytical measurements in aquatic environments* (S.1–18). Boca Raton, FL: CRC Press.

10 Verzeichnis der Diagramme

- Diagramm 1: Übersicht über alle stärker differenzierten Skalenmittelwerte als prozentuale Anteile am Maximalwert der Skala. Hierzu wurden die einzelnen Skalen über alle Teilnehmenden gemittelt. Deutlich erkennbar ist ein aktuelles Interesse im Bereich der oberen Hälfte. Die kognitive Beanspruchung durch die Instruktionen bewegt sich im Bereich bis 40%. Die jeweilige Standardabweichung ist als Fehlerbalken wiedergegeben. 46
- Diagramm 2: Skalenmittelwerte aktuelles Interesse erhoben mit 11 jeweils vierstufigen Items. Die Standardabweichung wurde für jeden Schüler ermittelt und als Fehlerbalken aufgetragen. Eine mittlere bis überdurchschnittliche Ausprägung ist durchweg erkennbar. 47
- Diagramm 3: Skalenmittelwert Befindlichkeit, erfasst durch ein sechsstufiges Item. Bis auf zwei Teilnehmer ist bei allen eine positive Wahrnehmung der Freilandarbeit erkennbar. 48
- Diagramm 4: Skalenmittelwerte zum *cognitive load*, erhoben durch elf elfstufige Items der Subskalen *intrinsic*, *extraneous* und *germane cognitive load*. Die jeweiligen Standardabweichungen sind mit angegeben. 49
- Diagramm 5: Skalenmittelwerte zum *cognitive load*, erfasst durch 2 Items zum allgemeinen *cognitive load*. 50
- Diagramm 6: Skalenmittelwerte zum *cognitive load* als kombinierte Werte übergeordneter sowie subkategorisierter Items. Die neunstufige Skala zur kognitiven Belastung wurde in Summe ausgewertet. Zur Mittelwertbildung wurde der Mittelwert der drei *Items intrinsic*, *extraneous* und *germane cognitive load* mit dem Item zur übergeordneten Kategorie *cognitive load* subsummiert. Der Mittelwert dieser beiden Werte ist hier abgebildet. 51
- Diagramm 7: Darstellung der Übereinstimmungen der drei Skalenmittelwerte zum *cognitive load*. Dargestellt sind die prozentualen Skalenmittelwerte als prozentualer Anteil des Maximalwerts der einzelnen Skalen. Auf Standardabweichungen wurde hier zwecks Übersichtlichkeit verzichtet. Die insgesamt erkennbare Passung der Skalen gegeneinander lässt die Validität der Items erkennen. 52
- Diagramm 8: *intrinsic cognitive load*, erfasst durch drei Items. Die Einschätzung der thematischen Schwierigkeit polarisiert erkennbar. 53
- Diagramm 9: Skalenmittelwerte des *intrinsic cognitive load*, erhoben mit einem neunstufigen Item. Die Einschätzung erscheint hier etwas weniger heterogen als in der differenzierten Erfassung, mit einer Tendenz zur Mitte. 54

Diagramm 10: Vergleich der Skalenmittelwerte des <i>intrinsic cognitive load</i>	55
Diagramm 11: Skalenmittelwerte des <i>extraneous cognitive load</i> nach Erhebung mit Hilfe von drei elfstufigen Items. Bei zumeist geringer bis mittlerer Streuung zeigen sich niedrige Werte. Ein niedriger Zahlenwert bildet gemäß der eingesetzten Items eine große Unklarheit und mangelnden Nutzen der Instruktionen ab.	56
Diagramm 12: Skalenmittelwerte <i>extraneous cognitive load</i> nach Erfassung mit einem neunstufigen Item. Hier fällt die weniger differenzierte Betrachtung wertemäßig etwas höher aus als in der vorherigen Skala.	56
Diagramm 13: Vergleich der Skalenmittelwerte des <i>extraneous cognitive load</i> . Die Passung ist hier nur in Teilen gegeben.	57
Diagramm 14: Skalenmittelwerte des mit vier elfstufigen Items erhobenen <i>germane cognitive load</i> . Bei gemäßiger Streuung rangieren die Werte überwiegend im mittleren Bereich.	58
Diagramm 15: Skalenmittelwerte zum <i>germane cognitive load</i> , erhoben mit einem Item. Der überwiegende Teil der Schüler ordnete die erforderliche Konzentration zur Bearbeitung den mittleren Ratingoptionen zu.	59
Diagramm 16: Vergleich der prozentualen Skalenmittelwerte der erhobenen Skalen des <i>germane cognitive load</i> . In weiten Teilen ist die Passung der Skalen zueinander als gut anzusehen.	60
Diagramm 17: Häufigkeitsverteilung der kategorisierten Fragen in Bezug auf die Adressatenwahl. Von insgesamt 108 erfassten Fragen wurden 100 an übrige Teilnehmende gerichtet. Demgegenüber stehen acht an Lehrkräfte gerichtete Fragen.	63
Diagramm 18: Häufigkeitsverteilung der erfassten Hauptkategorien der Videoanalyse. Eine deutliche Diskrepanz zwischen Verfahrensfragen als meist aufgetretenen und Konfirmations- oder anderen Fragen als am seltensten codierte Frageformate wird erkennbar.	65
Diagramm 19: Häufigkeitsverteilung aller Fragen über die Subkategorien. Der überwiegende Teil der aufgetretenen Probleme war organisatorischer Natur, in deutlichem Abstand gefolgt von Fragen zu Inhalten.	66
Diagramm 20: Lesbarkeitsindex der Instruktionstexte vor Überarbeitung. Mit nur geringer Schwankungsbreite liegen alle Texte im mittleren Schwierigkeitsbereich.	70
Diagramm 21: Vergleich der LIX-Kennwerte vor und nach Überarbeitung der Instruktionstexte. Es ist ersichtlich, dass keine maßgebliche Veränderung der schwierigkeitsgenerierende Merkmale stattfand.	75

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Freilandmobil der Universität Koblenz-Landau, Campus Landau, AG Chemiedidaktik, dient als Ausgangsort für die Freilandeinheiten. Durch Sitz- und Arbeitsgelegenheiten ist das Konzept sinnvoll ergänzt.	23
Abbildung 2: Die Messergebnisse und Beobachtungen wurden zentral gesammelt zur gemeinsamen Diskussion.	27
Abbildung 3: Vorstrukturierte Übersicht der Gruppen. Hier lassen sich vor Ort die zu erhebenden Parameter und Namen der Gruppenmitglieder eintragen.	28
Abbildung 4: Eine siebenstufige Skala zur Erfassung des <i>cognitive load</i> bestehend aus zwei Items nach Koenen (2014, S. 79).	32
Abbildung 5: Die verwendete Skala zur Einschätzung des <i>cognitive load</i> und dessen Subskalen <i>intrinsic</i> , <i>extraneous</i> und <i>germane cognitive load</i>	33
Abbildung 6: Zehnstufige zehn-Item-Skala zur Erhebung des <i>cognitive load</i> differenziert in Subskalen. Items 1-3 beziehen sich auf den <i>intrinsic cognitive load</i> , Items 4-6 auf den <i>extraneous cognitive load</i> und Items 8-10 auf den <i>germane cognitive load</i>	34
Abbildung 7: Skala zur Erhebung der Befindlichkeit der Teilnehmer während der Freilandarbeit. Insbesondere äußere Einflüsse der gegenüber dem Klassenraum veränderten Umgebungsbedingungen kamen hier zum Tragen.	35
Abbildung 8: Skala aus elf Items zur Erfassung des aktuellen Interesses. Die Unterteilung erfolgt vierstufig.	36
Abbildung 9: Schwierigkeits-Skala des Lesbarkeitsindex (LIX) nach (Renström, 1980, S. 153)	70
Abbildung 10: "Checkliste zur Optimierung von multimedialen Arbeitsblättern" nach (Emden, 2016, S. 55)	71

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig verfasst wurde und ich keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel – insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen – benutzt habe und die Arbeit von mir vorher nicht in einem anderen Prüfungs-verfahren eingereicht wurde. Die eingereichte schriftliche Fassung entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium (DVD-ROM).

Ort, Datum

Unterschrift

Einverständnis zur Nutzung der Abschlussarbeit

Ich, Neff, Sascha, geb. am 04.02.1991, übertrage hiermit der Universität Koblenz-Landau ein unentgeltliches, ausschließliches Verwertungsrecht an meinem Werk „Konzeption, Durchführung und Evaluation einer Einheit zum Thema „Gewässeranalytik“ für die Sekundarstufe II am Schülerlabor Freilandmobil“ für nicht-kommerzielle Zwecke. Ich verpflichte mich zudem, mein Werk kommerziell nur im Einvernehmen mit der Universität Koblenz-Landau zu nutzen.

Ort, Datum

Unterschrift

Anhänge

Die aufgeführten Unterlagen finden sich in der dargestellten Anordnung auf den Folgeseiten.

Anhang I – Handreichung zur Konzeption

Anhang II – Arbeitsblatt „Bedienung MiLab“ überarbeitete Fassung

Anhang III – Arbeitsblatt „Fließgeschwindigkeit messen“ überarbeitete Fassung

Anhang IV – Arbeitsblatt „pH-Werte messen“ überarbeitete Fassung

Anhang V – Arbeitsblatt „Leitfähigkeit messen“ überarbeitete Fassung

Anhang VI – Arbeitsblatt „Sauerstoff-Gehalte messen“ überarbeitete Fassung

Anhang VII – Arbeitsblatt „Ionen-Gehalte messen“ überarbeitete Fassung

Anhang VIII – Arbeitsblatt „Sensorische Beurteilung“ überarbeitete Fassung

Anhang IX – Auswertungshilfe Einzelergebnisse – Gewässergüteklassen

Anhang X – erhobene Gewässerdaten der Queich

Anhang XI – Gewässeranalyse XXXXXXXXXX

Digitale Anlagen

- Ausgangsfassungen der vorgenannten Arbeitsblätter
- Checklisten zur Überarbeitung der Arbeitsblätter
- Materialien zur Gewässerbewertung einschließlich Gewässerstrukturgüte und biologischer Parameter nach Vereinigung Deutscher Gewässerschutz
- Digitalisierte Fragebögen der Erhebung
- Videospuren der videografierten Ausschnitte
- Teiltranskripte der videografierten Ausschnitte
- Digitale Fassung der vorliegenden Arbeit
- Digitale Fassung der verwendeten Literatur

Die Queich – Zahlen & Fakten

Eine Handreichung

Zeitangabe: 90 Minuten

Einführung: Die Queich bietet als kleines Flüsschen abwechslungsreiche Lebensräume für Tiere. In sie werden Wasser und Stoffe eingebracht und aus ihr entnommen. Auf ihrem Weg durchfließt sie Städte, Äcker und Wälder. Ist die Wasserqualität tatsächlich noch gut, oder machen äußere Einflüsse die Queich zu einem schmutzigen Rinnsal?

Ziele: Anhand einer Vielzahl von Parametern sollen die Schülerinnen und Schüler die Gewässergüte der Queich am Messpunkt abschätzen und interpretieren. Sie sollen hierbei den Umgang mit Messgeräten und Bestimmungshilfen üben, Messwerte ermitteln und verarbeiten, sowie städtebauliche und zivilisatorische Einflüsse recherchieren und abwägen können.

Materialien: Die benötigten Materialien werden nach Absprache fertig vorbereitet für die entsprechenden Gruppen am Eduard-Spranger-Gymnasium Landau/ Freilandmobil zur Verfügung gestellt.

Zielgruppe: Schülerinnen und Schüler der Oberstufe

Methodik: Die Schülerinnen und Schüler erheben ihre Daten in arbeitsteiliger Gruppenarbeit. Hierbei steht die Lehrkraft beratend zur Seite.

Anschließend werden die Daten zusammengetragen und besprochen. Eine Übersicht über die Messdaten wird erstellt. Die Lehrkraft moderiert dies.

Zum Abschluss können die Daten durch Eingabe in das System FLUIDAT festgehalten und ausgewertet werden.

1. Gruppenbildung

Bildet Gruppen aus je ca. 3 – 5 Schülerinnen und Schülern:

- Physikalische Parameter
- Allgemeine chemische Parameter
- Ionen-Bestimmung (ISE)
- Gewässerstrukturgüte

2. Arbeitsteilige Gruppenarbeit

1. Gruppe physikalische Parameter: bestimmt mit Hilfe des einstein-Messsystems
 - Lufttemperatur
 - Wetterdaten (Luftdruck, Beleuchtungsstärke)
 - Wassertemperatur
 - Leitfähigkeit
2. Gruppe allgemeine chemische Parameter: bestimmt mit Hilfe des einstein-Messsystems
 - Sauerstoff-Sättigung
 - pH-Wert
 - Farbe (visuell)
 - Geruch
 - Trübung (visuell)
3. Gruppe Ionen-Bestimmung (ISE): bestimmt mit den ISE im einstein System:
 - Ammonium-Ionen
 - Nitrat-Ionen
 - Chlorid-Ionen
4. Gruppe Gewässerstrukturgüte: bestimmt mit Hilfe des Bewertungsbogens die geschätzte Gewässerstrukturgüte. Holt euch hierzu Informationen der anderen Gruppen ein, wenn nötig. Recherchiert anhand der Karten und weiteren Materials, welche Eintragungen und zivilisatorische Einflüsse auf das Gewässer wirken (z.B. Abwässer, Landwirtschaft, etc....) Wie schätzt ihr diese ein?
 - Verlauf der Fließgeschwindigkeit (Strömungsschatten, Randbereiche,...)

Alle:

Notiert eure Messwerte und Ergebnisse ordentlich, sodass diese zur Auswertung zusammengetragen werden können.

Beurteilt die erhobenen Daten anhand der Auswertungshilfe.

Abschließend werden die Werte gesammelt und besprochen.



Aufbau der Messgeräte

Zeitangabe: 5 Minuten

In der analytischen Chemie werden Parameter und Messdaten meist durch elektronische Messgeräte erfasst. Sie liefern häufig schneller genauere Werte als herkömmliche Nachweise. Außerdem sind sie ständig wiederverwendbar und können meist auch sehr kleine Schwankungen der Werte darstellen.

Für das Experiment benötigst du die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Beliebige Einstein Mess-Elektrode

So baust du das Messgerät auf:

1. Starte die App MiLab auf dem Tablet. Schalte das einstein LabMate+ durch langes drücken der Taste ein, so dass es grün blinkt. Verbinde dann die App per Bluetooth mit dem einstein LabMate+ Datenlogger.

Anmerkung: Die letzten 4 Ziffern der Seriennummer auf der Rückseite des LabMate+ geben die Bluetooth-Kennung an.

2. Verbinde die Elektrode mit dem Datenlogger durch miniUSB-Kabel und Converter-Box.

Hinweis: Du kannst die **Dauer** und die **Häufigkeit der Messungen** einstellen. Überlege dir vor jeder Messung welche Einstellungen hier sinnvoll sind. Überlege auch, ob die Genauigkeit der ausgegebenen Messwerte zur Durchführung passt.

Zur Einstellung der Messrate, klicke auf das Zahnrad hinter „Rate“.

Stelle dann die gewünschte Messrate und –Dauer ein. Und bestätige durch Klick auf den grünen Pfeil unten rechts.



automatische
Datenerfassung



Datenerfassung ab
Trigger-Wert



Manuelle
Messwernerfassung



Ereignisbasierte
Zeitmessung

Abtastrate	Dauer			Messwerte
	Std	Min	Sek	
25 Messungen/s	13	2	59	1801
10 Messungen/s	0	3	0	
jede Sekunde	1	4	1	

x - Achse

Zeit



Prognose

Deaktiviert



Nach dem Experimentieren:

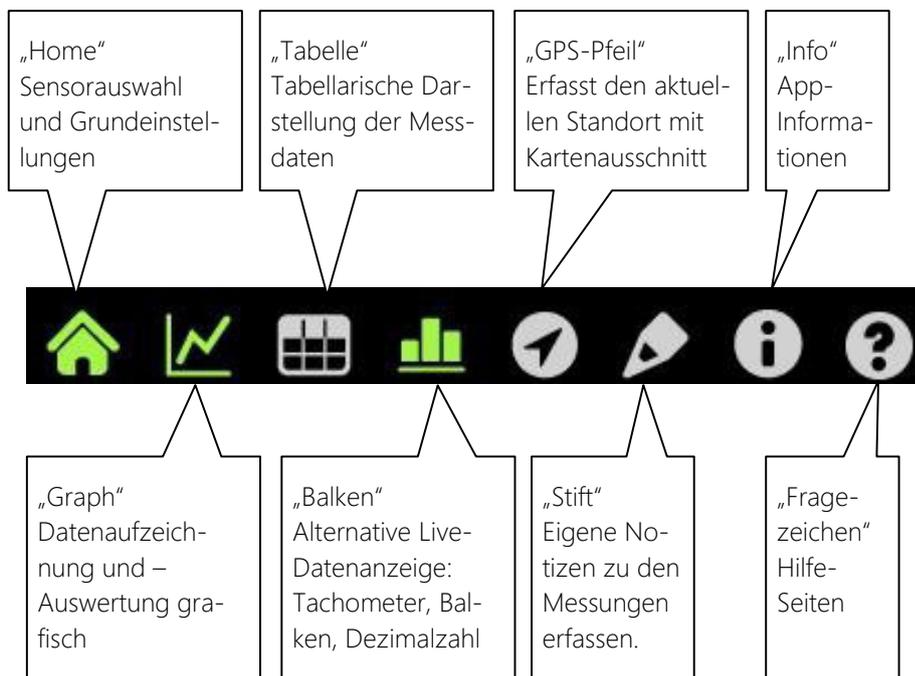
- Speichere deine Daten lokal oder exportiere deine Messreihen. Notiere die wichtigsten Werte auch manuell!



Gut zu wissen:

Über die Auswahlliste unten links in der App, kannst du dir zusätzliche Informationen anzeigen lassen oder diese zu den Daten aufnehmen.

Du kannst dir dort auch die Daten in der App auf viele verschiedene Arten ansehen.



Fließgeschwindigkeit messen

Zeitangabe: 20 Minuten

Bestimmt hast du schon einmal beobachtet, wie ein Gegenstand in einem Fluss treibt, oder wie sich das Aussehen der Wasseroberfläche an manchen Stellen verändert. Was denkst du, wie diese Strömungsformen zustande kommen und welche Auswirkungen sie auf Pflanzen und Tiere haben? Welche Faktoren könnten deiner Ansicht nach die Strömungsgeschwindigkeit beeinflussen, oder ist diese immer gleich?

Für das Experiment benötigst du die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein Fließgeschwindigkeits-Elektrode
- Papiertücher
- Kabelbinder
- Schere
- Stabiler Teleskopstab (z.B. von Ke-schern)

So führst du das Experiment durch:

1. Baue das Messgerät zusammen, indem du die Plastikrohre ineinander steckst. Am unteren Ende werden **Abstandhalter** zum Gewässerboden befestigt, sodass der Propeller nicht aus Versehen in den Boden gedrückt werden kann. Wähle die Abstandshalter passend zur Tiefe, in der du messen willst.



2. Verbinde das Kabel über die Adapter mit der Einstein LabMate+ Box. Wähle in der MiLAB App den Fließgeschwindigkeits-Sensor aus. Du findest diesen über den **Ausklapp-Pfeil** in der Sensorenliste am linken Bildschirmrand.





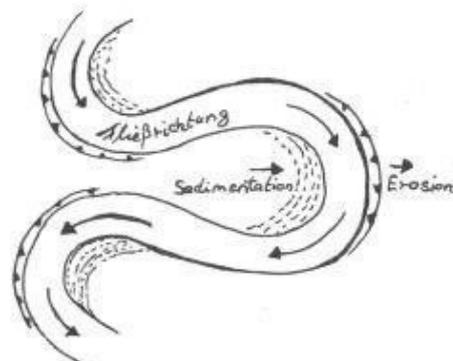
3. Befestige die Plastikrohre mit Kabelbindern so am Ende eines Teleskop-Stabes, dass der Propeller frei drehen kann, und du ihn sicher in die Strömung halten kannst.
4. Du kannst nun die Fließgeschwindigkeit von Gewässern bestimmen. Nimm hierzu an mehreren Stellen im Gewässer Messdaten auf. Eine Messung kannst du durch Antippen des „Play-Pfeiles“ starten. 
5. Die gemessenen Werte sind nur im Zusammenhang der Position der Messung aussagekräftig. Notiere diese Angaben jeweils zusammen. Achte auf die eingestellte **Messrate**. Gegebenenfalls musst du diese anpassen. 

Nach dem Experimentieren:

- Säubere die Materialien am Spültisch mit klarem Wasser
- Trockne das Messgerät mit Papier ab
- Speichere deine Daten lokal oder exportiere deine Messreihen zusammen mit Informationen zu den Messstellen für eine optimale Auswertung.

Das konntest du beobachten:

Stellen hoher Fließgeschwindigkeit im Randbereich des Gewässers gehen mit einer anderen Uferform einher als Stellen langsamer Fließgeschwindigkeit. In geraden Abschnitten ist die Fließgeschwindigkeit in der Mitte meist höher. Direkt nach Hindernissen im Strom ist die Fließgeschwindigkeit sehr gering. Es kann dort sogar Stellen geben, an denen sich die Fließrichtung umkehrt. Häufig ist die gemessene Geschwindigkeit an der Oberfläche höher als am Grund.



https://www.geocaching.com/geocache/GC65TCR_aus-dem-leben-eines-flusses?guid=9aa27d18-aa20-4e92-97cf-3ae79541521a

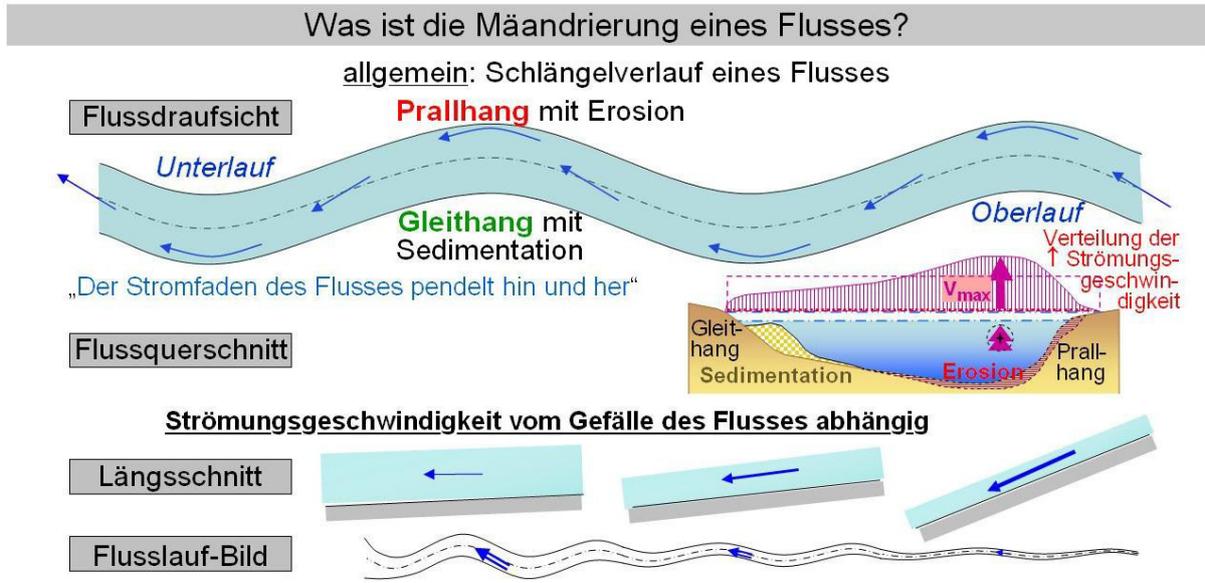
So lässt sich erklären, was du beobachtet hast:

Die auf das Ufer treffende Strömung verursacht einen Abtrag von Ufer-Material. Man spricht vom Prozess der Erosion, es bildet sich ein sogenannter Prallhang, an den das Wasser mit höherer Geschwindigkeit und Kraft „prallt“. An Stellen, an welchen das Wasser mit geringer Geschwindigkeit vorbei fließt, können sich Sedimente (also Sand etc.) ablagern. Hier kann sich ein Gleithang bilden.

Vertiefende Informationen

Flussläufe wurden häufig durch Menschen begradigt. Dies kann viele Gründe haben: gerade Flussläufe sind einfach mit Schiffen befahrbar, da sich der Flusslauf kaum ändert, sind die Ufer besser bebaubar, stabile Ufer ermöglichen eine intensive Nutzung, Grundflächen werden nicht verändert, etc.

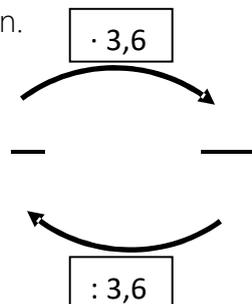
Ein natürlicher Flusslauf verschiebt sich im Laufe der Zeit. Kurven entstehen durch das Zusammenspiel von Gefälle und Erosion, und verschwinden wieder, wenn die Erosion weiter fortgeschritten ist. So ist ein Flusslauf ein dynamisches System.



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:K%C3%BCsteningenieurwesen_M%C3%A4andrierung.jpg

Durch Hindernisse im Gewässer kann es zur Bildung sogenannter Kehrwasser-Bereiche kommen. Hier fließt das Wasser hinter dem Hindernis entgegen der Hauptströmungsrichtung des Gewässers. Solche Bereiche stellen meist sehr ruhige Abschnitte im Vergleich zum Hauptstrom dar. Aufgrund der geringen Strömung und der mit der Änderung der Strömungsrichtung verbundenen Strudelbildung können sich hier Treibgut und Schwebstoffe ansammeln.

Die gemessene Geschwindigkeit ist in der Einheit m/s angegeben. Du kannst sie ganz einfach in die Einheit km/h umrechnen, um sie besser mit dir bekannten Geschwindigkeiten zu vergleichen.



pH-Werte messen

Zeitangabe: 15 Minuten

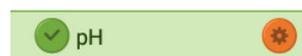
Der pH-Wert einer Lösung gibt an, wie sauer oder basisch sie ist. Da bestimmte Pflanzen und Lebewesen nur innerhalb eines schmalen pH-Korridors überleben können, gibt dieser Wert Anhaltspunkte für die Flora und Fauna eines Gewässers. Darüber hinaus wirkt der pH-Wert auf viele weitere Parameter. So erhöht ein saurer pH-Wert beispielsweise die Mobilität von Schwermetallen im Boden, wodurch diese gelöst in das Wasser gelangen können. In diesem Versuch findest du heraus, wie stark und warum die pH-Werte unserer Gewässer schwanken.

Für das Experiment benötigst du die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein pH-Elektrode
- Pufferlösung pH4 Standard
- Pufferlösung pH 7 oder 10 Standard
- 2 kleine Bechergläser (50-100ml) zur Kalibration
- Destilliertes Wasser
- Papiertücher
- Mehrere große Bechergläser zur Probenahme

So führst du das Experiment durch:

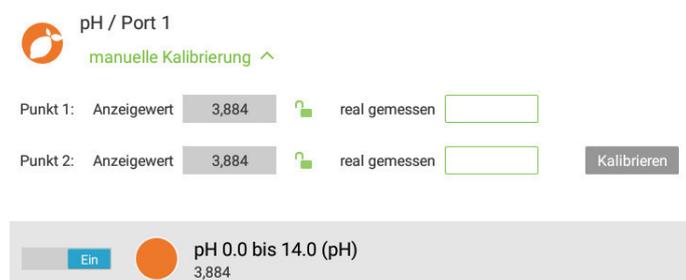
1. Verbinde den Sensor wie dargestellt mit dem Datenlogger. Wähle in der MiLAB App den pH-Sensor aus und tippe auf das Zahnrad hinter der Sensor-Bezeichnung. Klappe das Feld zum manuellen Kalibrieren des Sensors auf.



2. Tippe in das obere Feld den Wert „4“ ein. Halte die Elektrode in ein kleines Becherglas mit der Pufferlösung (pH=4 Standard). Wenn sich der Wert stabilisiert hat, logge ihn durch Anklicken des „Schloss“-Symboles ein.

3. Spüle die Elektrode mit destilliertem Wasser ab und tupfe sie mit Papier trocken.

4. Tippe den Wert der zweiten Pufferlösung (pH=7 oder pH=10) in das untere Feld ein und halte die Elektrode





dann in ein kleines Becherglas mit der entsprechenden Pufferlösung. Warte erneut die Einstellung des Wertes ab und logge diesen dann ein. Tippe anschließend auf „Kalibrieren“

- Du kannst nun den pH-Wert von Wasserproben bestimmen. Entnimm hierzu an verschiedenen Stellen Proben und ermittle die Messwerte. Eine Messung kannst du durch Antippen des „Play-Pfeiles“ starten.



Entsorgung der Abfälle:

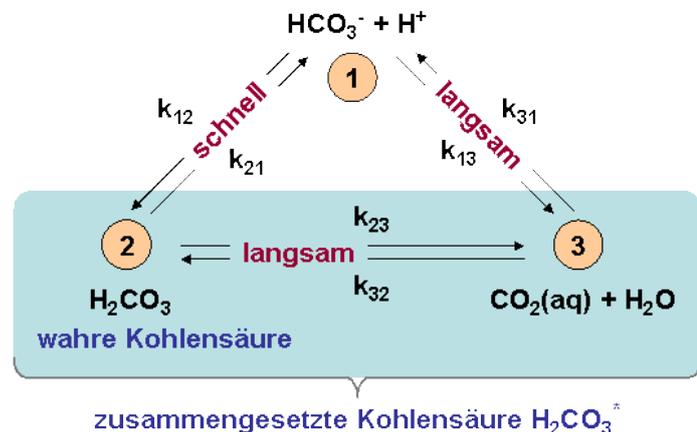
- Pufferlösungen aufbewahren, Wasserproben können ausgeschüttet werden
- Feststoffabfälle in den Mülleimer
- Säubere die Materialien am Spültisch
- Spüle die Elektrode mit destilliertem Wasser, tupfe sie trocken und bewahre sie in der Aufbewahrungslösung auf (Elektrode muss eingetaucht sein!)

Das konntest du beobachten:

Die pH-Werte von Gewässern bewegen sich in der Regel im neutralen Bereich. Trotzdem sind Schwankungen möglich. In der Regel liegen die Messwerte zwischen 6,5 und 8.

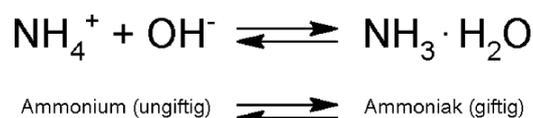
So lässt sich erklären, was du beobachtet hast:

Biologische und chemische Prozesse beeinflussen die Einstellung des pH-Werts eines Gewässers. Einen starken Einfluss hat die Aufnahme von CO₂ aus der Luft. Durch die Reaktion mit Wasser kommt es zur Bildung der „Kohlensäure“ und somit zur Senkung des pH-Wertes in den sauren Bereich.



Vertiefende Informationen

Der pH-Wert eines Gewässers sollte im neutralen Bereich liegen. Eine Schwankung in den alkalischen oder sauren Bereich löst im Gewässer eine Reihe weiterer Reaktionen aus. So kann bei basischer Verschiebung des pH-Werts beispielsweise Ammoniak aus Ammonium freigesetzt werden. Der freiwerdende Ammoniak wirkt besonders auf Fische giftig.



Leitfähigkeit messen

Zeitangabe: 15 Minuten

Aus dem Chemieunterricht weißt du, dass reines Wasser elektrischen Strom fast gar nicht leitet. Wieso ist die Konstruktion in nebenstehender Abbildung dann überhaupt so gefährlich? Und was hat das mit unseren Gewässern zu tun? Mit diesem Versuch kannst du es herausfinden!



<https://www.watson.ch/imgdb/45b6/Qx,A,0,0,512,362,217,145,100,75/5276452339181954>

Für das Experiment benötigst du die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein LF-Elektrode
- Destilliertes Wasser
- Papiertücher
- Thermometer
- Mehrere große Bechergläser zur Probenahme
- Leitfähigkeits-Standardlösungen

So führst du das Experiment durch:

1. Verbinde den Sensor mit dem Datenlogger. Wähle in der MiLAB App den Leitfähigkeits-Sensor aus und tippe auf das Zahnrad hinter der Sensor-Bezeichnung. Klappe das Feld zum manuellen Kalibrieren des Sensors auf.



2. Tippe in das obere Feld den Wert der ersten Standard-Lösung ein. Halte die Elektrode in die Standard-Lösung. Wenn sich der **Wert stabilisiert** hat, logge ihn durch Anklicken des „Schloss“-Symboles ein.



Beachte: Der Sensor muss bis zum oberen Ende des Ausschnittes eingetaucht sein!

3. Spüle die Elektrode mit destilliertem Wasser ab und tupfe sie mit Papier trocken.





- Tippe den Wert des zweiten Standards in das untere Feld ein. Halte dann die Elektrode in diesen Standard und warte bis der Wert stabil ist. Logge diesen dann ein. Tippe anschließend auf „Kalibrieren“
- Du kannst nun die Leitfähigkeit von Wasserproben bestimmen. Entnimm hierzu an verschiedenen Stellen Proben und ermittle die Messwerte. Eine Messung kannst du durch Antippen des „Play-Pfeiles“ starten.
- Die gemessenen Werte sind nur im **Zusammenhang mit der Temperatur der Wasserprobe** aussagekräftig. Notiere diese Werte jeweils zusammen und korrigiere die Messwerte zur Auswertung mit Hilfe der Tabelle.



Entsorgung der Abfälle:

- Standards aufbewahren, Wasserproben können ausgeschüttet werden
- Feststoffabfälle in den Mülleimer
- Säubere die Materialien am Spültisch
- Spüle die Elektrode mit destilliertem Wasser, tupfe sie trocken und verpacke sie

Das konntest du beobachten:

Gewässer weisen unterschiedliche Leitfähigkeiten auf. Dies gibt uns einen Hinweis auf die Menge der enthaltenen Ionen. Die Leitfähigkeitswerte sind deutlich von der Temperatur abhängig.

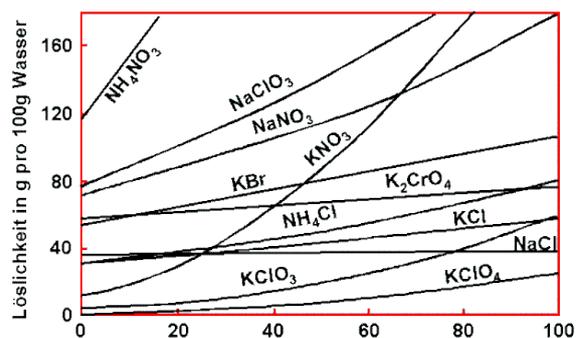
So lässt sich erklären, was du beobachtet hast:

Gelöste Ionen im Wasser ermöglichen einen Ladungstransport. Dadurch ist es möglich bei Anlegen einer Spannung eine Leitfähigkeit zu messen. In Abhängigkeit von der Wassertemperatur können sich verschiedene Stoffe unterschiedlich gut lösen.

Vertiefende Informationen

In nebenstehender Abbildung sind Löslichkeitskurven verschiedener Salze in Abhängigkeit von der Wassertemperatur aufgetragen. Aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit des Löslichkeitsproduktes ist die Temperaturangabe unbedingt notwendig.

Aus unten stehender Tabelle lässt sich für jede Wassertemperatur ein Korrekturfaktor



http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/11/aac/vorlesung/kap_7/kap7_5/kap7_52/grafik/t_abaengigkeit.gif

ablesen. Durch Multiplikation des Faktors mit dem gemessenen Leitfähigkeits-Wert ergibt sich die reale Leitfähigkeit, standardisiert bezogen auf 25°C.

Beispiel: Das Wasser hat eine gemessene Temperatur von 20°C und eine gemessene Leitfähigkeit von 5 mS/cm. Der zugehörige Korrekturfaktor ist 1,116.

Der reale Leitfähigkeitswert ergibt sich aus:

t	°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	1,918	1,912	1,906	1,899	1,893	1,887	1,881	1,875	1,869	1,863	
1	1,857	1,851	1,845	1,840	1,834	1,828	1,822	1,817	1,811	1,805	
2	1,800	1,794	1,788	1,783	1,777	1,772	1,766	1,761	1,756	1,750	
3	1,745	1,740	1,734	1,729	1,724	1,719	1,713	1,708	1,703	1,698	
4	1,693	1,638	1,683	1,678	1,673	1,668	1,663	1,658	1,653	1,648	
5	1,643	1,638	1,634	1,629	1,624	1,619	1,615	1,610	1,605	1,601	
6	1,596	1,591	1,587	1,582	1,578	1,573	1,569	1,564	1,560	1,555	
7	1,551	1,547	1,542	1,538	1,534	1,529	1,525	1,521	1,516	1,512	
8	1,508	1,504	1,500	1,496	1,491	1,487	1,483	1,479	1,475	1,471	
9	1,467	1,463	1,459	1,455	1,451	1,44	1,443	1,439	1,436	1,432	
10	1,428	1,424	1,420	1,416	1,413	1,409	1,405	1,401	1,398	1,394	
11	1,390	1,387	1,383	1,379	1,376	1,372	1,369	1,365	1,362	1,358	
12	1,354	1,351	1,347	1,344	1,341	1,337	1,334	1,330	1,327	1,323	
13	1,320	1,317	1,313	1,310	1,307	1,303	1,300	1,297	1,294	1,290	
14	1,287	1,284	1,281	1,278	1,274	1,271	1,268	1,265	1,262	1,259	
15	1,256	1,253	1,249	1,246	1,243	1,240	1,237	1,234	1,231	1,228	
16	1,225	1,222	1,219	1,216	1,214	1,211	1,200	1,205	1,202	1,199	
17	1,196	1,193	1,191	1,188	1,185	1,182	1,179	1,177	1,174	1,171	
18	1,168	1,166	1,163	1,160	1,157	1,155	1,152	1,149	1,147	1,144	
19	1,141	1,139	1,136	1,134	1,131	1,128	1,126	1,123	1,121	1,118	
20	1,116	1,113	1,111	1,108	1,105	1,103	1,101	1,098	1,096	1,093	
21	1,091	1,088	1,086	1,083	1,081	1,079	1,076	1,074	1,071	1,069	
22	1,067	1,064	1,062	1,060	1,057	1,055	1,053	1,051	1,048	1,046	
23	1,044	1,041	1,039	1,037	1,035	1,032	1,030	1,028	1,026	1,024	
24	1,021	1,019	1,017	1,015	1,013	1,011	1,008	1,006	1,004	1,002	
25	1,000	0,998	0,996	0,994	0,992	0,990	0,987	0,985	0,983	0,981	
26	0,979	0,977	0,975	0,973	0,971	0,969	0,967	0,965	0,963	0,961	
27	0,959	0,957	0,955	0,953	0,952	0,950	0,948	0,946	0,944	0,942	
28	0,940	0,938	0,936	0,934	0,933	0,931	0,929	0,927	0,925	0,923	
29	0,921	0,920	0,918	0,916	0,914	0,912	0,911	0,909	0,907	0,905	
30	0,903	0,902	0,900	0,898	0,896	0,895	0,893	0,891	0,889	0,888	
31	0,886	0,884	0,883	0,881	0,879	0,877	0,876	0,874	0,872	0,871	
32	0,869	0,867	0,865	0,864	0,863	0,861	0,859	0,858	0,856	0,854	
33	0,853	0,851	0,850	0,848	0,846	0,845	0,843	0,842	0,840	0,839	
34	0,837	0,835	0,834	0,832	0,831	0,829	0,828	0,826	0,825	0,823	
35	0,822	0,820	0,819	0,817	0,816	0,814	0,814	0,811	0,810	0,809	

<https://www.chf.de/eduthek/chemischer-index14.html>

Sauerstoff-Gehalte messen

Zeitangabe: 15 Minuten

Sauerstoff ist nicht nur für den Menschen, sondern auch für viele weitere Lebewesen die Grundlage des Lebens. Sauerstoff kommt nicht nur in der Luft vor, sondern ist auch in Gewässern vorhanden. Ist er dort nicht in ausreichendem Maß vorhanden, kann es im schlimmsten Fall zu Fischsterben kommen. Wie viel Sauerstoff in Gewässern vorkommt und wie er dorthin gelangt, kannst du im folgenden Versuch entdecken.

Für das Experiment benötigst du die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein O₂-Elektrode
- Salzlösung Null-Standard
- Großes Becherglas (250 mL)
- Glasstab
- Destilliertes Wasser
- Papiertücher
- Thermometer
- Mehrere große Bechergläser zur Probenahme

So führst du das Experiment durch:

1. Wähle in der MiLAB App den Sauerstoff-Sensor aus und tippe auf das Zahnrad hinter der Sensor-Bezeichnung. Wähle die **Option „Sauerstoff in Flüssigkeiten [mg/L]“**. Klappe das Feld zum manuellen Kalibrieren des Sensors auf.
2. Tippe in das obere Feld den Wert „0“ ein. Halte die Elektrode in die Salzlösung (**Null-Standard**). Wenn sich der Wert stabilisiert hat, logge ihn durch Anklicken des „Schloss“-Symboles ein.



Anmerkung: Es dauert eine Weile, bis sich der Wert stabilisiert! Sei geduldig! Die Membran der Elektrode ist sehr empfindlich und grenzt die Elektrodenlösung im Inneren ab. Falls die Membran beschädigt wurde oder Luftblasen sichtbar sind, lasse dir von einer Lehrkraft helfen.

3. Spüle die Elektrode mit destilliertem Wasser ab und tupfe sie mit Papier trocken.





4. Sättige etwas destilliertes Wasser mit Sauerstoff, indem du es mit dem Glasstab kräftig aufrührst. Bestimme mit dem Thermometer die Temperatur des Wassers. Lies in untenstehender Tabelle den Wert der Sättigung bei der gemessenen Temperatur ab. Dies ist dein **zweiter Punkt zur Kalibration!** Tippe diesen Wert in das untere Feld ein, Halte die Elektrode in das Wasser, warte erneut die Einstellung des Wertes ab und logge diesen dann ein. Tippe anschließend auf „Kalibrieren“
5. Du kannst nun den Sauerstoffgehalt von Wasserproben bestimmen. Entnimm hierzu an verschiedenen Stellen Proben und ermittle die Messwerte. Eine Messung kannst du durch Antippen des „Play-Pfeiles“  starten. Achte darauf möglichst **frische Proben zu nehmen und diese schnell zu verarbeiten**, da der Sauerstoffgehalt schnell abnimmt.
6. Die gemessenen Werte sind nur im Zusammenhang mit der Temperatur der Wasserprobe aussagekräftig. Notiere diese Werte jeweils zusammen und korrigiere die Temperatur anhand der Tabelle.

Entsorgung der Abfälle:

- Salzlösung aufbewahren, Wasserproben können ausgeschüttet werden
- Feststoffabfälle in den Mülleimer
- Säubere die Materialien am Spültisch

Das konntest du beobachten:

Gewässer weisen unterschiedliche Sauerstoffgehalte auf. In der Regel haben fließende Gewässer höhere Sauerstoff-Gehalte als stehende. Ebenso weisen kältere Gewässer einen höheren Sauerstoff-Gehalt auf als wärmere.

So lässt sich erklären, was du beobachtet hast:

Sauerstoff kann besonders gut durch Bewegung und Durchmischung des Wassers mit Luft in ein Gewässer gelangen. Daher sind Fließgewässer meist Sauerstoffreicher.

Vertiefende Informationen

Der Sauerstoffgehalt eines Gewässers ist das Ergebnis eines Wechselspiels Sauerstoffliefernder und -zehrender Vorgänge. Die Photosynthese von Pflanzen im Wasser liefert beispielsweise Sauerstoff, während der Abbau organischer Stoffe und die Stoffwechselvorgänge vieler Lebewesen Sauerstoff verbrauchen. Physikalisch hängt der Sauerstoffgehalt hauptsächlich von der Oberfläche des Gewässers und dessen Temperatur ab. Durch Luftbewegungen und Wasserturbulenzen wird die Sauerstoff-Sättigung erhöht. Deshalb wird als „Erstmaßnahme“ bei akuten Fischsterben aufgrund „gekippter“ Seen zunächst häufig

versucht den Sauerstoffgehalt durch massives Umwälzen des Gewässers mittels Wasserpumpen und –Werfern zu erhöhen. Fische benötigen zum Überleben einen bestimmten Sauerstoffgehalt. So brauchen Karpfen mindestens 4 mg/L Sauerstoff (dauerhaft >5 mg/L), Forellen benötigen sogar ein Minimum von 7 mg/L (dauerhaft >10 mg/L).



De i August 7 „gekippete“ Schwae weiher i Landau wird Sauerstoff zugeführt.

Quelle: THW OV Landau - https://ov-landau.thw.de/uploads/pics/IMG_0472_04.JPG

Temperaturabhängige Sättigungswerte von Sauerstoff in Wasser bei einem Luftdruck von 1013 mbar										
Sauerstoff ist in Wasser physikalisch gelöst, d.h. der Sättigungswert in Wasser hängt vor allem vom Partialdruck des Sauerstoffs in der Luft ab. Luft hat einen O ₂ -Gehalt von 20,95%: → $p_{O_2} = 0,2095 \cdot 1013 \text{ mbar} = 212,2 \text{ mbar}$. Der Sättigungszustand im Wasser ist dann erreicht, wenn der Partialdruck von O ₂ im Wasser gleich dem der Luft ist. Zusätzlich hat auch noch die Temperatur Einfluss, da der Dampfdruck von Wasserdampf mit steigender Temperatur zunimmt und somit bei der Berechnung vom Luftdruck noch abgezogen werden muss → für die Berechnung gilt: $p_{O_2} = x_{O_2} \cdot (p_L - p_W)$. Je höher die Temperatur, desto größer der Wasserdampfdruck und desto geringer der Anteil von O ₂ in Wasser.										
t[°C]	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
	<i>mg O₂/l</i>									
0	14,16	14,12	14,08	14,04	14,00	13,97	13,93	13,89	13,85	13,81
1	13,77	13,74	13,70	13,66	13,63	13,59	13,55	13,51	13,48	13,44
2	13,40	13,37	13,33	13,30	13,26	13,22	13,19	13,15	13,12	13,08
3	13,05	13,01	12,98	12,94	12,91	12,87	12,84	12,81	12,77	12,74
4	12,70	12,67	12,64	12,60	12,57	12,54	12,51	12,47	12,44	12,41
5	12,37	12,34	12,31	12,28	12,25	12,22	12,18	12,15	12,12	12,09
6	12,06	12,03	12,00	11,97	11,94	11,91	11,88	11,85	11,82	11,79
7	11,76	11,73	11,70	11,67	11,64	11,61	11,58	11,55	11,52	11,50
8	11,47	11,44	11,41	11,38	11,36	11,33	11,30	11,27	11,25	11,22
9	11,19	11,16	11,14	11,11	11,08	11,06	11,03	11,00	10,98	10,95
10	10,92	10,90	10,87	10,85	10,82	10,80	10,77	10,75	10,72	10,70
11	10,67	10,65	10,62	10,60	10,57	10,55	10,53	10,50	10,48	10,45
12	10,43	10,40	10,38	10,36	10,34	10,31	10,29	10,27	10,24	10,22
13	10,20	10,17	10,15	10,13	10,11	10,09	10,06	10,04	10,02	10,00
14	9,98	9,95	9,93	9,91	9,89	9,87	9,85	9,83	9,81	9,78
15	9,76	9,74	9,72	9,70	9,68	9,66	9,64	9,62	9,60	9,58
16	9,56	9,54	9,52	9,50	9,48	9,46	9,45	9,43	9,41	9,39
17	9,37	9,35	9,33	9,31	9,30	9,28	9,26	9,24	9,22	9,20
18	9,18	9,17	9,15	9,13	9,12	9,10	9,08	9,06	9,04	9,03
19	9,01	8,99	8,98	8,96	8,94	8,93	8,91	8,89	8,88	8,86
20	8,84	8,83	8,81	8,79	8,78	8,76	8,75	8,73	8,71	8,70
21	8,68	8,67	8,65	8,64	8,62	8,61	8,59	8,58	8,56	8,55
22	8,53	8,52	8,50	8,49	8,47	8,46	8,44	8,43	8,41	8,40
23	8,38	8,37	8,36	8,34	8,33	8,32	8,30	8,29	8,27	8,26
24	8,25	8,23	8,22	8,21	8,19	8,18	8,17	8,15	8,14	8,13
25	8,11	8,10	8,09	8,07	8,06	8,05	8,04	8,02	8,01	8,00
26	7,99	7,97	7,96	7,95	7,94	7,92	7,91	7,90	7,89	7,88
27	7,86	7,85	7,84	7,83	7,82	7,81	7,79	7,78	7,77	7,76
28	7,75	7,74	7,72	7,71	7,70	7,69	7,68	7,67	7,66	7,65
29	7,64	7,62	7,61	7,60	7,59	7,58	7,57	7,56	7,55	7,54
30	7,53	7,52	7,51	7,50	7,48	7,47	7,46	7,45	7,44	7,43
% Sättigung = gemessener O₂-Wert / Sättigungswert (bei gemessener Temperatur)										

<http://www.fv-heilbronn.de/pdf/Uebersicht%20Wasserchemische%20Parameter.pdf>

Ionen-Gehalte messen

Zeitangabe: 25 Minuten

Die Gehalte verschiedener Ionen in einem Gewässer lassen Rückschlüsse auf dessen Güte zu. Insbesondere Einträge in das Gewässer – natürliche wie auch zivilisatorische – können so nachvollzogen werden.

Für das Experiment benötigst du die folgenden Dinge:

- Tablet mit der App MiLab
- Einstein LabMate+ Datenlogger
- Verbindungskabel 2x miniUSB
- Einstein ISE-Elektrode
- ISA-Lösungen
- Standard-Lösungen 10 & 1000 ppm
- 2 kleine Bechergläser
- Mehrere 0,1 mL und 10 mL Spritzen mit stumpfen Kanülen
- Glasstab
- Destilliertes Wasser
- Papiertücher
- Mehrere große Bechergläser zur Probenahme

So führst du das Experiment durch:

1. Verbinde den Sensor mit dem Datenlogger. Wähle in der MiLAB App den jeweiligen ISE-Sensor aus und tippe auf das Zahnrad hinter der Sensor-Bezeichnung. Klappe das Feld zum manuellen Kalibrieren des Sensors auf.
2. Bereite folgende **Lösungen zum Kalibrieren** der Elektrode vor:
 - a. Gib 10 mL der 10 ppm-Lösung in ein 50 mL Becherglas. Gib 0,2 mL der ISA-Lösung hinzu. Rühre die Lösung kräftig durch.
 - b. Gib 10 mL der 1000 ppm-Lösung in ein 50 mL Becherglas. Gib 0,2 mL der ISA-Lösung hinzu. Rühre die Lösung kräftig durch.
3. Tippe in das obere Feld den Wert „10“ ein. Halte die Elektrode in die vorbereitete 10 ppm-Lösung (Standard 1). Wenn sich der Wert stabilisiert hat, logge ihn durch Anklicken des „Schloss“-Symboles ein.
4. Spüle die Elektrode mit destilliertem Wasser ab



Ammonium 0...	Zeit
ISE Verstärker	
<u>Ammonium 0.1 bis 14000.0 (ppm)</u>	
Blei 0.2 bis 20700.0 (ppm)	
Bromid 0.4 bis 79900.0 (ppm)	
<u>Chlorid 1.8 bis 35500.0 (ppm)</u>	
Flourid 0.02 bis ∞ (ppm)	
Kalium 0.04 bis 39000.0 (ppm)	
Kalzium 0.02 bis 40000.0 (ppm)	
Natrium 0.1 bis 23000.0 (ppm)	
<u>Nitrat 0.1 bis 14000.0 (ppm)</u>	

Prof. Dr. Björn Risch
Alexander Engl

Punkt 1: Anzeigewert 0 real gemessen

Punkt 2: Anzeigewert 0 real gemessen

Kalibrieren

Ein Ammonium 0.1 bis 14000.0 (ppm)
0



und tupfe sie mit Papier trocken.

5. Tippe in das untere Feld den Wert „1000“ ein. Halte die Elektrode in die vorbereitete 1000 ppm-Lösung (Standard 2). Wenn sich der Wert stabilisiert hat, logge ihn durch Anklicken des „Schloss“-Symboles ein. Tippe anschließend auf „Kalibrieren“
6. Du kannst nun die Ionengehalte von Wasserproben bestimmen. Entnimm hierzu an verschiedenen Stellen Proben und ermittle die Messwerte. Eine Messung kannst du durch Antippen des „Play-Pfeiles“ starten. Das Volumen der Probe sollte in etwa gleich dem Volumen der Kalibrierlösungen sein.  Zu je 10 mL Wasserprobe müssen vor der Messung 0,2 mL ISA-Lösung zugegeben und gut durchmischt werden.

Entsorgung der Abfälle:

- Restliche Standard-Lösungen gut verschließen und aufbewahren, Wasserproben können ausgeschüttet werden
- Feststoffabfälle in den Mülleimer
- Säubere die Materialien am Spültisch

Das konntest du beobachten:

Die Ionen-Gehalte von Gewässern können stark unterschiedlich sein. Ebenso kann der Ort der Probennahme die Ergebnisse beeinflussen.

So lässt sich erklären, was du beobachtet hast:

Üblicherweise haben Oberflächengewässer einen Chlorid-Gehalt von ca. 10 – 30 mg/L. Erhöhte Chlorid-Werte sind häufig die Folge starken Eintrags von häuslichen oder industriellen Abwässern. Im Winter kann ein Anstieg des Chlorid-Gehalts auch aus Streugut der Winterdienste resultieren.

Hauptbelastungsfaktor für Stickstoff-Verbindungen sind häufig Einträge aus Kläranlagen, insbesondere durch Regenentwässerungssysteme (Überlauf) können stark erhöhte Ammonium-Einträge entstehen. Nitrat-Stickstoff wird großteils durch die Landwirtschaft eingetragen.

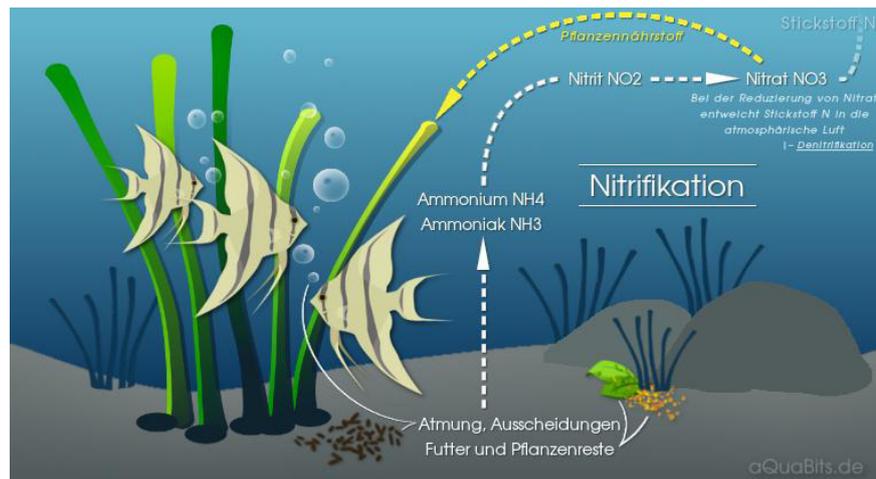
Hinweis: Die Angabe „ppm“ (=parts per million, also Teile pro Million) kann in der Gewässeranalytik analog der Angabe „mg/L“ verwendet werden, da die Dichte von Wasser genähert 1 kg/L ist. Es gilt: $1 \text{ mg/L} = 1 \text{ mg} / 1000 \text{ g} = 1 \text{ mg} / 1.000.000 \text{ mg} \approx 1 \text{ ppm}$.

Vertiefende Informationen

Außer einer möglichen Nähe zur Küste können auch Salzlagerstätten und Kali-Industrie (Abwässer) den Chlorid-Gehalt im Gewässer stark erhöhen. Ab ca. 250 mg/L Chlorid im Wasser ist dies als salzartiger Geschmack wahrnehmbar, da Chlorideinträge in der Regel durch Natriumchlorid entstehen. Chlorid-Gehalte ab ca. 200 mg/L können durch die gesteigerte Korrosionswirkung Probleme in (Trink-)Wassernetzen verursachen. Chlorid trägt wesentlich zur **Leitfähigkeit** eines Gewässers bei. Da es nicht abgebaut wird, **akkumuliert** es im Verlauf eines Gewässers.

Neben molekularem Stickstoff (N_2) kommt Stickstoff auch organisch gebunden (Biomasse) sowie anorganisch gebunden in Gewässern vor. Anorganisch gebunden liegt er zum größten Teil als Ammonium (NH_4^+) oder Nitrat (NO_3^-) vor. Biochemische und physikalisch-chemische Prozesse in Boden, Wasser und Luft sowie in technischen Anlagen (z.B. Kläranlagen) setzen Stickstoffverbindungen durch Reduktions- und Oxidationsstufen um. Durch **Nitrifikation** (mikrobielle

Oxidation) wird Ammonium zu Nitrat umgesetzt. Ein hoher Sauerstoffverbrauch für diesen Prozess kann eine Absenkung der Sauerstoff-Sättigung zur Folge haben. Verschiebt sich der pH-Wert eines mit Ammo-



<http://aquabits.de/wp-content/uploads/2015/07/nitrifikation.png>

niump belasteten Gewässers in den alkalischen Bereich, so führt dies zur Freisetzung von Ammoniak (NH_3), welcher auf Fische toxische Wirkung hat. Nitrat- und Ammonium-Stickstoff stellen wichtige Nährstoffe für Pflanzen dar. Stark erhöhte Werte können ein übermäßiges **Pflanzenwachstum** im Gewässer verursachen, wodurch der Sauerstoffgehalt stark abnimmt. Ein Gewässer kann dann „kippen“.

Sensorische Beurteilung

Zeitangabe: 15 Minuten

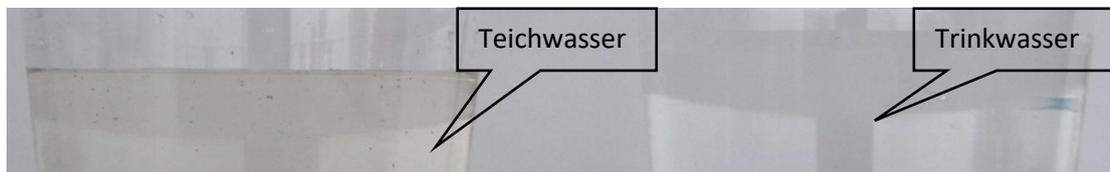
Die Güte von Gewässern lässt sich nicht nur mit Hilfe von Messgeräten erfassen. Auch mit unseren Sinnen können bereits wichtige Parameter erfasst werden. In diesem Versuch lernst du grundlegende sensorische Parameter kennen und sie zu beschreiben.

Für das Experiment benötigst du die folgenden Dinge:

- Großes Gefäß mit weitem Hals
- Weißes Blatt Papier
- Trinkwasserprobe
- Auswertungshilfe zur Beschreibung der Wahrnehmungen
- Mehrere große Bechergläser zur Probenahme

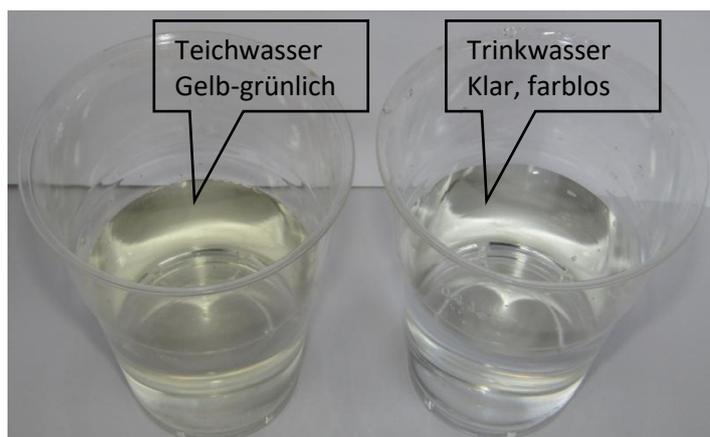
So führst du das Experiment durch:

1. Entnimm Wasserproben. Achte darauf an verschiedenen Stellen und in unterschiedlichen Tiefen Proben zu nehmen.
2. Halte die Wasserprobe in einem durchsichtigen Gefäß (z.B. Becherglas) vor ein **weißes Blatt Papier**. Beschreibe die **Trübung der Probe**. Hierbei ist es wichtig die Probe zügig zu beobachten, bevor die Sedimentation von **Schwebstoffen** einsetzt. Lass die Wasserprobe anschließend für Schritt 4 ruhig stehen.



Erst in der Nahaufnahme erkennt man kleinste Trübungen und Feststoff-Teilchen mit bloßem Auge

3. Gib eine Wasserprobe in ein weithalsiges Gefäß (z.B. Weithals-Erlenmeyerkolben). Schüttele die Probe im Gefäß kräftig auf und beschreibe den **Geruch der Probe**.
4. Betrachte die Probe aus Schritt 2, nachdem sie eine Weile ruhig stand und sich



In der Draufsicht erkennt man im Vergleich die Färbung



somit verschiedene Inhaltsstoffe absetzen konnten. Beschreibe nun die **Färbung der Wasserprobe**. Arbeite dazu erneut vor einem weißen Hintergrund.

Anmerkung: Als Vergleich dient bei allen sensorischen Wahrnehmungen frisches Trinkwasser. Alle sensorischen Untersuchungen sollten von mehreren Testpersonen gemacht werden. Die Auswertungshilfe liefert dir Vorgaben zur Beschreibung der Proben.

Entsorgung der Abfälle:

- Wasserproben können ausgeschüttet werden
- Feststoffabfälle in den Mülleimer
- Säubere die Materialien am Spültisch

Das konntest du beobachten:

Natürliche Gewässer in unserer Region führen in der Regel kein absolut sauberes Wasser. Je nach Grad und Art der Verunreinigungen sind charakteristische Trübungen, Färbungen oder Gerüche wahrnehmbar. Viele Wasserproben erscheinen uns zunächst klar. Erst in der kontrollierten Beobachtung mit **Vergleichsprobe** und **definiertem Hintergrund** erkennen wir sicher, dass es Unterschiede gibt.

So lässt sich erklären, was du beobachtet hast:

Ein faulig, moderiger Geruch kann auf **Fäulnisprozesse** im Gewässer hinweisen. Schlammablagerungen können durch organische Prozesse einen charakteristischen Geruch nach **faulen Eiern** (H_2S , Schwefelwasserstoff) entwickeln.

Eine Färbung des Wassers muss nicht unbedingt negativ sein. Ein Eintrag von **Humus** (z.B. in Moorbächen) kann beispielsweise zu einer klarbräunlichen Färbung führen. Andere Gründe für eine bräunliche Farbe können **Kieselalgen** (ein Hinweis auf **Eutrophierung!**), ein hoher Anteil biologisch gereinigten Abwassers oder auch Einträge aus **Bodenabschwemmungen** von von



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Rhein_Zusammenfluss

landwirtschaftlichen Flächen (vor allem nach starken Regenfällen) sein. Eine beständige grünliche Färbung ist hingegen meist auf **fädige Grünalgen** oder **freischwebende Algen**

bzw. Phytoplankton zurückzuführen und damit ein Indikator geringerer Gewässergüte. Eine trübe, milchige Verfärbung weist auf eine Abwasserbelastung hin.

Die Trübung eines Gewässers entsteht zumeist durch **erodierte Feststoffe**, welche im Einzugsgebiet des Gewässers abgeschwemmt werden. Ebenso können Einleitungen von Kläranlagen, Regen- und Mischwasserentlastungen zur Trübung führen. Trübung kann jedoch auch durch Prozesse im Gewässer selbst entstehen. Dies können Aufwirbelungen, eine **Plankton-„blüte“** oder auch stoffliche Umsetzungen sein.

Vertiefende Informationen

Eine Trübung im Gewässer verändert die Lichtverhältnisse. **Absorption und Reflexion** des einfallenden Lichts beeinflussen den **Stoffwechsel** von Phyto- und Zooplankton sowie die Photosynthese, was sich wiederum auf den Sauerstoffhaushalt auswirkt. Setzen sich die Trübstoffe am Gewässergrund oder auf Pflanzen ab, wirken sie auch hier verändernd auf den Lebensraum der vorhandenen Organismen ein.

Erklärungen nach: FLUVIDAT Saar – Methodik – Physikalische/ chemische Parameter. verfügbar unter www.fluvidat-saar.de/methodik/gefaesse-fuer-die-wasserprobe/ . zuletzt geprüft: 20.09.2017.

Beurteilung der Einzelergebnisse – Gewässergüteklassen

Parameter	1 – sehr gut	2 – gut	3 – mäßig
Temperatur [°C] – im Sommer	<18	18 - 20	20 – 22
pH-Wert	6,5 – 8,0	6,0 – 6,4 oder 8,1 – 8,5	5,5 – 5,9 oder 8,6 – 9,0
Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	<300	301 – 500	501 – 700
Sauerstoff-Sättigung [%]	91 – 110	81 – 90 oder 111 – 120	70 – 80 oder 121 – 130
Ammonium [mg/L] $\text{NH}_4\text{-N}$ (1 mg NH_4^+ = 0,778 $\text{mg NH}_4\text{-N}$)	<0,04	0,05 – 0,3	0,31 – 0,6
Nitrat [mg/L] $\text{NO}_3\text{-N}$ (1 mg NO_3^- = 0,226 $\text{mg NO}_3\text{-N}$)	<1,0	1,1 – 2,5	2,6 – 5,0
Geruch (nach kräftigem Schütteln in weithalsigem Gefäß)	Nahezu geruchlos, frisch	Geruch vorhanden, aber nicht unangenehm	Geruch unangenehm, muffig, faulen Eiern (Schlammablauf)
Farbe (Vergleich mit Trinkwasser, vor weißem Hintergrund und nach Absetzen)	farblos, klar (leicht bräunlich durch Humus-Stoffe möglich)	Leicht getrübt	Stärker getrübt oder grünlich
Trübung	Sofort nach Probennahme kann man unterscheiden: klar; schwach getrübt		
Chlorid-Gehalt	10 – 30 $\text{mg Cl}^-/\text{L}$ sind üblich. Grenzwert für Trinkwasser bei 250 mg/L .		
Gewässerstrukturgüte	Unterteilung anhand der Materialien (Bewertungsbögen)		

Differenzierte Bewertung der Einzelergebnisse:

1. Wurden einzelne Parameter schlechter als Stufe 2 bewertet? – falls ja überlegen und diskutieren
2. Welche besonderen Probleme bestehen an der Probestelle? – Gibt es aufgrund der Einzelergebnisse Hinweise auf: Eutrophierung; Versauerung; Versalzung; Abwasserbelastung; giftige Stoffe?
3. Welche Ursachen könnten die ggf. vorhandenen Belastungen haben? Abwassereinleitung; Kanalisationseinleitung; diffuse Einträge von umgebenden Flächen?

Nach: Vereinigung Deutscher Gewässerschutz, Schriftenreihe Band 64: M. Graw (2011), Ökologische Bewertung von Fließgewässern. Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V., Bonn.

Gewässeranalyse Queich GER

Entnahmestelle: Queichbrücke "Alte Schiffbrückenstraße", ca. 200m vor
Rheinmündung 49,227593,8 °N / 8,383023; °W 49°13'39,32"N /
8°22'58,9"O

Beschreibung der Entnahmestelle: wenig beleuchtet schräg unterhalb Brücke, keine künstliche
Verwirbelung vor Entnahmestelle

Datum: 23.09.2017

Uhrzeit: 15:00 Uhr

Art der Probennahme: Oberflächlich, durch einströmen in PE-
Probengefäß ca. 0,5 L

Probennehmer: Sascha Neff

Parameter	Wert	Bemerkung	Güte
Temperatur [°C]	16	gemessen ca. 1 Minute nach Entnahme	1
pH-Wert	7,6		1
Leitfähigkeit [µS/cm]	537		3
Sauerstoff [mg/L]	5,9	ACHTUNG Ausreißer-Wert. Elektrode überprüfen!	5
Sauerstoff-Sättigung [%]	56,4	ACHTUNG Ausreißer-Wert. Elektrode überprüfen!	5
Ammonium [mg/L]	<10	konkreter Messwert schwankend	?
Nitrat [mg/L]	0,46		1
Chlorid [mg/L]	1,8		
Geruch	vorhanden aber nicht unangenehm	leicht erdig	2
Farbe	farblos, klar		1
Trübung	klar		
Steinoberseiten	Steine/ Hartsubstrat vereinzelt von einem dünnen Algenfilm überzogen		2
Nutzung der Aue	Gärten/ Straße, kleiner Äcker		3
Gewässerrandstreifen	ca. 2-5 m		3
Gewässerverlauf	gestreckt	mäßig verändert	3
Uferbewuchs	Krautflur aus Brennesseln und anderen Nährstoffzeigern		3
Uferstruktur	Ufer stellenweise befestigt <50%		3
Gewässerquerschnitt	flach		2
Strömungsbild	Wechsel von langsam und schnell fließendem Wasser in größeren Abständen		3
Tiefenvarianz	mäßig über größere Strecken verschlammt/		3
Gewässersohle	versandet		4
Durchgängigkeit	keine Hindernisse		1

Gewässeranalyse Queich GER

Entnahmestelle: Queich am Gelände ESG, Standort Freilandmobil

Beschreibung der Entnahmestelle: mäßig beleuchtet zwischen Baumbestand, leichte Verwirbelungen durch Verlauf und Gewässersohle

Datum: 22.09.2017

Uhrzeit: 13:00 Uhr

Art der Probennahme: Oberflächlich, durch einströmen in PE-Probengefäße ca. 0,5 L

Probennehmer: LK Chemie

Parameter	Wert	Bemerkung	Güte
Temperatur [°C]	22,98		4
pH-Wert			
Leitfähigkeit [µS/cm]	500		2
Sauerstoff [mg/L]	5,65		
Sauerstoff-Sättigung [%]	67,4		4
Ammonium [mg/L]			
Nitrat [mg/L]	0,1		1
Chlorid [mg/L]	45	erhöht	
Geruch	geruchlos		1
Farbe	leicht gelblich		3
Trübung	klar		1
Steinoberseiten			
Nutzung der Aue	Gärten/ Straße, kleiner Äcker, geschlossene Ortschaft		4
Gewässerrandstreifen	ca. 2-5 m		3
Gewässerverlauf	weitgehend gerade		4
Uferbewuchs	lückiger Gehölzsaum mit Krautflur		3
Uferstruktur	stellenweise befestigt		3
Gewässerquerschnitt	sehr flach 10:1		1
Strömungsbild	Wechsel von langsam und schnell fließendem Wasser in größeren Abständen		3
Tiefenvarianz	mäßig		3
Gewässersohle	gleichmäßig		3
Durchgängigkeit	künstliche Stauung aus einzelnen Steinen		2

Gewässeranalyse Queich GER

Entnahmestelle: Queich am Gelände ESG, Standort Freilandmobil und Renaturierungsgebiet
Beschreibung der Entnahmestelle: mäßig beleuchtet zwischen Baumbestand, leichte Verwirbelungen durch Verlauf und Gewässersohle
Datum: 22.09.2017
Uhrzeit: 13:00 Uhr
Art der Probennahme: Oberflächlich, durch einströmen in PE-Probengefäße ca. 0,5 L
Probennehmer: LK Chemie

Parameter	Wert	Bemerkung	Güte
Temperatur [°C]	12		1
pH-Wert	8		1
Leitfähigkeit [µS/cm]	800		4
Sauerstoff [mg/L]	6,36		
Sauerstoff-Sättigung [%]	60,9		4
Ammonium [mg/L]	2,7		5
Nitrat [mg/L]	4		3
Chlorid [mg/L]	21,84	nicht erhöht	
Geruch	vorhanden, leicht schlammig		3
Farbe	leicht gelblich		3
Trübung	klar		1
Steinoberseiten			
Nutzung der Aue			
Gewässerrandstreifen			
Gewässerverlauf			
Uferbewuchs			
Uferstruktur			
Gewässerquerschnitt			
Strömungsbild	Fließgeschw: 0,9-1,2 m/s		
Tiefenvarianz			
Gewässersohle			
Durchgängigkeit			

DVGW-Technologiezentrum Wasser; Karlsruher Str. 84, 76139 Karlsruhe

Auftraggeber	
--------------	---

Probennahmestelle			
Queich, Bachwasser			
Probenahme	Probeneingang, Untersuchungsbeginn	Probenehmer	Probe-Nr.
07.08.2017	07.08.2017		2017013032

Parameter	bei °C	Ergebnis	Einheit	BG	GW	Verfahren
Färbung, qualitativ		ohne	-			DIN EN ISO 7887-C1
Trübung, qualitativ		trüb	-			DIN EN ISO 7027-C2
Geruch, qualitativ		erdig	-			DIN EN 1622-B3
Färbung, SAK bei 436 nm		0,5	1/m	0,1		DIN EN ISO 7887-C1
Trübung, quantitativ		15	FNU	0,01		DIN EN ISO 7027-C2
Trübung, quantitativ (anges.)		8,8	FNU	0,01		DIN EN ISO 7027-C2
Fassungstemperatur		16,1	°C			DIN 38404-4-C4
Elektr. Leitfähigkeit bei 20°C	20,0	345	µS/cm			DIN EN 27888-C8
Elektr. Leitfähigkeit bei 25°C	25,0	385	µS/cm			DIN EN 27888-C8
Sauerstoff		8,6	mg/L	0,5		DIN EN 25813/14-G21/22
pH-Wert bei Fassungstemperatur	16,1	8,05	-			DIN 38404-10-C10-R3
pH-Wert nach Calcitsättig. b. Fassungstemp.		7,86	-			DIN 38404-10-C10-R3
pH-Wertabweichung vom Gleichgewicht		0,19	-			DIN 38404-10-C10-R3
Säurekapazität bis pH = 4,3	21,8	2,05	mmol/L	0,010		DIN 38409-H7
Säurekapazität bis pH = 8,2		-	mmol/L	0,005		DIN 38409-H7
Basekapazität bis pH = 4,3		-	mmol/L	0,005		DIN 38409-7-H7
Basekapazität bis pH = 8,2	21,5	< BG	mmol/L	0,005		DIN 38409-7-H7
Härte (Summe Ca- u. Mg-Ionen)		1,39	mmol/L			Berechnung
Härte		7,8	° dH			Berechnung
Sättigungsindex		0,21	-			DIN 38404-10-C10-R3
Calcitlösekapazität		< BG	mg/L	1		DIN 38404-10-C10-R3
Calcitabscheidekapazität		3	mg/L	1		DIN 38404-10-C10-R3
Calcium		42,2	mg/L	0,5		DIN EN ISO 11885-E22
Magnesium		8,1	mg/L	0,5		DIN EN ISO 11885-E22
Natrium		22,2	mg/L	0,3		DIN EN ISO 11885-E22
Kalium		3,4	mg/L	0,3		DIN EN ISO 11885-E22
Ammonium		0,03	mg/L	0,01		DIN EN ISO 11732-E23
Eisen		0,31	mg/L	0,01		DIN EN ISO 11885-E22
Mangan		0,068	mg/L	0,005		DIN EN ISO 11885-E22
Aluminium, gesamt		0,12	mg/L	0,02		DIN EN ISO 11885-E22
Aluminium, gelöst		< BG	mg/L	0,02		DIN EN ISO 11885-E22
Arsen		0,014	mg/L	0,001		DIN EN ISO 17294-2-E29
Chrom		< BG	mg/L	0,001		DIN EN ISO 17294-2-E29

Probennahmestelle
Queich, Bachwasser

Probenahme
07.08.2017

Probeneingang, Untersuchungsbeginn
07.08.2017

Probenehmer

Probe-Nr.
2017013032

Parameter	bei °C	Ergebnis	Einheit	BG	GW	Verfahren
Uran		0,0007	mg/L	0,0001		DIN EN ISO 17294-2-E29
Chlorid		31,9	mg/L	1,0		DIN EN ISO 10304-1-D20
Nitrat		4,8	mg/L	0,5		DIN EN ISO 10304-1-D20
Nitrit		0,03	mg/L	0,01		DIN EN ISO 13395-D28
Sulfat		37,4	mg/L	1,0		DIN EN ISO 10304-1-D20
Phosphat, gesamt		0,46	mg/L	0,01		DIN EN 1189-D11
Silicium		4,4	mg/L	0,1		DIN EN ISO 11885-E22
TOC		5,3	mg/L	0,20		DIN EN 1484-H3
SAK bei 254 nm		9,1	1/m	0,1		DIN 38404-3-C3

Bemerkung:

BG = Bestimmungsgrenze; GW = Grenzwert nach TrinkwV

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf
die untersuchte Probe.

Untersuchungsende, Karlsruhe, den 17.08.2017