



MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Entwicklung und Evaluation von Unterrichtseinheiten
zum Thema Messunsicherheiten“

verfasst von / submitted by

Hannah Loidl, BEd

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree
of

Master of Education (MEd)

Wien, 2021 / Vienna 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 199 500 523 02

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Lehrverbund
UF Bewegung und Sport Lehrverbund
UF Physik Lehrverbund

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Mag. Dr. Clemens Nagel

Ein herzliches Dankeschön an ...

... meinen Betreuer *Clemens Nagel*, der mich an das Thema dieser Arbeit heranföhrte & mich ermutigte, die Welt der Physikdidaktik naher zu erkunden sowie diese Arbeit zu verfassen.

... *Susanne*, die mich in der (schul-)praktischen Umsetzung dieses Unterrichtskonzeptes unterstutzte.

... meinen Studienfreund *Martin*: lange Labornachmittage, Lerntelefonate, lustige Sportkurse & das Studienleben, das man sich wünscht. Danke, dass ich all das mit dir erleben konnte!

... meinen Cousin *Xaver*, der mich bei meinen ersten Schritten des Physiklernens & beim Korrekturlesen unterstutzte.

... meine Cousine *Alexandra*, die wundervolle Figuren für meinen Concept Cartoon zeichnete.

... *Astrid*, für ihr offenes Ohr & ihre liebevollen Worte, wann immer es notwendig war. Und nicht zu vergessen: Danke für deine stundenlangen & akribischen Korrekturlesearbeiten!

... meine *Eltern*, die mich in meinen Vorhaben stets unterstutzten, mir die Möglichkeit gaben, verschiedenste Richtungen auszuprobieren & Trost spendeten, wenn ich stolperte.

... *Maximillian*, der mir immer neue Sichtweisen eröffnet, Fehler aufzeigt, mich inspiriert, unterstutzt & aufbaut, wenn die Welt grau aussieht.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
1 Theoretischer Hintergrund der Arbeit	10
1.1 Messunsicherheiten in der Naturwissenschaft	10
1.2 Begriffsdefinitionen	11
1.3 Bestimmung der Unsicherheit nach Methode Typ A	14
1.3.1 Mittelwert und Standardabweichung	14
1.3.2 Spannweite	15
1.3.3 Abschätzung der maximalen Unsicherheit	15
1.4 Bestimmung der Unsicherheit nach Methode Typ B.....	16
1.5 Quellen von Messunsicherheiten und Fehlern.....	17
2 Messunsicherheiten im Physikunterricht.....	22
2.1 Das Experiment im Physikunterricht.....	22
2.2 Didaktische Überlegungen zur Messunsicherheit.....	23
2.3 Einbettung im Lehrplan und Kompetenzmodell.....	28
2.4 Mathematische Voraussetzungen	30
2.5 Zusammenfassung und Lernziele	32
3 Design-Based Research	34
3.1 Methodologie	34
3.1.1 Design-Based Research	34
3.1.2 Akzeptanzbefragung	36
3.1.3 Datensammlung im Feld (Unterrichtsbeobachtung).....	36
3.1.4 Weitere Erhebungsmethoden.....	38
3.1.5 Forschungs- und Entwicklungszyklen.....	40
3.1.6 Gütekriterien.....	42
3.1.7 Zusammenfassung Methodik.....	46
3.2 Datenauswertung	47

3.2.1	Akzeptanzbefragungen.....	49
3.2.2	Unterrichtsbeobachtungen.....	59
3.2.3	Schriftliche Tests.....	78
3.2.4	Ergänzungen durch weitere Methoden.....	83
3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	86
4	Vorstellung des Unterrichtskonzepts	90
4.1	Einstieg in die Thematik der Messunsicherheiten.....	91
4.2	Arbeiten mit Messunsicherheiten	93
4.3	Unterrichtsmaterialien	95
5	Diskussion und Ausblick.....	107
	Literaturverzeichnis.....	111
	Abbildungsverzeichnis	112
	Anhang	112
	Zusammenfassung	128
	Abstract	129

Einleitung

Die Interpretation eigener Messergebnisse und solcher veröffentlichter Studien ist in einer wissenschaftlichen Karriere eine Kompetenz, die während des Studiums von Studierenden erlernt und perfektioniert werden muss. Wie könnte man diese Fähigkeit besser erwerben als bei der Auswertung eigener Daten? Im Physikstudium an der Universität Wien werden die Studierenden des BSc Physik bereits im zweiten Semester in einer Lehrveranstaltung zur Einführung in das experimentelle Arbeiten mit Messunsicherheiten konfrontiert. Für Lehramtsstudierende ist im zweiten Semester ein experimentelles Anfängerpraktikum vorgesehen, wo die Durchführung von Experimenten, aber vor allem die Auswertung der Messdaten und die Interpretation von Messergebnissen, erlernt und geübt werden. Der Umgang mit Messunsicherheiten und deren Angabe in einem Endergebnis ist für Studierende oft Neuland und im Verlauf der Praktika notwendiges Übel. Gründe dafür könnten Überforderung mit der neuen Thematik, fehlende Einsicht in die Relevanz der Angabe von Messunsicherheiten oder fehlendes Verständnis für deren Bedeutung bei der Interpretation von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen sein.

Bedeutsam ist die Auseinandersetzung mit Messunsicherheiten darüber hinaus auch aus einer philosophischen Perspektive. Jede Messung kann als Beobachtung der Natur angesehen werden. Eine Beobachtung geschieht zwangsläufig durch ein Subjekt, durch welches die gesammelten Beobachtungsdaten interpretiert werden. Im physikalischen Kontext werden die Beobachtungen hauptsächlich mithilfe von (computergestützten) Messgeräten durchgeführt. Die ausgeworfenen Messdaten sind dann vom Menschen für eine interessierende Fragestellung auszuwerten und zu interpretieren. Von einem zu untersuchenden Ereignis über einen Messwert bis hin zu einer indirekt bestimmten Messgröße fließen Unsicherheiten mit ein, welche am Ende über die Zuverlässigkeit eines Ergebnisses bestimmen. Möchte man z. B. mehrmals die Zeit stoppen, in der ein Tennisball von 2 m Höhe zu Boden fällt, kann man ad hoc einige Quellen für Unsicherheiten aufzählen: Reaktionszeit des Menschen, Rundungsfehler bei der Übersetzung der Schwingungsdauer von Quarz in eine Zeiteinheit innerhalb der Stoppuhr, zufällige Schwankungen der Messwerte um den wahren Wert usw. Nicht nur das Messgerät hat eine bestimmte Unsicherheit, sondern auch die Messwerte einer Messreihe schwanken um den wahren Wert einer Größe. Aus philosophischer Sicht könnte man im Zusammenhang mit letzterer Aussage die Frage stellen, ob es überhaupt möglich sei, jemals an den wahren Wert einer Messgröße heranzukommen. Aus naturwissenschaftlicher Perspektive hat man diese Frage möglicherweise im Hinterkopf, sucht pragmatisch jedoch

nach mathematischen Näherungen, die ein zufriedenstellend präzises und richtiges Ergebnis liefern und die Messunsicherheiten als nützliche Information zur Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit eines Experiments heranziehen.

Nicht weniger interessant ist der Einfluss von Messunsicherheiten auf unseren Alltag. Betrachtet man den Wetterbericht für das kommende Wochenende, so wird einem schnell bewusst, dass die Einschätzung von Messergebnissen auch für die gemeine Bevölkerung von Interesse sein kann. Wie oft wird der Wetterbericht regelmäßig verfolgt und in die (Ausflugs-)Pläne oder andere Aktivitäten miteinbezogen? Doch wie vertrauenswürdig sind die Temperaturangaben, in welchem Temperaturbereich schwanken die Prognosen für die Temperatur und mit welcher Wahrscheinlichkeit treffen die Vorhersagen fünf Tage im Voraus zu? All diese Fragen könnte man sich in Bezug auf Messunsicherheiten stellen. Jedoch nicht nur bei der Wettervorhersage, sondern auch bei der Angabe des Inhalts von Lebensmittelverpackungen, der Verteilung von z. B. roten Gummibärchen in einem Säckchen oder der Beurteilung des*der schnellsten Läufers*in im Sportunterricht können Messunsicherheiten und die Vertrauenswürdigkeit der Angabe eines *Mittelwertes* diskutiert werden. Anhand dieser Beispiele wird deutlich, dass Messunsicherheiten nicht nur trocken und mühselig in universitären naturwissenschaftlichen Praktika behandelt werden müssen, sondern auch spannende Diskussionen im schulischen Kontext aufwerfen können. Die Schüler*innen lernen, Daten kritisch zu hinterfragen und auf wissenschaftlichen Ergebnissen beruhende Meinungen zu beurteilen. Weiters können Schüler*innen, die sich in der Zukunft für ein naturwissenschaftliches Studium entscheiden, bereits auf Grundlagen einer wissenschaftlichen Herangehensweise bei der Auswertung von Experimenten zurückgreifen. Auch der österreichische Lehrplan fordert eine naturwissenschaftliche Ausbildung, in welcher ein Einblick in die Arbeitsweisen der Physik (Durchführen, Auswerten, Interpretieren von Experimenten und Daten, ...) unterrichtet wird.

Infolgedessen soll im Rahmen dieser Masterarbeit ein Konzept zum Umgang mit Messunsicherheiten entwickelt werden. Das Unterrichtskonzept setzt sich zum Ziel, dass die Schüler*innen anhand eines Experiments auf die Existenz von Messunsicherheiten stoßen. Sie sollen sich mit verschiedenen Quellen und Ursachen von Unsicherheiten auseinandersetzen, Ergebnisse auswerten und diese anhand von Streuungsmaßen vergleichen. Die Schüler*innen sollen weiters am Ende dieser einführenden Unterrichtseinheiten erkennen, dass jede Messung eine Messunsicherheit hat und anhand dieser die Vertrauenswürdigkeit bzw. die Zuverlässigkeit einer Messung beurteilt werden kann.

Ursprünglich sollte sowohl ein Unterrichtsentwurf für die Sekundarstufe I als auch für die Sekundarstufe II entwickelt werden. Aufgrund der anhaltenden COVID-19 Pandemie musste jedoch auf ein eigenes Unterrichtskonzept für die Sekundarstufe II verzichtet werden. Der Unterrichtsentwurf für die Sekundarstufe I soll hingegen so erarbeitet werden, dass er auch zu Beginn der Sekundarstufe II eingesetzt werden kann. Dies soll ermöglicht werden, indem Bausteine und Grundideen des Konzeptes auf verschiedenste Unterrichtssequenzen und bei der Auswertung unterschiedlicher Experimente anwendbar sind.

Nach einem einleitenden Kapitel zum theoretischen Hintergrund dieser Arbeit sollen fachdidaktische Überlegungen zum Thema Messunsicherheiten im Physikunterricht angestellt werden. Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Methode des Design-Based Research zur Entwicklung und Evaluation des Unterrichtsentwurfes. Verschiedene Ansätze der empirischen Sozialforschung, wie beispielsweise Akzeptanzbefragungen und Unterrichtsbeobachtungen, werden Erkenntnisse für die theoretische Überarbeitung der Unterrichtsmaterialien liefern. Nach einer detaillierten Auswertung der erhobenen Daten wird der finale Unterrichtsentwurf vorgestellt und die Produkte der Forschungsarbeiten für Physiklehrkräfte dargelegt. Zudem werden die Erkenntnisse dieser Arbeit für einen Artikel in der Fachdidaktik-Zeitschrift Plus Lucis zusammengefasst und dienen hoffentlich der Inspiration für weitere Unterrichtsideen zum Umgang mit Messunsicherheiten.

1 Theoretischer Hintergrund der Arbeit

Zur guten wissenschaftlichen Praxis gehört es dazu, Ergebnisse unter Einbeziehung ihrer Messunsicherheiten anzugeben, um damit eine fundierte Diskussion mehrerer oder auch einzelner Ergebnisse zu ermöglichen. Eine kurze Einführung in die Geschichte der Messunsicherheiten soll dieses Kapitel einleiten, ehe die wichtigsten Begriffe und Methoden zur Ermittlung von Messunsicherheiten erläutert werden. Ein beispielhaftes Experiment aus dem Physikunterricht zeigt praktisch Quellen für Fehler und Messunsicherheiten von der Planung bis zur Auswertung eines Experiments auf.

1.1 Messunsicherheiten in der Naturwissenschaft

Ausgangspunkt der Diskussion und der Vereinheitlichung von Messunsicherheiten war C. F. Gauß. Er verfasste 1821/23 das Werk „*Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae*“¹ und führte somit den Fehlerbegriff ein, welcher sich auch heute noch hartnäckig in der wissenschaftlichen Community hält. Der Begriff des Fehlers impliziert ein Versagen und deutet auf ein ungeschicktes Arbeiten und/oder Experimentieren hin. Vielmehr liegt es jedoch in der Natur des Messens, dass stets Abweichungen (*Messunsicherheiten*) vom *wahren Wert* in Kauf genommen werden müssen und eine Diskussion der Verlässlichkeit einer Messung unumgänglich ist. Trotzdem wird in der Physik der Begriff des *Fehlers* häufig gleichgesetzt mit dem Begriff der Messunsicherheit. Wie sich noch herausstellen wird, ist die Gleichsetzung ungünstig, da ein Fehler im Gegensatz zur Messunsicherheit verhindert oder zumindest korrigiert werden kann.

Im letzten Jahrhundert wurden verschiedene Methoden und Verfahren für den Ausdruck von Messunsicherheiten gefunden und erprobt, eine internationale Vereinheitlichung blieb jedoch lange Zeit aus. Das Internationale Komitee für Maß und Gewicht (CIPM = Comité International des Poids et Mesures) veranlasste daher eine Arbeitsgruppe im Jahr 1980 zur Erstellung einer Vereinheitlichung zur Angabe von Messunsicherheiten mithilfe des Internationalen Büros für Maß und Gewicht (BIPM = Bureau International des Poids et Mesures),

¹ Übersetzung: Theorie der den kleinsten Fehlern unterworfenen Kombination der Beobachtungen

vgl. [1]. Es entstand das INC-1 (1980), welches vom CIPM zunächst genehmigt und anschließend erweitert wurde. Aber auch im deutschsprachigen Raum versuchten verschiedene Institutionen, eine einheitliche Lösung zum Umgang mit der Angabe von Unsicherheiten anzubieten (beispielsweise die DIN 1319 bzw. DIN V ENV 13005 oder aber die sicherlich bekanntere ÖNORM ENV 12005: 1999 07 01). Derzeit wird vom Gesetzgeber die Anwendung des „GUM“ (= Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)² empfohlen. Sowohl das CIPM als auch die „ArGe zur Angabe von Messunsicherheiten der BIPM“ wirkten bei der Erstellung des GUM als Herausgeber mit und empfehlen den Einsatz dieser ISO-Norm, vgl. [2]. Mit dem GUM ist es gelungen, einheitliche Verfahren für den Umgang mit Messgrößen herauszugeben und so auch zu einer erhofften besseren Wissenschaftskommunikation beizutragen. Dennoch werden auch einige Kritikpunkte laut, welche vor allem in der unpraktischen Anwendung der ISO-Norm in der Wissenschaft und der Vorwurf der hauptsächlichlichen Orientierung an Technik und Industrie zu finden sind. Auch der traditionelle Gebrauch des Terms „Messfehler“ wird durch eine klare Abgrenzung der Begriffe Messunsicherheit und Fehler „verboten“, was bei einigen Wissenschaftlern, aufgrund des traditionell lange im Gebrauch gewesenen Begriffs *Messfehler*, auf Unverständnis trifft, vgl. [2, S. 14].

1.2 Begriffsdefinitionen

Die Auseinandersetzung mit Messunsicherheiten bringt die Notwendigkeit einer einheitlichen Verwendung von Begriffen mit sich. Aus diesem Grund werden die für diese Arbeit wichtigsten und notwendigen Termini in diesem Unterkapitel vorgestellt und erläutert.

Der wahre Wert

Der wahre Wert einer Größe ist prinzipiell unbekannt. Bei Beobachtungen der Natur bzw. von Messungen versucht man, dem wahren Wert einer zu messenden Größe durch präzise Aufbauten, exakte Durchführungen und geeignete mathematische Verfahren so nahe wie

² Genaue Bezeichnung des GUM: ISO/IEC Guide 98-3:2008-09

möglich zu kommen. Moderne Technik und weiterentwickelte mathematische Methoden liefern in der Wissenschaft immer bessere Schätzer für den wahren Wert zu bestimmender Größen, wie zum Beispiel für die Naturkonstanten in der Physik. Dennoch werden Messergebnisse stets auf endlichen Messungen beruhen und somit nur begrenzt an den wahren Wert herankommen. Wie vertrauenswürdig ein bester Schätzer für den wahren Wert ist, kann anhand der Angabe von Messunsicherheiten beurteilt werden. Die genaue Protokollierung von Mess- und Auswerteverfahren sowie die Diskussion von Fehlern und Unsicherheiten sind somit unbedingt notwendig in seriösen wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

Fehler

Ein *Fehler* muss bereits vor dem Experiment unbedingt vermieden oder wenn möglich im Nachhinein korrigiert werden. Im GUM findet man dazu „*It is assumed that the result of a measurement has been corrected for all recognized significant systematic effects and that every effort has been made to identify such effects*“ [3, S. 5]. Es wird unterschieden zwischen dem systematischen und dem groben Fehler:

Der *systematische Fehler* kann, sofern entdeckt, korrigiert werden und beispielsweise durch einen Kalibrierfehler verursacht sein. Seine Abweichung vom Referenzwert ist sowohl im Betrag als auch in der Richtung bekannt.

Der *grobe Fehler* entspricht der Abweichung von einem Referenzwert, welcher jedoch nicht mehr korrigiert werden kann und damit unbedingt vermieden werden muss. Beispiele für grobe Fehler sind: Rechenfehler, Fehler in der Datenauswertung, fehlerhafte Interpretation der Daten, Ablese- oder Bedienfehler der Instrumente, aber auch fehlerhafte Überlegungen bzgl. der Konzeption eines Messverfahrens, vgl. [4].

Unsicherheiten

Der Begriff der Unsicherheit wurde bereits in Bezug auf den wahren Wert angesprochen. Die Durchführung einer Messung oder die Beobachtung der Natur im Allgemeinen wird immer durch Umweltfaktoren, u. a. aufgrund der Abweichung zwischen Modell und Realität, beeinflusst. Dieser Umstand impliziert die Unsicherheit als natürlichen Bestandteil einer Messung. Im GUM liest man dazu: „*The uncertainty of the result of a measurement reflects the lack of exact knowledge of the value of the measurand*“ [3, S. 5]. Die Messunsicherheit ist durch die *zufälligen* Abweichungen von Messwerten gegeben und darf somit nicht mit Fehlern verwechselt oder ident gehandhabt werden. Fehler gilt es zu verhindern, während

Messunsicherheiten akzeptiert werden müssen. Im GUM werden verschiedenste Quellen für Unsicherheiten, wie folgt, genannt:

- eine unvollständige Definition der Messgröße
- eine nicht-repräsentativ gewählte Stichprobe
- unvollständige Analyse über die Einflüsse der Umwelt bzw. suboptimale Umweltbedingungen für ein Experiment
- persönliche Vorurteile gegenüber analogen Messgeräten
- endliche Auflösung der Messgeräte (*evtl. auch unüberlegte Auswahl des Messbereichs*)
- Verwendung falscher Referenzwerte (Standards)
- Einbeziehung inadäquater Messwerte für weitere Kalkulationen
- Näherungen im Messvorgang und in der Messmethode
- Variation beim Ablesen von Messdaten unter scheinbar identen Bedingungen

Die aufgelisteten Quellen sind nicht zwingend unabhängige Einflussgrößen und können beispielsweise auch zum letztgenannten Punkt beitragen und sich gegenseitig bedingen. Unbekannte systematische Abweichungen können nicht zur Bestimmung der Messunsicherheit herangezogen werden, diese tragen dann jedoch zu einem *Fehler* des Messergebnisses bei [3, S. 6].

Nach dem INC-1 wird zwischen zwei Arten für die Bestimmung von Messunsicherheiten unterschieden. Die *Typ A-Unsicherheit* ist durch die zufällige Abweichung einzelner Ergebnisse in einer Messreihe bestimmt. Sie wird über statistische Häufigkeitsverteilungen und geeigneten mathematischen Modellen errechnet. Am bekanntesten ist der Mittelwert mit seiner Standardabweichung, welcher auch bereits in der Sekundarstufe I in Österreich unterrichtet wird. Die *Typ B-Unsicherheit* ist auf die verwendeten Messgeräte und Messmethoden zurückzuführen. Diese werden mit *anderen* Methoden bestimmt, oder wie es im INC-1 formuliert ist: „*celles qui sont évaluées par d'autres moyens*“³ [1, S. 30]. Bereits ein einzelner

³ Übersetzung nach der Verfasserin: „solche, die mit anderen Mitteln bestimmt werden“

Messwert hat eine Unsicherheit. Es können drei Haupttypen für Messunsicherheiten von Messgeräten ausgemacht werden: *Eichunsicherheit*, *Linearitätsunsicherheit* und *Digitalisierungsunsicherheit*. Im nächsten Kapitel werden die Typ A- und Typ B-Unsicherheit und ihre Bestimmungsmöglichkeiten genauer erläutert.

1.3 Bestimmung der Unsicherheit nach Methode Typ A

Die *Typ A-Unsicherheit* wird durch statistische Verfahren bei der Auswertung einer Messreihe ermittelt. Einzelnen Messwerten wird damit keine Typ A-Unsicherheit zugewiesen. Typ A-Unsicherheiten sind unkorreliert, d.h. sie hängen nicht mit anderen Messunsicherheiten zusammen. Im Folgenden werden die in den erstellten Unterrichtskonzepten verwendeten Methoden vorgestellt.

1.3.1 Mittelwert und Standardabweichung

Die häufigste Methode zur Ermittlung eines *Endergebnisses* ist die Bestimmung des arithmetischen Mittelwerts \bar{x} , welcher auch in der Schule in Mathematik unterrichtet wird, siehe Gleichung (1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Bei genügend großer Anzahl einzelner Messwerte n ($n \rightarrow \infty$) konvergiert der Mittelwert zum wahren Wert μ . Die Streuung der Messergebnisse wird durch die Standardabweichung, siehe Formel (2), der Stichprobe s_x ermittelt. Das Quadrat der Standardabweichung s_x ist die Varianz s^2 . Bei einer genügend großen Stichprobe konvergiert die Standardabweichung der Stichprobe zur Standardabweichung der Grundgesamtheit ($\lim_{n \rightarrow \infty} s = \sigma$).

$$s_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Die Standardabweichung ist jener Bereich, in welchen 68,3 % aller einzelnen Messwerte hineinfallen. Bei Betrachtung einer Gauß-Normalverteilung entspräche die Standardabweichung vom Mittelwert $\bar{x} \pm s_x$ genau den Wendepunkten der Glockenkurve, siehe dazu Abbildung 1. Aus statistischer Sicht könnte man die Aussage treffen, dass ein nächster gemessener Wert zu 68,3 % innerhalb dieses Bereichs liegen wird.

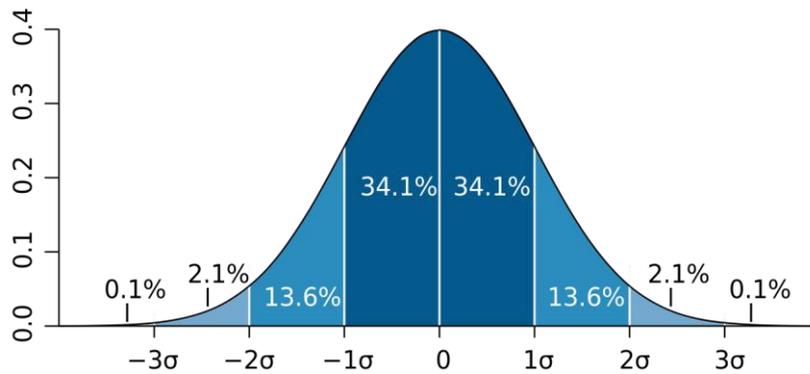


Abbildung 1: Gauß'sche Glockenkurve mit Angabe der Standardabweichung. 68,3 % der Messwerte befinden sich im Bereich von $\pm 1\sigma$, 95,5 % in einem Vertrauensbereich von $\pm 2\sigma$ und 99,7 % in einem Vertrauensbereich von $\pm 3\sigma$. Entnommen aus: [6].

Zum Vergleich von Daten wird die Standardabweichung des Mittelwerts u_x herangezogen, da Abweichungen von Einzelmessungen einer Messreihe im Vergleich mit anderen Messergebnissen weniger aussagekräftig sind. Die Standardabweichung des Mittelwerts berechnet sich mit Formel (3).

$$u_x = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (3)$$

1.3.2 Spannweite

Die Spannweite R , im Englischen auch *range* genannt, ist ein einfaches Streuungsmaß, die zur Beschreibung von Ordinaldaten herangezogen werden kann. Sie wird durch die Differenz des maximalen und minimalen Wertes, x_{max} und x_{min} , einer Beobachtung berechnet, siehe (4).

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (4)$$

1.3.3 Abschätzung der maximalen Unsicherheit

Die maximale Unsicherheit Δy_{max} von indirekten Messgrößen kann durch Aufsummieren aller k Messgrößen x_i und ihren Unsicherheiten Δx_i abgeschätzt werden, siehe Formel (5).

$$\Delta y_{max} = \sum_{i=1}^k \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \cdot \Delta x_i \quad (5)$$

Der wahre Wert von y befindet sich dann mit größter Wahrscheinlichkeit zwischen dem minimalen und maximalen Wert von y , wenn die Unsicherheit addiert bzw. subtrahiert wird

$(y - \Delta y_{max}) \leq \mu_y \leq (y + \Delta y_{max})$. Die Unsicherheit einer indirekten Messgröße $y(x_i)$ ist immer kleiner als die maximale Messunsicherheit: $\Delta y \leq \Delta y_{max}$ ⁴.

Einfach nachzurechnen ist die Abschätzung der maximalen Unsicherheit, indem das kleinstmögliche und das größtmögliche Ergebnis sowie die halbe Spannweite dieses Betrages für eine indirekte Messgröße herangezogen werden, vgl. [2].

1.4 Bestimmung der Unsicherheit nach Methode Typ B

Die *Typ B-Unsicherheit* wird bereits bei einem einzelnen Messwert bestimmt. Im Gegensatz zu den Typ A-Unsicherheiten können Messunsicherheiten vom Typ B auch mit anderen Unsicherheiten korrelieren. Beispiele für die Typ B-Unsicherheit sind solche, die auf das Messgerät selbst zurückzuführen sind (z. B. die Skalenunsicherheit eines Lineals). Sie lässt sich ebenfalls über „*mathematische Methoden basierend auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen handhaben, die sich [jedoch, Anm. d. Verf.] aus begründeten Annahmen über die inneren Eigenschaften des Datenwerts beziehungsweise der Messung [...] ableiten*“ [2, S.16].

Die Unsicherheit eines Messgeräts ist in ihrer Richtung unbekannt und damit kein systematischer Fehler. Die drei Haupttypen (Eich-, Linearitäts- und Digitalisierungsunsicherheit) von Unsicherheiten jedes Messgeräts sollen kurz näher erläutert werden:

Die *Eichunsicherheit* ist durch die Kalibrierung eines Messgeräts an einen internationalen Standard gegeben. Ein gemessener Wert mittels des zu kalibrierenden Messgeräts wird mit einem Eichnormal (Referenzwert) verglichen. Wurde ein Messgerät geeicht, so wurde es einer Qualitätsüberprüfung unterzogen und erklärt damit, dass die ausgegebenen Messwerte in dem Bereich der *Grenzabweichungen* liegen.

Die *Linearitätsunsicherheit* gibt Auskunft über die übertragenen Skalenteile bei einem vorab am Ende kalibrierten Messgerät. Da bei jedem Skalenteil die Unsicherheit anders ausfallen kann, ist die Linearitätsunsicherheit unkorreliert.

⁴ Gleich groß wären die beiden Unsicherheiten im Fall von total korrelierten Messunsicherheiten.

Die *Digitalisierungsunsicherheit* kommt durch die Auflösung von Messgeräten sowohl bei digitalen als auch analogen⁵ Messgeräten vor. Eine Skala kann nur eine endliche Anzahl an Unterteilungen aufweisen. Der wahre Wert hingegen muss nicht unbedingt auf einer Unterteilung liegen, sondern kann irgendwo im gesamten Bereich einer Skala liegen. Ein Messwert kann nie genauer abgelesen werden als $\pm 0,5$ Einheiten von der kleinsten Unterteilung der Skala. Ein Messbecher beispielsweise, der die Bestimmung von Wasser in Abständen von 10 ml zulässt, hat eine Unsicherheit von ± 5 ml. Eine Angabe von 13 ml wäre „genauer“ als es das Messgerät zulässt und somit nicht möglich. In diesem Fall wäre es am sinnvollsten, eine Menge an Wasser von $15 \text{ ml} \pm 5 \text{ ml}$ anzugeben.

1.5 Quellen von Messunsicherheiten und Fehlern

Von der Planung bis zum Ergebnis eines Experiments gibt es eine Vielzahl an Momenten, in welchen Fehler und Messunsicherheiten auftreten können. Der Fokus wird zwar bei einem Schülerexperiment vermutlich weniger auf der naturwissenschaftlich exakten Planung, Durchführung und Datenauswertung liegen als es bei einem Laborexperiment, das modellhaft für eine wissenschaftliche Fragestellung in der Natur herangezogen wird (z.B. Mathematisches Pendel zur Bestimmung der Gravitationsbeschleunigung), der Fall ist. Dennoch sollen beispielhaft Überlegungen zu Fehlern und Messunsicherheiten zu einem (relativ) einfachen Schülerexperiment, zur Bestimmung der Schmelzwärme von Eis, angestellt werden.

Beschreibung des Experiments

Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird das vorgeschlagene Experiment kurz erläutert, wobei auf eine gelungene Aufbereitung des Experiments im Praxisteil des Schulbuchs „Expedition Physik“ verwiesen wird [5]. Für das Experiment werden ein Becherglas mit 300 g Wasser, 2-3 Eiswürfel, ein (analoges) Thermometer, eine Stoppuhr und eine Waage benötigt. Die Masse des Wassers m_W sowie dessen Anfangstemperatur T_A soll bestimmt werden. Eiswürfel werden abgetrocknet, ihre Masse m_E bestimmt und in das Becherglas mit Wasser gelegt. Sobald das Eis geschmolzen ist, wird die Endtemperatur T_E des Wassers erhoben und der

⁵ Bei analogen Messgeräten wird die Digitalisierungsunsicherheit *Skalenunsicherheit* genannt.

Temperaturunterschied $T = T_A - T_E$ ermittelt. Die vom Wasser abgegebene Wärmemenge Q entspricht der aufgenommenen Wärme des Eises (= Schmelzwärme Q_S) beim Phasenübergang von fest zu flüssig: $m_E \cdot Q_S$. Zur Berechnung der Wärmemenge wird Formel (6) herangezogen, wobei c_W die Wärmekapazität des Wassers ist:

$$Q = m_W \cdot c_W \cdot T \quad (6)$$

Durch Gleichsetzen und Umformen erhält man anschließend die Schmelzwärme von Eis: $Q_S = Q/m_E$.

Planung

Bereits bei der *Planung* eines Experiments müssen die genauen Rahmenbedingungen geklärt sein: Wo wird die Untersuchung stattfinden, welche Einflussgrößen müssen berücksichtigt werden, misst ein Experiment auch das, was es vorgibt zu messen (*Reliabilität*), wie sieht der exakte Aufbau aus und wie stark kann vereinfacht werden, ohne dass grobe Fehler (siehe weiter unten) auftreten?

Betrachtet man die genannten Punkte anhand des konkreten Experiments zur Bestimmung der *spezifischen* Schmelzwärme von Eis, so überlegt man sich zunächst beispielsweise die Forschungsfrage: „*Wie viel Energie muss einem Eiswürfel zugeführt werden, damit dieser vom Zustand fest in den Zustand flüssig übergeht?*“. Ausgehend von der Fragestellung können konkrete theoretische Überlegungen angestellt werden, wie z. B.: „Wovon ist der Phasenübergang *schmelzen* abhängig (z. B. Umgebungsdruck)?“. Welche Daten müssen erhoben werden? Welche Messunsicherheiten fließen in das Erheben der Daten ein?⁶ Der Aufbau des Experiments setzt weiters eine sinnvolle Wahl der Messgeräte und Messinstrumente vo-

⁶ Bei diesem Experiment sind sowohl Messunsicherheiten durch die Messung der Temperatur als auch durch die Messung der Masse von Eis und Wasser in das Endergebnis miteinzubeziehen. Eine korrekte Bestimmung der zusammengesetzten Messunsicherheiten würde hier nach der Fehlerfortpflanzung von C. F. Gauß verlangen. Diese übersteigt den Oberstufen-Schulstoff weitgehend. Dennoch können mit Schüler*innen die Messunsicherheiten der einzelnen Größen sowie die maximale Unsicherheit abgeschätzt werden oder *zumindest* eine qualitative Besprechung der Zuverlässigkeit der Messung den zentralen Punkt einer Diskussion der Messergebnisse darstellen.

raus. In der Schule wird sich (aufgrund des Zeitmangels) eher ein einfacher Aufbau mit Becherglas und normalem Thermometer anbieten. Natürlich könnte auch ein abgedichtetes Gefäß (Kalorimeter) mit computerbasiertem Thermometer (usw.) eingerichtet werden, was sich in vielen Schulen evtl. nicht finden wird und auch nicht zwingend notwendig ist.

Durchführung

Bei der Durchführung braucht es vor allem Geschick und Erfahrung der Experimentator*innen. Ein physikalisches Hintergrundwissen und Grundlagen beim Experimentieren sollten bereits vorhanden sein oder im Falle der Schule anhand von geführten Schülerexperimenten erworben werden. Während der Durchführung des Experiments können systematische Fehler und in jedem Fall Messunsicherheiten auftreten. Beim einfachen (analogen) Schülerexperiment zur Schmelzwärme ist es notwendig, die Masse bzw. die Temperatur des Eises und des Wassers zu messen. Das Resultat für die Schmelzwärme erhält man anschließend durch Einsetzen der Messdaten in Formel (6). Beispiele für Fehler und Messunsicherheiten, die beim Erheben der Daten auftreten (können), sind nachfolgend aufgelistet:

- eine Gruppe liest die Temperatur jedes Mal von schräg oberhalb eines analogen Thermometers ab (= systematischer Fehler)
- eine Gruppe vergisst zu Beginn des Experiments die Masse des Eisblocks abzuwiegen (= grober Fehler)
- Messunsicherheit des Thermometers (Typ B)
- Messunsicherheit der Waage (Typ B)
- unterschiedliche Ergebnisse mehrerer Gruppen für die gleiche Messgröße → Typ A
Unsicherheit: Abweichung vom wahren Wert der Schmelzwärme
- oder Vergleich der erhaltenen Messgröße mit einem Literaturwert → Abweichung vom wahrscheinlich wahren Wert

Auswertung der Ergebnisse

In der Schule wird die Auswertung der Ergebnisse mithin einer der schwierigsten Aufgaben sein. Ein begleitetes und aufbauendes Erarbeiten der notwendigen Kompetenzen ist daher unumgänglich. Bei der Analyse und Auswertung der Daten müssen zunächst die richtigen Modelle für die Berechnung und Angabe der Unsicherheiten ausgewählt werden. Auch die Prüfung der am Anfang gestellten Hypothese (in der Schule Forschungsfrage) und eine plausible Interpretation der Ergebnisse sind Teil des Auswerteprozesses.

In Bezug auf das vorgestellte Experiment zur Schmelzwärme kann zur Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit auf eine qualitative Diskussion der Messunsicherheiten oder aber auch die maximale Unsicherheit quantitativ abgeschätzt werden. Im Praxisheft von „Expedition Physik“ für die 3. Klasse der Sekundarstufe I wird zumindest ein Vergleich der ermittelten Schmelzwärme mit dem Literaturwert im Theorieteil des Schulbuches angestrebt. Die Schüler*innen sollen begründen, warum die beiden Werte voneinander abweichen [5]. In diesem Zusammenhang können beispielsweise der Wärmetransport mit der Umwelt und dem nicht perfekt abgedichteten Gefäß, Messgeräte mit geringerer Genauigkeit als es unter Laborbedingungen der Fall ist etc. besprochen werden. Alternativ könnten auch die Ergebnisse mehrerer Gruppen miteinander verglichen, ein Mittelwert aller Ergebnisse gebildet und Messunsicherheiten und ggf. Fehler diskutiert werden. Der Vergleich des Mittelwerts mit einem Literaturwert (z. B. aus dem Schulbuch) könnte die Diskussion anregen. Eine tiefere Auseinandersetzung in der Oberstufe (z. B. in Form eines Laborunterrichts) würde durch die Bestimmung der maximalen Unsicherheit ermöglicht werden und soll beispielhaft anhand fiktiver Daten vorgerechnet werden.

Beispielhafte Auswertung fiktiver Daten

Die Masse des Wassers und Eiswürfels wurde anhand einer digitalen Küchenwaage bestimmt, dessen Skalenunsicherheit ± 1 g beträgt. Die Temperatur wurde mit einem Braten-thermometer bestimmt, ein Datenblatt wurde im Internet nicht gefunden, weshalb auch hier die Auflösung als Unsicherheit mit $\pm 0,1$ °C herangezogen wurde. Aus der Tabelle 1 können alle Messdaten aus der Versuchsdurchführung entnommen werden.

Tabelle 1: Fiktive Messwerte zur Bestimmung der Schmelzwärme von Eis.

Messwerte	
Masse Wasser m_W	300 g \pm 1 g
Masse Eis m_E	18 g \pm 1 g
Anfangstemperatur T_A	20,0 °C \pm 0,1 °C
Endtemperatur T_E	15,0 °C \pm 0,1 °C

Aus der Anfangs- und Endtemperatur wird die Temperaturdifferenz $\Delta T = 5$ °C berechnet und der Wert der spezifischen Wärmekapazität von Wasser ($c_W = 4190 \frac{J}{kgK}$) nachgeschlagen. Durch Einsetzen in Formel (6) erhält man für die Wärmemenge gerundet $Q = 6285$ J.

Dieser Wert entspricht gleichzeitig der aufgenommenen Wärme durch die Eiswürfel. Dividiert man die Wärmemenge Q durch die Masse des Eises, so erhält man die für die Schmelzwärme $Q_S = 349 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$. Für die Berechnung der Unsicherheit der Schmelzwärme wird der schlechteste Fall angenommen, dass sich hier die Unsicherheiten der Temperatur und der Masse genauso auf das Ergebnis auswirken und somit einmal der maximale Wert für die Schmelzwärme $Q_{S,max}$ und einmal der minimale Wert für die Schmelzwärme $Q_{S,min}$ errechnet wird:

$$Q_{S,max} = \frac{c_W \cdot (m_W + \Delta m) \cdot (T + \Delta T)}{(m_E - \Delta m)} = 378\,357 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$Q_{S,min} = \frac{c_W \cdot (m_W - \Delta m) \cdot (T - \Delta T)}{(m_E + \Delta m)} \approx 323\,093,11 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Bestimmt man die halbe Spannweite der Differenz von $Q_{S,max}$ und $Q_{S,min}$ erhält man als Abschätzung für die größtmögliche Unsicherheit:

$$\Delta Q_S = \frac{Q_{S,max} - Q_{S,min}}{2} \approx 27\,631,95 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Rundet man das Ergebnis auf seine signifikanten Stellen, erhält man als Endresultat für die Schmelzwärme des Eises:

$$Q_S = (350 \pm 30) \frac{\text{kJ}}{\text{K}}.$$

Anschließend kann das Ergebnis mit dem Wert für die Schmelzwärme von Eis ($Q_S = 334 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$) aus dem Schulbuch verglichen und Ursachen für die Abweichungen diskutiert werden. Das vorgestellte Beispiel ist tendenziell den komplexeren Schülerversuchen zuzuordnen. Die Auswertung sollte im Prinzip jedoch in der Sekundarstufe II mit Schüler*innen (zumindest unter Anleitung) im Physikunterricht bewältigbar sein.

2 Messunsicherheiten im Physikunterricht

Dieses Kapitel begründet die Relevanz von Messunsicherheiten im Physikunterricht. Warum und in welchem Kontext ist es sinnvoll, Messunsicherheiten bereits im Schulunterricht zu behandeln und welche Kompetenzen können dabei erlernt bzw. vertieft werden? Diese Fragestellungen gilt es im Folgenden zu klären. Nach allgemeinen fachdidaktischen Überlegungen sollen geeignete Methoden zur Bestimmung von Messunsicherheiten in der Schule abgeleitet werden. Die allgemeinen Überlegungen werden sowohl für die Sekundarstufe I als auch für die Sekundarstufe II angestellt, auch wenn die Entwicklung und Erprobung eines Unterrichtskonzepts für die Sekundarstufe II, aufgrund der seit März 2020 andauernden COVID-19 Pandemie, nicht mehr stattgefunden hat.

2.1 Das Experiment im Physikunterricht

Experimente finden in verschiedenen Kontexten Anwendung und unterscheiden sich dabei in ihren zugeschriebenen Funktionen. Während sie in Wissenschaft und Forschung zur Generierung neuen Wissens und neuer Erkenntnisse eingesetzt werden, können sie Begeisterung für Wissenschaft durch eindrucksvolle Aufbauten im Fernsehen, Internet oder diversen Veranstaltungen hervorrufen. Besonderen Stellenwert haben Experimente jedoch im (Physik-)Unterricht, wo sie vielfältig und mit unterschiedlichsten Zielsetzungen eingesetzt werden. Nicht zu unterschätzen ist dabei der motivierende Faktor, der das Interesse der Schüler*innen für neuen Schulstoff wecken kann. In seltensten Fällen werden mit Schülerexperimenten neue Forschungserkenntnisse gewonnen, viel eher werden sie genutzt, um Arbeitsweisen der Physik oder Naturwissenschaften im Allgemeinen kennenzulernen und um Fähigkeiten und Fertigkeiten im naturwissenschaftlichen Arbeiten zu gewinnen. Eine weitere wichtige Funktion des Experiments im Physikunterricht ist das Unterstützen von Lernprozessen. Je nach Lernziel und Aufbereitung kann das Experiment somit einen anderen Beitrag im Unterricht leisten. Im Zusammenhang mit dem Thema der Messunsicherheit sind vor allem die drei nachfolgenden Ziele von Experimenten im Schulunterricht zu nennen, vgl. [6, S. 107]:

- Erwerben von Kompetenzen im *Naturwissenschaftlichen Arbeiten*
- Schaffen von Übungsmöglichkeiten zum *Kommunizieren über Physik*
- *Lernen über die Natur der Naturwissenschaften*

Die Organisationsform der Experimente hat Einfluss auf die Funktion eines Experiments. So sind Schülerexperimente insbesondere für die Förderung naturwissenschaftlichen Arbeitens geeignet. Die Schüler*innen werden selbst tätig, entwickeln Fragestellungen, planen und führen die Versuche durch, werten gewonnene Daten aus und setzen sich im besten Fall kritisch mit den Versuchsergebnissen auseinander. Das Kommunizieren über Physik beinhaltet das Dokumentieren der Experimente und der Daten sowie die Diskussion der erhaltenen Ergebnisse. Die Diskussion der Ergebnisse kann sowohl nach einem Schülerexperiment im Plenum als auch bei der gemeinsamen Auswertung von Messreihen eines Demonstrationsexperiments durch die Lehrkraft stattfinden. Die Auswertung im Plenum stellt vielfach Ausgangspunkte für die Diskussion der Erkenntnisgewinnung in den Naturwissenschaften dar und kann damit einen Beitrag zum letztgenannten Lernziel leisten, vgl. [7]. Schlussendlich sollte man nicht den motivierenden Faktor von Experimenten im Physikunterricht unterschätzen, der bei einer sinnvollen und thematisch passenden Auswahl Einfluss auf das Lernen der Schüler*innen haben kann.

2.2 Didaktische Überlegungen zur Messunsicherheit

Datenauswertung und Messunsicherheiten sind aus den Naturwissenschaften nicht wegzudenken, jedoch haben Studierende zu Beginn ihrer Wissenschaftskarriere oft Schwierigkeiten bei der Analyse und Interpretation von Daten. Es erscheint daher sinnvoll, schon in der Schulzeit auf eine Grundbildung in den Naturwissenschaften zu setzen, um später nicht nur im Alltag, sondern auch bei einem naturwissenschaftlichen Studium auf Vorerfahrungen zurückgreifen zu können. Doch wie können Schüler*innen ein komplexes Gebiet erlernen, bei welchem sich selbst Studierende nach Abschluss einer Matura noch Schwierigkeiten ausgesetzt sehen? Zusätzlich scheint das Themengebiet Messunsicherheiten zunächst wenig spannend und nicht gerade eine motivierende Materie für Schüler*innen im Physikunterricht zu sein. Bei näheren Betrachtungen jedoch stößt man hier auf großes Potential für interessante Diskussionen. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse einer umfassenden Dissertation sowie einer Bachelorarbeit und praktischen Vorerfahrungen zum Thema Messunsicherheiten zusammengetragen und daraus didaktische Überlegungen abgeleitet werden.

„Aus Fehlern wird man klug“⁷

Susanne Heinicke befasste sich im Rahmen ihrer Dissertation mit Fehlern und Messunsicherheiten und erstellte eine detaillierte genetisch-didaktische Rekonstruktion des Messfehlers [8]. Relevante Ergebnisse für den Schulunterricht wurden bei der Erstellung des Unterrichtsentwurfs eingearbeitet und werden nachfolgend prägnant zusammengefasst werden.

Nicht nur das GUM, sondern auch die Beobachtungen Heinickes plädieren für eine Unterscheidung von Messunsicherheiten und Messfehlern. Die Verwendung des Begriffs *(Mess-)Fehler* ist mit negativen Assoziationen, im Hinblick auf fehlerhafte *Handlungen*, belegt, wie Befragungen im Rahmen der Dissertation aufdeckten. Auch der Begriff der *(Mess-)Unsicherheit* stellte sich bei den Befragungen nicht als gänzlich frei von Assoziationen heraus, sondern vermittelte bei einem Drittel der Befragten den Eindruck, dass es sich dabei um die Unsicherheit von Experimentierenden handeln könnte. Dennoch ist der Begriff der *(Mess-)Unsicherheit* nicht gleichermaßen negativ konnotiert wie der *(Mess-)Fehler*. Aufgedeckt wurden weiterhin *Routinen und Faustregeln* der Studierenden bei der Durchführung und Auswertung von Messungen. Problematisch erweisen sich diese dann, wenn beispielsweise stets unüberlegt Messreihen mit sechs Messpunkten angefertigt werden, ohne dass über die Sinnhaftigkeit dieser gewählten Anzahl nachgedacht wird (z. B. ist es nicht ausreichend nur sechs Messungen durchzuführen, wenn die Messdaten sehr große Streuungen aufweisen). Bei Rechenroutinen wie der Mittelwertbildung einer Messreihe fehlt oft ein vertieftes Verständnis der Vereinfachung und Modellhaftigkeit der angewandten Methoden. Heinicke schlägt daher vor, Lernumgebungen zu vermeiden, welche Routinen solcherart unterstützen. Aus Sicht des Schulunterrichts wird ein Erlernen von Routinen Ausgangspunkt für eine vertiefte Auseinandersetzung sein. Erst wenn Schüler*innen ein gewisses Vorwissen oder bestimmte Handlungsstrategien nutzen können, stehen Kapazitäten für Transfer- und Vertiefungsaufgaben zur Verfügung. Weiters stellte sich bei den Untersuchungen Hei-

⁷ Titel der Dissertation von Susanne Heinicke [8]

nickes heraus, dass Studierende die Datengenerierung und Datenauswertung getrennt voneinander betrachten. Studierende versuchen demnach, Unsicherheiten zu Hause bei der Auswertung durch Datenanalyse zu bereinigen. Eine Wiederholung des Experiments findet nur dann statt, wenn sich Daten als „völlig unbrauchbar“ herausstellen. Im schulischen Kontext findet eine Datenauswertung, wenn sie durchgeführt wird, vorwiegend im Unterricht statt. Ein Nicht-Wiederholen von Experimenten bei unbrauchbaren Daten oder das „Zurechtbiegen“ von Daten wird hier vermutlich eher auf Zeitmangel, fehlendes Interesse o. A. zurückzuführen sein. Ein Erfolg könnte in diesem Zusammenhang bereits ein ausführliches und zeitgleiches Auswerten der Daten im Unterricht sein. Die ausgewählten Ergebnisse stellen nur einen Bruchteil der Forschungsergebnisse Heinickes dar. Aus den dargelegten Ergebnissen und der Durchsicht der daraus folgenden Forderungen von Heinicke ergeben sich für die Erstellung einer geeigneten Lernumgebung mit der Zielsetzung erster Erfahrungen mit Messunsicherheiten im Schulunterricht die nachstehenden Orientierungspunkte:

- Unterrichten der Messunsicherheiten nach den Ansätzen des GUM (Übernahme der vorgeschlagenen Terminologie und Einteilung in Typ A- und Typ B-Unsicherheiten, je nachdem ob eine statistische oder nicht-statistische Verteilung vorliegt)
- Wahrnehmen von Unsicherheiten als zusätzliche Information über ein Messergebnis
- Anerkennen von Messergebnissen als wahrscheinliche Ergebnisse einer zu bestimmenden Größe
- Diskussion der Ergebnisse durch offene Fragestellungen in Bezug auf Messunsicherheiten hervorrufen („Wie *verlässlich* ist ein Ergebnis?“)
- Vorbereitung der Auswertung bereits vor- oder während der Durchführung einer Messung etablieren (z. B. im Plenum vorab Überlegungen zu einer Wertetabelle oder zu Messbereichen und Unsicherheiten eines Messgeräts anstellen, ...)
- Lernen über Messunsicherheiten und Fehlern durch offene Aufgabenstellungen ermöglichen
- Stellen kritischer und interessanter Forschungsfragen (Betrachtung der Genauigkeit steht im Vordergrund; sie sollte nicht zu gering, jedoch weiter optimierbar sein, vgl. [8, S.651])

Messunsicherheiten im Physikunterricht

Neben der Forschungsarbeit von Heinicke wurde für die Erstellung der Unterrichtskonzepte auf gesammelte Informationen von Susanne Neumann zurückgegriffen, welche bereits Unterrichtseinheiten zum Thema Messunsicherheiten im Physikunterricht erprobte. Erkenntnisse aus jenen Unterrichtseinheiten wurden auch im Rahmen einer Bachelorarbeit von der Verfasserin dieser Arbeit zusammengefasst, welche sich mit dem Umgang von Messunsicherheiten im Physikunterricht in der Sekundarstufe II beschäftigte. Die wichtigsten Erkenntnisse daraus sollen kurz vorgestellt werden.

Im Rahmen der Bachelorarbeit „Messunsicherheiten im Physikunterricht“ wurden insgesamt zwei Unterrichtseinheiten beobachtet und mittels Methoden qualitativer Sozialforschung untersucht. Die erste Unterrichtseinheit bestand aus einer einführenden Einheit von Susanne Neumann, in welcher die Schüler*innen die Grundlagen zum Auswerten experimenteller Daten anhand einer Power Point Präsentation vorgestellt bekamen und mithilfe von Alltagsbeispielen in die Thematik der Messunsicherheiten eingeführt wurden. Das Konzept der Messunsicherheiten wurde anhand von Aufgaben zum Vergleich von Körpergrößen, zur Diskussion von Wahlergebnissen und Aufgaben aus der Mechanik besprochen. Bereits in einer nächsten Einheit sollten die Schüler*innen das Konzept direkt auf ein Beispiel aus der E-Lehre übertragen. Die Aufgabe bestand darin, die Stromstärke bei zwei verschiedenen, unbekanntem Widerständen und bei konstanter Spannung zu messen. Im Anschluss musste derjenige Widerstand (*begründet*) angegeben werden, bei welchem die höhere Stromstärke zu messen war. Dann wurden die Schüler*inne dazu angeleitet, selbstständig die Erstellung einer Messreihe sowie die Errechnung des Mittelwerts und – im besten Fall – die Standardabweichung im Endergebnis anzugeben, um die beiden Bauteile tatsächlich vergleichen zu können. Im Optimalfall sollten die Schüler*innen beide Messunsicherheiten (Typ A und Typ B) berücksichtigen und die größere im Endergebnis anführen. Wie sich im Rahmen der Untersuchung herausstellte, war der Sprung von Alltagsbeispielen direkt ins naturwissenschaftliche Experiment zu optimistisch gedacht.

Die Auswertung der Unterrichtsbeobachtungen zeigte vor allem auf, dass die Aufgaben kaum das Interesse der Schüler*innen weckten, was in vielen Fällen zu wahllosem Ausprobieren führte. Für die Erstellung der Unterrichtskonzepte in dieser Arbeit soll daher u. a. ein Fokus auf die Gestaltung interessanterer Aufgaben gelegt werden. Weiters zeigte sich, dass

der Einführungsunterricht bei einigen Schüler*innen fruchtete und damit auch bei der zweiten Einheit bereits Gelerntes über die Typ A- und Typ B-Messunsicherheit in die Überlegungen zur Lösung der Aufgabe miteinbezogen wurde. Einige Schüler*innen versuchten durch gezieltes Ausprobieren die gestellte Aufgabe zu lösen und brauchbare Ergebnisse vorzuweisen. Letztendlich wurden noch Hinweise gefunden, dass die Schüler*innen ernsthaft über Schwierigkeiten beim Experimentieren nachdachten. Das bedeutet, dass das Konzept der Messunsicherheiten durchaus im Physikunterricht Anklang finden kann und somit anhand strukturiert aufbereiteter Unterrichtskonzepte für die Schüler*innen greifbar zu sein scheint. In anschließenden Interviews mit Schüler*innen, die sowohl den Einführungs- als auch den Folgeunterricht besuchten, zeigte sich jedoch auch, dass das Gelernte nach einigen Tagen bereits wieder aus dem Gedächtnis verschwunden war (dies galt in besonderer Weise bei der Unterscheidung der Typ A- und Typ B-Messunsicherheiten). Dennoch konnten bereits kleine Hinweise durch die Interviewerin die Schüler*innen zurück auf den richtigen Weg im Umgang mit Messunsicherheiten führen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten jedenfalls, dass es noch Verbesserungspotential für einführende Stunden zum Thema Messunsicherheiten gibt. Aus den Ergebnissen der Bachelorarbeit resultierten die aufgelisteten Überlegungen:

- Der ausgewählte Versuch zur E-Lehre erwies sich als unpraktisch. Die Schüler*innen empfanden es sinnlos, ein Bauteil mehrmals zu messen und umständlich eine Messreihe anzufertigen, wenn doch bereits das einmalige Messen jedes Bauteils die Fragestellung „Bei welchem Bauteil misst man eine höhere Stromstärke?“ scheinbar beantwortete. Daraus folgt für das zu erstellende Unterrichtskonzept, dass ein Experiment gewählt werden sollte, welches einen Raum für Messunsicherheiten offenlässt und die Schüler*innen direkt auf die Notwendigkeit der Angabe von Messunsicherheiten stößt. Außerdem soll die eingangs gestellte Aufgabe nicht durch einmaliges Messen abgeschlossen werden können.
- Das Experiment sowie die Unterrichtsmaterialien sollten abwechslungsreich und interessant gestaltet sein. Schnellere (*leistungsstärkere*) Gruppen brauchen nach Abschluss der Aufgaben noch zusätzliche Möglichkeiten, ihr Wissen zu vertiefen (Differenzierung).
- Der Schülerversuch selbst sollte *kurzweilig* sein, um den Fokus vor allem auf die Auswertung der Daten und Diskussion der Ergebnisse zu legen. Das Experiment

sollte arbeitsgleich von verschiedenen Gruppen durchgeführt werden und am Ende einen Vergleich der Experimente zulassen.

- Bei der Auswahl des Experiments sollen die Schüler*innen in einer routinemäßigen Bearbeitung der gestellten Aufgabe überrascht werden und im Sinne der Konfrontationsstrategie nach Wiesner et al. einen kognitiven Konflikt durchleben [7]. Die Schüler*innen sollen dadurch zum Nachdenken über die Vertrauenswürdigkeit einer Messung angeregt werden.
- Das Konzept der Messunsicherheiten sollte nach einem einführenden Unterricht bei weiteren Experimenten immer wieder thematisiert werden. Nur die Wiederholung und der Transfer in verschiedenen Aufgabenbereichen führen zu einem tieferen Verständnis und zu einer allgemeinen Akzeptanz von Messunsicherheiten bei naturwissenschaftlichen Experimenten.
- Im Vordergrund sollen das Vorhandensein von Messunsicherheiten im Allgemeinen, verschiedene Quellen und Ursachen für Messunsicherheiten sowie erste Schritte zur Angabe von Ergebnissen immer mit Messunsicherheiten im Physikunterricht stehen.
- Während in der Unterstufe auf einfache mathematische Modelle zurückgegriffen wird, können in der Oberstufe, aufbauend auf die bereits erworbenen Kompetenzen aus der Sekundarstufe I, komplexere Methoden aus der Mathematik eingesetzt werden und damit eine tiefere Interpretation von Daten erfolgen.
- Zu überlegen ist, ob man in der Unterstufe bereits die Begrifflichkeit Typ A- und Typ B-Messunsicherheit einführt oder ob man zunächst auf diese verzichtet hat und nur von Messunsicherheiten von Messreihen bzw. Messgeräten spricht. In leistungsstarken Klassen kann zusätzlich der *Fehler* eingeführt werden.
- In der Oberstufe kann man aufbauend auf das bereits bekannte Konzept von Messunsicherheiten auch die Unterscheidung Typ A- und Typ B-Messunsicherheit vornehmen. Zunächst sollte aber das Prinzip im Allgemeinen bekannt sein.

2.3 Einbettung im Lehrplan und Kompetenzmodell

Nach den vorangegangenen didaktischen Überlegungen soll nun eine Einordnung der Messunsicherheiten im Lehrplan des Faches Physik geschehen. Auch wird das Kompetenzmodell des BIFIE, welches in abgewandelter Form auch im neuen Lehrplan der Sekundarstufe II zu finden ist (und künftig auch im Lehrplan der Sekundarstufe I zu finden sein wird), bei der Einbettung miteinbezogen werden.

Sekundarstufe I

Bereits in den einleitenden Worten des Lehrplans der Sekundarstufe I zur Bildungs- und Lernaufgabe des Physikunterrichts können Komponenten entdeckt werden, wo das vorgestellte Thema Messunsicherheiten zu verorten ist. Die Schüler*innen sollen „*typische Denk- und Arbeitsweisen der Physik*“ altersadäquat anwenden, sie sollen physikalische Vorgänge beschreiben und *protokollieren* sowie Schülerexperimente planen, durchführen aber auch *auswerten* können [9, S. 96 - 97].

Durch Experimente oder auch durch die bloße Auswertung von gegebenen Messdaten können mithilfe altersgemäßer Aufgabenstellungen erste Schritte in Richtung naturwissenschaftlicher Arbeitsweisen gegangen werden. Die Interpretation von Messdaten eröffnet eine neue Sichtweise, die den absoluten Aussagen, die im Alltag oft vorherrschen, entgegensteht.

Im zukünftigen neuen Lehrplan der Unterstufe im Fach Physik sind die zu erwerbenden *Kompetenzen* durch das (leicht modifizierte) Kompetenzmodell der Naturwissenschaften des BIFIE festgelegt [10]. Der Umgang mit Messunsicherheiten lässt sich vor allem in der *Handlungsdimension E* (Erkenntnisse gewinnen: Fragen, Untersuchen und Interpretieren) finden. Im Kompetenzmodell können die zu erwerbenden Fähigkeiten im Umgang mit Messunsicherheiten den folgenden zwei Punkten zugeordnet werden [10]:

- „*zu Fragestellungen eine passende Untersuchung oder ein Experiment planen, durchführen und protokollieren*“
- „*Daten und Ergebnisse von Untersuchungen analysieren (ordnen, vergleichen, Abhängigkeiten feststellen) und interpretieren*“

Wie bereits im Kapitel 1.5 dargelegt, gibt es vom Planen eines Experiments über das Durchführen und Protokollieren bis hin zum Auswerten dieses einige Quellen für Messunsicherheiten und Fehler. Ein bewusstes Legen des Fokus auf den Umgang mit Messunsicherheiten während der einzelnen Phasen des Experimentierens könnte ein erster Ansatz in Richtung eines Verständnisses für die Ursachen von Messunsicherheiten und Fehlern sein.

Sekundarstufe II

Im semestrierten Lehrplan der Sekundarstufe II werden die „*spezifischen Arbeitsweisen der Physik*“ und der „*Erwerb naturwissenschaftlicher Kompetenzen*“ hervorgehoben [9]. Schüler*innen sollen nach dem Physikunterricht in der Lage sein, fundierte Entscheidungen auf

Basis naturwissenschaftlicher Erkenntnisse treffen zu können. Um eine kritische Auseinandersetzung zu ermöglichen, muss der Umgang mit vorgelegten Daten erlernt und geübt werden. Im Abschnitt der *Didaktischen Grundsätze* sind die zu erwerbenden Kompetenzen im Rahmen des Physikunterrichts festgelegt. Der Umgang mit Messunsicherheiten kann vor allem der *Handlungsdimension E* (Experimentieren und Erkenntnisgewinnung) zugeordnet werden. Die ausformulierten Kompetenzen sind mit jenen in der Unterstufe (im neuen noch unveröffentlichten Lehrplan für die Sekundarstufe I) weitestgehend ident. Der Punkt „*Daten und Ergebnisse von Untersuchungen analysieren [...] und interpretieren*“ wird durch die ausführlichere Variante „*im Rahmen naturwissenschaftlicher Untersuchungen oder Experimente Daten aufnehmen und analysieren (beobachten, ordnen, vergleichen, messen, Abhängigkeiten feststellen, Zuverlässigkeit einschätzen*“ sowie im nächsten Unterpunkt „*Daten durch mathematische und physikalische Modelle abbilden und interpretieren*“ ersetzt. Vertiefend wird in der Oberstufe der Einsatz „*moderner Medien und Technologien*“ gefordert, „*insbesondere elektronische Messwerterfassung, [...], Datenauswertung und -analyse und Modellbildung*“ [9, 10].

Zusammenfassend gehen aus der Analyse und dem Vergleich des Unterstufen- und Oberstufenlehrplans inkl. des Kompetenzmodells Naturwissenschaften des BIFIE die gleichen zu erwerbenden Kompetenzen hervor, wobei die Tiefe und die Wahl der mathematischen Methoden unterschiedliche Schwierigkeitsgrade mit sich bringen. Beim Durchlaufen der einzelnen Schulstufen von Unter- zur Oberstufe lassen sich somit immer zuverlässigere Bewertungskriterien für Messergebnisse und Untersuchungen bereitstellen. Der Einsatz von computergestützter Software, wie beispielsweise Excel für die Auswertung von Daten oder die Durchführung eines t-Tests mittels Geogebra, ermöglicht eine vertiefte Auseinandersetzung mit Messunsicherheiten und der Interpretation gewonnener Ergebnisse.

2.4 Mathematische Voraussetzungen

In diesem Unterkapitel wird der Mathematik Lehrplan der Unter- und Oberstufe gesichtet, um bei der Auswahl der Methoden für die Berechnung von Messunsicherheiten im Physikunterricht sicherzugehen, dass die notwendigen mathematischen Fertigkeiten bereits im Mathematikunterricht erarbeitet wurden.

Sekundarstufe I

Im österreichischen Lehrplan der Sekundarstufe I findet man das „*Arbeiten mit Modellen, Statistik*“ ab der 1. Klasse. Spätestens in der 3. Klasse sollen Datenmengen genauer untersucht und dargestellt werden, was bereits einen Grundstein für die Messunsicherheiten im Physikunterricht legen könnte. In der 4. Klasse der Sekundarstufe I findet man den Punkt „*Untersuchen und Darstellen von Datenmengen unter Verwendung statistischer Kennzahlen (z. B. Mittelwert, Median, Quartil, relative Häufigkeit, Streudiagramm)*“ [9, S. 85]. Für das Unterrichtskonzept werden daher der Mittelwert und die Spannweite vorausgesetzt. In leistungsstarken Klassen (bzw. ab der 8. Schulstufe) empfiehlt es sich, auch die Standardabweichung zur Beschreibung der Vertrauenswürdigkeit einer Messung einzusetzen. Folgende mathematische Methoden werden daher für das Unterrichtskonzept in der Sekundarstufe I vorausgesetzt und müssen, je nach mathematischen Fertigkeiten in den jeweiligen Klassen, im Plenum oder selbstständig gelöst werden können:

- Mittelwert
- Spannweite
- Standardabweichung

Ein weiteres praktisches Tool kann in der Unterstufe bereits die *Abschätzung der maximalen Unsicherheit* sein, welche bereits im Theorieteil in Kapitel 1.3.3 behandelt wurde. Je nach verfügbarer Zeit im Physikunterricht könnte hier das Wissen noch weiter vertieft werden. Im vorgestellten Unterrichtskonzept wird die Abschätzung der maximalen Unsicherheit jedoch nicht notwendigerweise benötigt.

Sekundarstufe II

Die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung wird in der Sekundarstufe II bereits vorausgesetzt. Diese können evtl. auch mittels Computer (z. B. Excel) kalkuliert werden. Im Rahmen des Physikunterrichts wäre es sinnvoll, auch die Standardabweichung des Mittelwerts einzuführen, da diese in wissenschaftlichen Kontexten aussagekräftiger ist als die in der Schule üblicherweise gelehrt Standardabweichung der Grundgesamtheit. Zusätzlich kann in der Schule auch ein t-Test mittels GeoGebra (in der Option Wahrscheinlichkeitsrechner) durchgeführt und so die Mittelwerte von Messergebnissen verschiedener Gruppen miteinander verglichen werden.

2.5 Zusammenfassung und Lernziele

Experimente spielen im Physikunterricht eine zentrale Rolle. Neben der Planung und der oft im Vordergrund stehenden Durchführung gehören auch die Auswertung und die Interpretation der erhobenen Daten zu einem naturwissenschaftlichen Experiment. Die drei genannten Ziele „*Naturwissenschaftliches Arbeiten*“, „*Kommunizieren über Physik*“ und das „*Lernen über die Natur der Naturwissenschaften*“ können durch sinnvoll eingesetzte Experimente im Unterricht erreicht werden. Für das Unterrichtskonzept soll vor allem der Fokus auf dem naturwissenschaftlichen Arbeiten liegen, die beiden anderen Ziele sollen an untergeordneter Stelle stehen.

Die dargestellten Überlegungen, unterstützt durch Vorarbeiten einer Bachelorarbeit, ergeben, dass für das Unterrichtskonzept eine schülerzentrierte Organisationsform des Experiments sinnvoll erscheint, wobei die Kleingruppen arbeitsgleiche Aufgaben lösen. Der Versuch selbst soll kurzweilig gestaltet sein und die Auswertung und Diskussion der Ergebnisse im Fokus haben. In der ersten Stunde ergibt ein kognitiver Konflikt eine Wende im Laufe des Experiments. Die Schüler*innen werden durch gezielte Aufgaben zum Nachdenken über die Zuverlässigkeit ihrer Messung angeregt. Im Vordergrund soll das Bewusstwerden um das Konzept von Messunsicherheiten im Allgemeinen stehen. Welche Quellen und Ursachen für Messunsicherheiten gibt es und wie kann man die Zuverlässigkeit des eigenen Experiments angeben, um es mit Mitschüler*innen vergleichen zu können? Während in der Sekundarstufe I einfache mathematische Methoden die Angabe von Messunsicherheiten ermöglichen sollen, können die Verfahren in der Sekundarstufe II zunehmend ausgebaut werden.

Der österreichische Lehrplan im Fach Physik lässt das Thema Messunsicherheiten nicht nur zu, sondern verlangt explizit nach einer Entwicklung naturwissenschaftlicher Grundkompetenzen. Auch im Kompetenzmodell Naturwissenschaften des BIFIE, welches sich bereits eingebettet im Lehrplan der Sekundarstufe II befindet und im neuen Lehrplan der Sekundarstufe I eingeplant ist, spielt die Auswertung und Interpretation von Messdaten eine entscheidende Rolle.

Der österreichische Lehrplan im Fach Mathematik fordert das „*Arbeiten mit Modellen, Statistik*“ bereits ab der 1. Klasse in der Sekundarstufe I. Konkret wird die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung ab der 4. Klasse genannt, wobei der Mittelwert und die Spannweite anhand eines Zahlenstrahls bereits ab der 3. Klasse möglich sein sollte. In der Sekundarstufe II können der Mittelwert und die Standardabweichung ab der 5. Klasse

vorausgesetzt werden. Mittels GeoGebra sollte es auch möglich sein, einen t-Test durchzuführen und zur Interpretation von Ergebnissen heranzuziehen.

Aus den vorangegangenen Überlegungen lassen sich daher die folgenden Lernziele auf der nächsten Seite für die Schulstunden zum Thema Messunsicherheiten in der Sekundarstufe I ableiten:

Der*Die Schüler*in kann ...

- ✓ ... erklären, warum eine Messung immer eine gewisse Unsicherheit hat.
- ✓ ... ein Ergebnis vollständig (Mittelwert von mehreren Messergebnissen und als Streuungsmaß die Spannweite – oder die Standardabweichung⁸, abhängig vom mathematischen Vorwissen) angeben.
- ✓ ... die Vertrauenswürdigkeit verschiedener Messergebnisse einschätzen und vergleichen.
- ✓ ... verschiedene Quellen für Unsicherheiten aufzählen und sie bei der Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit einer Messung miteinbeziehen.

⁸ Erweiterung für einen differenzierten Unterricht.

3 Design-Based Research

Ursprünglich war für diese Masterarbeit die Erstellung eines Unterrichtskonzepts für die Sekundarstufe I und II geplant. Aufgrund der COVID-19 Pandemie wurde in weiterer Folge nur das Unterrichtskonzept der Unterstufe an einer Schule erprobt, das Unterrichtskonzept der Sekundarstufe II blieb damit in der Entwicklungsphase unvollendet und findet sich daher nur in einem kurzen Abschnitt unter dem Kapitel *Ausblick* wieder. In weiterer Folge werden deshalb nur die Entwicklung und Evaluation des Unterrichtskonzeptes für die Sekundarstufe I beleuchtet.

3.1 Methodologie

3.1.1 Design-Based Research

Grundlage des Entwicklungsprozesses stellt das Modell des „Design-Based Research“ (D-BR) dar [11]. Ziel dieses Modells ist es, Ergebnisse aus der Forschung direkt auf aufgedeckte Problemstellungen aus der Praxis anzuwenden und direkt Lösungen für Praktiker*innen zu finden. Explizit hervorzuheben ist, dass der Ausgangspunkt für eine Forschung beim „Design-Based Research“ aufgegriffenen Problemen aus der Schulpraxis entspringen. Durch diesen Ansatz, welcher Forschung und Praxis in enger Zusammenarbeit sieht, soll es ermöglicht werden, dass Forschungsergebnisse am Ende auch tatsächlich bei den Lehrkräften in den Schulen zur Kenntnis gebracht werden, vgl. [11, S. 3 - 5]. In Abbildung 2 kann man eine schemenhafte Darstellung des „Design-Based Research“ nach Haagen-Schützenhofer betrachten [11, S.10]. Dabei erkennt man die zwei Prozessräume, nämlich den Forschungsraum links und den Produktentwicklungsraum rechts, ineinandergreifen. Auf vier Ebenen (siehe in der Abbildung am rechten Rand) werden Schritte in Richtung eines Endergebnisses gesetzt.

Forschungszyklus

Im Forschungszyklus werden zunächst Hypothesen zu einem Problem (= heuristische Ebene) formuliert. Auf empirischem Wege werden Daten zu den aufgestellten Hypothesen erhoben, um anschließend spezifische Erkenntnisse aus der Datenerhebung (z. B. Lernschwierigkeiten im Umgang mit Typ B-Messunsicherheiten) zu erhalten. Diese Forschungsprodukte werden im Anschluss mit einer Scientific Community (hier z. B. Betreuer der Masterarbeit) abgeglichen (= Validierung).

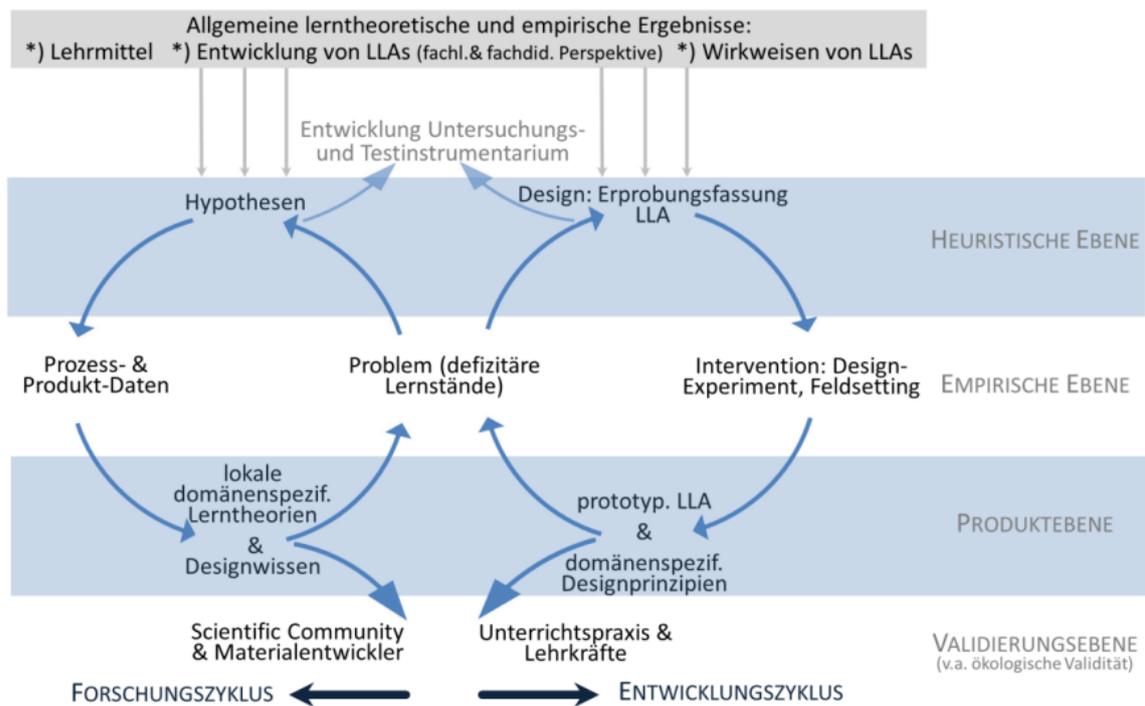


Abbildung 2: Schematisches Modell des Design-Based Research [11, S. 10].

Entwicklungszyklus

Im Produktentwicklungsraum wird zunächst ein Entwurf eines Lehr- und Lernarrangements (in dieser Arbeit Vorentwurf der Unterrichtseinheiten genannt) unter Zurückgreifen auf bisherige Erfahrungen, empirische und lerntheoretische Erkenntnisse erstellt (heuristische Ebene). Dieser Vorentwurf wird in einem nächsten Schritt durch eine Intervention erprobt (Empirie), wobei erhobene Daten aus dieser Intervention in die Weiterentwicklung der Unterrichtskonzepte (= Entwicklungsprodukte) einfließen. Anschließend können die Entwicklungsprodukte (im weiteren Verlauf Unterrichtsentwurf) in der Unterrichtspraxis einer Validierung unterzogen werden.

Verschränkung der Zyklen

Die zunächst getrennt dargestellten Arbeitsbereiche des Forschungs- und Entwicklungszyklus sind jedoch im Verlauf des Erstellungsprozesses nicht isoliert voneinander zu betrachten. Vielmehr werden Erkenntnisse und Ergebnisse der beiden Bereiche konsequent aufeinander bezogen. Außerdem ist zu beachten, dass es beim „Design-Based Research“ zum mehrmaligen Durchlaufen der dargestellten Zyklen kommt, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis, also brauchbare und in der Praxis taugliche Unterrichtsmaterialien bzw. Unterrichtskonzepte, vorliegt, vgl. [11, S. 11].

3.1.2 Akzeptanzbefragung

Wiesner und Wodzinski erklären prägnant das Ziel von Akzeptanzbefragungen in naturwissenschaftlichen Lehr- und Lernsettings folgendermaßen:

Untersuchungen nach der Methode der Akzeptanzbefragung haben zum Ziel, Schwierigkeiten beim Lernen grundlegender physikalischer Inhaltsbereiche zu erkennen und die Lernverläufe von Schülerinnen und Schülern besser zu verstehen. Sie schaffen die Grundlage für die Entwicklung von Unterrichtskonzepten, mit denen die Lernschwierigkeiten verringert werden können und die Akzeptanz der physikalischen Sicht unterstützt werden kann [12, S. 250].

Die Methode eignet sich daher optimal für eine erste Überprüfung des mithilfe von allgemeinen Lerntheorien und Erfahrungen von Lehrkräften erstellten Vorentwurfs der Unterrichtseinheiten. In einem Einzellehrgespräch zwischen einem*einer Schüler*in und einer Lehrperson (= Verfasserin der Arbeit) sollen Verständnisschwierigkeiten beim Bearbeiten der zur Verfügung gestellten Unterrichtsmaterialien aufgedeckt werden. Aus Reaktionen während des Gesprächs und aus den aufgezeichneten und teilweise transkribierten Audiodaten werden Erkenntnisse für die Überarbeitung des Unterrichtsentwurfs gewonnen. Gegebenfalls kann die Akzeptanzbefragung nach einem überarbeiteten Konzept nochmals Anwendung finden, beispielsweise wenn sich das gewählte Experiment oder weitere Aufgabenstellungen als nicht geeignet herausstellten.

3.1.3 Datensammlung im Feld (Unterrichtsbeobachtung)

Die beiden bereits aus den Akzeptanzbefragungen überarbeiteten Unterrichtseinheiten werden im Rahmen des Physikunterrichts in einer 8. Schulstufe einer AHS in der gesamten Klasse durchgeführt und evaluiert. Dafür wird einerseits ein Camcorder so am Ende des Klassenraums platziert, dass die Gesamtsicht auf das Unterrichtsgeschehen gefilmt wird. Bei zwei Gruppen werden zusätzlich Schülergespräche während der Gruppenarbeitsphasen mittels Audioaufzeichnungen via Smartphones aufgezeichnet. Der Physiklehrer der Klasse wird außerdem mit einem Beobachtungsleitfaden ausgestattet, um mittels teilnehmender Beobachtung weitere Informationen zu Schwierigkeiten und/oder Verständnisproblemen zu sammeln. Auf die teilnehmende Beobachtung durch die Verfasserin musste aufgrund der starken Einschränkungen durch die COVID-19 Pandemie verzichtet werden.

Audioaufzeichnung

Pro Unterrichtsstunde werden die Schülergespräche in zwei Gruppen bei der Bearbeitung der Unterrichtsmaterialien mittels Tonaufnahme aufgezeichnet. Nachteil dieser Methode ist, dass beispielsweise eine Zuordnung der Stimmen bei unbekanntenen Personen deutlich schwieriger ist sowie Informationen über die Mimik und Gestik der Schüler*innen als Informationen für den Auswertenden fehlen, vgl. [13]. Vorteil hingegen ist, dass die reine Audioaufnahme im Gegensatz zur Videoaufnahme weniger invasiv ist und sich Schüler*innen aufgrund dessen möglicherweise weniger stark im Gesagten zensieren, wodurch sich tiefere Einblicke in die Denkprozesse der Schüler*innen einfangen lassen könnten als bei Videoaufzeichnungen. Die Aufzeichnungen der Gruppenarbeitsphasen werden teilweise transkribiert und ausgewertet.

Videoanalyse

Die Videoanalyse bietet im Vergleich zur reinen Audioaufzeichnung den Vorteil, dass auch situative Rahmenbedingungen (Gesten, Bewegungen, Gesichtsausdrücke, etc.) aufgenommen werden, welche weitere Informationen bei der Auswertung bieten können. Somit ist eine Rekonstruktion des Unterrichtsgeschehens im Nachhinein möglich. Nachteil der Methode ist, dass dem auffälligen Aufbau und der ungewohnten Situation viel Aufmerksamkeit geschenkt werden, „*was sich störend auf die Klassensituation auswirken kann*“ [13, S. 149]. Die ursprünglich geplante Videoaufnahme zweier Gruppen konnte aufgrund Zeitmangels der Lehrpersonen und der nicht anwesenden Verfasserin nicht stattfinden. Um bei der Analyse gezielt Informationen zu erhalten, sollten vor der Durchsicht des Videomaterials bereits Forschungsfragen feststehen, um so einen gezielten Fokus auf entscheidende Situationen lenken zu können, vgl. [13].

Teilnehmende Beobachtung

Nach Lamnek & Krell ist „*das maßgebliche Kennzeichen der teilnehmenden Beobachtung [...] der Einsatz in der natürlichen Lebenswelt der Untersuchungspersonen*“, dabei soll der Beobachter „*durch genaue Beobachtung etwa deren Interaktionsmuster und Wertvorstellungen zu explorieren und für die wissenschaftliche Auswertung zu dokumentieren*“ versuchen [14, S. 516]. Problematisch im Zusammenhang mit der teilnehmenden Beobachtung ist, dass es Übung in der gezielten Wahrnehmung und Übung im Verstehen während des Beobachtungsprozesses braucht. Das Verstehen im wissenschaftlichen Kontext ist eher kognitiv-be-

trachtend und analytisch im Gegensatz zum alltäglichen Verstehen, welches eher pragmatisch und emotional belastet ist, vgl. [14]. Um den Physiklehrer bei einer kognitiv-betrachtenden und analytischen Beobachtung zu unterstützen, wurde ein Beobachtungs-Leitfaden für die beiden Unterrichtsstunden erstellt. Auf dem ausgedruckten Leitfaden sollen zu den gezielt formulierten Beobachtungspunkten Notizen über beobachtete Situationen von der Lehrkraft festgehalten werden.

3.1.4 Weitere Erhebungsmethoden

Zu den weiteren Erhebungsmethoden zählen ein schriftlicher Testbogen zur Post-Testung, eine Online-Umfrage für Mathematik-Lehrkräfte (Welche Modelle zur Berechnung statistischer Größen werden bis zur 8. Schulstufe unterrichtet?) und ein abschließendes Feedback-Gespräch mit der Physiklehrerin, die das entwickelte Unterrichtskonzept erprobte.

Schriftlicher Test

Für die Überprüfung des behaltenen Wissens und des erlangten Verständnisses durch die Unterrichtsinterventionen wird ein schriftlicher Testbogen erstellt. Auf mehreren Seiten werden Items zu einem beispielhaften Experiment zu finden sein. Von Seite zu Seite werden die Durchführung und Auswertung systematisch verbessert. Die Schüler*innen sollen die Vertrauenswürdigkeit des durchgeführten Experiments bzw. der Ergebnisse beurteilen und ihre Antworten begründen. Der schriftliche Testbogen soll einerseits von den Schüler*innen nach der Akzeptanzbefragung und andererseits von allen Schüler*innen, die bei der Durchführung beider Unterrichtseinheiten im Physikunterricht anwesend waren, ausgefüllt werden. Optimalerweise sollte auch vor den Interventionen der gleiche schriftliche Test von den teilnehmenden Schüler*innen ausgefüllt werden.

Online-Umfrage

Um einen groben Überblick über die unterrichteten mathematischen Methoden zur Ermittlung von statistischen Größen in der 8. Schulstufe zu erhalten, wurde eine Online-Umfrage durchgeführt. Es sollte einerseits festgestellt werden, ob der Mittelwert prinzipiell von allen Mathematik-Lehrkräften unterrichtet wird und andererseits, welche Methoden zur Bestimmung einer Streuung von Messwerten herangezogen werden. Explizit sollte auch erfragt werden, welche Standardabweichung (Standardabweichung der Grundgesamtheit/ der Stichprobe/ des Mittelwerts/ ...) von Lehrpersonen vorzugsweise unterrichtet wird.

Für die Aussendung der Online-Umfrage sollte die ausgewählte Zielgruppe möglichst direkt angesprochen werden. Vorteil der Methode einer Online-Befragung ist, dass sie schnell und einfach für die Befragten auszufüllen ist und etwaige Versandkosten oder organisatorische Umstände erspart bleiben. Durch die unkompliziertere Rekrutierung erhofft man sich im Allgemeinen von Online-Befragungen eine höhere Teilnehmerzahl [15]. Für die Gestaltung des Fragebogens haben nach Maurer & Jandura auch die Gestaltung des Fragebogens und die Usability einen Einfluss auf die Teilnahmebereitschaft [16]. Dazu zählt generell der Verzicht auf zu viel Lesetext (beispielsweise in den einleitenden Worten), „*eine verständliche Beschreibung von Fehlermeldungen*“ und weiters eine Fortschrittsanzeige, um Drop-outs möglichst zu verhindern [15, S. 67 - 68]. Bei der Erstellung der Fragen und Antwortmöglichkeiten decken sich die Ergebnisse von Methodenstudien weitgehend mit jenen von schriftlichen Befragungen, vgl. [15]. Ein weiterer entscheidender Vorteil bei der Verwendung von Online-Befragungen ist, dass Filterungsfunktionen sinnvoll eingesetzt und damit auf die Antworten von Teilnehmer*innen abgestimmt werden. Unter Einbeziehung der Tipps aus [14] und [15] wurde anschließend ein Fragebogen für die Umfrage erstellt und ausgesandt.

Feedbackgespräch mit der unterrichtenden Lehrperson

Ein abschließendes Online-Gespräch via Zoom soll eingesetzt werden, um weitere Inputs von der Lehrperson, die die Unterrichtseinheiten durchführt, zu sammeln. Die Lehrperson wird zunächst im Sinne eines *informativischen Interviews*⁹ angehalten, ihre eigenen Erfahrungen, die in Erinnerung geblieben sind, zu erzählen, vgl. [14]. Zwischenfragen und *Erzählaufforderungen* von der Verfasserin sollen der Lehrperson bei lückenhaften Erinnerungen helfen, die Informationen zu ergänzen. Während der Erzählungen werden Notizen von der Verfasserin der Arbeit festgehalten. Im Abschluss des Gesprächs werden die ausgewerteten Daten aus der Film- und Audioanalyse und Schlussfolgerungen der Verfasserin mit der Lehrperson abgeglichen und ggf. weitere Interpretationen aufgegriffen.

⁹ nach Lamnek & Krell [14, S. 316]: Der*die Befragte wird als Experte verstanden und berichtet deskriptiv Erfahrungen aus seinen*ihren *Wissensbeständen*.

3.1.5 Forschungs- und Entwicklungszyklen

Verschiedene Ideen zur Umsetzung der Unterrichtseinheiten wurden in einem Brainstorming zusammengestellt und mit dem Betreuer dieser Arbeit ausdifferenziert. Zunächst im Eigenversuch und schließlich durch drei naturwissenschaftlich unerfahrene Bekannte der Verfasserin konnten das Experiment und die Auswertung desgleichen erprobt werden, um grobe Verständnisschwierigkeiten im Aufgabentext und in der Durchführung auszuräumen. Dieser Vorentwurf der Unterrichtseinheiten wurde weiters mit Susanne Neumann, einer bereits erfahrenen Lehrperson auf diesem Gebiet, besprochen und weitere Verbesserungsvorschläge in den Unterrichtsentwurf eingearbeitet. Diese anfänglichen Annäherungen eines Unterrichtskonzepts sind im ersten Entwicklungszyklus zu verorten, wie aus Abbildung 3 entnommen werden kann.

Nach diesen Vorarbeiten fand erstmals eine Testung des Vorentwurfs in der Praxis mittels Akzeptanzbefragungen an zwei Schülern der 8. Schulstufe des BRG 14 statt. Die Erstellung und Testung des Vorentwurfs stellt den zweiten Zyklus im D-RB-Modell dar. Die Auswahl der Schüler geschah durch die Physiklehrerin der beiden Schüler, deren schulisches Leis-

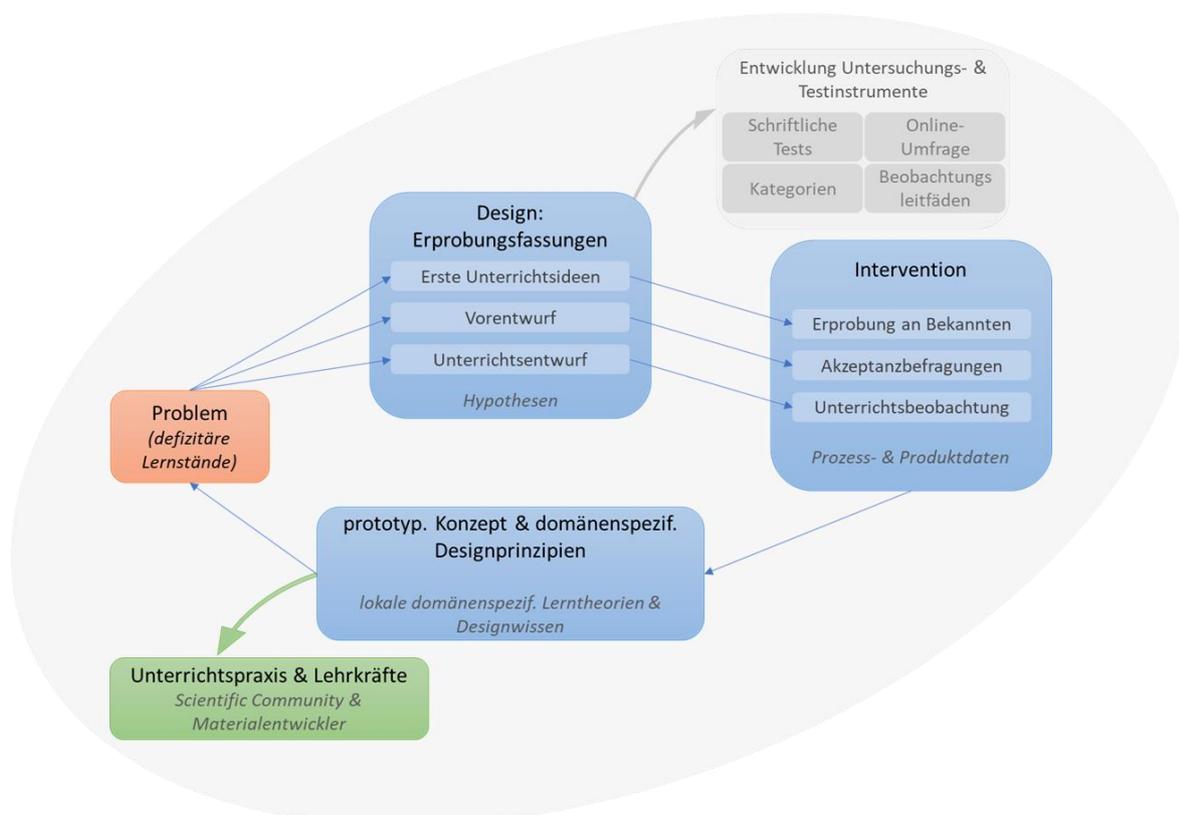


Abbildung 3: Die Forschungs- und Entwicklungszyklen werden dreimal durchlaufen. Die drei Zyklen werden anhand der Aufspaltung der Pfeile erkennbar. Die vorliegende Grafik wurde in Anlehnung an das D-BR-Modell aus Abbildung 2 erstellt, mod. n. [10].

tungsniveau mittelmäßig eingestuft wurde. Außerdem beschrieb die Lehrerin, dass die beiden erstens redselig und zweitens auch interessiert an der Testung waren. Aus den Ergebnissen dieser Akzeptanzbefragungen konnten wiederum wertvolle Informationen gesammelt werden, welche in die Weiterentwicklung und Verbesserung des Unterrichtskonzeptes eingeflossen sind.

Zur Überbrückung des pandemiebedingten Lockdowns wurde im Rahmen des zweiten Forschungs- und Entwicklungszyklus kurzerhand noch eine Online-Umfrage für Mathematik-Lehrkräfte erstellt, um weitere Erkenntnisse in die Unterrichtsplanungen einbeziehen zu können. Konkret wurden Informationen zu den unterrichteten statistischen Methoden bis zur 8. Schulstufe erhoben, um sicherzustellen, dass die Voraussetzung der mathematischen Fertigkeiten zur Errechnung eines Mittelwerts und der Spannweite gegeben ist. Weitere Fragestellungen zum Einsatz statistischer Methoden im Mathematikunterricht sollten außerdem einen besseren Überblick über die Vorkenntnisse von Schüler*innen der 8. Schulstufe ergeben.

Sobald es möglich war, wurde der zwei Schulstunden umfassende Unterrichtsentwurf in einer Klasse des BRG 14 zu Beginn der 8. Schulstufe durchgeführt. Die Überarbeitung und Evaluierung des Unterrichtsentwurfes mittels Unterrichtsbeobachtungen bilden den dritten und letzten Zyklus zur Erstellung eines geeigneten Unterrichtskonzeptes zum Thema Messunsicherheiten. Aufgrund der COVID-19 Pandemie konnte die Verfasserin dieser Arbeit nicht selbst an den Unterrichtsstunden teilhaben. Aus diesem Grund wurde der Unterricht von einer langjährigen und erfahrenen Physiklehrerin durchgeführt. Der eigentliche Physiklehrer nahm mittels teilnehmender Beobachtung an den Unterrichtsstunden teil. Für die teilnehmende Beobachtung wurde ein Leitfaden (siehe Anhang) erstellt und anschließend ausgewertet. Für die Physiklehrerin wurde eine genaue Stundenplanung für beide Unterrichtseinheiten vorbereitet und diese vorab gründlich und Punkt für Punkt durchbesprochen, um alle offenen Fragen zu klären.

Beide Schulstunden wurden in einer Gesamtsicht gefilmt und je zwei Gruppen mittels Audiogeräten aufgenommen. Die Audios der insgesamt drei Gruppen wurden transkribiert und anschließend analysiert. Zur Analyse wurden zunächst (deduktiv) Kategorien erstellt und ausdefiniert. Während der Sichtung des Materials wurden die Kategorien durch weitere Kategorien und Subkategorien induktiv ergänzt.

Drei Tage nach der letzten Einheit zum Thema Messunsicherheiten wurde ein schriftlicher Test von den Schüler*innen der Klasse ausgefüllt. Dieser Schritt ist ebenfalls als zusätzliche Erhebungsmethode im dritten Zyklus zu verorten. Aufgrund der unsicheren Umstände bzw. aufgrund der unklaren Lage bzgl. der Umstellung zwischen Präsenz- und Homelearning-Phasen war es terminlich nicht möglich, einen Pre-Test vorab durchzuführen. Leider konnte auch der durchgeführte Test aufgrund eines weiteren herannahenden Lockdowns nicht weiter herausgezögert werden. Trotz der nicht optimal gewählten drei Tage, war es aus Sicht der Verfasserin und des Betreuers besser, den schriftlichen Test zu diesem Zeitpunkt durchzuführen, um die Möglichkeit nicht gänzlich zu verpassen. Schlussfolgerungen aus der Auswertung der vorliegenden Daten vonseiten der Verfasserin wurden im Abschluss des Gesprächs mit der Physiklehrerin abgeglichen.

Im letzten Schritt dieser Arbeit wurden alle Ergänzungen und Schlussfolgerungen noch einmal in die Unterrichtsmaterialien eingearbeitet und mit dem Betreuer der Arbeit durchbesprochen. Die Erkenntnisse und die Bausteine dieses Unterrichtskonzeptes konnten abschließend in einem Artikel für ein Themenheft der Fachdidaktik Zeitschrift Plus Lucis niedergeschrieben werden. Dieser letzte Schritt ist im D-BR-Zyklus im dritten Quartal in Abbildung 3 als Outcome der Forschungs- und Entwicklungszyklen erkennbar. Lehrkräfte und die scientific community sollen von den prototypischen Konzepten und Designideen profitieren können. Die gesamte Sammlung der Unterrichtsmaterialien des vorgestellten Unterrichtskonzeptes ist außerdem in Kapitel 4 dieser Arbeit zu finden.

3.1.6 Gütekriterien

Der Ansatz dieser Arbeit ist qualitativer Natur. Im Gegensatz zur quantitativen Forschung, wo die Absicherung der Ergebnisse anhand von Gütekriterien (Reliabilität, Validität, Objektivität, ...) notwendig ist, können selbige Maßstäbe nicht einfach auf qualitative Forschung angewandt werden, da Datengewinnung und Theoriekonstruktion auf völlig unterschiedlichen Wegen basieren. Während die quantitative Forschung deduktiv von Theorien ausgehend Hypothesen bildet und diese prüft, geht die qualitative Forschung von der Realität aus und formuliert induktiv Hypothesen als Endprodukt, vgl. [14, S. 134]. Von quantitativen Sozialforscher*innen wird das Fehlen der Gütekriterien oft kritisiert. Überlegungen zu Maßstäben qualitativer Forschung müssen u. a. deshalb umso sorgfältiger überlegt werden. Dem zugrunde liegt eine entsprechende Haltung des*der Forscher*in, der*die offen an das Feld herangeht, gewonnene Erkenntnisse in Zweifel zieht und nach Belegen sucht, um seine*ihre

Einsichten zu unterstützen, vgl. [14]. Heinicke nennt drei Gruppen von Forschergemeinschaften, die sich in ihren Arten der Anwendung von Gütekriterien unterscheiden: „(1) diejenigen, die die quantitativen Kriterien für die qualitativen Studien adaptieren [...], (2) solche, die eigene Kriterien der Qualitätssicherung fordern [...], (3) jene, die generell in Frage stellen, Qualitätskriterien für qualitative Forschung aufstellen zu können“ [8, S. 73]. Diese Arbeit orientiert sich an einer Mischung erstgenannter und zweitgenannter Gruppen, wonach Qualitätskriterien an die gewählten Methoden, dem Forschungsgegenstand und dem Untersuchungsziel angepasst werden. Dafür wird auf die sechs Gütekriterien qualitativer Forschung nach Mayring zurückgegriffen [17]: 1) *Verfahrensdokumentation*, 2) *Argumentative Interpretationsabsicherung*, 3) *Regelgeleitetheit*, 4) *Nähe zum Gegenstand*, 5) *Kommunikative Validierung*, 6) *Triangulation*;

1) *Verfahrensdokumentation*

Die genaue Dokumentation der Verfahren muss genau geführt und die für einen Gegenstand entwickelten Methoden nachvollziehbar beschrieben werden. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit Wert darauf gelegt, bereits gesammeltes Wissen (einerseits durch Vorarbeiten der Bachelorarbeit und andererseits durch die Dissertation Heinickes) zusammenzutragen, die ausgewählten Verfahren zu erklären sowie die Durchführung und Auswertung der Daten genauestens zu protokollieren.

2) *Argumentative Interpretationsabsicherung*

Ein wesentlicher Teil qualitativer Forschung sind die Interpretationen von Datenlagen. Interpretationen müssen mithilfe von Argumenten begründet werden, wobei auf eine sinnvolle Deutung anhand von Theorie, eine schlüssige Argumentationslinie und auf das Suchen und Prüfen von „*Alternativdeutungen*“ geachtet wird. In diesem Zusammenhang nennt Mayring auch *Negativdeutungen*, deren Widerlegung Schlussfolgerungen unterstützen können, vgl. [17, S.145].

3) *Regelgeleitetheit*

Obwohl eine qualitative Herangehensweise die Modifizierung von Analyseschritten zulässt, muss ein systematisches Vorgehen der Bearbeitung des Materials zugrunde liegen. Notwendige Schritte zur Analyse werden im Vorhinein festgelegt und durchlaufen. Es empfiehlt sich, das auszuwertende Material in Einheiten zu unterteilen und diese systematisch, Einheit

für Einheit, zu analysieren. Die Zyklen der Entwicklung und Forschung wurden auch in dieser Arbeit vorab bestimmt und durchgeführt. Die Planung des Projekts sah beispielsweise jedoch vor, zuerst den Unterrichtsentwurf im Klassenverband zu testen, ehe Akzeptanzbefragungen realisiert wurden. Aus praktischen Gründen erschien es dann jedoch sinnvoll, den Ablauf umzukehren, wodurch grobe Hindernisse bei der Bewältigung der Arbeitsmaterialien bereits vor der Erprobung in einer gesamten Klasse ausgemerzt wurden. Die Auswertung des Datenmaterials konnte, durch die bereits gegebenen Unterteilungen in mehrere Einheiten und Gruppen, wie von dem Kriterium Regelgeleitetheit empfohlen, stattfinden.

4) *Nähe zum Gegenstand*

Die Nähe zum Gegenstand wird in qualitativer Forschung u. a. dadurch erreicht, dass man in die Alltagswelt der Proband*innen eindringt. Anstatt Subjekte ins Labor zu holen, findet die Erforschung mitten im Feld statt, wodurch die natürliche Umwelt erhalten bleibt. Weiters sollen Forschungsergebnisse Relevanz für die Betroffenen haben und damit konkret an Problemstellungen ansetzen. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden Akzeptanzbefragungen in der Schule mit sich freiwillig gemeldeten Schüler*innen durchgeführt. Auch die Unterrichtsbeobachtungen fanden im Klassenverband im Physiksaal der Schüler*innen statt. Ungeöhnlich war an dieser Stelle sicherlich, dass nicht der Physiklehrer der Klassen den Unterricht durchführte, sondern eine andere Physiklehrerin der Schule. Dennoch war auch der gewohnte Physiklehrer während beider Unterrichtstestungen anwesend. Die Schüler*innen konnten weiters mit ihren Freund*innen zusammenarbeiten und wurden nicht auf besondere Weise in Gruppen eingeteilt. Das Umfeld der Schüler*innen sollte somit weitestgehend dem Alltag entsprechen.

5) *Kommunikative Validierung*

Zur Überprüfung der Gültigkeit qualitativ erhobener Ergebnisse können am Ende des Analyseprozesses mit den Beforschten abgeglichen und diskutiert werden. Können sich die Befragten mit den Interpretationen identifizieren, leistet dieser Schritt einen wichtigen Beitrag zur Gültigkeit der Ergebnisse, darf aber nicht als ausschließliches Kriterium eingesetzt werden, um „*subjektive Bedeutungsstrukturen der Betroffenen*“ auszuschließen [17, S. 147]. Entscheidend ist, dass die Befragten im Rahmen einer kommunikativen Validierung mehr Kompetenz zugeschrieben wird, als dies sonst üblich ist. Durch den Dialog werden weitere Begründungen zur Relevanz der Ergebnisse gesammelt. Im Fall der Akzeptanzbefragungen tritt die Verfasserin in einen ernst gemeinten Dialog auf Augenhöhe mit den Schüler*innen,

um genau zu sehen, wie die Aufgabenstellungen und die Ideen zur Bewältigung der Aufgaben entwickelt und umgesetzt werden. Ein Nachfragen während des Prozesses gewährleistet eine akkurate Interpretation der Situation durch die Verfasserin. Die Ergebnisse und Zusammenfassungen der Unterrichtsbeobachtungen wurden einerseits mit dem Betreuer dieser Arbeit diskutiert und andererseits mit der Physiklehrerin, welche den Unterricht durchführte, abgeglichen. Die kommunikative Validierung der Ergebnisse spielte somit im Rahmen dieser Masterarbeit eine besondere Rolle, wodurch die Gültigkeit der Ergebnisse gewährleistet wird.

6) *Triangulation*

Durch den Einsatz „*mehrerer Analysegänge*“ wird die Qualität der Forschung nach Mayring erhöht [17, S. 147]. Es wird versucht, eine Fragestellung mithilfe von verschiedenen Lösungswegen zu bearbeiten und somit Ergebnisse unterschiedlicher Sichtweisen miteinbeziehen und zum Vergleich heranziehen zu können. Ziel der Triangulation ist es nicht, eine komplette Übereinstimmung der Ergebnisse zu erreichen, dennoch können Stärken und Schwächen einzelner Methoden aufgezeigt und daraus ein Gesamtbild zusammengestellt werden. Auch in dieser Arbeit finden sich eine Vielzahl an Methoden. Akzeptanzbefragungen, Unterrichtsbeobachtungen und der Dialog mit dem Betreuer und der Physiklehrerin sollen insgesamt zu einem erfolgreich evaluierten Unterrichtsentwurf zum Umgang mit Messunsicherheiten führen.

Für die Analyse und Durchführung der Beobachtungen wurden Daten mehrmals und kritisch betrachtet. Die erstellten Kategorien zur Auswertung der Daten wurden in mehreren Analyseschritten geprüft, in kleinere Subkategorien unterteilt, präzise ausdefiniert und durch mehrere Textpassagen bestätigt. Ausgeblieben ist das Zuordnen von Textpassagen anhand mehrerer und unterschiedlicher Kodierer, was auf die Alleinarbeit zum Abschluss dieser Masterarbeit zurückzuführen ist.

Abschließend ist es aus forschungsethischer Perspektive wichtig zu erwähnen, dass die Film- und Audioaufnahmen zum einen mit einer Kooperationsschule der Universität Wien und zum anderen die Testungen nur mit Schüler*innen durchgeführt wurden, deren Eltern eine Einverständniserklärung unterzeichneten. Alle gesammelten Daten wurden vertraulich und anonym gesichert behandelt.

3.1.7 Zusammenfassung Methodik

Für die Entwicklung und Evaluation des vorliegenden Unterrichtskonzeptes wird die Methode des Design-Based Research herangezogen. In drei Entwicklungs- und Forschungszyklen finden Ergänzungen, Erprobungen und Erweiterungen der Unterrichtsmaterialien statt, wie es auch in Abbildung 3 grafisch dargestellt wurde. Neben den fundierten Kenntnissen des Betreuers dieser Arbeit im Bereich der Experimentalphysik und dem Umgang mit Messunsicherheiten (Datenauswertung) wurden auch Erfahrungen einer langjährigen Lehrkraft und die Erkenntnisse der Verfasserin durch die vorangegangenen Arbeiten im Rahmen einer Bachelorarbeit zu diesem Thema bei der Erstellung und Überarbeitung der Unterrichtsmaterialien miteinbezogen. Für die Evaluation werden die verschiedensten Möglichkeiten der empirischen Sozialforschung eingesetzt. In einem ersten Zyklus werden Unterrichtsideen und erstellte Aufgaben an drei Bekannten der Verfasserin erprobt. Nachdem die anfänglichen Ideen ausprobiert wurden, können konkrete Stundenplanungen und Arbeitsmaterialien in einem zweiten Zyklus erarbeitet und mittels zweier Akzeptanzbefragungen in der Schule BRG 14 getestet werden. Im Zuge des zweiten Zyklus wird zusätzlich eine kleine Online-Umfrage unter Mathematiklehrkräften eingesetzt, um die verwendeten statistischen Erhebungsmethoden im Mathematikunterricht zu erfahren. Aus den Ergebnissen der Umfrage sollen die dem Unterrichtskonzept zugrundeliegenden mathematischen Methoden begründet werden. Im dritten und letzten Zyklus werden die Erkenntnisse aus den Akzeptanzbefragungen in die Unterrichtsmaterialien eingearbeitet und der Unterrichtsentwurf in einer 8. Schulstufe des BRG 14 mittels Unterrichtsbeobachtungen evaluiert. Video- und Audioaufnahmen bei den Testungen der Materialien an Schüler*innen sollen ausreichend Daten für die Beantwortung der Forschungsfrage (*„Bezwecken die gestellten Aufgaben eine tiefergehende Auseinandersetzung mit dem Thema Messunsicherheiten, sodass die intendierten Ziele daraus gewonnen werden können?“*) liefern.

Die ursprünglich geplanten und tatsächlich durchgeführten Vorhaben dieser Masterarbeit mussten aufgrund der unsicheren Situation während der andauernden COVID-19 Pandemie laufend angepasst werden. Auch auf einige Verfeinerungen in den Methoden, wie beispielsweise der Durchführung eines Pre-Tests bei den schriftlichen Fragebögen, wurde verzichtet. Ebenfalls blieb die erneute Testung der Unterrichtsmaterialien in einer weiteren Physikklasse aufgrund einerseits neuerlicher Lockdowns im Winter und andererseits des Abgabetermins für die Verfassung des Artikels für Plus Lucis zu dieser Arbeit leider aus. Schlussendlich konnte jedoch die in diesem Kapitel beschriebene Abfolge der Entwicklung und

Evaluation des Unterrichtskonzepts zum Umgang mit Messunsicherheiten erfolgreich durchgeführt werden. Für ein Unterrichtskonzept in der Sekundarstufe II wurden erste Ideen gesammelt, welche im Ausblick dieser Arbeit zu finden sind. Im anschließenden Kapitel soll nun das entwickelte und evaluierte Konzept für die Sekundarstufe I dargestellt und mitsamt den Unterrichtsmaterialien zur Verfügung gestellt werden.

3.2 Datenauswertung

Die Videos bzw. Tonaufnahmen, sowohl von den Akzeptanzbefragungen als auch von den beobachteten Unterrichtseinheiten, werden transkribiert. Nach einer ersten überblicksartigen Sichtung aller Daten werden relevante Ausschnitte aus den Transkripten den vorab deduktiv definierten Kategorien zugeordnet. Das Videomaterial wird außerdem unter Berücksichtigung der Forschungsfrage mehrmals betrachtet und interessierende Szenen notiert sowie ggf. beschrieben. Bei Bedarf werden während der Sichtung auch neue Kategorien eröffnet [13].

Für die Erstellung der Kategorien liegt die folgende Forschungsfragestellung zugrunde:

- Bezwecken die gestellten Aufgaben eine tiefere Auseinandersetzung mit dem Thema Messunsicherheiten, sodass die intendierten Ziele daraus gewonnen werden können?

Aus den bereits definierten Zielen in Kapitel 2.5 und den vorangegangenen didaktischen Überlegungen wurden die folgenden Kategorien deduktiv erschlossen. Aus Abbildung 4 auf der nächsten Seite können die erstellten Kategorien und Unterkategorien inkl. kurzer Beschreibungen für die Sortierung des Datenmaterials entnommen werden. Unterkategorien, die bei der Auswertung des Datenmaterials ergänzt wurden, sind durch ein * markiert. Auch für die Auswertung der schriftlichen Testbögen nach den beiden Unterrichtseinheiten werden die vorgestellten Kategorien herangezogen und ggf. Unterkategorien erweitert.

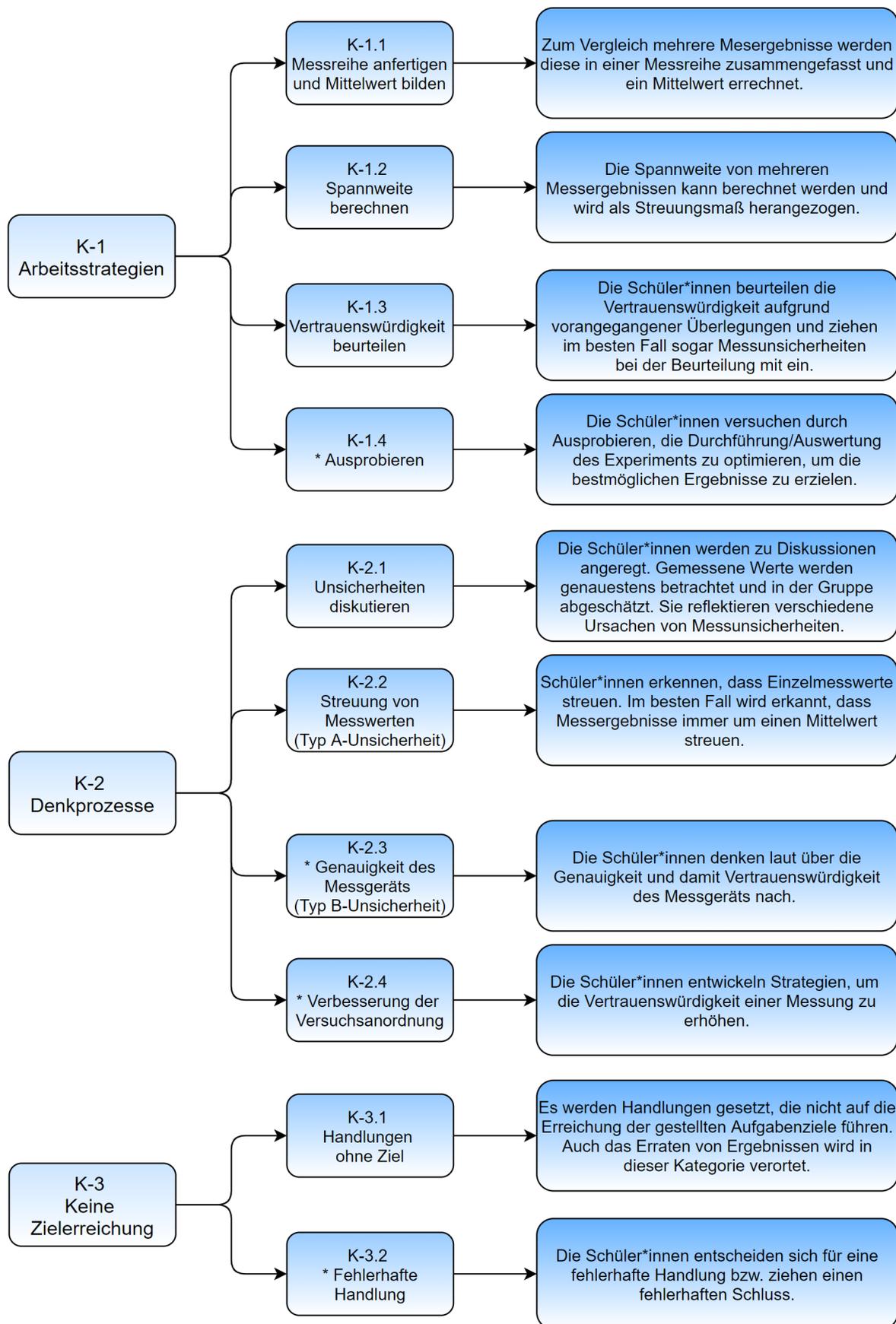


Abbildung 4: Kategorien zur Auswertung der gesammelten Daten. Mit * versehene Kategorien wurden während der Auswertung ergänzt.

3.2.1 Akzeptanzbefragungen

Von den ersten Ideen bis zum oben dargestellten, endgültig vorliegenden Unterrichtsentwurf wurden in mehreren Schritten die Arbeitsmaterialien überarbeitet und erweitert. Bevor der Unterrichtsentwurf in einer Klasse erprobt werden konnte, fand zuerst eine Testung des Vorentwurfs mithilfe von Akzeptanzbefragungen statt. Schwierigkeiten, fehlende Verbindungen und neue Ideen wurden durch diese Art der Befragung ausgebessert und ergänzt. Insgesamt konnten zwei Akzeptanzbefragungen durchgeführt werden, wobei beide Unterrichtseinheiten mit den Schülern erprobt wurden. Die Dauer der Akzeptanzbefragungen belief sich pro Durchgang auf etwas über einer Stunde.

3.2.1.1 Vergleich Unterrichtsentwurf und finale Unterrichtseinheiten

Der getestete Vorentwurf bestand insgesamt aus dem unten erklärten Experiment und drei Arbeitsblättern. Gliedert man die Befragung in zwei Teile, wobei jeder Teil einer Schulstunde entspricht, so wurde im ersten Teil der Befragung das Experiment durchgeführt und der zugehörige Arbeitszettel ausgefüllt/durchbesprochen. Der zweite Teil der Befragung, also die zweite Unterrichtseinheit, bestand aus dem Erkenntniszettel, wobei sich bereits fiktive Ergebnisse einer Klasse und ein mit den Ergebnissen beschrifteter Zahlenstrahl auf dem Blatt befanden. Zusätzlich wurde auch das Arbeitsblatt für Fortgeschrittene mit der Standardabweichung als Streuungsmaß mit einem der beiden Schüler ausprobiert (längeres Interview mit knapp 1:10 h).

Teil 1 (Erste Unterrichtseinheit)

Der erste Teil der erprobten Unterrichtseinheit unterschied sich vom tatsächlichen Unterrichtsentwurf nur in der Form des zugehörigen Arbeitsblattes. Es wurden weniger konkrete Aufgaben formuliert und am Ende des Arbeitsblattes offene Reflexionsaufgaben gestellt („*Das habe ich heute gelernt*“ und „*Diese Punkte sind mir noch unklar*“). Bereits auf dem getesteten Entwurf zu finden war eine Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit der Messung anhand einer Skala (siehe Abbildung 14 auf Seite 85) sowie das Eintragen und Vergleichen des eigenen Messergebnisses auf einem vorgefertigten Zahlenstrahl (nächstes Arbeitsblatt) und eine Frage nach der Ursache der verschiedenen Messergebnisse auf dem Zahlenstrahl (*Woran könnte es liegen, dass die Messwerte der verschiedenen Gruppen auf dem Zahlenstrahl unterschiedlich verteilt liegen? Oder anders gesagt: Welche Unsicherheiten könnten eure Messung beeinflusst haben?*). Auch die Zusatzaufgabe zum gemachten Fehler in dieser Messung (übriges Wasser im Behälter) und die Frage nach seiner Bedeutung waren bereits

in diesem Unterrichtsentwurf verfasst. Die Messunsicherheit des Messbechers und eine Verknüpfung mit der Vertrauenswürdigkeit mit Messunsicherheiten fehlten hier noch gänzlich.

Teil 2 (Zweite Unterrichtseinheit)

Das zweite getestete Arbeitsblatt unterschied sich maßgeblich vom endgültigen Entwurf aus dem Anhang. Der Mittelwert und die Spannweite wurden zwar zur Berechnung eines Endergebnisses verlangt, aber nicht weiter erklärt. Die Unsicherheit des Messgeräts wurde mit einem Satz erläutert und anschließend eine Antwort für die Unsicherheit des Messbechers verlangt. Anschließend galt es auszuwählen, welche Unsicherheit im Falle des Experiments größer war: die Spannweite der Einzelergebnisse oder die Unsicherheit des Messbechers? Die zweite Seite des Arbeitsblattes bestand ausschließlich aus offenen Fragen und einem Begriffslexikon zum Nachlesen am Ende des Zettels. In diesen offenen Fragen wurden die Bedeutung des Mittelwerts, Ursachen und Quellen von Unsicherheiten u. Ä. erfragt. Abschließend wurden auch auf diesem Blatt Reflexionsfragen zu den Learning-Outcomes (siehe oben) gestellt.

Das Arbeitsblatt zur Standardabweichung unterschied sich nur wenig vom resultierenden Entwurf, nur die Aufgaben zum Punkt „Überlege“ gestalteten sich ursprünglich offen und weniger konkret.

3.2.1.2 Ergebnisse der 1. Akzeptanzbefragung

Die Audioaufnahmen der Akzeptanzbefragungen wurden teilweise transkribiert und Notizen/Ideen während und nach der Transkription zu den jeweiligen Interviewpassagen notiert. Auch die Notizen, die während der Akzeptanzbefragungen von der Verfasserin auf einem Leitfaden notiert wurden, sind in die Auswertung der Akzeptanzbefragungen eingeflossen.

Teil 1

Die Durchführung des Experiments war für den Schüler gut nachvollziehbar. Um die Menge an Wasser im Messbecher exakter abschätzen zu können, kippte der Schüler Wasser zurück in den großen Behälter, wenn die 50 ml Linie überschritten war. Dieser Schritt ist im Sinne eines genauen Arbeitens geschickt gesetzt. Um jedoch größere Schwankungen der Einzelergebnisse zu erzielen, sollte die (mündliche und schriftliche) Angabe des Experiments insofern angepasst werden, dass einmal abgeschöpftes Wasser abgelesen und weggeleert werden muss (kein Zurückkippen erlaubt).

Bei der Testung wurde auf die Hinweiskärtchen zurückgegriffen. Das erste Mal, als das Wasser genau zwischen zwei Skalenteilen stand und später, als das übrige Wasser im Behälter, also der Fehler des Versuchs, abgeschätzt wurde. In beiden Fällen führte das Hinweiskärtchen den Schüler auf den richtigen Weg. So erklärte der Schüler beispielsweise, nachdem er das erste Hinweiskärtchen gelesen hatte: *„Ich soll was näher ist, also zu welchem Strich es näher ist, wenn es zwischen zwei Strichen steht und dann diesen Wert nehmen“* (M-5) und konnte den Fehler angeben, indem er den Messbecher, wie auf dem Hilfskärtchen abgebildet, neben den gekippten Behälter platzierte und die übrige Menge Wasser abschätzte.

Beim Berechnen des Mittelwertes und Einzeichnen des Ergebnisses am Zahlenstrahl hatte der Schüler keine Schwierigkeiten. Bei der nächsten Aufgabe wurde der Schüler aufgefordert darüber nachzudenken, woran es liegen könnte, dass sich die Messwerte auf dem Zahlenstrahl unterscheiden. Der Schüler gab den Aufgabentext wieder, formulierte jedoch die Messwerte zu Messungen um. Die Nachfrage: *„Hatten alle unterschiedliche Messungen?“* (M-12) der Interviewerin schien für den Schüler auszureichen, sodass er antwortete: *„Nein, aber es war ziemlich weit verbreitet. Also die Spannweite war ziemlich groß“* (M-12). Der Schüler ging selbstständig auf den Begriff der Spannweite ein, um die Schwankung der Messwerte zu erklären. Es ist jedoch leider nicht auszuschließen, dass der Schüler den Begriff bereits auf dem nächsten Zettel gesehen hätte.

Als der Schüler über mögliche Ursachen oder Quellen für die Unsicherheiten der Messwerte nachdachte, stimmten zwei genannte Möglichkeiten mit den vorab formulierten Key Ideas in der Unterrichtsplanung überein. Zum einen erklärte der Schüler: *„Das könnte daran liegen, dass wir nicht ganz genau auf 50 oder auf 40 [...] ml genau gemessen haben, sondern immer einen kleinen Abstand gelassen haben oder ein bisschen zu viel“* (M-13). Zum anderen erwähnte er, dass er ja auch ziemlich viel verschüttet habe und dass dieser Umstand auch die Messung beeinflusst haben könnte. Als weitere Ursache gab der Schüler an, dass am Anfang *„vielleicht nicht genau gleich viel Wasser drin war“* (M-13). Das zeigt, dass das Experiment zumindest die Reflexion über die Existenz von Messunsicherheiten anregt. Nicht erreicht wurde, dass der Schüler auch tatsächlich über *Messunsicherheiten* sprach. Der Begriff wurde noch durch die vage Formulierung einer *ungenauen Messung* überschattet.

Die Interviewerin fragte im nächsten Schritt nach, wie der Schüler den Begriff *Vertrauenswürdigkeit*, der bereits auf der Vorderseite eingeführt wurde, nun mit dem neuen Wissen

interpretieren würde. Interessanterweise kam der Schüler hier selbstständig auf die Idee des Vergleichens von Messwerten. Er sagte dazu: „*das kann man auch sehr gut vergleichen mit anderen Werten, also wie wir [es, Anm. d. Verf.] hier gemacht haben zum Beispiel, wenn man ungefähr [...] nahe zum Mittelwert is, dann is es eigentlich ziemlich vertrauenswürdig, denke ich*“ (M-14). Weiters stellte der Schüler für sich eine Verbindung zwischen den beiden Begriffen Vertrauenswürdigkeit und Vernünftigkeit einer Messung her, was besonders im nächsten Schritt interessant ist, als die Interviewerin versuchte, noch einmal einen Zusammenhang mit dem *Unsicherheitsbegriff* herzustellen. Der Schüler probierte sein Verständnis des Begriffes Unsicherheit so zu erklären: „*Also eine Unsicherheit ist das [...], was man nicht weiß, was alles ungenau war und deswegen kann man das auch nicht ganz sagen und ich bin mir sicher, dass meine Messung nicht **genau** war, aber ich, aber ich bin mir ziemlich sicher, dass sie --- **vernünftig** war*“ (M-15). Diese Aussage lässt die Vermutung zu, dass der Schüler bereits den Gedanken gefasst hatte, dass eine Messung immer eine gewisse Unsicherheit mit sich bringt und diese auch vom Experimentator abhängt. Die Unsicherheit lässt eine Aussage über die Vernünftigkeit einer durchgeführten Messung zu.

Zuletzt wurde der Fehler der Messung besprochen. Der Schüler erkannte schnell, dass durch den gemachten Fehler die gemessenen Werte zu hoch oder zu niedrig sein könnten. Durch Hinweise wurde schließlich zusammengefasst, dass alle, die den Versuch durchgeführt haben, einen zu niedrigen Wert am Ende angegeben haben müssten. Die Korrektur des Fehlers anhand des Zahlenstrahls wurde nicht vorgenommen.

Teil 2

Die Spannweite und der Mittelwert sind für den Schüler aus dem Mathematik-Unterricht bekannt und bedürfen keiner weiteren Klärung. Der Begriff des wahren Wertes war für den Schüler neu, er hatte jedoch nach eigenen Angaben eine vage Vorstellung davon, was er bedeuten könnte. Die Definition am Arbeitsblatt zum wahren Wert machte ihn dann jedoch stutzig, denn er argumentierte, dass der Mittelwert bei extremen Werten verzerrt werden würde und dieser dann auch bei vielen Messungen nicht dem wahren Wert näherkommen könne. Der Schüler bezog Ausreißer in seine Überlegungen mit ein. Weiters erklärte der Schüler, dass „*ja auch alle Messungen falsch sein [könnten, Anm. d. Verf.] und dann ist [...] der Mittelwert auch sowieso falsch*“ (M-21). Der Schüler wurde offensichtlich zu weiteren Überlegungen durch die Aufgabenstellungen angeregt und fing an, sich in das Konzept der Fehler und Messunsicherheiten einzudenken.

Im zweiten Teil konnte auch gezeigt werden, dass die Unsicherheit des Messgeräts für den Schüler nachvollziehbar war. Er erläuterte, dass die Unsicherheit plus minus 5 ml sein müsste, weil er ja schätzt, „*wo es näher dran ist und das Höchste wäre 5 ml, die [er sich, Anm. d. Verf.] verschätzen könnte*“ (M-22), andernfalls würde er ja den nächsthöheren oder eben niedrigeren Wert auf der Skala angeben.

Die Spannweite als Streuungsmaß für die Unsicherheit der Messreihe schien den Schüler nicht gänzlich zu befriedigen. Er überlegte, dass die Spannweite deutlich von den extremen Werten unterhalb und oberhalb des Mittelwertes beeinflusst wurden und die sonstigen Messwerte doch ziemlich nahe beieinander lagen. Die Überlegungen des Schülers gingen deutlich in die Tiefe. In einer optimalen Unterrichtsstunde würde sich daher anbieten, dem Schüler das Arbeitsblatt für Fortgeschrittene, mit der Standardabweichung als Streuungsmaß, auszuhandigen.

Die Zusammenfassung der Erkenntnisse zeigte auf, dass der Schüler zwar von der Angabe eines Mittelwerts überzeugt war, die Messunsicherheiten müsste man aber seiner Ansicht nach nur *manchmal* angeben, was er folgendermaßen begründete: „*Weil bei manchen Versuchen die Unsicherheiten nicht so wichtig sind, z. B. in der Physik, wenn man Versuche macht. Entweder funktioniert oder funktioniert nicht. Die Unsicherheiten sind nicht so wichtig wie hier z. B.*“ (M-32). Anscheinend wurde das Konzept der Messunsicherheiten noch nicht gänzlich verstanden, was in Anbetracht der kurzen Zeit und dem einmaligen Anwenden des Gelernten auch nachvollziehbar erscheint.

Der Arbeitszettel zur Berechnung der Standardabweichung warf keine Probleme auf, einzig die Überlegungsfrage zum Schluss „*Was könnte die Standardabweichung für dein Ergebnis bedeuten?*“ war für den Schüler unbrauchbar und führte nicht zu einem gewünschten Erkenntnisgewinn.

Abschließende Worte des Schülers zeigten auf, dass die ausführliche Diskussion des Ergebnisses eine erstmalige Erfahrung war. Überraschend war für ihn weiters, wie viele Informationen in einem Ergebnis stecken können. Er erkannte, dass das Experiment nicht die Hauptsache war, sondern dass es primär um die Auswertung ging: „*sie haben gezeigt, dass man sehr viel um (...) das eigentliche Ergebnis (...) machen kann*“ und dass wir „*hier jetzt sehr viele Zettel gehabt [haben, Anm. d. Verf.] für einen relativ einfachen Versuch*“ (M-39).

3.2.1.3 Ergebnisse der 2. Akzeptanzbefragung

Teil 1

Im Gegensatz zur vorherigen Akzeptanzbefragung wurde diesmal das Experiment kurz erklärt und erst anschließend der Angabentext vom Schüler gelesen. Bereits beim ersten Schöpfer stockte der Schüler, da das Wasser im Messbecher zwischen zwei Strichen stand. Er gab einen geschätzten Wert von 48 ml an, weshalb ihm das erste Hinweiskärtchen zum Nachlesen gereicht wurde. Anschließend war dem Schüler klar, wie er vorzugehen hatte. Als jedoch noch einmal das Wasser genau in der Mitte zwischen zwei Skalenteilen stand, zeigte er erneut Verunsicherung. Mit einem kurzen Blick auf das Hinweiskärtchen entschied er sich für den niedrigeren Wert auf der Skala und notierte diesen.

Das Abschätzen des Fehlers gelang dem Schüler ohne Hilfestellung, jedoch war er nicht sicher, ob er den abgeschätzten Wert zum Volumen des Wassers dazurechnen sollte, oder nicht: „*Aber zieh ich das mit ein in der Addierung [sic!]*?“ (E-4).

Der Schüler kreuzte seine Messung als eher vertrauenswürdig auf der Skala an, wozu er auch eine Begründung liefern konnte. Er stellte fest, dass sich die Male, in denen er aufrundete und die Male, in denen er abrundete, insgesamt ausgleichen müssten. Zur Beschreibung dieser Tatsache verwendete er die Formulierung *falsch abmessen* (E-6). Die Formulierung impliziert, dass er einen *Fehler* gemacht hätte, in der Theorie würde man diesen Umstand richtigerweise der Typ B-Unsicherheit zuweisen.

Das Einzeichnen am Zahlenstrahl war für den Schüler einfach zu bewerkstelligen, seine Interpretation der eingezeichneten Werte am Zahlenstrahl ging sogleich in die wünschenswerte Richtung, er formulierte, dass „*daher, dass die meisten 500 ml bekommen haben, dass es eher wahrscheinlich ist, dass das die richtige Antwort ist [...]*“ (E-7). Der Schüler kam mit dieser Aussage schon sehr nahe an den wahren Wert heran.

Als Quellen für Unsicherheiten fielen dem Schüler sofort die beiden Gründe Wasserver-schütten und Unsicherheit bzgl. des Messbechers ein. Manche Gruppen hätten demnach ein zu hohes Ergebnis, weil sie zu großzügig aufgerundet hätten und andere Gruppen hätten niedrigere Ergebnisse, da sie beispielsweise Wasser verschütteten.

Im nächsten Schritt sollte herausgefunden werden, was der Schüler unter dem Begriff der Unsicherheit verstand. Es stellte sich heraus, dass die Überlegungen des Schülers noch von der fachlich korrekten Bedeutung abweichen. Unter Unsicherheit verstand er ein subjektives

Gefühl der Experimentatoren gegenüber dem durchgeführten Experiment: „[...] ,dass die jetzt vielleicht unsicher sind, ob ihre Antwort doch richtig ist oder doch falsch ist [...]“ [sic!] (E-9). Der Begriff der Vertrauenswürdigkeit wurde zwar in erster Linie auch mit Personen in Verbindung gebracht, bezog sich jedoch schon mehr auf das Ergebnis eines Experiments.

Die Zusatzaufgabe (Was bedeutet der Fehler für die Ergebnisse am Zahlenstrahl?) wurde von dem Schüler sehr ausführlich erklärt. Er erkannte, dass sich die Werte am Zahlenstrahl bei Berücksichtigung des Fehlers nach oben verschieben würden und fasste seine Ausführung mit „also es verschiebt sich alles...“ (E-11) zusammen.

Für die Reflexionsfrage am Ende des Arbeitsblattes zog der Schüler den Schluss, dass es bei Messungen „immer Verschiedenheiten gibt von den Antworten her“ (E-13) und diese beispielsweise auf Fehler oder andere Rechenwege zurückzuführen sind. Den Mittelwert bezeichnete der Schüler als die *Norm*, welche in diesem Fall 500 ml betragen würde. Eine nähere Ausführung des Begriffes lautete: „Mit Norm meine ich, dass das die meisten Leute haben [...]“ (E-14). Der Schüler nutzte scheinbar eigene Begrifflichkeiten, um die neuen Informationen mit seinem Vorwissen zu verknüpfen. Er erkannte anhand des Zahlenstrahls und der Glockenkurve (Abbildung 5), dass die *Norm* die wahrscheinlich „richtigste“ Antwort sein müsste.

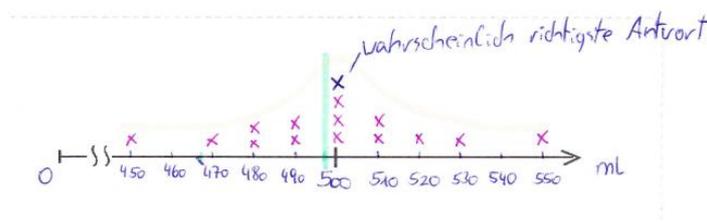


Abbildung 5: Scan des ausgefüllten Arbeitsblattes mit der Notiz des Schülers zur wahrscheinlich „richtigsten“ Antwort.

Teil 2

Das Berechnen des Mittelwerts und der Spannweite verlief ohne Schwierigkeiten. Als der Schüler seinen Messwert mit dem Mittelwert am Zahlenstrahl verglich, schätzte er seine Messung vertrauenswürdiger als zu Beginn der Befragung ein. Der Vergleich von Messwerten anhand des Zahlenstrahls scheint somit ein guter Weg zur Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit von Messergebnissen zu sein.

Eine Verknüpfung der Spannweite mit der Unsicherheit der Messung konnte in den ersten Anläufen nicht hergestellt werden: „Aber wie kann man das dann als Unsicherheit verwenden“ (E-17). Durch Hinweise versuchte die Interviewerin, den Schüler auf die richtige Spur

zu führen. Schlussendlich formulierte der Schüler die Bedeutung einer kleineren Spannweite für die Messunsicherheit folgendermaßen: „[...] weil weniger Platz ist, wo die richtige Antwort sein könnte [...] es ist wahrscheinlicher, dass man als Gruppe näher ist an der richtigen Antwort, deshalb fühlt man sich sicherer, dass es richtig ist [...].“ Der Schüler verbindet die Messunsicherheit mit einem subjektiven Gefühl der Gruppe, dennoch wurde die kleinere Spannweite auch mit einer kleineren Unsicherheit in Verbindung gebracht.

Ein spontanes Beispiel wird von der Interviewerin erfunden. Drei Klassen führten das gleiche Experiment wie der Schüler durch und hätten alle unterschiedliche Spannweiten und Mittelwerte erhalten. Fiktive Werte wurden auf einem Blatt Papier aufgeschrieben. Es wurde betont, dass die Spannweite ein Maß für die Unsicherheit der Messungen ist. Der Schüler sollte sich entscheiden, welcher Messung er am meisten vertrauen würde. Mit dem konkreten Beispiel konnte der Schüler scheinbar eine Verbindung herstellen und begründete richtigerweise: „Die [Messung] der 4B, weil sie am wenigsten Unsicherheit hat“ (E-23).

Abschließende Gespräche zu den Erkenntnissen des Unterrichtsentwurfs zeigten auf, dass der Schüler verschiedene Quellen für Unsicherheiten nennen konnte, die Unsicherheit einer Messung jedoch verstärkt auf die durchführenden Personen eines Experiments bezogen wurde. Die Angabe eines Mittelwerts zum Vergleich für Ergebnisse war für den Schüler verständlich und wurde selbstständig wiederholt. Erst durch Hinweise nannte der Schüler auch die Spannweite als sinnvolle Angabe für den Vergleich von Messwerten.

3.2.1.4 Schriftliche Tests nach den Akzeptanzbefragungen

Etwa zwei Wochen nach den Akzeptanzbefragungen beantworteten die beiden Schüler selbstständig den schriftlichen Test (siehe Anhang C). Aufgabe war es, die Vertrauenswürdigkeit eines beschriebenen Messvorgangs zu beurteilen. Von Seite 1 bis Seite 3, im weiteren Verlauf als Item 1 – 3 bezeichnet, auf dem Testbogen verbessert ein Schüler (Martin) bzw. eine Schülerin (Lisa) die Durchführung der Messung. Das zugrundeliegende Experiment (Zeit stoppen, die vergeht, wenn ein Tennisball aus 2 m Höhe fallen gelassen wird) bleibt das gleiche. Bei der Beantwortung der Fragen durften die Seiten nicht zurückgeblättert werden.

Zunächst lässt Martin aus zwei Metern Höhe einen Ball fallen und stoppt die Zeit mit dem Sekundenzeiger seiner Armbanduhr. Die gestoppte Zeit von Martin wird mit 2 s angegeben.

Die beiden Schüler der Akzeptanzbefragung sollten die Vertrauenswürdigkeit dieser Messung angeben, wobei der erste Schüler die Messung weniger vertrauenswürdig als der zweite Schüler der Akzeptanzbefragung einschätzte, siehe Abbildung 6.

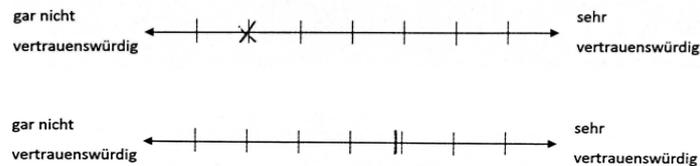


Abbildung 6: Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit anhand der bereits bekannten Skala aus der Akzeptanzbefragung.

Beide Schüler nannten ein *genaueres Messgerät* (= Stoppuhr) als Verbesserungsvorschlag für die durchgeführte Messung sowie eine zweite Person zur Unterstützung bei der Zeitnahme. Der erste Schüler nannte außerdem einen Maßstab zur *genaueren* Höhenbestimmung. Die beiden letzteren Punkte können zur Kategorie *K-2.4 Verbesserung der Versuchsanordnung* zusammengefasst werden. Das genauere Messgerät entspricht der Kategorie *K-2.3 Genauigkeit des Messgeräts*.

Bei Item 2 verwendet Martin seine Stoppuhr am Handy und vergleicht sein Ergebnis mit dem Ergebnis seiner Sitznachbarin Lisa, welche das Experiment unter den gleichen Bedingungen durchführte. Die jeweils gestoppte Zeit von Lisa und Martin wurde angegeben. Die Schüler mussten nun ankreuzen, welche der beiden Schüler*innen das vertrauenswürdiger Ergebnis hatten und ihre Auswahl im nächsten Schritt begründen. Beide wählten die Antwortmöglichkeit „*Das kann ich so nicht beantworten*“ und begründeten sie damit, dass sie das Experiment selbst nicht durchgeführt hätten. Der zweite Schüler erklärte weiters, dass er die Ergebnisse anderer Schüler nicht kenne. Diese Überlegung führt bereits hin zu der Notwendigkeit einer Messreihe oder mehreren Daten, um einen aussagekräftigen Vergleich anstellen zu können. Auch auf dieser Seite wurden Verbesserungsvorschläge für die Durchführung erfragt. Der erste Schüler wiederholte den Einsatz eines Maßstabs und eine zweite Person zur *Verbesserung der Versuchsdurchführung* (K-2.4). Der zweite Schüler gab an dieser Stelle keine Antwort.

Auf der letzten Seite des Testbogens bei Item 3 fertigten Martin und Lisa eine Messreihe bestehend aus 10 Messungen an, berechneten den Mittelwert der gestoppten Zeiten und gaben die Spannweite ihrer Messreihen an. Wiederum sollte angekreuzt werden, welche der beiden Messungen vertrauenswürdiger ist. Der erste Schüler entschied sich für Lisas Messung und begründete seine Auswahl mit „*Lisa hat eine geringere Spannweite, das heißt, sie*

*hat genauer und constanter gemessen [sic!].“ Der zweite Schüler fand, dass keine der beiden Messungen vertrauenswürdiger sei und erklärte seine Auswahl folgendermaßen: „Weil ich das Experiment nicht ausgeführt habe und die Spannweite anderer nicht kenne. Außerdem sind der Mittelwert und die Spannweite der beiden sehr verschieden.“ Beide Schüler bezogen die Spannweite zur Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit mit ein (K-1.3). Der erste Schüler erinnerte sich an die Verbindung „Je kleiner die Spannweite, desto vertrauenswürdiger das Ergebnis“. Dem zweiten Schüler reichte die kleinere Spannweite von Lisa nicht, um ihre Messung als vertrauenswürdiger zu beurteilen. Um die Vertrauenswürdigkeit zu beurteilen, greift er lieber auf eigene Erfahrungen (z. B. zur Einschätzung der Vernünftigkeit des Messergebnisses – *Wie viel Zeit vergeht tatsächlich, wenn ein Ball aus 2 m Höhe fallen gelassen wird?*) zurück.*

Einerseits zeigt die Auswertung der Tests, dass durch die Unterrichtsmaterialien bzw. durch die Aufgaben am Testbogen selbst eine Reflexion der Messunsicherheiten angestoßen wurde, Möglichkeiten für die Verringerung dieser gesucht und damit Quellen für Messunsicherheiten identifiziert sowie mehrmaliges Messen für den Vergleich von Ergebnissen als notwendig betrachtet wurden. Andererseits deckte die Antwort des zweiten Schülers auf der letzten Seite auf, dass u. a. die Angabe von Messunsicherheiten die Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit erlaubt. An dieser Stelle wären weitere Überlegungen des Schülers interessant gewesen.

3.2.1.5 Schlussfolgerungen für die Überarbeitung der Unterrichtsmaterialien

Aus den Akzeptanzbefragungen ging hervor, dass sich das ausgedachte Experiment sehr gut als Einführung und zur Datenerhebung für alle weiteren Überlegungen bzgl. Messunsicherheit und Auswertung der Daten eignet. Eine stärkere Verbindung zwischen Vertrauenswürdigkeit und Messunsicherheit einerseits und eine direkte Verbindung zwischen Spannweite als Messunsicherheit und damit als Maß für die Vertrauenswürdigkeit andererseits ist noch ausständig und muss in den Unterrichtsmaterialien deutlicher hervorgehoben werden. Weiters wurde zwar die Messunsicherheit des Messgeräts und die Messunsicherheit der Messreihe (Spannweite) herangezogen, eine explizite Darstellung, warum man beide betrachtet, sollte beispielsweise im Plenum genauer besprochen werden. Am Arbeitsblatt selbst wäre es sinnvoll, noch zusätzliche Aufgaben zum Vergleichen und Bewerten der beiden Unsicherheiten (Typ A und Typ B) zu geben. Obwohl die Schüler selbstständig auf die Idee kamen, dass der Mittelwert am Zahlenstrahl einen Vergleich mit dem eigenen Ergebnis zulässt, wäre es vorteilhaft mit den überarbeiteten Unterrichtsmaterialien stärker in den Vordergrund zu

rücken, warum Messunsicherheiten unbedingt angegeben werden sollten. Die Hinweiskärtchen waren zielführend und können deshalb weiter eingesetzt werden. Die überwiegend offenen gestellten Aufgaben müssen überarbeitet werden, konkretere (Anwendungs-)Beispiele sollen stattdessen auf den Arbeitsblättern Platz finden (wie das spontane Beispiel in der zweiten Akzeptanzbefragung). Wie auch Heinicke in ihren Befragungen (siehe Kapitel 2.2) herausfand, bezogen die Schüler die Unsicherheit tendenziell auf Personen und nicht so sehr auf das Wesen einer Messung selbst. Diese *Schülervorstellung* sollte Lehrkräften beim Planen und Unterrichten von Einheiten zum Thema Messunsicherheiten bewusst sein. Weiters soll durch die Verwendung des Begriffs **Messunsicherheit** in den Arbeitsmaterialien, der Bezug zur Verlässlichkeit einer Person abgeschwächt werden. Aus der Auswertung der schriftlichen Tests geht weiters hervor, dass sich der bisherige Unterrichtsentswurf für die Einführung und sogar für vertiefende Überlegungen hinsichtlich einer sorgfältigen Auswertung der Daten eignet. Aufgedeckte Stolpersteine, fehlende Überleitungen, vertiefende Aufgaben und das Ersetzen offener Fragestellungen durch konkrete Lernaufgaben, sollen den bisherigen Unterrichtsentswurf verfeinern, ehe er im Klassenverband getestet wird.

3.2.2 Unterrichtsbeobachtungen

Bei der Durchsicht der Transkripte wurden weiters die abgesammelten Arbeitsblätter der Schüler*innen und die Beobachtungsnotizen des Lehrers der Klasse für die Auswertung und Kategorisierung hinzugenommen. Für auffällige Stellen und Beobachtungen wurden neue Unterkategorien eröffnet. Die Auswertung des Audio- und Videomaterials wurde detailliert in den folgenden Unterpunkten dieses Kapitels festgehalten, nachdem der aus den Akzeptanzbefragungen überarbeitete Unterrichtsentswurf vorgestellt wurde. Im letzten Unterpunkt kann ein Fazit der gesamten Unterrichtsbeobachtung inkl. der eingearbeiteten Beobachtungspunkte des Lehrers nachgelesen werden.

3.2.2.1 Überarbeiteter Unterrichtsentswurf

Mithilfe der Ergebnisse aus den Akzeptanzbefragungen und dem anschließenden schriftlichen Test wurden die Arbeitsblätter überarbeitet, die geplanten Unterrichtsabläufe blieben die gleichen. Auch das Experiment wurde beibehalten, allerdings wurden die zwei Bedingungen, dass abgeschöpftes Wasser nicht zurück geschüttet und der Behälter nicht über die Tischkante gekippt werden darf, hinzugefügt. Unterhalb der Wertetabelle wurde zusätzlich die Menge an übrigem Wasser erfragt. Zwei Aufgaben zum Messbecher, wie sie auch im fertigen Arbeitsblatt zu finden sind, wurden ergänzt. Die Reflexionsfragen wurden gestri-

chen und ein „Je-Desto Satz“ hinzugefügt, um eine Verbindung zwischen der Messunsicherheit und der Vertrauenswürdigkeit herzustellen. Die Frage nach der Ursache für die Verteilung der Messwerte am Zahlenstrahl wurde umformuliert und explizit nach beitragenden Messunsicherheiten gefragt. Die Zusatzaufgabe wurde beibehalten, jedoch sollte zusätzlich der geschätzte Fehler notiert werden.

Das zweite Arbeitsblatt wurde durch mehrere vielfältige Aufgaben ergänzt und die offenen Fragen allesamt gestrichen. Auf der Vorderseite wurde die Information zum Mittelwert in den Aufgabentext integriert, ehe er von den Schüler*innen berechnet werden sollte. Eine nächste Aufgabe fordert die Lernenden zum Vergleich ihres Messwertes mit dem Mittelwert der Klasse auf. Anschließend wird noch einmal die Unsicherheit des Messbechers wiederholt und danach mittels Lernaufgaben die Spannweite als Streuungsmaß eingeführt. Ein abschließendes Anwendungsbeispiel sollte den Schüler*innen Möglichkeit des Vergleichs von Messergebnissen durch die Angabe von Messunsicherheiten aufzeigen. Das zweite Arbeitsblatt stimmt mit dem finalen Arbeitsblatt der zweiten Einheit im nächsten Kapitel bereits überein. Auf den Arbeitsblättern wurden des weiteren Merkkästchen hinzugefügt, welche zwischendurch ergänzende Informationen liefern sollen. Um das Gelernte noch einmal zu wiederholen, wurde außerdem ein Lückentext mit den Erkenntnissen zum Thema Messunsicherheiten nach den beiden Einheiten erstellt.

Am Arbeitsblatt für Fortgeschrittene zur Berechnung der Standardabweichung als Streuungsmaß wurden die offenen Fragen durch MC-Fragen ersetzt. Es entspricht bereits dem finalen Arbeitsblatt im nächsten Kapitel.

3.2.2.2 Ergebnisse 1. Unterrichtseinheit

Die Beobachtungen der ersten Unterrichtseinheiten zeigten, dass sich das Experiment für den Einstieg in das Thema Messunsicherheiten eignet. Die Schüler*innen diskutierten die Methoden und Genauigkeit der Arbeitsweise beim Abschöpfen des Wassers mit dem kleinen Messbecher. Transkribierte Abschnitte der Schülergespräche lassen sich daher in die Kategorie *Denkprozesse* bzw. in die Unterkategorie *K-2.1 Unsicherheiten diskutieren* einordnen. Dies lässt sich unter anderem an folgendem Beispiel feststellen:

S1: Sind das 40? Sind das genau 40?

S2: Der erste ist 40.

S3: Stells mal auf den Tisch.

S1: Na, das sind nicht genau 40.

S2: Doch das sind genau 40.

Auch spätere Unterhaltungen derselben Gruppe deuten auf Denkprozesse hin, die die Diskussion um den aufzuschreibenden, gemessenen Wert erlauben. Aushandlungen um den zu notierenden Wert sind im Transkript dieser Gruppe mehrmals zu finden, beispielhaft wurde der folgende Abschnitt ausgewählt:

S2: 41 sind das jetzt.

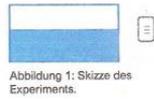
S3: Ne sagen wir 40,5.

S2: Nein es sind 41.

S1: Ja, ok.

Die Schüler*innen rätseln in diesem Abschnitt um den *richtigen* Messwert, der am Ende auf den Zettel aufgeschrieben werden soll. Scheinbar steht das Wasser zwischen den Skalenteilen 40 ml und 50 ml. Leider holen sich die Schüler*innen in diesem Fall nicht das entsprechende Hinweiskärtchen¹⁰ und geben einen falschen Wert an, daher muss der dargestellte Abschnitt der dritten Kategorie *K-3 Keine Zielerreichung* zugeordnet werden. Es wird eine neue Unterkategorie *K-3.2 Fehlerhafte Handlung* geöffnet. Aufgeschriebene Messwerte, die genauer sind als es das Messgerät erlaubt, sollten von der Lehrkraft unbedingt bemerkt und im Plenum besprochen werden. Für die Durchführung des Unterrichtskonzeptes ist es daher ratsam, beim Durchgehen und Beobachten der Gruppen, auch einen Blick auf die Arbeitsblätter und Wertetabellen zu werfen. Beim Durchsehen der abgesammelten Arbeitsblätter konnten mehrmals Messwerte in den Tabellen gefunden werden, die genauer angegeben waren, als es der Messbecher mit einer Milliliter-Skala in 10er Schritten ermöglicht, siehe auch Abbildung 7. Spätestens beim Vergleich der errechneten Mengen an Wasser im ursprünglichen Behälter sollte der Lehrperson auffallen, dass beim Ablesen der Messwerte Fehler gemacht wurden.

¹⁰ Dass Hinweiskärtchen am Lehrtisch zu holen sind, wurde in der Erklärung der Professorin am Anfang der Unterrichtsstunde nicht erwähnt. Allerdings war der Hinweis zu den Kärtchen auch auf dem ausgeteilten Arbeitsblatt zu finden.



Messreihe:

1	40	ml	13	20	ml
2	41	ml	14	19	ml
3	40	ml	15	30	ml
4	30	ml	16	19	ml
5	30	ml	17	10	ml
6	32	ml	18	10	ml
7	30	ml	19	8	ml
8	30	ml	20		ml
9	30	ml	21		ml
10	31	ml	22		ml
11	30	ml	23		ml
12	32	ml	24		ml

Es befanden sich 504 ml Wasser im Behälter.

Abbildung 7: Die Messreihe eines Schülers mit genaueren Messwerten, als es der Messbecher zulässt. Auch im Endergebnis erkennt man, dass der Schüler nicht in 10er Schritten abgelesen hatte.

Das simple Experiment lässt es dennoch zu, dass die Schüler*innen ihre Handlungen reflektieren müssen. Durch die Gruppenarbeit entfacht bei der Durchführung des Experiments eine Diskussion, was zur Erreichung des ersten Ziels der Unterrichtseinheit beiträgt. Die Lernenden denken über die Genauigkeit (Unsicherheit) eines Experiments nach und stoßen damit unbewusst auf die Notwendigkeit eines genauen wissenschaftlichen Arbeitens und damit verbundener Unsicherheiten einer Messung.

Weiters konnte beobachtet werden, dass die Schüler*innen versuchten, Wege zu finden, die den optimalsten Lösungsweg bzw. die optimalste Handlungsstrategie darstellte. Diese Beobachtung veranlasste es, eine neue Unterkategorie *K-1.4 Ausprobieren* zu eröffnen. Die Lernenden einer Gruppe versuchten, je Schöpfer zunächst genau 50 ml, dann 40 ml Wasser zu erhalten, um so die genauesten Messergebnisse vorweisen zu können. Sie kippten daher Wasser zurück, wenn die 40 ml- Linie überschritten war. Die Aufgabenstellung „verbietet“ diese Herangehensweise zwar explizit, dennoch zeigt die Beobachtung, dass die Schüler*innen versuchten, das Experiment sehr gewissenhaft in ihrer Arbeitsweise durchzuführen.

In einer Gruppe bestand Uneinigkeit über die tatsächliche Aufgabenstellung. Ein Schüler vermutete, dass die Aufgabe im Zählen der Anzahl befüllter Becher bestand. Auch dieser Weg würde zu einer Abschätzung der Menge an Wasser führen und könnte zu spannenden Diskussionen im Plenum beitragen. Da jedoch die Mehrheit der Gruppe gegen diese Methode abstimmte und es nicht zur Zielerreichung gelangte, wird der Abschnitt des Transkripts in die dritte Kategorie *K-3 Keine Zielerreichung* eingeordnet.

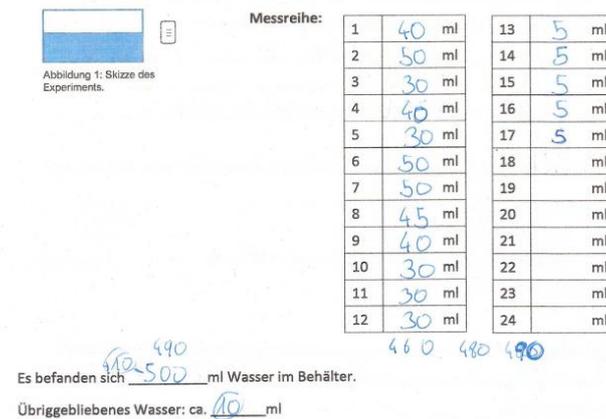


Abbildung 8: Der Scan des Arbeitsblattes zeigt die auf die Zehnerstelle richtig angegebenen Messwerte, aber auch den dazugerechneten Fehler zum Endergebnis des Volumens.

Bei der Durchsicht der Arbeitszettel konnte eine weitere *K-3.2 Fehlerhafte Handlung* aufgedeckt werden. Die zugehörige Gruppe wurde leider nicht mittels Audioaufzeichnung aufgenommen. Der eingescannte Abschnitt des Arbeitsblattes soll jedoch die folgenden Erkenntnisse unterstützen. Zwar gaben die Schüler*innen der Gruppe die Messwerte in 10er Schritten an und beschrieben auch auf der Rückseite als Ursache für die verstreuten Messwerte am Zahlenstrahl: „Messbecher ist nur in 10 ml abgebildet“ (Zuordnung zu *K-2.1 Unsicherheiten diskutieren*). Die Gruppe gehörte also zu den wenigen, welche die Messwerte begründet richtig vom Messbecher ablesen und auch in die Tabelle schrieben, siehe Abbildung 8, rechneten aber leider den geschätzten Fehler (Menge an übrig gebliebenem Wasser) zum gemessenen Volumen des ursprünglichen Behälters hinzu. Dieser Aspekt wurde leider nicht im Plenum besprochen. Jedoch ist die Erkenntnis davon interessant für Lehrkräfte, die dieses Unterrichtskonzept in ihrer Klasse ausprobieren möchten.

Im Zusammenhang mit der Fehlerabschätzung ist außerdem der folgende Dialog erwähnenswert, in welchem die Schüler*innen über die Menge des übrigen Wassers rätseln. Der Absatz kann der Kategorie *K-1.4 Ausprobieren* zugeordnet werden und zeigt, dass noch Übungsbedarf in der Abschätzung von Größenverhältnissen (zumindest in dieser Gruppe) angebracht ist. Aus diesem Grund erscheint es auch sinnvoll, dass die Fehlerabschätzung ein Teil der Arbeitsaufgaben ist, auch wenn diese nur untergeordnet eine Rolle bei den Zielsetzungen spielen.

S3: Nein, 3.

S1: Warum 3? Warum schreibst du 3 hin?

S2: 3? Wir sind doch sicher nicht 3. Da ist ja nichts...

S3: Doch da sind noch ur viele Tröpfel... [sic!]

S2: Das sind doch sicher nicht 3 ml...

Schüler 3 vermutet, dass sich noch 3 ml Wasser im Gefäß befinden, die anderen Schüler*innen widersprechen diesem Schüler. Eine weitere Gruppe konnte auf dem Video beobachtet werden. Diese schätzte den gemachten Fehler ab, indem sie das restliche Wasser des Behälters in den Messbecher kippte und somit die Bedingungen der Aufgabe nicht einhielt.

Obwohl das Experiment sehr einfach gehalten ist, zeigte die Klasse Motivation bei der Durchführung desselben. Dies drückt sich beispielsweise in Konversationen wie: „Immer abwechseln“ – „Nö“ – „Bitte! Nicht nur du!“ oder auch „Darf ich mal? **Bitte-e!**“ aus. Eine andere Gruppe entwickelte auch eine Strategie, um selbst verschüttetes Wasser noch in die Messung miteinbeziehen zu können. Sie saugten mit dem Tafelschwamm das verschüttete Wasser auf und transferierten es in den Messbecher, um das Wasser abmessen zu können.

Im Anschluss an das Experiment bewerteten die Schüler*innen die Vertrauenswürdigkeit ihrer Messungen anhand einer Skala (gar nicht vertrauenswürdig bis sehr vertrauenswürdig). Bei der Durchsicht der Arbeitsblätter waren die Markierungen tendenziell mittig angesiedelt. Einblick in Gespräche der Schüler*innen konnte nur in sehr geringem Maße gewährt werden. Jedenfalls kann der folgende Gesprächsausschnitt der Kategorie *K-1.3. Vertrauenswürdigkeit beurteilen* als Arbeitsstrategie zugewiesen werden, auch wenn die Diskussion nicht auf tiefergehenden Begründungen basiert:

SX: Ich bin zuversichtlich, dass unseres richtig ist.

SY: Also wir sind immer noch am nächsten dran, glaub ich...

Da die Schüler*innen bereits viel über die *Genauigkeit* ihrer Messungen sprachen, erscheint es sinnvoll, direkt an die Umgangssprache der Schüler*innen anzuknüpfen. Möglicherweise wäre ein erklärender Satz zur Vertrauenswürdigkeit und der Genauigkeit einer Messung praktikabel, um eine Verbindung der Begriffe herzustellen.

Die Messunsicherheit des Messbechers wurde vom größten Teil der Klasse richtig ermittelt. Für die Beantwortung der Fragen wurden auch Hinweiskärtchen in Anspruch genommen. Einige Angaben auf den Arbeitsblättern sind nicht nachvollziehbar, wobei es spannend wäre, hier nähere Informationen zu erhalten. Beispielsweise wurde von einer Gruppe eine Messunsicherheit des Messbechers von 500 ml angegeben, ein*e weitere*r Schüler*in gab 64 ml und ein*e andere*r 7 ml an. Leider konnten dazu keine weiteren Beobachtungen am Video oder auf der Audioaufnahme erhoben werden.

Nachdem die Schüler*innen Aufgabe 6 bearbeitet hatten, wurden die Werte am Zahlenstrahl mit der Physiklehrerin besprochen und Quellen für Unsicherheiten besprochen. Dabei wurde das Verschütten von Wasser genannt, ein Schüler erklärte, „*es schätzen vielleicht auch nicht alle so gut?*“, der Schwamm wurde im Zusammenhang mit dem Korrigieren des Fehlers ins Spiel gebracht und auch die Unsicherheit des Messbechers („*der war etwas ungenau*“) wurde im Plenum aufgezeigt. Das gemeinsame Nachbesprechen des Experiments und die Diskussion der Unsicherheiten ist ein zentraler Punkt des Unterrichtsentwurfs. Die Lehrperson sollte sich daher vorab genau überlegen, welche Fragen sie stellen wird und welche Informationen bereits vor der eigenständigen Bearbeitung der Aufgabenstellungen gegeben werden. Jedenfalls sollten vor der gemeinsamen Besprechung alle Schüler*innen die Möglichkeit gehabt haben, sich über mögliche Ursachen für die am Zahlenstrahl verstreuten Messergebnisse Gedanken zu machen. Anschließend an das Plenum hatten die Schüler*innen noch einmal Zeit, selbstständig Punkte zu Aufgabe 6 am Arbeitsblatt zu notieren. Es ist daher nicht auszuschließen, dass manche der Schüler*innen erst im Anschluss an die Besprechung die genannten Punkte aufschrieben. Die am häufigsten aufgezählten Punkte bei Aufgabe 6 sind nachfolgend aufgelistet:

- Wasser wurde verschüttet
- Genauigkeit beim Messen/Schätzen
- Schwamm zur Behebung des Fehlers
- Genauigkeit des Messbechers

Am häufigsten wurden das verschüttete Wasser sowie die Genauigkeit beim Messen/Schätzen beschrieben. Diese zwei Punkte nannten auch zwei Schüler in der Audioaufnahme vor dem Plenum: „*Äh viel verschüttet*“ – „*Äh zu ungenau gemessen?*“. Mit dem letzten Punkt der Aufzählung könnte auch schon in Alltagssprache die Messunsicherheit des Messbechers umschrieben sein. Einige Male wurde immerhin auch die Genauigkeit des Messbechers, d. h. die Unsicherheit des Messbechers, explizit genannt. Die Formulierung der Schüler*innen lässt einmal mehr auf eine notwendige Verbindung zwischen den Begriffen Genauigkeit und Vertrauenswürdigkeit bzw. Unsicherheit schließen. Weiters nennen die Lernenden auch den Schwamm als Unsicherheitsaspekt, obwohl sie diesen bereits zur Korrektur des gemachten Fehlers verwendeten. Einige Schüler*innen saugten das übrige Wasser mithilfe des Schwammes auf und maßen die Menge an Wasser im Messbecher ab. Auf einzelnen Arbeitsblättern wurden außerdem folgende weitere Punkte genannt:

- Wasserunterschied beim Einfüllen
- Wasser musste auf- oder abgerundet werden bzw. zu viel gemessen
- Fehler beim Ausrechnen
- Man konnte nicht das ganze Wasser aus dem Behälter bekommen.

Der erste Punkt, Wasserunterschied beim Einfüllen, spricht bereits die Unsicherheit durch das Abfüllen durch die Lehrkraft an. Einige formulierten die Messunsicherheit durch das Auf- oder Abrunden des Wassers konkret aus, was ebenfalls unter die Messunsicherheit des Messgeräts fällt. Auch ein Fehler beim Ausrechnen des Endergebnisses sowie das übrige Wasser im Behälter wurden genannt. Diese beiden Aussagen wären sehr gut im Plenum zu besprechen, man könnte an dieser Stelle die Notwendigkeit der Vermeidung von Fehlern diskutieren. Die verschiedensten Aussagen zeigen jedenfalls, dass das Nachdenken über und Diskutieren von Messunsicherheiten (*K-2.1 Unsicherheiten* diskutieren) und das Unterrichtsziel *Aufzählen verschiedener Quellen für Unsicherheiten* mit der ersten Unterrichtseinheit erreicht wurde.

Die Physiklehrerin holte die Klasse anschließend noch einmal zurück ins Plenum, wobei sich interessante Aussagen und Ideen der Schüler*innen festhalten ließen. Die Lehrperson wollte wissen, wie das Experiment sein müsste, damit das Ergebnis vertrauenswürdiger ist. Vorschläge der Schüler*innen waren z. B. ein genaueres Messgerät (Waage, anderer Messbecher) verwenden oder auch die Änderung der Messmethode (das gesamte Wasser in einen größeren Messbecher schütten), um weniger Versuche zu brauchen. Aus den Beobachtungen lassen sich die beiden Kategorien *K-2.5 Verbesserung der Versuchsanordnung* und *K-2.3 Genauigkeit des Messgeräts* ableiten. Die Schüler*innen überlegten Möglichkeiten, um eine Messung vertrauenswürdiger zu gestalten, und denken explizit über die Genauigkeit eines Messgeräts (= Typ B-Unsicherheit) nach.

Als die Physiklehrerin die Frage aufwirft, was denn die Klasse als Gruppe tun könnte, um ein vertrauenswürdigeres Ergebnis zu erhalten, wird die Möglichkeit des *Vergleichens von Ergebnissen* genannt. Aus der geschickten Hinleitung der Lehrerin wird von einem Schüler die Berechnung des Durchschnittes zum Vergleich der Ergebnisse genannt, was schließlich zur Kategorie *K-1.1 Messreihe anfertigen und Mittelwert bilden* zugeordnet werden kann und in Richtung der Erreichung des zweiten Unterrichtsziels [Ergebnis vollständig angeben (Mittelwert und Streuungsmaß angeben)] kommt. Der entsprechende Ausschnitt aus dem Transkript lautet hierzu folgendermaßen:

L: Was könnt ihr denn als Gruppe machen?

S19: Äh, vergleichen.

L: Mhm, warum ist vergleichen gut?

S20: Also jeder selber und dann am Ende schauen alle, was man herausbekommen hat... halt ja, und dann einen Durchschnitt berechnen oder so...

3.2.2.3 Zusammenfassung 1. Unterrichtseinheit

Bei der Beobachtung des Unterrichts zeigt sich, dass das Experiment einen guten Grundstock für die Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten mit dem Schwerpunkt Messunsicherheiten darstellt, auf den weiter aufgebaut werden kann. Bei der Durchführung dieses Experiments muss jedoch mit dem Verschütten von Wasser gerechnet werden, was für das Experimentieren im Physiksaal spricht. Ein Kritikpunkt ist sicherlich auch die aufwendigere Vorbereitung der ersten Unterrichtseinheit aufgrund des notwendigen genauen Befüllens des Wasserbehälters vor Beginn der Physikstunde. Dennoch eignet sich der einfache Versuch für die Schulung der E-Kompetenz, welche neben der Planung und Durchführung vor allem auch die Auswertung von Daten anspricht.

Die gestellten Aufgaben ließen die Schüler*innen gemeinsame Überlegungen anstellen, wie am ‚genauesten‘ gemessen werden kann, was sich einerseits in den aufgenommenen Gruppengesprächen, aber andererseits auch im Zusammentragen der Ideen eines vertrauenswürdigeren Experiments im Plenum abzeichnete. Obwohl das Experiment simpel gehalten ist, zeigten die Schüler*innen Motivation bei der Bearbeitung der gestellten Aufgabe. Dies ließ sich sowohl in der Videoaufnahme als auch bei Aushandlungen in der Gruppe, wer als nächstes Wasser abschöpfen und messen dürfe, feststellen. Überdies zeigten die kreativen Lösungen, ausgeschüttetes Wasser bzw. das übrige Wasser im Behälter mithilfe des Schwammes aufzusaugen und in den Messbecher zu transferieren, dass die Schüler*innen Interesse an der Aufgabenstellung hatten.

Besonders hervorzuheben ist, dass die Schüler*innen durch den Unterrichtsentwurf praktisch von selbst auf die Genauigkeit ihrer Messungen zu sprechen kommen. Eine direktere Verbindung zwischen der Alltagssprache und der Fachsprache könnte an dieser Stelle helfen, eine Überleitung zum Konzept der Messunsicherheiten herzustellen. So wäre es eine Möglichkeit, ebendiesen Zusammenhang anhand eines Nebensatzes bei der Aufgabe zur Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit auf der Skala herzustellen. Diese Überlegungen könnten auch Lösungen für die gemachten Beobachtungen des Lehrers, welcher auf dem

Leitfaden notierte, dass die Vertrauenswürdigkeit der Messung vermehrt auf die Schüler*innen selbst bezogen wurde, sein: „*Wenn das Ergebnis stark abweicht, werden einzelne Personen verantwortlich gemacht.*“

Um möglichst genaue Werte vom Messbecher abzulesen, wurden verschiedenste Möglichkeiten gesucht und Strategien von den Schüler*innen entwickelt. Erwartungsgemäß wurden dabei auch Fehler gemacht, wie beispielsweise zu genaue Angaben des Messwertes, wie auch der Lehrer der Klasse auf seinem Beobachtungsbogen festhielt: „*Die Werte werden zum Teil abgeschätzt – Auf 2 Kommastellen zu genau – Öfters auf x,5*“. Diese Momente können einen großen Nutzen für das Erlernen wissenschaftlichen Arbeitens bieten und sollten im Rahmen dieser Unterrichtseinheiten daher unbedingt von der Lehrperson aufgegriffen werden.

Letztendlich stellte das Abschätzen des gemachten Fehlers (übriges Wasser im Behälter) Schwierigkeiten dar, was an enorm hohen oder niedrigen Schätzungen des übrigen Wassers ersichtlich wurde. Bei Gelegenheit kann das Abschätzen jedoch weitere Lernmöglichkeiten darstellen und des weiteren Raum für Diskussionen eröffnen. Da in der ersten Einheit (aufgrund des doch einfachen Experiments) noch Zeit für detailliertere Besprechungen gewesen wäre (und auch in anderen Klassen Zeit übrig sein sollte), empfähle es sich, den Fokus bei der Besprechung im Plenum noch stärker auf die Erhebung der Messdaten zu legen (= Ablesen der Messwerte nicht genauer, als es das Messgerät erlaubt). Auch die Diskussion des Fehlers sollte in der ersten Stunde noch Zeit finden. Da das Arbeitsblatt diesen auch bereits auf der ersten Seite erfragt, sollte zumindest klargestellt werden, dass der abgeschätzte Fehler nicht einfach zum Messergebnis addiert werden darf, sehr wohl jedoch in der wissenschaftlichen Diskussion des Endergebnisses berücksichtigt und abschließend, wenn möglich, korrigiert werden muss.

Die vorliegenden Ergebnisse der ersten Unterrichtsstunde zeigen in jedem Fall, dass es erreicht wurde, die Schüler*innen auf die Existenz von Messunsicherheiten aufmerksam zu machen. Ein tieferes Verständnis des Konzeptes *Messunsicherheiten* wurde in dieser ersten Einheit sicherlich noch nicht erlangt. Aus der Besprechung der Unterrichtseinheit mit der Physiklehrerin kristallisierte sich der Unterrichtsentwurf der ersten Stunde als innovative, spannende und neue Idee heraus. Im nächsten Unterkapitel sollen nun die Beobachtungen und Erkenntnisse der anknüpfenden zweiten Stunde erläutert werden.

3.2.2.4 Ergebnisse 2. Unterrichtseinheit

Eine kurze Wiederholung und Zusammenfassung der Erkenntnisse der letzten Stunde eröffneten die zweite Unterrichtseinheit zum Thema Messunsicherheiten. Ein aufzeigender Schüler erinnerte sich daran, dass 500 ml in dem Behälter gemessen wurden. Als Ursachen für die verschiedenen Messwerte am Zahlenstrahl wurden von den Schüler*innen der „unge-naue Messbecher“, das Schätzen bzw. Ablesen vom Messbecher und das übrige Wasser im Behälter genannt. Vorrangig sind die Meldungen daher der Kategorie *K-2.3 Genauigkeit des Messgeräts* zuzuordnen. Dass Messergebnisse immer zufällig um einen Mittelwert streuen und eine Messreihe damit auch eine gewisse Unsicherheit hat (Typ A-Unsicherheit) wurde nicht weiter erläutert. Kategorie *K-2.2 Streuung von Messwerten* wurde somit nicht angesprochen.

Die Schüler*innen durften sogleich mit dem zweiten Arbeitsblatt beginnen, wurden schließlich aber noch einmal unterbrochen, um die Messergebnisse aller Gruppen zu vergleichen. Nachdem die insgesamt neun Ergebnisse aller Gruppen zusammengetragen waren (und über den Beamer an die Wand projiziert wurden), konnten die Schüler*innen selbstständig mit den Aufgaben fortfahren.

Es wurden zwei Tonaufnahmen von einer Dreier- und einer Vierergruppe gemacht. Die Vierergruppe wird künftig als Gruppe 3 und die Dreiergruppe als Gruppe 2 bezeichnet. Leider wurde die Audioaufzeichnung von Gruppe 2 einerseits zu Beginn kurzfristig abgebrochen und andererseits wurde in der restlichen Stunde kaum von Gruppe 2 zu den Aufgaben (hörbar?) gesprochen.

Gruppe 3 kontrollierte die eingetragenen Messergebnisse in der Tabelle ihrer Arbeitsblätter mit jenen des projizierten Arbeitsblattes und wusste gleich darauf, den Mittelwert zu bestimmen. Eine Schülerin fasste für ihre Gruppenmitglieder zusammen:

S8: Der wahre Wert ist genau 500. Jetzt müssen wir alles zusammenrechnen und das dann durch 9. Das ist dann der Mittelwert [...].

Die Erklärung der Schülerin deutet darauf hin, dass der Unterschied des Mittelwerts vom wahren Wert und die Ermittlung des Mittelwerts aus der gegebenen Messreihe verstanden wurden (*K-1.1 Messreihe anfertigen und Mittelwert bilden*). Sie verbindet also den wahren Wert mit demjenigen Wert, der von der Lehrkraft ursprünglich in den Behälter gefüllt wurde (und damit für vertrauenswürdig gehalten wird?). Weiters liest sie auch den Satzteil der An-

gabe noch einmal bedächtig und laut vor: „*kommt dem wahren Wert einer Größe am nächsten...*“ Es scheint als wären bei der Schülerin Denkprozesse über die Bedeutung des wahren Wertes tatsächlich ausgelöst worden. Sicher ist sich die Schülerin jedenfalls nicht, wie sie kurz darauf noch einmal in ihrer Gruppe hervorhob: „*Ich weiß aber nicht, ob das richtig ist, was ich geredet hab.*“

Die Berechnung des Mittelwerts in Gruppe 3 zeigt auf, dass die Schüler*innen nicht von ihren mathematischen Fertigkeiten überzeugt waren. Aussagen wie „*Ich sag dir, es ist falsch*“ oder „*Mathe ist nicht so meine Stärke...*“ untermauern diese Annahme. Auch ein Schüler einer anderen Gruppe wollte den errechneten Mittelwert nicht im Plenum preisgeben, er erwiderte auf den Aufruf der Lehrperson „*Ich würde uns nicht vertrauen...*“. Diese Beobachtung wird keiner konkreten Kategorie zugeordnet, findet sich aber dennoch in den Ergebnissen dieser Unterrichtsstunde wieder, da sie einen relevanten Einblick in die Bearbeitung der Unterrichtsmaterialien liefert.

Bei Aufgabe 2 sollten die Lernenden angeben, wie weit die Messwerte der jeweiligen Gruppe vom Mittelwert entfernt lagen. Schülerin S8 der Gruppe 3 ließ sich an dieser Stelle doch noch einmal vom wahren Wert und dem Mittelwert verwirren. Auf die Frage ihrer Mitschülerin S7, wie weit sich das Ergebnis der Gruppe vom Mittelwert entfernt befindet, dachte Schülerin S8, dass das Ergebnis ident sei mit dem Mittelwert:

S7: Ja wie viel sind wir vom Mittelwert entfernt?

S8: Ja gar nicht.

Vermutlich ging die Schülerin vom wahren Wert aus, da das Messergebnis der Gruppe bei 500 ml lag und somit mit dem wahrscheinlich wahren Wert übereinstimmte. Schülerin S7 hilft ihrer Mitschülerin auf die Sprünge, wodurch eine richtige Abweichung des Messergebnisses vom Mittelwert auf dem Arbeitsblatt notiert werden konnte:

S7: Der Mittelwert- (lässt sich unterbrechen)

S8: Doch warte! Ja. Warte kurz.

S7: Der Mittelwert ist 485 und wir hatten 500.

In diesem Abschnitt werden erste Denkprozesse zur *K-2.2 Streuung von Messwerten* um den Mittelwert erkennbar. Die Aufgabe scheint ein guter Einstieg für weitere Überlegungen darzustellen.

Im nächsten Schritt holte die Lehrperson die Klasse wiederum ins Plenum zurück, um mit ihnen den berechneten Mittelwert zu vergleichen und die Spannweite zu besprechen, für den Fall, dass sich die Klasse an letztere nicht mehr aus dem Mathematik-Unterricht erinnerte. Dabei stellte sich heraus, dass beim Vergleichen der Messergebnisse etwas schiefgelaufen war und daher der kleinste Wert von 381 ml nicht beachtet wurde. Ein Schüler der Gruppe 2 äußerte seinen Frust darüber und meinte „*Ja, aber das kann man doch nicht zählen*“, er wollte diesen *Ausreißer* nicht in die Berechnung der Spannweite miteinbeziehen. Dieser kurze Zwischenfall würde im Optimalfall einen guten Input für eine weiterführende Diskussion der Datenauswertung bieten, wurde aber, wahrscheinlich aufgrund des engen Korsetts der Erprobung des Unterrichtsentwurfs, nicht von der Physiklehrerin in Erwägung gezogen. Fazit der Physiklehrerin war schließlich, dass die große Spannweite der Messung auf die vielen Ausreißer zurückzuführen war. Das Berechnen der Spannweite ließ sich ohne größere Schwierigkeiten von der Klasse bewerkstelligen, was in die Kategorie *K-1.2 Spannweite berechnen* einzuordnen ist. Auch ihre Bedeutung als Streuungsmaß durch die Betrachtung am Zahlenstrahl und die Überlegungen des unzufriedenen Schülers wurden zumindest kurz besprochen. Damit sollten die Schüler*innen zu den nächsten Aufgaben übergehen.

Schülerin S8 dachte über Aufgabe 5a zur Spannweite gewissenhaft nach, während ihre Mitschüler*innen bereits die richtige Antwort angekreuzt hatten. Es galt zu überlegen, ob die Spannweite größer oder kleiner wird, wenn die äußersten eingekreisten Werte am Zahlenstrahl nicht mehr zur Messreihe dazugehörten. Die Schüler*innen der Gruppe entschieden sich für die richtige Antwort (Spannweite wird kleiner):

S8: Warte die Spannweite der Messreihe, größer oder kleiner. Hm... kleiner. Kleiner. Weil wenn die da nicht da ist, nur die in der Mitte, dann ist das kleiner... kleiner! Ich würde sagen kleiner.

Bei Aufgabe 5b sollten die Lernenden nun eine Verknüpfung zur Vertrauenswürdigkeit bzw. Messunsicherheit der Messreihe herstellen. Gruppe 3 äußerte keine Bedenken, sie kreuzte ohne Umschweife die richtige Antwort an. Damit könnte die Kategorie *K-1.3 Vertrauenswürdigkeit beurteilen* erreicht sein. Die Schüler*innen beurteilten die Messergebnisse anhand ihrer Spannweite und zogen somit ein Streuungsmaß in ihre Überlegungen zur Messunsicherheit (bzw. Vertrauenswürdigkeit) des Ergebnisses mit ein. Bei der Durchsicht der Arbeitsblätter stellte sich jedoch heraus, dass einige Schüler*innen Probleme bei der Bewältigung dieser Aufgabe hatten. Leider wurden die Antwortkästchen nicht vom Drucker abgebildet, wodurch möglicherweise nicht von allen Schüler*innen nachzuvollziehen war, dass

es sich um eine Auswahl zweier Antworten handelte. Drei Schüler (vermutlich eine Gruppe) beschrieben daher selbstständig, was sie unter der Vertrauenswürdigkeit einer Messung verstanden:

- 1) *Vertrauenswürdigkeit: Wie vertrauensvoll das Ergebnis der Messung ist. Messunsicherheit: Wie verlässlich deine Messung ist.*
- 2) *Messunsicherheit bedeutet, dass es beim Messen Schwierigkeiten gab. Vertrauenswürdigkeit bedeutet das Leute vertrauen an den Abmesser haben [sic!].*
- 3) *Messunsicherheit bedeutet, dass die Messung weniger verlässlich ist und eben umgekehrt.*

Bei Aufgabe 5a kreiste der*die Schüler*in der Aussage 1) die richtige Antwort ein, die Spannweite der Messreihe wäre kleiner. Die beiden anderen Schüler*innen kreisten beide Antwortmöglichkeiten bei Aufgabe 5a ein. Während das Verständnis von Schüler*in 1) und 2) der Messunsicherheit in die richtige Richtung zu gehen scheint, geht Schüler*in 3) davon aus, dass Messunsicherheiten nur dann bestehen, wenn das Experiment schief läuft, und Unsicherheiten somit zu vermeiden sind. Aus den offenen Antworten geht hervor, dass Überlegungen zur Vertrauenswürdigkeit angestellt wurden (K-1.3), die im Prinzip der Messung verankerte Streuung von Messwerten um den Mittelwert (K-2.2) wurde jedenfalls von Schüler*in 2) nicht in Überlegungen miteinbezogen. Von insgesamt 29 Arbeitsblättern wurde Aufgabe 5a 23-mal und Aufgabe 5b) 17-mal richtig beantwortet. Drei Schüler*innen beantworteten Aufgabe 5a falsch, wobei sie die richtige Schlussfolgerung für 5b gezogen hatten (5a Spannweite wird größer → 5b Messunsicherheit wird größer). Zwei Schüler*innen kreuzten beide Antwortmöglichkeiten bei 5a an (siehe oben) und beantworteten 5b schriftlich. Ein*e Schüler*in bearbeitete Aufgabe 5a und vier Schüler*innen 5b überhaupt nicht. Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass nicht alle Schüler*innen, aber mehr als die Hälfte, die Bedeutung der Spannweite als Streuungsmaß verstanden. Ein weiteres Beispiel dieser Art oder zumindest der Vergleich der Aufgabe innerhalb der Klasse würde evtl. zu einer besseren Bilanz führen. Interessant wären an dieser Stelle weitere offene Antworten und Aussagen über den Zusammenhang von Spannweite (oder Streuungsmaß im Allgemeinen) mit der Messunsicherheit bzw. Vertrauenswürdigkeit.

Die letzte Aufgabe auf dem Arbeitsblatt deckte auf, dass Gruppe 3 die Messunsicherheit des Messbechers noch nicht verstanden hatte. Sie kopierten schlussendlich die Lösung von der vorherigen Nummer, welche bereits im Plenum verglichen wurde:

S7: Ich weiß es einfach nicht... Ja sagen wir auch einfach 5ml.

S8 kommt auf die Idee, auf der anderen Seite des Zettels nachzulesen, sie liest Aufgabe 3 durch und weiß nun:

B: 5 ml – 5. [ruft den Namen von S7], 5! Das haben wir ja da vorhin grad angekreuzt, bei Nummer 3.

Die Aufgabenstellung, die Messungen nach ihrer Messunsicherheit zu ordnen und anschließend die Klasse mit der vertrauenswürdigsten Messung anzugeben, veranlasste die Schüler*innen der Gruppe 3 zum Nachdenken und Diskutieren. Das bisher Gelernte konnte in dieser Aufgabe Anwendung finden. Es wird sowohl die Kategorie *K-1.3 Vertrauenswürdigkeit beurteilen* als auch die Kategorie *K-2.1 Unsicherheiten diskutieren* in der Bewältigung der Aufgabe gefunden, was im anschließenden Schülergespräch ersichtlich wird:

S8: Klasse X würde ich sagen, oder?

S7: Ja...

S8: Weil die haben sehr wenig Messunsicherheit der Messreihe, gleich viel wie alle andern Messunsicherheit des Messgeräts und das Ergebnis des Mittelwertes halt... ich würd X sagen. (Pause) Aber es kann halt auch Z und Y sein...

S9: Aber schau, die haben das Ergebnis 498 und dann ist die Unsicherheit 100 ...

S8: ...der Messreihe, das ist die Unsicherheit der Messreihe. -- Ich bin mir eben auch nicht sicher, ob Y oder X. Ich glaub auch Y – weil, das ist dann weniger. Nämlich die Messunsicherheit ist am wenigsten bei Y. Drum... ist es schon Y. Es ist Y [...].

Als Abschluss der Stunde wurde ein Erkenntniszettel ausgeteilt, welcher die wichtigsten Key Ideas dieser Unterrichtseinheiten in Form eines Lückentextes enthält. Der Lückentext war für die Schüler*innen eher schwierig, was sich möglicherweise auf die vielen neuen Begriffe, welche innerhalb von nur zwei Schulstunden aufgeworfen wurden, zurückführen lässt. Weiters fingen viele dieser neuen Begriffe mit immer gleichen Wortanfängen (Messunsicherheit, Messwert, Messergebnis, ...) an. Dieser Umstand wurde auch von der Physiklehrerin kritisch betrachtet und bei der Nachbesprechung beschrieben: „*Es sind halt echt viele neue Begriffe und alle fangen irgendwie mit ‚Mess-‘ an.*“ Weiters stellte sich auch im Lückentext die erwünschte Verknüpfung der Vertrauenswürdigkeit mit der Messunsicherheit noch nicht zufriedenstellend heraus. Die Schülerin, welche den entsprechenden Satz im Lückentext vervollständigen sollte (die Lehrerin rief die Schüler*innen in Schlangenlinien auf, wobei jede*r einen Satz vorlas) erklärte, dass sie genau diesen Satz nicht geschafft hätte. Erst durch Nachhelfen kam die Schülerin auf die richtige Lösung:

S13: Genau das hab‘ ich nicht ... also halt und es passt auch nicht das, was wir ok fänden.

L: Na denk' einmal logisch. Welcher Messung würdest du eher vertrauen, einer die eine große Unsicherheit, oder einer die eine eher kleine Unsicherheit hat?

S13: Also je kleiner...

Bei der Durchsicht der Arbeitsblätter stellte sich die letzte Aufgabe als bewältigbar heraus. Einzig die Spannweite der eigenen Klasse wurde von einer Gruppe falsch angegeben, die Schlussfolgerung des vertrauenswürdigsten Ergebnisses wurde dann jedoch wiederum richtig gezogen.

3.2.2.5 Zusammenfassung 2. Unterrichtseinheit

In der beobachteten Klasse bewies sich das Arbeitsblatt mit diversen Aufgaben zur Auswertung der Daten mit Schwerpunkt Messunsicherheiten als bewältigbar und brachte trotzdem einige komplexere Aufgaben mit, um die Schüler*innen zum Nachdenken anzuregen. Die Berechnung des Mittelwerts verlief ohne Probleme, auch die Spannweite war für die Lernenden einfach zu berechnen. Sollte das Unterrichtskonzept in einer leistungsschwächeren Klasse durchgeführt werden, so können die ersten Aufgaben gemeinsam gelöst werden, ehe die Schüler*innen selbstständig fortfahren. In der Unterrichtsbeobachtung wurden die Kategorien K-1.1 und K-1.2 gefunden und damit geforderte Ziele erreicht.

Die Verbindung kleinere Spannweite oder größere Spannweite mit der Messunsicherheit scheint theoretisch gut zu funktionieren. Das zeigte sich bei der Aufgabe zur Spannweite, welche anhand des Zahlenstrahls betrachtet wird. An dieser Stelle wurde die Vertrauenswürdigkeit anhand eines Streuungsmaßes beurteilt, was unter K-1.3 einzuordnen ist. Weitere Aufgaben, die diese Verknüpfung wiederholen und somit stärken, könnten zielführend sein.

Der Vergleich von Endergebnissen verschiedener Klassen war nachvollziehbar und kristallisierte sich als wertvolle Lernaufgabe heraus. Weitere Beispiele dieser Art könnten auf abwechslungsreiche Weise eine Vertiefung des Verständnisses für das Konzept der Messunsicherheiten ermöglichen.

Als weniger erfolgreich entpuppte sich hauptsächlich der Lückentext, welcher zum einen in seiner Form schwieriger gestaltet war und zum anderen Fachbegriffe abfragte, die alle ähnlich klingen und neu für die Schüler*innen waren.

3.2.2.6 Fazit der Unterrichtsbeobachtungen

Die Beobachtungen der beiden Unterrichtseinheiten wurden mit der Physiklehrerin abgeglichen. In diesem Unterkapitel werden daher die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und diskutiert.

Bei der Bearbeitung der Unterrichtsmaterialien entwickelten und übten die Schüler*innen verschiedene Arbeitsstrategien. Die analysierten Transkripte und Videos zeigten auf, dass die erste Unterrichtseinheit eine eher allgemeine Einführung und ein Herantasten an die Existenz von Messunsicherheit darstellt. Diese Vermutung zeigt sich auch in der hauptsächlichen Findung der Kategorien *K-1.4 Ausprobieren* und seltener *K-1.3 Vertrauenswürdigkeit beurteilen*. Der Umstand, dass die ersten beiden Unterkategorien *K-1.1 Messreihe anfertigen und Mittelwert bilden* sowie *K-1.2 Spannweite berechnen* nicht gefunden wurden, liegt im Wesentlichen an der Planung der ersten Unterrichtseinheit. Dennoch konnte bereits am Ende der ersten Einheit ein Schüler mit seiner Vermutung, den Durchschnitt zu bilden, auf einen sinnvollen weiteren Weg der Datenauswertung schließen. *K-1.4 Ausprobieren* entstand während der Datenauswertung und wurde einer Vielzahl an Textstellen zugeordnet. Die Schüler*innen versuchten, stets exaktere Messwerte von der Skala abzulesen, indem sie die Schöpfer so entnahmen, dass der Wasserstand mit der Unterteilung des Skalenabschnittes übereinstimmte. In der weiteren Auswertung vermischten sich die Unterkategorien *K-1.4* und *K-2.5* zunehmend miteinander. Aufgrund der Evaluation der weiter unten beschriebenen schriftlichen Tests erschien es trotzdem sinnvoll, beide Unterkategorien beizubehalten. *K-1.4* steht für das Ausprobieren und Optimieren der Versuchsdurchführung, während des Experimentierens, während *K-2.5* eher die theoretischen Überlegungen dazu anspricht.

Einige Passagen konnten auch der Kategorie *K-1.3* zugeordnet werden, was für einen kleinen Erfolg des Unterrichtsentwurfs spricht. Die Schüler*innen begründeten ihre Messwerte mit gering gehaltenen Messunsicherheiten und Fehlern, was z. B. die Aussage „*Ich schreib 507 hin. Weil so viel haben wir nicht verschüttet...*“ aufzeigt. Ob tatsächlich die Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit anhand der Skala ausschlaggebend für die angestellten Überlegungen war, ist leider nicht eindeutig anhand der Unterrichtsbeobachtungen nachzuweisen.

Dass Denkprozesse bei den Schüler*innen ausgelöst wurden und somit ein Hinführen in die Welt der kritischen Datenauswertung mit dem Schwerpunkt Messunsicherheiten gelungen ist, wird an der Zuordnung der Kategorien *K-2.1 Unsicherheiten diskutieren* und *K-2.3 Genauigkeit des Messgeräts* erkannt. Die Schüler*innen kamen durch das Experiment auf die Genauigkeit der Messwerte zu sprechen und diskutierten innerhalb der Gruppe, welcher Messwert der richtige ist, wenn es sich um das Bestimmen des Wasserstandes handelte. Teilweise wurden *zu genaue* Messwerte angegeben, die aufgrund der 10-er Schritte des Messbechers richtigerweise nicht zu bestimmen sind. Die Diskussion der Messunsicherheiten

fand vorwiegend im Plenum statt, als verschiedene Ursachen für die unterschiedlichen Messergebnisse am Zahlenstrahl gesucht wurden. Eine Verbesserung der Vertrauenswürdigkeit wurde hauptsächlich auf die Verbesserung der Versuchsanordnung durch genauere Messgeräte zurückgeführt.

Der Unterrichtsentwurf zur ersten Einheit stellte sich als passender Einstieg heraus. Kleinigkeiten in den Aufgabenstellungen können weiter verbessert werden, wie sie auch im finalen Unterrichtskonzept im nächsten Kapitel zu finden sind. Das Experiment in seiner Einfachheit, obwohl es bewusst durch die verkomplizierte Messmethode manipuliert ist (dies könnte so manchen Lernenden in der Durchführung stören), motivierte die Schüler*innen ein *genaues* Ergebnis zu erzielen. Dabei wurden verschiedenste Strategien entwickelt und vielfach Denkprozesse angeregt.

Eine vertiefende und mathematischere Auseinandersetzung mit dem Thema Messunsicherheiten wurde in der zweiten Einheit herbeigeführt. Die überwiegende Einordnung der Beobachtungen in die Kategorien *K-1.1 Messreihen anfertigen und Mittelwert bilden* und *K-1.2 Spannweite berechnen* sowie *K-1.3 Vertrauenswürdigkeit beurteilen*, wenn die eingesetzten Arbeitsstrategien betrachtet werden, deuten auf eine tiefergehende Auswertung als noch in der einführenden Einheit hin. Das Berechnen des Mittelwertes und der Spannweite ist für die Schüler*innen der 8. Schulstufe keine Schwierigkeit. Die Aufgaben sind nachvollziehbar und ausreichend gut beschrieben, sodass die Schüler*innen auch selbstständig arbeiten können. Sollte die Spannweite in einer Klasse nicht bekannt sein, sollte sie daher mithilfe des Arbeitsblattes bzw. im Plenum einfach nachzuvollziehen sein.

Besonders hervorzuheben ist, dass der wahre Wert und der Mittelwert von einer der audioaufgezeichneten Gruppen kurz angesprochen und richtige Schlussfolgerungen für deren Unterscheidung gezogen wurden. Dieser Umstand zeigt das Potential der Aufmachung dieses Unterrichtskonzeptes. Im Plenum wäre es ratsam, dass diese beiden Begriffe genauer anhand des Zahlenstrahls herausgearbeitet werden. Dafür bräuchte es eine entsprechende Vorbereitung der Lehrkraft, um Unterrichtsgespräche dahingehend zu lenken.

Die Verbindung der Spannweite mit der Messunsicherheit anhand von Aufgabe 5a und 5b scheint zielführend zu sein. Dass die Vertrauenswürdigkeit einer Messung größer wird, wenn die Spannweite kleiner wird, ist anhand des Zahlenstrahls gut ersichtlich. Um das Gelernte zu festigen könnte man weitere Beispiele in diese Richtung stellen. Die Kategorie *K-1.3 Vertrauenswürdigkeit beurteilen* konnte bei der Durchsicht der Arbeitsblätter gefunden und

als erreicht bezeichnet werden, da die Spannweite als Messunsicherheit zur Beurteilung herangezogen wurde.

Die Kategorie *K-1.3 Vertrauenswürdigkeit beurteilen* wurde in besonderem Maße im letzten Beispiel des Arbeitsblattes angesprochen und die Aufgabe erfolgreich von den Schüler*innen bewältigt. Dies zeigte sich einerseits durch die richtigen Ergebnisse auf den Arbeitsblättern und andererseits in der aufgezeichneten Diskussion der Gruppe 3. Die Aufgabe beinhaltete Messergebnisse verschiedener Gruppen sowie die zugehörigen Typ A- und Typ B-Unsicherheiten und forderte die Schüler*innen dazu auf, die Messergebnisse nach ihrer Vertrauenswürdigkeit zu ordnen. Die Form dieser Aufgabe eignete sich sehr gut für das Festigen und Üben der neuen Parameter zur Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit von Messwerten.

Die Genauigkeit des Messgeräts (*K-2.3*) geriet in der zweiten Unterrichtseinheit in den Hintergrund. Die Key Idea, dass ein Messgerät, unabhängig von der Art des Messgeräts, immer eine gewisse Messunsicherheit mit sich bringt, wurde nur bedingt herausgearbeitet, obwohl erkannt wurde, dass der Messbecher „ungenau“ ist und andere Messgeräte besser geeignet wären.

Die letzte Kategorie *K-3 Keine Zielerreichung* wurde einmal gezählt, als Schüler*innen der Gruppe 3 die Messunsicherheit des Messbechers der vorherigen Aufgabe übernahmen und nicht überlegt eine Lösung suchten (*K-3.1 Handlungen ohne Ziel*). Auch das mangelnde Selbstvertrauen in die mathematischen Fähigkeiten der Schüler*innen kann K-3 zugeordnet werden. Jedoch wurde dafür keine separate Unterkategorie eröffnet, da die Beobachtung als irrelevant im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit betrachtet wird. In der ersten Einheit wurde die Unterkategorie *K-3.2 Fehlerhafte Handlung* ergänzt, als Schüler*innen die Aufgabenstellung des Experiments missverstanden (sie dachten aufgrund der Messwertetabelle, sie hätten 24 Versuche, um den Behälter leer zu bekommen). Beobachtungen, bei denen die Messwerte auf Nachkommastellen ‚zu genau‘ angegeben wurden, sind ebenfalls dieser Unterkategorie zuzuordnen. Letztgenannte Beobachtungen sollten im Unterricht unbedingt aufgedeckt und im Plenum nachbesprochen werden.

Abschließend ist über die beiden Unterrichtseinheiten zum Einstieg in das zunächst trocken erscheinende Gebiet der Messunsicherheiten zu berichten, dass der Unterrichtsentwurf sowohl bei den Schüler*innen als auch bei den beiden Lehrenden gut angekommen ist. Kritikwürdig ist ein erhöhter Arbeitsaufwand für die Lehrperson vor der ersten Einheit und die Notwendigkeit eines Physiksaals (aufgrund des Verschüttens von Wasser) sowie viele neue

Begriffe, die auf die Schüler*innen einprasseln. Aus sprachdidaktischer Sicht ist dieser Punkt noch aufzuarbeiten, was sich unter anderem an dem schwierigen Lückentext bemerkbar machte. Obwohl die Klasse einen traditionellen Physikunterricht gewohnt und kaum Erfahrung in Bezug auf selbstständiges Experimentieren und Auswerten von Daten auf wissenschaftlicher Basis hatte, kann behauptet werden, dass von den Schüler*innen Ansätze neuer Kompetenzen erlernt wurden (beispielsweise mehrmaliges Messen und Abschätzen der Vertrauenswürdigkeit unter Einbeziehung verschiedener Messunsicherheiten). Des Weiteren ist es ein großer Vorteil des Unterrichtsentwurfes, dass es die Einfachheit des Experiments sogar zulässt, das vorgestellte Unterrichtskonzept bereits in einer zweiten Klasse der Sekundarstufe I durchzuführen, um die Schüler*innen hin zur Existenz von Unsicherheiten und der Vertrauenswürdigkeit einer Messung zu führen. Die abwechslungsreich gestalteten Aufgaben schienen die Schüler*innen laut der Physiklehrerin auch zum Arbeiten zu motivieren. Kreative Ansätze bei der Lösung der Aufgaben unterstützen diese Annahme. Vorteilhaft ist es mit Sicherheit, wenn die Klasse von der gleichen Lehrperson in den Fächern Physik und Mathematik unterrichtet wird oder eine gute Kommunikation bzw. guter Austausch zwischen Physik- und Mathematiklehrkraft besteht. Der Einsatz verschiedener Streumaßen ist somit einfacher auszuwählen. So wurde beispielsweise in der getesteten Klasse das Arbeitsblatt Messunsicherheiten für Fortgeschrittene absichtlich nicht ausgeteilt, da die Standardabweichung in jener Klasse erst gegen Ende des Schuljahres unterrichtet werden sollte. Aus den Unterrichtsbeobachtungen und Inputs der Lehrpersonen lässt sich abschließend behaupten, dass das vorliegende Unterrichtskonzept einen wichtigen Beitrag zum Thema Messunsicherheiten und in Bezug auf die Kompetenzen im naturwissenschaftlichen Unterricht leisten kann. Eine tiefere Auseinandersetzung mit den Unterrichtsmaterialien durch die Lehrperson ist jedoch notwendig, um spannende Diskussionen von aufgedeckten Sachverhalten, Fehlern, Handlungen, Konflikten usw. während des Experimentierens zu entfachen und zu begleiten, die einen großen Beitrag zur Zielerreichung liefern. Damit sind unter anderem das Abschätzen des Fehlers, der Einsatz des Schwammes zur Korrektur des Fehlers, das zu genaue Ablesen von Messwerten an der Skala etc. gemeint. Ein Nicht-Ansprechen dieser Momente führt zu einem Verlust interessanter Lernmöglichkeiten.

3.2.3 Schriftliche Tests

Drei Tage nach der zweiten Einheit wurden die schriftlichen Tests, wie sie auch schon nach den Akzeptanzbefragungen Anwendung fanden, eingesetzt. Insgesamt wurden 27 Testbögen

ausgefüllt und eingesammelt, wobei insgesamt 29 Schüler*innen an den Unterrichtseinheiten teilnahmen. Die Ergebnisse der schriftlichen Befragung werden Seite für Seite zusammengefasst und diskutiert.

Auf der ersten Seite bei Item 1 des schriftlichen Tests wurde das Experiment von Martins Physikunterricht vorgestellt (Tennisball aus 2 m Höhe fallen lassen und die Zeit stoppen). Zunächst misst Martin die Zeit mit dem Sekundenzeiger seiner Armbanduhr. Die Schüler*innen sollen die Vertrauenswürdigkeit dieser Messung anhand der Skala beurteilen. Die Mehrzahl der Schüler*innen stufen die Messung tendenziell gar nicht vertrauenswürdig ein, markierten also die Stufe 1 oder 2 auf der Skala. Ein Drittel schätzten die Messung als vertrauenswürdig ein, entschieden sich daher für Stufe 3, 4 oder 5 und niemand fand die Messung sehr vertrauenswürdig, wie auch der grafischen Aufbereitung aus Abbildung 9 entnommen werden kann.

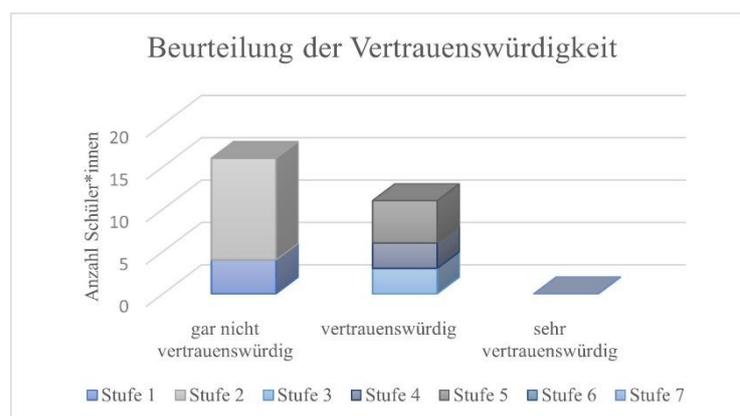


Abbildung 9: Ankreuzen von Stufe 1 bis 2 wurde zusammengefasst zur Kategorie gar nicht vertrauenswürdig, die Stufen 3-5 fallen unter vertrauenswürdig und Stufe 6-7, sehr vertrauenswürdig, wurde von niemandem zur Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit von Item 1 markiert.

Zur Verbesserung der Vertrauenswürdigkeit der Messung wurden am häufigsten Vorschläge genannt, die den Kategorien *K-2.3 Genauigkeit des Messgeräts*, *K-2.2. Streuung der Messwerte (Typ A-Unsicherheit)*, *K-1.1 Messreihe und Mittelwert* sowie *K-2.4 Verbesserung der Versuchsanordnung* zuzuordnen sind. Betreffend *K-2.3* schlugen Schüler*innen vor Lichtschranken, eine genauere (Stopp-)Uhr, Videoaufzeichnungen, Sensoren oder ein unspezifisches, genaueres Messgerät zu verwenden. Fast die Hälfte der Schüler*innen gab an, mehrmals zu messen und einen Durchschnitt auszurechnen. 52 % nannten Verbesserungsvorschläge, die unter dem Sammelbegriff Geschicklichkeit des Experimentators zusammengefasst werden können und somit der Kategorie *K-2.2* untergeordnet ist. Darunter fallen Bei-

spiele wie „genauer stoppen, schneller reagieren, präziser Ball fallen lassen“ etc. Fünf Schüler*innen kamen auf die Idee mit einer zweiten Person beim Messen zusammenzuarbeiten, was der Kategorie *K-2.4* zugeordnet wurde. Auch das Verwenden eines Sessels, eine richtige Wahl der Perspektive, um genau stoppen zu können, wurden im Zusammenhang mit *K-2.4* beschrieben.

Die Bewertungen der Vertrauenswürdigkeit und Verbesserungsvorschläge der Klasse deuten bereits auf ein kritisches Hinterfragen von Messergebnissen und Versuchsaufbauten hin. Auf jedem Fragebogen wurde zumindest ein Verbesserungsvorschlag gefunden, mehr als die Hälfte nannten sogar drei Vorschläge. Besonders hervorzuheben ist, dass sogar 13 Schüler*innen mehrmaliges Messen vorschlugen, um ein *genauer* Ergebnis zu erhalten.

Bei Item 2 verwendet Martin die Stoppuhr seines Handys und vergleicht sein Ergebnis mit dem Ergebnis von Lisa. Knapp $\frac{3}{4}$ der Schüler*innen kreuzten an, dass sie anhand der Angabe nicht beurteilen könnten, ob Lisa oder Martin das vertrauenswürdiger Ergebnis habe. Vier Schüler*innen beurteilten Lisas, und drei Schüler*innen Martins Ergebnis als vertrauenswürdiger. Unterschiedlichste Begründungen, welche von sehr subjektiven Erfahrungen (z. B. Mädchen sind vertrauenswürdiger) über interessante Überlegungen von Unsicherheiten (z. B. Abhängigkeit der Messungen von unterschiedlichen Reaktionszeiten) bis hin zu Ideen (z. B. Martin hat es genau gemacht und Lisa nicht) reichen und in die Kategorie *K-3 Keine Zielerreichung* zugeordnet werden können, wurden gefunden. Eine Antwort, die sich auf die fehlende Angabe von Messunsicherheiten beziehen könnte, lautete: „*Weil man nicht weiß, welche von den beiden genauer gemessen hat [sic!]*“. Einige Schüler*innen erklärten auch, dass sie das Messergebnis nicht vergleichen könnten, da sie die „*richtige*“ Antwort nicht kennen, wie diese beispielhafte Aussage aufzeigt: „*Da man keine Antwort weiß, kann ich nicht beurteilen, wer genauer gemessen hat.*“ Spannend war auch folgende Begründung, bei welcher eigene Erfahrungen zur Beurteilung der Richtigkeit der Ergebnisse miteinbezogen wurden: „*Wenn ich mir vorstelle, wie der Ball runterfällt, glaube ich, dass es näher zu der 1 Sekunde hinkommt.*“

Leider gab keine*r der Lernenden die Begründung an, dass die einmalige Messung der Zeit kein aussagekräftiges Ergebnis liefert. Als Verbesserungsvorschlag darunter nannten jedoch wiederum sechs Schüler*innen mehrmaliges Messen und Mittelwert bilden (*K-1.1*). Auch auf Seite zwei wurde die Zusammenarbeit zur *Verbesserung der Versuchsanordnung* von

rund $\frac{1}{4}$ der Schüler*innen gefordert. Ein weiteres Viertel nannte die Verwendung genauerer Messgeräte *K-2.3* oder sonstige Ideen für verbesserte Bedingungen.

Dass $\frac{3}{4}$ der Schüler*innen angaben, dass die Vertrauenswürdigkeit anhand der gegebenen Informationen nicht beurteilt werden kann, zeichnet sich als kleiner Erfolg der Unterrichtseinheiten ab. Leider steht jedoch kein Vergleichswert aus einem Pre-Test zur Verfügung. Obwohl die Begründungen nicht die gewünschten Antworten wie *Messreihe anfertigen* und explizit *Messunsicherheiten angeben* lieferten, wurden doch einige reflektierte Aussagen getroffen.

Bei Item 3 stoppen Martin und Lisa 10-mal die Zeit und geben den Mittelwert und die Spannweite als Endergebnis an. Die Schüler*innen sollen das vertrauenswürdiger Ergebnis ankreuzen und ihre Auswahl begründen. 63 % stimmten für Lisas Messergebnis, welche nach den Überlegungen aus der Unterrichtseinheit auch die kleinere Messunsicherheit aufgrund der kleineren Spannweite aufweist, siehe auch die untenstehende Abbildung 10. Jeweils 15 % entschieden sich für Martins Ergebnis oder für die Möglichkeit, dass keine der beiden Messungen vertrauenswürdiger ist. Zwei Schüler*innen bearbeiteten die letzte Aufgabe überhaupt nicht. Von den insgesamt 17 Schüler*innen, die Lisas Messergebnis als vertrauenswürdiger angaben, begründeten 15 ihre Auswahl mit der niedrigeren Spannweite von Lisas Messwerten, ein*e Schüler*in begründete ihre Auswahl nicht und ein*e Schüler*in entschied sich für Lisas Messergebnis, da ihr Mittelwert kleiner ist als jener von Martin.

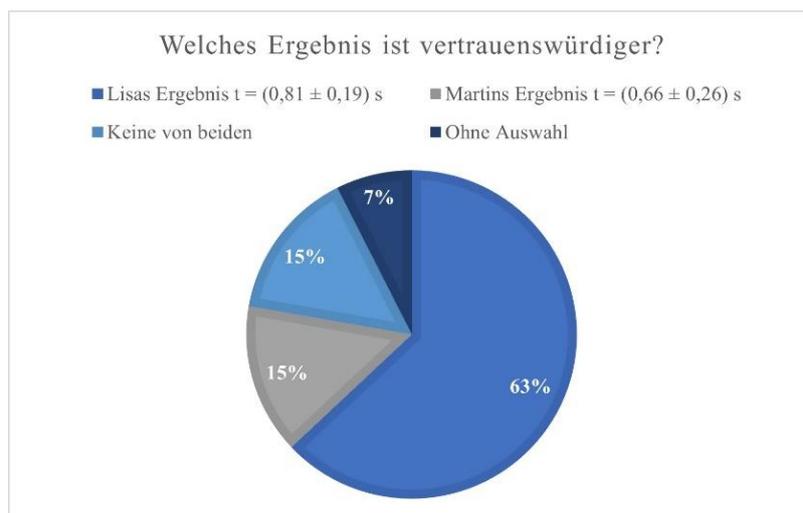


Abbildung 10: Dem Kreisdiagramm kann die Prozentzahl der Schüler*innen pro Antwortmöglichkeit zu Item 3 entnommen werden.

Alle Lernenden, die Martins Ergebnis vertrauenswürdiger beurteilten gaben auch Begründungen für ihre Auswahl an. Zwei von den vier Schüler*innen interpretierten eine größere Spannweite als zuverlässiger. Auch die Aussagen der anderen beiden Schüler*innen zeigten auf, dass sie die Spannweite zur Beurteilung der Messunsicherheit nicht richtig einsetzen konnten: „*Weil er irgendeine Zahl hat, wenn man addiert. Lisa hat genau 100 bei der Addition*“ und „*Weil der Unterschied zwischen 0,66 s und 0,26 s kleiner ist als 0,81 s und 0,19 s.*“

Drei von vier Schüler*innen, die keine der beiden Messungen für vertrauenswürdiger hielten, begründeten ihre Auswahl. Ein*e Schüler*in argumentierte, dass „*die beiden vielleicht nicht die gleiche Höhe benutzt haben*“. Dieser Fall sollte ausgeschlossen werden, da in der Angabe von Item 2 beschrieben wurde, dass beide das Experiment unter denselben Bedingungen durchführten. Dennoch zeigt die Antwort, dass sich der*die Schüler*innen Gedanken über den Einfluss einer weiteren Unsicherheit in Bezug auf die Messung machte. Eine weitere Begründung lautete, dass man „*nicht weiß, von wo bis wo die Spannweite geht*“, der*die Schüler*in reicht die Spannweite und der Mittelwert nicht aus, um eine Aussage über die Vertrauenswürdigkeit zu treffen. In der dritten Aussage wurde begründet, dass „*es immer um ein paar Millisekunden Unterschied gibt*“, eine weitere Erklärung dieser Aussage wäre notwendig, um den Gedankengang der*des Lernenden nachvollziehen zu können.

Fazit

Aus der Betrachtung der Ergebnisse des schriftlichen Tests kann man schließen, dass die Schüler*innen zumindest ansatzweise die Notwendigkeit einer *genauen* Messung verstanden und damit einen Einblick in das Konzept der Messunsicherheiten erhalten haben. Der Großteil der Schüler*innen beurteilte das erste Item tendenziell wenig vertrauenswürdiger und fand sehr gute und unterschiedliche Verbesserungsvorschläge, welche zu einer kleineren Messunsicherheit des Ergebnisses führen könnten. Die Überlegungen konnten vor allem den Kategorien *K-1.1*, *K-2.2.*, *K-2.3* und *K-2.4* zugeordnet werden. Im Hinblick auf eine Verbesserung der Typ A-Unsicherheit (*K-2.2*) wurden vor allem Beispiele genannt, die die Geschicklichkeit der Experimentator*innen ansprach, aber auch die Anfertigung einer Messreihe und Berechnung des Mittelwertes (*K-1.1*). Diese Punkte fallen unter die genannten Key Ideas der geplanten Unterrichtseinheiten, welche es am Ende der Unterrichtseinheiten zu erreichen galt. Oft genannt wurde auch die Zusammenarbeit zur Verbesserung der Versuchsanordnung (*K-2.4*). Mithin am häufigsten wurden *genauere* Messgeräte aufgezählt, womit

auch die Typ B-Unsicherheit abgedeckt und *K-2.3* angesprochen wurde. Beim letzten Item konnte festgestellt werden, dass mehr als die Hälfte die Spannweite als Streuungsmaß für die Messunsicherheit heranziehen und damit die Vertrauenswürdigkeit zweier Messungen einschätzen konnten (*K-1.2* & *K-1.3*). Betrachtet man schlussendlich die gesamten gesammelten Ideen zu den Begründungen und Verbesserungsvorschläge aller Items, so lässt sich mit Recht behaupten, dass der Großteil der Schüler*innen zum Nachdenken über Messunsicherheiten angeregt wurde und diese auch zur Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit herangezogen wurden.

3.2.4 Ergänzungen durch weitere Methoden

In diesem Unterkapitel werden kurz die wichtigsten Ergebnisse aus der Online-Umfrage vorgestellt, ehe die Erkenntnisse aus dem Feedbackgespräch mit der Physiklehrerin, die den Unterrichtsentwurf durchführte, zusammengefasst werden.

Online-Umfrage

Vorab sei erwähnt, dass der Erhebung keine repräsentative Stichprobe zugrunde liegt. Deshalb soll die Zusammensetzung der Stichprobe kurz umrissen werden. Insgesamt nahmen 31 Mathematiklehrkräfte aus Österreich teil, welche zum größten Teil in Wien (20) und Niederösterreich (6) unterrichten. Insgesamt 5 Lehrpersonen gaben an, in Oberösterreich, der Steiermark oder in Vorarlberg tätig zu sein. Die Verteilung der Lehrpersonen auf die verschiedenen Schultypen können Abbildung 11 entnommen werden. Die Mehrzahl der befrag-

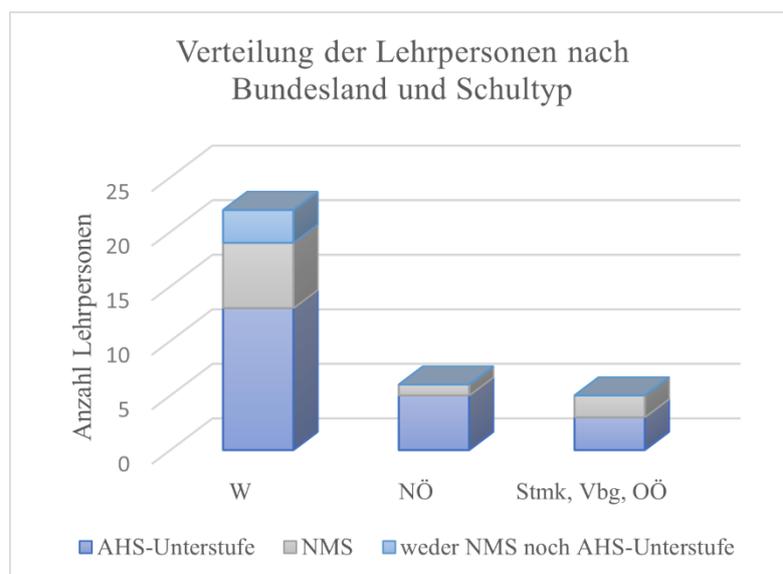


Abbildung 11: In der Grafik ist die Verteilung der Lehrkräfte nach Bundesland und Schulstufe abgebildet. Zwei der Lehrpersonen gaben an, sowohl in einer AHS-Unterstufe als auch in einer anderen Schulform zu unterrichten.

ten Lehrpersonen mit knapp 70 % ist im Schultyp AHS beschäftigt. Neun der befragten Lehrer*innen gaben an, im ersten bis dritten Dienstjahr zu sein. 14 Teilnehmer*innen haben bereits mehr als zehn Dienstjahre hinter sich und die beiden Zwischenkategorien vom vierten bis zum zehnten Dienstjahr wurden zusammengefasst und zählen somit acht Teilnehmer*innen. Weiters interessiert der Anteil an Mathematik-Lehrpersonen, die auch Physik unterrichten. Insgesamt gaben 10 Lehrpersonen diese Fächerkombination an.

Trotz der geringen Teilnehmer*innenzahl an der Umfrage können die Ergebnisse einen groben Einblick auf die unterrichteten statistischen Methoden bis zum Ende der achten Schulstufe sowohl in der AHS als auch NMS geben. Eine detaillierte Übersicht über die im Mathematikunterricht vorgestellten statistischen Kennzahlen kann Abbildung 12 entnommen werden. Alle Lehrpersonen gaben an, den Mittelwert zur Untersuchung von Datenmengen in ihrem Unterricht zu verwenden. Auch die Spannweite wurde von rund 94 % der Lehrpersonen angegeben. Die Standardabweichung hingegen wird nur von ca. 39 % der befragten Lehrer*innen unterrichtet. Die Items 7 bis 9 erhoben spezifischere Daten zur Verwendung der Standardabweichung. Acht Lehrkräfte gaben an, dass sie die Standardabweichung *eigentlich immer*, sechs Lehrkräfte *nur in leistungsstarken Klassen*, sechs Lehrpersonen *nur wenn ausreichend Zeit bleibt* unterrichten. Elf der Befragten kreuzten an, die Standardabweichung *nie* zu lehren. Nur neun der insgesamt 20 Lehrpersonen, die die Standardabweichung zumindest manchmal unterrichten, stellen die Standardabweichung auch im *naturwissenschaftlichen Kontext* vor. Die Spannweite hingegen wird von mehr als $\frac{3}{4}$ der Lehrpersonen immer anhand von vielfältigen Aufgaben unterrichtet.

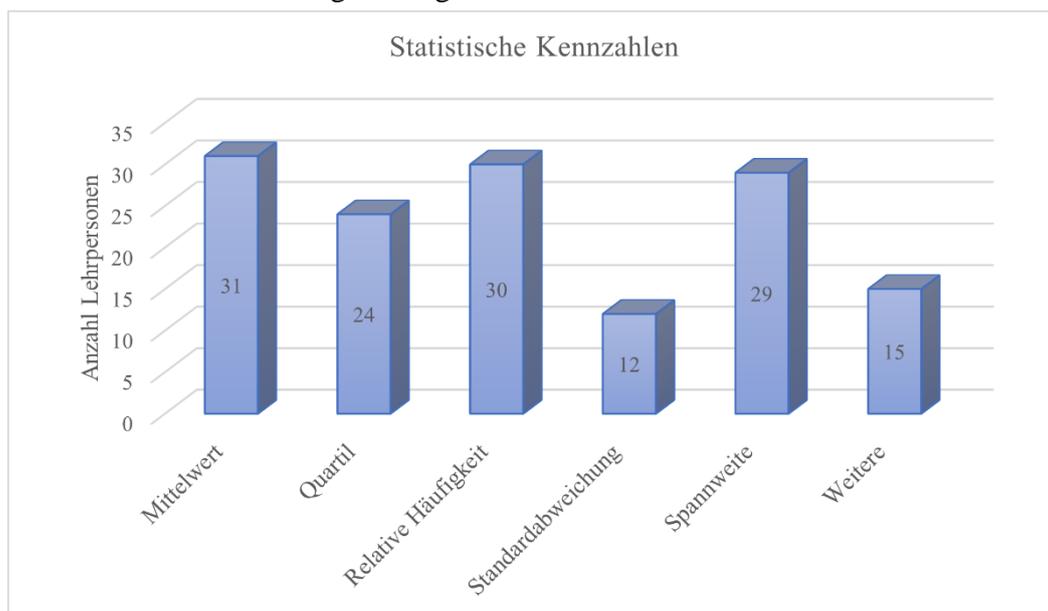


Abbildung 12: Unterrichtete statistische Kennzahlen bis zum Abschluss der 8. Schulstufe (SD = Standardabweichung). Unter „Weitere“ werden am häufigsten der Median und Modus genannt.

Für den Unterrichtsentwurf bestätigt sich damit die Annahme, dass der Mittelwert und die Spannweite zumindest für eine 8. Schulstufe durchaus vorausgesetzt werden können. Die Standardabweichung kann in leistungsstärkeren Klassen anstelle der Spannweite oder auch für einzelne Schüler*innen im Zuge des Arbeitsblattes Messunsicherheiten für Fortgeschrittene eingesetzt werden. Einen Vorteil haben Lehrpersonen, die eine Klasse sowohl im Fach Physik als auch im Fach Mathematik unterrichten und dadurch fächerübergreifend eine vertiefte Datenauswertung durchführen können. Eine Absprache zwischen Mathe- und Physik-lehrer*in ist selbstverständlich empfehlenswert.

Feedbackgespräch mit der Physiklehrerin

Das Feedbackgespräch fand ein Monat nach der Testung im Unterricht via Zoom statt. Alle besprochenen Punkte wurden während des Gespräches mitnotiert und interessante Stellen als Zitate festgehalten. Zunächst beschrieb die Physiklehrerin ihre Beobachtungen, ehe offene Fragen vonseiten der Verfasserin bzgl. der Auswertung von Unterrichtssequenzen geklärt wurden.

Das Experiment erfordert aus Sicht der Lehrperson einen großen Aufwand in der Vorbereitung, was im Schulalltag unpraktisch erscheint. Auch das Hantieren mit Wasser in der Klasse könnte ein Hindernis für die tatsächliche Durchführung des Unterrichtsentwurfes darstellen. In Bezug auf die Gestaltung der Arbeitsmaterialien zeigte sich die Lehrperson begeistert, die Aufgabenstellungen sind verständlich formuliert und abwechslungsreich. Außerdem zeigten sich die Schüler*innen motiviert und kreativ bei der Bearbeitung der Aufgaben.

Leider werden in den beiden Unterrichtseinheiten viele neue Begriffe eingeführt, die zudem ähnlich klingen und mit demselben Wortanfang beginnen (*Mess-...*). Dieser Umstand erscheint der Lehrerin aus sprachdidaktischer Sicht problematisch. In diesem Zusammenhang wurde auch der Lückentext genannt, welcher für die Schüler*innen (vermutlich aufgrund der Ähnlichkeit der Begriffe) schwierig war.

Sehr positiv hervorgehoben wurde, dass die getestete Klasse kaum Vorerfahrung in Bezug auf „Messen“ bzw. der „nature of science“ mitbrachte und einen sehr traditionellen Physikunterricht gewohnt ist. Durch das Unterrichtskonzept konnten die Schüler*innen u. a. anhand von Messungen in Verbindung mit Experimenten neue Einführungen und Herangehensweisen lernen, die in einem naturwissenschaftlichen Unterricht wichtig sind.

Zuletzt kam die Lehrperson auf die mathematischen Kenntnisse hinter dem Konzept zu sprechen, welche für eine vierte Klasse auf jeden Fall vorausgesetzt werden kann. Vorteilhaft wäre es auch aus Sicht der Lehrerin, wenn eine gute Kommunikation mit dem*der Mathematiklehrer*in vorhanden ist. In diesem Zusammenhang erklärte sie außerdem, dass das Arbeitsblatt *Messunsicherheiten für Fortgeschrittene* nicht ausgeteilt wurde, da die Klasse die Standardabweichung erst gegen Ende desselben Schuljahres erlernen würde. Auf Nachfrage bestätigte die Physiklehrerin auch, dass das Unterrichtskonzept bereits in der zweiten oder dritten Klasse der Sekundarstufe I durchgeführt werden könne.

Zusammenfassend beschreibt die Lehrperson, dass der Unterrichtsentwurf auf einer innovativen und guten Idee fußt, welcher auch einen wichtigen Beitrag in Bezug auf die Kompetenzen im naturwissenschaftlichen Unterricht leistet. Der Lückentext sollte noch leicht verändert werden und eine Bezugnahme auf die Umgangssprache (z. B. „*Wie genau ist deine Messung*“ bei der Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit) erschien der Lehrperson als eine gute Lösung, um die sprachlichen Hürden zu überwinden. Aus mathematischer Sicht ist die Spannweite ein guter Weg für die Diskussion der Streuung bzw. Unsicherheit einer Messung. Die Standardabweichung empfiehlt die Lehrperson mit Zweifach Mathematik maximal in Klassen mit sehr hohem Leistungsniveau oder ab der Sekundarstufe II in den Physikunterricht zur Auswertung der Daten miteinzubeziehen.

3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Von den ersten Ideen bis zum tatsächlichen Entwurf des Unterrichtskonzeptes zum Umgang mit Messunsicherheiten im Physikunterricht für die Sekundarstufe I sind die Unterrichtsmaterialien in mehreren Schritten überarbeitet worden. Das zugrundeliegende Experiment wurde zunächst in Akzeptanzbefragungen erprobt, ehe es von einer gesamten Schulklasse im Rahmen ihres Physikunterrichts durchgeführt wurde. Die zugehörigen Arbeitsblätter wurden zunächst durch den Betreuer dieser Arbeit und Lehrpersonen reviewed und anschließend ebenfalls in den Akzeptanzbefragungen und im Unterricht erprobt. Die Akzeptanzbefragungen stellten einen wichtigen Schritt bei einer ersten Überarbeitung der Arbeitsblätter und zur Generierung von Ideen zu vertiefenden Beispielen dar. Weiters zeigten sie Hürden, Fehlvorstellungen und Verständnisschwierigkeiten auf, die beim Experimentieren und Auswerten auftreten können.

Die Ergebnisse der Unterrichtsbeobachtung machen deutlich, dass die gestellten Aufgaben eine tiefere Auseinandersetzung mit dem Thema Messunsicherheiten bezwecken.

Das Auffinden von Handlungsstrategien und Denkprozessen bei der Bearbeitung der Unterrichtsmaterialien bestätigt diese Behauptung. In den vorangehenden Unterkapiteln wurden Beobachtungen und Aussagen den vorab aufgestellten sowie bei der Auswertung entstandenen Unterkategorien zugeordnet. Betrachtet man die Definition der einzelnen Unterkategorien, so kann man die gestellten Ziele in Kapitel 2.5 zum größten Teil als erreicht betrachten. Die Schüler*innen konnten den Mittelwert einer Messreihe bilden und die Spannweite als Streuungsmaß berechnen. Dies wird durch die Zuordnung von Aussagen zu *K-1.1 Messreihe anfertigen und Mittelwert bilden* und *K-1.2 Spannweite berechnen* sowie anhand der Ergebnisse auf den eingesammelten Arbeitsblättern am Ende der Einheiten sichtbar. Durch den Vergleich verschiedener Mittelwerte und Spannweiten konnten sie die Vertrauenswürdigkeit verschiedener Messergebnisse, einerseits bei den Messungen der eigenen Klasse und andererseits bei fiktiven Beispielen am Arbeitsblatt, einschätzen. Beobachtungen passend zu diesem Ziel wurden der Kategorie *K-1.3 Vertrauenswürdigkeit beurteilen* und *K-2.1 Unsicherheiten diskutieren* zugeordnet. Während des Experimentierens und bei Überlegungen zur *genaueren* Durchführung desgleichen wurden verschiedene Quellen für Unsicherheiten aufgezählt und diese Überlegungen auch bei der Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit ihrer Messungen miteinbezogen. Die aufgefundenen Kategorien *K-1.4 Ausprobieren* sowie *K-2.4 Verbesserung der Versuchsanordnung* verdeutlichen die Kreativität der Schüler*innen im Umgang mit Messunsicherheiten in Bezug auf das Experimentieren. Abschnitte aus Schülergesprächen konnten weiters den Kategorien *K-2.2 Streuung von Messwerten (Typ A-Unsicherheit)* und *K-2.3 Genauigkeit des Messgeräts (Typ B-Unsicherheit)* zugeordnet werden. Einzig das erste Ziel „*Erklären, warum eine Messung immer eine gewisse Unsicherheit hat*“ kann nicht durch Aussagen oder konkrete Beobachtungen als erreicht eingestuft werden. Einerseits gab es keine Aufgabenstellung, die eine Antwort auf dieses Ziel erfragt hätte und andererseits war in den Plenumsphasen kein Raum für die Diskussion dieses Ziels gegeben. Die vielfältigen Beobachtungen, vor allem zu den Überlegungen von Ursachen und Quellen von Unsicherheiten, deuten jedoch auf potenziell richtige Erklärungsversuche der Schüler*innen auch auf diese konkretere Fragestellung hin. Auf Grund der vielseitigen aufgefundenen Kategorien wird behauptet, dass das erste Unterrichtsziel als indirekt erreicht gilt. Einige Handlungen oder Aussagen entsprachen auch der dritten Kategorie *K-3 Keine Zielerreichung*, die sich jedoch in geringem Ausmaß hielten und somit dem Erfolg des Unterrichtskonzeptes insgesamt nicht entgegenstehen.

Die schriftlichen Tests nach den Unterrichtseinheiten konnten abermals zeigen, dass die Schüler*innen Überlegungen anstellten, die auf einer vertieften Auseinandersetzung mit Messunsicherheiten hindeuten. Ein Pre-Test würde die aufgestellte Behauptung verstärkt unterstützen, welcher jedoch, bedingt durch den Bedarf einer raschen Testung des Unterrichtsentwurfs, nicht erhoben wurde. Mit dem Test wurden vor allem die Kategorien *K-2.4 Verbesserung der Versuchsanordnung*, *K-2.3 Genauigkeit des Messgeräts*, *K-2.2 Streuung von Messwerten* und *K-1.3 Vertrauenswürdigkeit beurteilen* angesprochen. Die Schüler*innen konnten verschiedene Quellen für Messunsicherheiten erahnen und Verbesserungsvorschläge für den fiktiven Versuch aufzählen. In diesem Zusammenhang wurden nicht nur Typ B-Unsicherheiten, sondern durch den Vorschlag der Anfertigung einer Messreihe und Bildung des Mittelwerts auch Typ A-Unsicherheiten berücksichtigt. Die Mehrzahl der Klasse konnte die Vertrauenswürdigkeit der Messungen begründet einschätzen und nahm dafür die Spannweite zu entsprechenden Messergebnissen und Mittelwerten zu Hilfe (*K-1.3*).

Die Spannweite und die Berechnung des Mittelwerts zur Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit einer Messung im Rahmen des Physikunterrichts scheinen angemessen zu sein, wie aus der Online-Umfrage der Mathematik-Lehrkräfte hervorgeht. Obwohl der Umfrage leider keine repräsentative Stichprobe zugrunde liegt, geben die Ergebnisse einen groben Überblick über die hauptsächlich unterrichteten statistischen Kennzahlen bis zur achten Schulstufe. Es zeigte sich, dass alle Lehrpersonen den Mittelwert und der Großteil der Lehrpersonen die Spannweite im Fach Mathematik unterrichten. Da die Spannweite einfach zu ermitteln und ein gut ersichtliches Merkmal für die Streuung der Messergebnisse am Zahlenstrahl ist, kann sie in der Sekundarstufe I als Ersatz für die Standardabweichung eingesetzt werden. Die Standardabweichung wurde nur von einem Viertel der Lehrpersonen als Streuungsmaß, das in jeder ihrer Klasse unterrichtet wird, angegeben. 39 % der Lehrpersonen berichteten, die Standardabweichung nur in leistungsstarken Klassen oder nur wenn Zeit bleibt, zu unterrichten.

Im Feedback-Gespräch mit der Lehrperson konnten Schwierigkeiten bei der Durchführung (z. B. Lückentext) der Unterrichtseinheiten besprochen und zur Überarbeitung der Unterrichtsmaterialien einbezogen werden. Prinzipiell wurde das Experiment als geeignet und die Aufgabenstellungen als verständlich und abwechslungsreich eingestuft. Nachteilig stellt sich der Arbeitsaufwand für die erste Einheit des Unterrichtskonzeptes heraus. Dennoch können aus Sicht der Lehrperson wichtige Kompetenzen im Hinblick auf die naturwissenschaftliche Herangehensweise an Experimente und deren Auswertung erworben werden.

Im Rahmen dieser Masterarbeit konnte ein Unterrichtskonzept zum Thema Messunsicherheiten anhand eines Experiments erstellt werden, das in drei Zyklen mit verschiedenen Evaluationsmethoden (Akzeptanzbefragungen, Unterrichtsbeobachtungen, schriftlichen Tests und Online-Umfrage) kritisch betrachtet und anhand der Untersuchungsergebnisse überarbeitet wurde. Neue Erkenntnisse zum Umgang mit Messunsicherheiten in der Sekundarstufe I konnten gefunden und eingearbeitet sowie für die Entwicklung von weiteren Unterrichtseinheiten zur Verfügung gestellt werden. Das finale Unterrichtskonzept, vorgestellt im nächsten Kapitel, kann von Physiklehrkräften übernommen und im eigenen Unterricht eingesetzt werden.

4 Vorstellung des Unterrichtskonzepts

Der Unterrichtsentwurf wurde für die Sekundarstufe I entworfen, kann aber durchaus auch zu Beginn der Sekundarstufe II als einführende Einheit in das wissenschaftliche Arbeiten (z. B. im Zuge eines Laborunterrichts) eingesetzt werden. Es umfasst zwei Unterrichtsstunden, die gleichzeitig als zwei Phasen gesehen werden können, siehe auch Tabelle 2.

Tabelle 2: Übergeordnete und vertiefte Lernziele in den beiden Unterrichtseinheiten zum Thema Messunsicherheiten. Die Key Ideas sollen die Learning-Outcomes am Ende konkret verbalisieren.

	Übergeordnetes Ziel	Vertiefende Lernziele	Key Ideas
Phase 1 (Einheit 1)	Thematisieren der Vertrauenswürdigkeit einer Messung (Einführung in das Konzept Messunsicherheiten)	<ul style="list-style-type: none"> • Erklären können, warum eine Messung immer eine gewisse Unsicherheit hat. • Die Vertrauenswürdigkeit verschiedener Messergebnisse einschätzen und vergleichen können. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Die einzelnen Messungen einer Messreihe sind meistens nicht ident. ✓ Der Mittelwert einer Messreihe ist der Wert, der dem wahren Wert am nächsten kommt. Je mehr Messungen man macht, desto näher kommt der Mittelwert an den wahren Wert heran.
Phase 2 (Einheit 2)	Festigen der Erkenntnisse und Ergebnissicherung	<ul style="list-style-type: none"> • Ein Ergebnis vollständig (Mittelwert + Streuung) angeben können. • Verschiedene Quellen für Unsicherheiten aufzählen und sie bei der Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit miteinbeziehen können. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Je kleiner die Spannweite einer Messreihe, desto vertrauenswürdiger ist das Ergebnis. Man sagt dann: „Die Messung hat eine kleine Messunsicherheit.“ ✓ Unsicherheiten einer Messung haben verschiedene Ursachen: <ul style="list-style-type: none"> • zufällig unterschiedliche Messergebnisse • Genauigkeit des Messgerätes

In der ersten Phase sollen die Schüler*innen anhand eines Experiments, welches in Form von Gruppenarbeiten durchgeführt wird, auf die Vertrauenswürdigkeit ihrer Messung hingeführt werden. Dadurch sollen erste Überlegungen in Richtung eines Konzepts von Messunsicherheiten angestoßen werden. Mittels gezielt gestellter Aufgaben werden die Schüler*innen auf Typ A- und Typ B-Messunsicherheiten und bei leistungstärkeren Klassen auch auf den Fehler einer Messung geführt. In der zweiten Phase wird auf das Experiment zurückgegriffen und dadurch die *Bedeutung* des Mittelwerts und die Notwendigkeit der Angabe einer Messunsicherheit konkret erarbeitet. Bei der Auswertung und mathematischen Lösung der Aufgaben, kann durch geschicktes Eingreifen der Lehrperson, welche über Schwierigkeiten und den Leistungsstand ihrer Schüler*innen Bescheid weiß, der Fokus auf

die *Bedeutung* des Mittelwerts, beispielsweise für den Vergleich verschiedener Messungen, beibehalten werden. Lückentexte zwischendurch sollen das Gelernte festigen und ein Concept Cartoon am Ende der Unterrichtseinheiten eine Anwendung des neuen Wissens ermöglichen.

Die beiden finalen Unterrichtseinheiten sollen in den nächsten beiden Kapiteln näher beleuchtet werden. Alle erstellten Arbeitsblätter können dem Anhang dieser Arbeit entnommen und für die Durchführung der Unterrichtseinheiten in der eigenen Klasse kopiert werden. Die Detailplanung in Rasterform wird ebenfalls zur Verfügung gestellt.

4.1 Einstieg in die Thematik der Messunsicherheiten

In der Vorbereitung für die erste Unterrichtsstunde müssen von der Lehrperson die notwendigen Unterrichtsmaterialien vorbereitet werden. Auf einem großen Poster (z. B. Flipchart-Papier) wird ein Zahlenstrahl, siehe Abbildung 15, gezeichnet und dieses verdeckt im Klassenzimmer oder in einer angrenzenden Physiksammlung aufgehängt. Pro Gruppe wird ein Gefäß, bereits gefüllt mit 500 ml Wasser, ein extra Behälter für abgeschöpftes Wasser sowie ein kleiner Messbecher auf den Arbeitstischen benötigt, siehe dazu auch Abbildung 13.



Abbildung 13: Plastikgefäß mit 500 ml Wasser und kleinem Messbecher als Versuchsaufbau für jede Schülergruppe.

Pro Schüler*in wird außerdem eine Kopie des Arbeitsblatts Messunsicherheiten – Experiment benötigt. Weiters müssen die Hinweiskärtchen von der Lehrperson ausgedruckt und am Lehrertisch bereitgestellt werden (ca. 3 Stück pro Kärtchen). Die Hinweiskärtchen können selbstständig von den Schüler*innen eingesetzt werden, wenn sie bei einer Aufgabenstellung nicht weiter wissen.

Zu Stundenbeginn erklärt die Lehrperson kurz das zu bearbeitende Experiment, sodass ab dem Zeitpunkt der Gruppenarbeiten möglichst alle Fragen geklärt sind und die Schüler*innen eigenständig arbeiten können. Ziel des Experiments ist es, die Menge des Wassers im Plastikbehälter zu bestimmen. Durch Abschöpfen und Ablesen der Wassermenge im Messbecher fertigen die Schüler*innen eine Messreihe an. Die einzige Bedingung für die Durchführung ist, dass das Plastikgefäß nicht über die Tischkante gekippt werden darf und mit mindestens einer Ecke den Tisch berühren muss. Nachdem das Wasser aus dem ursprünglichen Behälter geschöpft wurde, soll die Menge an Wasser berechnet werden. Anschließend bewerten die Schüler*innen auf einer Skala am Arbeitsblatt, einzeln oder in der Kleingruppe, wie vertrauenswürdig ihre Messung ist, siehe Abbildung 14. Die nächsten beiden Aufgaben führen die Schüler*innen auf die Messunsicherheit des Messbechers, ehe das Ergebnis der Wassermenge der Gruppe auf dem präparierten Zahlenstrahl-Poster eingezeichnet wird. Die unterschiedlichen Ergebnisse am Zahlenstrahl sollen die Lernenden zum Nachdenken über verschiedene Ursachen für die variierenden Ergebnisse anregen und damit auf Quellen für Unsicherheiten der Messung hinführen. Abschließend verknüpft ein „Je-Desto Satz“ die Vertrauenswürdigkeit einer Messung mit dem Begriff *Messunsicherheit*. Besonders schnelle Schüler*innen können als Zusatzaufgabe auch die Menge an übrig gebliebenem Wasser abschätzen (= Messfehler), die Bedeutung des gemachten Fehlers diskutieren und überlegen, wie man ihn am Zahlenstrahl korrigieren könnte (Skala wird durch den geschätzten Fehler verbessert).

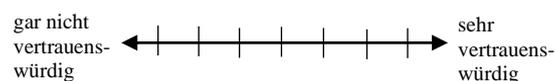


Abbildung 14: Skala zur Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit einer Messung.

Nach Beendigung der Einzelarbeiten und wenn alle Gruppen ihre Ergebnisse am Zahlenstrahl eingezeichnet haben, werden im Plenum Überlegungen zum Experiment und zur Auswertung angestellt. Dazu wird der Zahlenstrahl am Poster nun mit der Klasse besprochen und der wahrscheinlich wahre Wert diskutiert. An dieser Stelle wird den Lernenden außerdem verraten, dass sich am Anfang des Experiments die ‚exakt‘ gleiche Menge an Wasser in den Gefäßen jeder Gruppe befand. Optimalerweise führen die Überlegungen auf den geschätzten Mittelwert der Ergebnisse, welcher am Zahlenstrahl mit einem Farbstift markiert werden soll. Im Zuge dessen wird außerdem eine Glockenkurve von der Lehrperson eingezeichnet, siehe Abbildung 15.

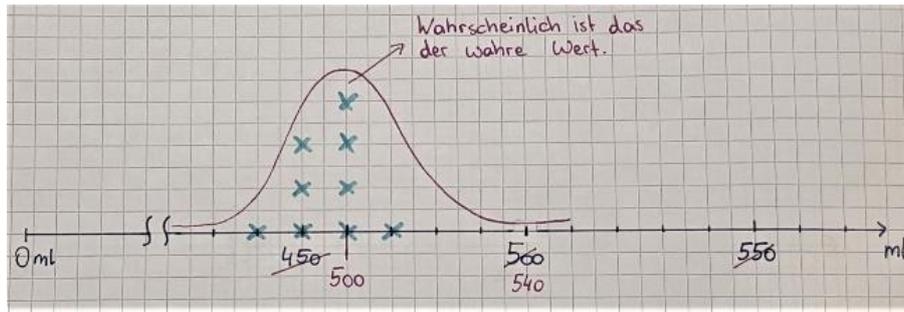


Abbildung 15: Zahlenstrahl mit beispielhaften Ergebnissen. Der wahre Wert liegt wahrscheinlich in der Mitte der Glockenkurve. Der Fehler der Messung wurde auf der Skala korrigiert.

Für das Unterrichtsgespräch im Plenum können die folgenden Leitfragen herangezogen werden:

- Warum haben wir nun X unterschiedliche Ergebnisse?
- Wer hat recht? Haben alle recht? Hat keiner recht?
- Welcher Wert ist wahrscheinlich der wahre Wert?

Sollte auch der Fehler von einigen Gruppen thematisiert worden sein, so könnten die nachfolgenden Leitfragen auch diesen aufgreifen:

- Hat eine Gruppe einen Fehler bei der Messung entdeckt?
- Ist einer Gruppe Wasser im Gefäß übriggeblieben?
- Wie könnte man den gemachten Fehler korrigieren?

Eine Kopie des Posters mit den Messergebnissen aller Gruppen, dem eingezeichneten Mittelwert und ggf. Fehler stellt in der nächsten Einheit die Basis für die weiteren Aufgaben dar.

4.2 Arbeiten mit Messunsicherheiten

Die zweite Einheit knüpft direkt an die Messergebnisse und den Zahlenstrahl der letzten Stunde an. Eine kurze Wiederholung des eingezeichneten wahrscheinlich wahren Wertes leitet auf die Berechnung des Mittelwerts aller erhaltenen Ergebnisse über. Je nachdem in welcher Schulstufe und wie leistungsstark die Klasse ist, kann der Mittelwert gemeinsam oder in Kleingruppen errechnet und verglichen werden. Dieser nun mathematisch bestimmte Mittelwert wird anschließend ebenfalls auf der Kopie des Zahlenstrahls am Arbeitsblatt eingezeichnet. Man erkennt, dass die Messergebnisse der Gruppen um den Mittelwert streuen und gleichzeitig der Mittelwert dem wahrscheinlich wahren Wert am nächsten kommt. Der Vergleich des eigenen Ergebnisses in der Gruppe mit dem berechneten Mittelwert der Klasse stößt Überlegungen zur Vertrauenswürdigkeit der eigenen Messung an. Bevor die Typ A-

Messunsicherheit in die Überlegungen miteinbezogen wird, soll noch einmal die Messunsicherheit des Messgeräts in einem Item wiederholt werden.

Die nächste Aufgabe erklärt die Spannweite anhand einer Abbildung am Arbeitsblatt. Mithilfe der Erklärung sollen die Schüler*innen selbstständig die Spannweite aller Messergebnisse der Klasse ermitteln. Darauf folgend soll ein Item die Spannweite mit der Messunsicherheit bzw. Vertrauenswürdigkeit einer Messreihe verknüpfen. Die Lernenden überlegen hierbei, ob eine kleinere Spannweite zu einer größeren oder kleineren Messunsicherheit führt. Das letzte Beispiel dieses Arbeitsblattes zeigt die Ergebnisse, also die Mittelwerte, die Typ A- und die Typ B-Messunsicherheit dreier anderer Klassen, die das gleiche Experiment durchgeführt haben. Zu ergänzen sind der Mittelwert, die Messunsicherheit des Messgeräts und der Messreihe der eigenen Klasse. Die Schüler*innen betrachten die Ergebnisse und Messunsicherheiten, ordnen anschließend die Messungen der Klassen nach ihrer Messunsicherheit und bestimmen diejenige Klasse, die das vertrauenswürdigste Ergebnis hat. Durch dieses letzte Beispiel soll den Schüler*innen bewusst werden, dass nur die Angabe von Messunsicherheiten einen fundierten Vergleich von Messergebnissen verschiedener Forschungsgruppen zulässt. Die bloße Angabe eines Mittelwerts sagt noch nichts über die Vertrauenswürdigkeit einer Messung aus und ist damit im wissenschaftlichen Sinne unbrauchbar. In einem Merkkästchen am Ende des Arbeitsblattes wird festgehalten, dass das Ergebnis einer Messung daher immer einen Messwert bzw. Mittelwert und eine Messunsicherheit beinhaltet.

Nachdem der beidseitig bedruckte Arbeitszettel durchgearbeitet wurde, können sich die Schüler*innen einen Lückentext zur Selbstkontrolle abholen. Dieser fasst die Key Ideas der Stunde zusammen und soll einerseits der Wiederholung dienen und andererseits das Verständnis einzelner Punkte vom vorherigen Arbeitsblatt überprüfen. Es empfiehlt sich, den Lückentext und evtl. ausgewählte Aufgaben vom Arbeitsblatt im Plenum zu vergleichen, bevor der ausgeteilte Concept Cartoon die Unterrichtseinheiten abschließt. Im Concept Cartoon stehen sich je zwei Schüler*innen gegenüber und treffen Aussagen über die Vertrauenswürdigkeit ihrer Messung. Dabei nehmen sie Bezug auf die verschiedenen Typen von Messunsicherheiten. Die Lernenden wiederum sollen beurteilen, welche der gegenübergestellten Schüler*innen das vertrauenswürdigere Messergebnis haben und ihre getroffene Auswahl mithilfe des neuen Wissens begründen.

4.3 Unterrichtsmaterialien

Auf den nachfolgenden Seiten werden alle erstellten Unterrichtsmaterialien für Physiklehrkräfte zur Verfügung gestellt.

- A) Messunsicherheiten – Experiment (1. Einheit)
- B) Messunsicherheiten (2. Einheit)
- C) Erkenntnisse zum Thema Messunsicherheiten (Lückentext)
- D) Messunsicherheiten für Fortgeschrittene (Zusatzaufgabe für leistungsstarke Klassen/Schüler*innen)
- E) Vertrauenswürdigkeit von Messungen (Concept Cartoon)
- F) Hinweiskärtchen zum Ausschneiden und Aneinanderkleben
- G) Detailplanung 1. Einheit
- H) Detailplanung 2. Einheit

Name: _____

Messunsicherheiten - Experiment

- 1) Auf eurem Tisch findet ihr einen Behälter mit Wasser. Eure Aufgabe ist es zu messen, wie viel Wasser sich darin befindet. Verwendet dazu den nebenstehenden kleinen Messbecher, indem ihr nach und nach Wasser aus dem Behälter schöpft. Auf der Skala des Messbechers könnt ihr ablesen, wie viel Wasser ihr erwischt habt. Notiert jeden einzelnen Wert in der untenstehenden Tabelle, um zum Schluss alle Werte für euer Ergebnis zu addieren.

Bedingungen:

- Der Behälter muss immer mit zumindest einem Punkt den Tisch berühren!
- Der Behälter darf nicht über die Tischkante gekippt werden!
- Abgeschöpftes Wasser darf nicht zurückgeschüttet werden!

Hinweis: Falls ihr in der Gruppe nicht mehr weiterwisst, könnt ihr vom Lehrertisch Hinweiskärtchen ausborgen.

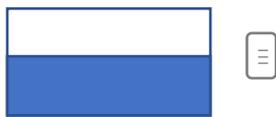


Abbildung 1: Skizze des Experiments.

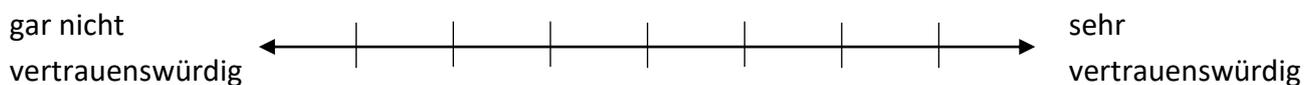
Messreihe:

1	ml	11	ml
2	ml	12	ml
3	ml	13	ml
4	ml	14	ml
5	ml	15	ml
6	ml	16	ml
7	ml	17	ml
8	ml	18	ml
9	ml	19	ml
10	ml	20	ml

Es befanden sich _____ ml Wasser im Behälter.

Übriggebliebenes Wasser: ca. _____ ml

- 2) Wie vertrauenswürdig, glaubst du, ist eure Messung?



Die Messunsicherheit einer Größe wird in der Physik mit einem Δ „delta“ abgekürzt.

3) Wie groß ist die kleinste Menge, die ihr am Messbecher noch ablesen könnt? _____ml

4) Wie groß ist daher die **Messunsicherheit des Messbechers**?

Überlege zur Beantwortung dieser Frage, was der maximale Wert ist, um den du nach oben oder unten runden kannst.

$$\Delta V = \text{_____} ml$$

5) Zeichnet euer Ergebnis (in ml) auf dem Zahlenstrahl am vorbereiteten Poster bei der Lehrkraft ein. **Vergleicht** dann euren Messwert mit den Messwerten der anderen Gruppen.

6) Welche **Messunsicherheiten** könnten dazu beigetragen haben, dass die Messwerte der verschiedenen Gruppen **auf dem Zahlenstrahl verstreut** sind?

- _____
- _____
- _____

7) Wie wirken sich Messunsicherheiten auf die Vertrauenswürdigkeit einer Messung aus?

Je _____ die Messunsicherheit, desto höher ist die Vertrauenswürdigkeit einer Messung.

größer

kleiner

**) Zusatzaufgabe: Deiner Gruppe ist Wasser im Behälter übriggeblieben, das ihr unter der genannten Bedingung nicht mehr abschöpfen könntet.*

Geschätzter Fehler: _____ml

Was könnte dies für die Messwerte am Zahlenstrahl bedeuten?

Name: _____

Messunsicherheiten



Diese Werte wurden in der Klasse ermittelt:

1	ml
2	ml
3	ml
4	ml
5	ml

6	ml
7	ml
8	ml
9	ml
10	ml

11	ml
12	ml
13	ml
14	ml
15	ml

Ursprünglich wurde in jeden Behälter die gleiche Menge an Wasser (500ml) von deiner Lehrkraft eingefüllt. Messunsicherheit des verwendeten Messgeräts: $\pm 1\text{ml}$

- 1) Der **Mittelwert** einer Messreihe kommt dem **wahren Wert** einer Größe am nächsten. Daher berechnen wir den Mittelwert der Messwerte aller Gruppen.
Der errechnete **Mittelwert** des Volumens = _____ ml.
- 2) Vergleiche deinen Messwert mit dem berechneten Mittelwert. Zeichne dazu den Mittelwert am Zahlenstrahl ein.
Wie viele ml liegt dein Messwert vom Mittelwert entfernt? _____ ml
- 3) Überlege, welcher Hinweis für die **Messunsicherheit einer einzelnen Messung** mit dem Messbecher herangezogen werden könnte!
 - a. Wie groß war die Messunsicherheit deines Messwertes?
 - $\pm 1\text{ml}$, weil der Abstand zwischen zwei Strichen 2ml groß war.
 - $\pm 5\text{ml}$, weil der Abstand zwischen zwei Strichen 10ml groß war.
 - $\pm 10\text{ml}$, weil der Abstand zwischen zwei Strichen 100ml groß war.

- 4) Zur Bestimmung der **Messunsicherheit der Messreihe** ziehen wir als einfachste Methode die **Spannweite** heran. Die Spannweite beinhaltet die Messwerte aller Gruppen und wird aus der **Differenz des größten und kleinsten Wertes** einer Messreihe berechnet. Schau dir dazu die untere beispielhafte Abbildung 1 an. Berechne die Spannweite der Messreihe eurer Klasse!

Die Spannweite des Volumens = _____ ml.

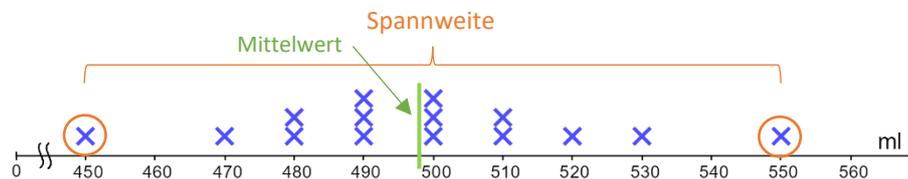


Abbildung 1: Zahlenstrahl mit ausgedachten Werten.

- 5) Schau dir noch einmal den Zahlenstrahl aus Abbildung 1 an und stelle dir vor, dass die beiden **eingekreisten Werte nicht** zur Messreihe gehören.
- Wäre die **Spannweite** der Messreihe dann größer oder kleiner?
 - Die Spannweite der Messreihe wäre **größer**.
 - Die Spannweite der Messreihe wäre **kleiner**.
 - Was bedeutet das für die **Vertrauenswürdigkeit** und **Messunsicherheit** der Messreihe?
 - Die Messreihe hat eine kleinere Messunsicherheit und ist somit vertrauenswürdiger.
 - Die Messreihe hat eine größere Messunsicherheit und ist somit weniger vertrauenswürdig.
- 6) Messunsicherheiten ermöglichen es uns, Ergebnisse vergleichen zu können. Stelle dir vor, dass eure Parallelklassen das gleiche Experiment durchgeführt haben. Die Ergebnisse kannst du in der folgenden Tabelle finden:

Klasse	Ergebnis (Mittelwert)	Messunsicherheit d. Messreihe	Messunsicherheit d. Messgeräts
Klasse X	498 ml	100 ml	5 ml
Klasse Y	505 ml	70 ml	5 ml
Klasse Z	505 ml	80 ml	5 ml
Deine Klasse			

- Ordne die Messungen der Klassen nach ihrer Messunsicherheit: _____
- Welche Klasse hatte das vertrauenswürdigste Ergebnis? _____

An diesem Beispiel kannst du erkennen, dass du durch die Angabe von Messunsicherheiten Messergebnisse miteinander vergleichen kannst.

Das Ergebnis einer Messung beinhaltet immer

- einen **Messwert oder Mittelwert** (bei einer Messreihe) und
- eine zugehörige **Messunsicherheit**.



Erkenntnisse zum Thema Messunsicherheiten

Vervollständige den Text und streiche falsche Möglichkeiten (getrennt durch ein „/“) durch.

- ✓ Die einzelnen _____ einer Messreihe sind meistens nicht ident.
- ✓ Der Mittelwert einer Messreihe ist jener besondere Wert, der dem _____ am nächsten kommt.
- ✓ Je mehr/weniger Messungen man macht, desto näher kommt der _____ an den wahren Wert heran.
- ✓ Die Messunsicherheit gibt Auskunft über die _____ einer Messung.
- ✓ Je größer/kleiner die Messunsicherheit ist, desto vertrauenswürdiger ist die Messung.
- ✓ Die Vertrauenswürdigkeit einer Messreihe kann man z. B. mit der _____ angeben.
- ✓ Je größer/kleiner die Spannweite einer Messreihe, desto weniger vertrauenswürdig ist das Ergebnis.
- ✓ Messunsicherheiten haben verschiedene Ursachen:
 - _____ z. B. wegen der Geschicklichkeit der experimentierenden Person (dargestellt durch die _____ einer Messreihe)
 - _____ (ablesbar z. B. an der Skala)
- ✓ Ein wissenschaftliches Ergebnis besteht immer aus einem Messwert oder _____ bei Messreihen und seiner _____ (z. B. Streuung der Messreihe, Unsicherheit des Messgeräts, ...).



Messunsicherheiten für Fortgeschrittene

Aus den einzelnen Werten für das Volumen wurde bereits der **Mittelwert** berechnet. Der Mittelwert einer Größe wird mit einem „ $\bar{}$ “ gekennzeichnet. Man spricht es, im Falle des Volumens zum Beispiel, „**V quer**“ aus.

$$\bar{V} = \underline{\hspace{2cm}} ml$$

☞ Die **einzelnen Messwerte** einer Messreihe **streuen um** diesen **Mittelwert!**

Die Spannweite dient nur als erste Abschätzung für die Messunsicherheit einer Messreihe und ist meist zu groß. Besser geeignet ist die Standardabweichung

☞ Die **Standardabweichung** gibt an, **wie weit die einzelnen Werte einer Messreihe durchschnittlich vom Mittelwert entfernt** sind.

So kannst du die Standardabweichung berechnen:

$$s = \sqrt{\frac{(V_1 - \bar{V})^2 + (V_2 - \bar{V})^2 + (V_3 - \bar{V})^2 + \dots + (V_n - \bar{V})^2}{n}}$$

Das n in der Formel ist die Anzahl der Werte einer Messreihe. Dein **Taschenrechner** hat diese Formel eingespeichert, sodass du nur die Daten eintippen musst. Auch mit einem Computerprogramm (z.B. Excel) lässt sich die Standardabweichung schnell berechnen.

Berechne nun die Standardabweichung mit deinem Taschenrechner.

Die **Standardabweichung** beträgt $s = \underline{\hspace{2cm}} ml$.



Überlege

Das Ergebnis einer Messung beinhaltet immer einen Messwert (bzw. Mittelwert) und eine zugehörige Messunsicherheit.

- a. Welche **Messunsicherheit** war im Falle dieses Experiments größer? Kreuze an:
- Die Messunsicherheit der Messreihe (Standardabweichung) war am größten.
 - Die Messunsicherheit des Messgeräts (Messbecher) war am größten.
- b. Überprüfe, ob sich dein Messwert mit dem Mittelwert **überschneidet**, wenn du...
- ...die Messunsicherheit des Messgeräts dazuzählst oder abziehst.
 - ...die Messunsicherheit der Messreihe dazuzählst oder abziehst.

☞ Beim **Endergebnis** wird in der Wissenschaft immer die **größere** Messunsicherheit angegeben!

Vertrauenswürdigkeit von Messungen

Szene 1: Julian und Marie haben beide das gleiche Experiment durchgeführt und vergleichen nun ihre Ergebnisse. **Diskutiere** mit deiner*deinem Sitznachbar*in, ob Marie oder Julian das vertrauenswürdiger Ergebnis hat. **Begründe** deine Vermutungen!

Marie:

$V = 970 \text{ ml}$
 $\Delta V = \pm 40 \text{ ml}$

Mein Ergebnis ist sehr vertrauenswürdig, denn die Spannweite ΔV meiner Messwerte ist sehr klein.

Mein Ergebnis ist sehr vertrauenswürdig. Ich habe sehr viele Messungen gemacht und daher kommt mein Mittelwert dem wahren Wert sehr nahe.

Julian:

$V = 1010 \text{ ml}$
 $\Delta V = \pm 60 \text{ ml}$

Marie

Julian

Szene 2: Mia und Enya haben beide das gleiche Experiment durchgeführt und vergleichen nun ihre Ergebnisse. **Diskutiere** mit deiner*deinem Sitznachbar*in, wer die vertrauenswürdiger Messung hat. Denke auch darüber nach, ob jemand einen **Fehler** gemacht hat. **Begründe** deine Vermutungen!

Ich habe zwar ein bisschen Wasser verschüttet, aber mein Messbecher hat nur eine Messunsicherheit von $\pm 2,5 \text{ ml}$.

Ich habe sehr ordentlich gemessen und nichts verschüttet. Mein Messbecher hat aber eine Messunsicherheit von $\pm 5 \text{ ml}$.

Mia

Enya

Hinweiskärtchen (Vorder- und Rückseite zum Ausschneiden und Aneinanderkleben)

Hinweis 1

Was ist zu tun, wenn das Wasser zwischen zwei Strichen steht?



Du kannst nur so gut messen, wie es dein Messgerät erlaubt. Daher musst du dich entscheiden, ob sich das Wasser näher bei der oberen oder unteren Linie befindet.

Die größte Unsicherheit deiner Messung ist dann plus oder minus 5ml.

Hinweis 2

Was ist zu tun, wenn zum Schluss noch Wasser im Behälter geblieben ist?

Kann abgeschätzt werden, wie viel Wasser im Behälter übriggeblieben ist?

Wenn ja, wie könntet ihr vorgehen?

Was fällt dir auf, wenn du die Ergebnisse am Zahlenstrahl betrachtest und die abgeschätzte Menge Wasser im Behälter in deine Überlegungen miteinbeziehst?



Detailplanung 1. Einheit		
Zeit	Beschreibung des Ablaufs	Material
20'	<p>1. Vorbereitung des Experiments: pro Arbeitsblatt wird 1 Behälter mit 500 ml Wasser, 1 großer Behälter und 1 Messbecher bereitgestellt</p> <p>2. Das Experiment wird kurz erklärt und auf Hinweiskärtchen verwiesen, falls Schüler*innen nicht mehr weiterwissen.</p> <p>3. Schüler*innen erhalten die Arbeitsblätter und können selbstständig in Kleingruppen zu arbeiten beginnen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • AB Messunsicherheiten - Experiment • Hinweiskärtchen <p><i>Pro Gruppe:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 Gefäß mit 500ml Wasser • 1 leeres Gefäß • 1 Messbecher
10'	<p>4. Sobald eine Gruppe mit den Punkten 1 bis 4 fertig ist, zeichnen die Schüler*innen das Ergebnis ihrer Gruppen am Zahlenstrahl ein (Aufgabe 5). → Lehrperson zeigt den Schüler*innen den vorgefertigten Zahlenstrahl am Poster. (Evtl. in einem anderen Raum/Physiksammlung...)</p> <p>*) Zusatzaufgabe: Besonders schnelle Schüler*innen schätzen übriges Wasser im Behälter ab – Was könnte diese Abschätzung für die Ergebnisse am Zahlenstrahl bedeuten? Evtl. Verweis auf Hinweiskärtchen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Poster mit Zahlenstrahl • Permanentmarker • Hinweiskärtchen 2
20'	<p>5. Alle Messergebnisse sind am Zahlenstrahl eingetragen → Diskussion der Ergebnisse im Plenum:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Was fällt den Schüler*innen bei Betrachtung des Zahlenstrahls mit den verschiedenen Ergebnissen auf? • Welche Punkte sind den Schüler*innen bei Aufgabe 5) eingefallen? • Welche Messunsicherheit hat der Messbecher? <p>6. Lehrperson verrät: Alle Gruppen hatten die gleiche Menge an Wasser in ihren Behältern!</p> <p><i>Mögliche Leitfragen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Warum haben wir nun XY unterschiedliche Ergebnisse? • Wer hat recht? Haben alle recht? Hat keiner recht? • Welcher Wert ist wahrscheinlich der wahre Wert? <p>Optional</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hat eine Gruppe einen Fehler bei der Messung entdeckt? • Bzw. ist einer Gruppe Wasser im Gefäß übriggeblieben? • Wie könnte man den gemachten Fehler korrigieren? <p>Weitere Auffälligkeiten beim Experimentieren:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wurden kreative Lösungen bei der Durchführung gefunden? • Wurden genauere Messwerte, als das Messgerät erlaubt, angegeben? • Vertiefende Fragestellungen: Messunsicherheiten von anderen Messbechern/Messgeräten erfragen, ... <p>7. Gemeinsam wird der Mittelwert am Zahlenstrahl eingezeichnet (je nach Zeit nur der geschätzte oder schon der errechnete Mittelwert).</p>	
Die Arbeitsblätter und das Poster sollen in der nächsten Unterrichtsstunde wieder mitgebracht werden.		

Detailplanung 2. Einheit		
Zeit	Beschreibung des Ablaufs	Material
15'	<p>1. Zusammenfassen aller Messergebnisse und in Tabelle notieren</p> <p>2. Je nach Klasse: Mittelwert selbstständig oder im Plenum berechnen</p> <p>3. Aufgabe 2 Mittelwert am Zahlenstrahl einzeichnen → eine Diskussion des errechneten Mittelwertes und der Abweichungen der einzelnen Messergebnisse wird dringend empfohlen</p> <p><i>Mögliche Leitfragen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Wie weit liegen eure Messergebnisse vom Mittelwert entfernt? • Welche Ursachen könnten die Streuungen haben? • Wie schätzt ihr die Vertrauenswürdigkeit eurer Messergebnisse im Vergleich mit dem Mittelwert ein? • Wie müsste der Zahlenstrahl aussehen, damit ihr euren Ergebnissen mehr vertrauen würdet? • Wie schätzt ihr die Messunsicherheit, also Vertrauenswürdigkeit, eurer Messergebnisse ein? Wieso? 	<ul style="list-style-type: none"> • AB Messunsicherheiten inkl. Foto des Zahlenstrahls der letzten Stunde • Poster an der Tafel zur Diskussion von Aufgabe 2
20'-25'	<p>4. Aufgaben 3-6 werden in Einzel-/Partnerarbeit gelöst (<i>leistungsstarke Schüler*innen</i> erhalten das AB für Fortgeschrittene zur Berechnung der Standardabweichung)</p> <p>5. Wer fertig ist, holt sich den Erkenntniszettel zur Überprüfung des Verständnisses</p> <p>6. Vergleich der Lösungen – je nach Klasse vor oder nach dem Erkenntniszettel</p> <p>7. Schnelle Schüler*innen holen sich den Concept Cartoon als Abschluss</p> <p>8. Alternativ kann der Concept Cartoon im Plenum besprochen werden</p>	<ul style="list-style-type: none"> • AB Messunsicherheiten für Fortgeschrittene • AB Erkenntnisse zum Thema Messunsicherheiten • AB Concept Cartoon
10'-15'	<p>9. <i>Leitfragen für eine abschließende Diskussion im Plenum:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Haben alle Messungen eine Messunsicherheit? <ul style="list-style-type: none"> ○ Wenn ja, woran liegt das? ○ Habt ihr schon mal Messunsicherheiten bei Messungen entdeckt? Wo? • Welche Ursachen können diese Messunsicherheiten haben? • Wozu gibt man Messunsicherheiten überhaupt an? • Warum berechnet man den Mittelwert? Ich könnte ja auch einfach alle Messergebnisse angeben, oder? 	

5 Diskussion und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurde ein Unterrichtskonzept zum Umgang mit Messunsicherheiten entwickelt und mit der Methode des Design-Based Research in mehreren Zyklen überarbeitet. Methoden der empirischen Sozialforschung wie Unterrichtsbeobachtungen und Akzeptanzbefragungen wurden dabei als wesentliche Bestandteile zur Verbesserung der Unterrichtsmaterialien herangezogen. Der finale Unterrichtsentwurf mit- samt Arbeitsblättern und Stundenplanung ist im vorhergehenden Kapitel illustriert. Aus den Unterrichtsbeobachtungen ging hervor, dass eine vertiefte Auseinandersetzung mit Messunsicherheiten durch die Intervention erreicht wurde. Schülergespräche und verschriftlichte Ideen auf den Testbögen zeigten, dass sowohl Arbeitsstrategien als auch Denkprozesse von den Lernenden angewandt und entwickelt wurden, um die Aufgabenstellungen zu lösen. Obwohl die ausgewählte Klasse keine Vorerfahrungen zur wissenschaftlichen Herangehensweise an Experimente mitbrachte (z. B. etwas mehrmals messen, Ergebnisse kritisch betrachten, ...), konnten die geforderten Unterrichtsziele weitestgehend mit den beiden Unterrichtseinheiten erreicht werden.

Dennoch muss festgehalten werden, dass aufgrund der COVID-19 Pandemie Untersuchungen in weiteren Klassen und anderen Schultypen, z. B. in einer achten Schulstufe der NMS, ausgeblieben sind. Die Beobachtungen zum vorgestellten Unterrichtskonzept beruhen daher nur auf einer getesteten Klasse der achten Schulstufe eines Wiener Realgymnasiums. Weiters durfte die Verfasserin dieser Arbeit aufgrund der strengen COVID-19-Maßnahmen im Herbst des Schuljahres 2020/21 nicht an den beiden Unterrichtsstunden zur Testung teilnehmen. Die Ergebnisse beruhen daher auf Video- und Audioaufnahmen sowie den festgehaltenen Notizen des Physiklehrers der Klasse auf einem Beobachtungsleitfaden. Die Stunden selbst wurde von einer erfahrenen Physiklehrerin gehalten, welche bereits die in der Bachelorarbeit beobachteten Unterrichtseinheiten durchführte.

Erkenntnisse und Einsatzmöglichkeiten des Unterrichtsentwurfs

Der Unterrichtsentwurf wurde ursprünglich für eine achte Schulstufe der Sekundarstufe I erstellt. Im Laufe der Testungen und Ausarbeitungen wurde jedoch zunehmend klar, dass die Unterrichtseinheiten bereits ab der sechsten Schulstufe zum Einstieg in das Experimentieren im Fach Physik gehalten werden können. Die zugrundeliegende Mathematik ist im finalen Unterrichtsentwurf absichtlich einfach gewählt, da das Interesse und vor allem aber der Fokus auf die Bedeutung der Messunsicherheiten gelegt werden soll. Die mathematische

Auswertung kann je nach Schulstufe, Schultyp oder Leistungsstärke der Klassen mehr oder weniger durch die Lehrperson begleitet bzw. durch anspruchsvollere Methoden vertieft werden. Sowohl die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes als auch die Spannweite als einfaches Streuungsmaß sollten ab der zweiten Klasse der Sekundarstufe I bewältigbar sein. Wird der Unterrichtsentwurf in einer Sekundarstufe II, beispielsweise zum Einstieg in den Laborunterricht, eingesetzt, so ersetzt man die Spannweite durch die Standardabweichung als Streuungsmaß einer Messung. Zusätzlich empfiehlt es sich, in der Sekundarstufe II computergestützte Software (z. B. Excel) zur Auswertung heranzuziehen.

Idealerweise wiederholen sich die erworbenen Denkprozesse und Handlungsstrategien bei der Durchführung von Experimenten im Physikunterricht. Zur Durchführung eines Experiments sollte die Auswertung auf jeden Fall als wichtiger Aspekt hinzugezogen und Ergebnissen diskutiert werden. Die Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit der (eigenen) Messung kann als Reflexion und zum Anstoß der Denkprozesse genutzt werden und ist besonders in der Unterstufe – unabhängig von der Leistungsstärke einer Klasse – hilfreich. Wird bereits ein Grundstock anhand der vorgestellten Methoden zur Einschätzung von Messergebnissen in der Sekundarstufe I gelegt, kann in höheren Schulstufen darauf aufgebaut und der Umgang mit Messunsicherheiten vertieft werden.

Bei der Einführung von Messunsicherheiten erscheint es praktikabel, die Alltagssprache der Schüler*innen aufzugreifen und sie anknüpfend die Vertrauenswürdigkeit von Messungen, unter Einbeziehung verschiedener Quellen von Messunsicherheiten, zu diskutieren. Bei der Durchführung des vorgeschlagenen Experiments beispielsweise kamen die Lernenden selbstständig auf die Genauigkeit der Messung zu sprechen. Eine gute Moderation durch die Lehrkraft ist förderlich, um die Brücke von *genauem Messen* auf die Messunsicherheit herzustellen. In der Detailplanung der Unterrichtseinheiten wurden Leitfragen vorgestellt, die als Inspiration für Lehrkräfte herangezogen werden können.

Ausblick

Kritisch anzumerken ist, dass sich beim gewählten Experiment vor allem die Typ B-Unsicherheit in den Vordergrund drängt. Die Typ A-Unsicherheit mit der Geschicklichkeit des Experimentierenden wurde zwar ebenfalls häufig angesprochen, dass jedoch die Messwerte einer Messreihe Schwankungen unterliegen, ist mit den erstellten Einheiten weniger im Fokus gestanden. Dieser Umstand gab Anlass für spannende Überlegungen, die im Folgenden kurz diskutiert werden sollen.

Das Experiment stellt den Ausgangspunkt für das Thema Messunsicherheiten im Unterrichtsentwurf dar. Durch die Einfachheit des Experiments ist es für die Sekundarstufe II vermutlich weniger interessant. Für die Sekundarstufe I schien es motivierend zu sein, was u. a. auf den „hands-on“ Charakter des Experiments und dem „*Pritscheln*“ mit Wasser zurückzuführen sein könnte. Das Experiment, das bloß als Ausgangspunkt gesehen werden soll, kann jedoch einfach ausgetauscht werden. Die einzelnen Schritte zum Heranführen an den Umgang mit Messunsicherheiten können als Bausteine betrachtet werden, welche, sinnvoll eingesetzt, zu einer vertieften Auseinandersetzung führen sollen. Mit ein wenig Kreativität können sie auf verschiedenste Schüler- oder auch Demoexperimente angewandt werden. Siehe dazu auch den für Plus Lucis verfassten Artikel im Anhang dieser Arbeit.

Bei der Auswahl anderer Experimente ist zu beachten, dass nicht nur die Typ B-Unsicherheit und die Geschicklichkeit der Experimentierenden im Vordergrund der Diskussionen stehen. Eine Möglichkeit wären Experimente, die mehrmaliges Messen der gleichen Messgröße erfordern. Es könnte z. B. die Reaktionszeit am Computer oder mittels Zollstocks (jemand lässt den Zollstock zufällig über der griffbereiten Hand einer Testperson senkrecht nach unten fallen) mehrmalig gemessen werden. Fächerübergreifend mit dem Fach Bewegung und Sport ergeben sich ähnliche und vielfältige Varianten zur mehrmaligen Messung der Zeit oder der Anzahl an Wiederholungen einer bestimmten Aufgabe. Mittelwert und Standardabweichung (oder Spannweite) können anschließend einfach ermittelt und diskutiert werden. Auch bietet sich beim Vergleich der Streuung ähnlicher Mittelwerte die Möglichkeit, die Aussagekraft und eine *signifikante* Unterscheidung zu diskutieren.

Fazit

Das erarbeitete und vorgestellte Unterrichtskonzept versteht sich als ein erster Weg in Richtung einer wissenschaftlichen Herangehensweise an die Auswertung von Experimenten im Schulunterricht und bildet einen Anreiz für weitere Ideen zur Umsetzung. Aus den Beobachtungen sind Schwierigkeiten im Umgang mit Messunsicherheiten aufgedeckt und Wege zur Überwindung einiger Stolpersteine gefunden worden. Die Aufgabenstellungen bewährten sich in der Durchführung des Unterrichtskonzeptes in einer Schulklasse der Sekundarstufe I eines Wiener Realgymnasiums und können interessierten Physiklehrkräften daher ohne Weiteres für den Einsatz in ihrem Unterricht zur Verfügung gestellt werden. Auch das Herausnehmen einzelner Bausteine, wie z. B. die Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit anhand einer Skala, das Einschätzen der Messunsicherheit eines spezifischen Messgeräts oder

der Vergleich von Messergebnissen verschiedener Klassen anhand des Mittelwertes und der Spannweite als Streuungsmaß, kann empfohlen werden.

Als übergeordnetes Ziel sollen die Überlegungen zu diesem Unterrichtskonzept einen Beitrag dazu leisten, den Schüler*innen das kritische Betrachten und Hinterfragen von (publizierten) Messergebnissen und daraus abgeleiteten Meinungen beizubringen. Das Reflektieren von Einflussgrößen auf eine Messung (unabhängig vom Fach) und die daraus abgeleitete Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit einer Messung kann bereits in der Sekundarstufe I geschult werden. Die Schüler*innen sollen erkennen, dass die Angabe der Unsicherheit einer Messung eine zusätzliche Information über ein Messergebnis darstellt, die eine Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit ermöglicht. Im vorgestellten Unterrichtsentwurf bezieht sich die Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit auf ein rein physikalisches (Schüler-)Experiment, das keine weiteren inhaltlich-physikalischen Ziele verfolgt. Ein tieferer Einblick in naturwissenschaftliche Forschungsergebnisse und die Bedeutung von Messunsicherheiten in diesem Zusammenhang bzw. die Ableitung einer eigenen Meinung aus der Betrachtung von Forschungsergebnissen (im Sinne einer Entwicklung der S-Kompetenz) stellen noch offene Gebiete für weitere fachdidaktische Forschungsarbeiten dar.

Aus den angestellten Überlegungen und den Erkenntnissen dieser Masterarbeit wird deutlich, dass das Thema Messunsicherheiten einen spannenden und andersartigen Zugang zur Durchführung von Experimenten ermöglicht. Auch wird den Schüler*innen ein Einblick in das wissenschaftliche Arbeiten von Physiker*innen oder Naturwissenschaftler*innen im Allgemeinen gewährt. Kompetenzen zur Auswertung und Interpretation können mit dem vorgestellten Unterrichtskonzept oder mit Bausteinen daraus erworben werden. In diesem Sinne leistet der Unterrichtsentwurf einen wichtigen Beitrag zur schulischen Ausbildung, der die Schüler*innen einen ersten Schritt in Richtung eines kritischen Hinterfragens von Ergebnissen und abgeleiteten Meinungen gehen lässt. Schlussendlich eröffnen sich Diskussionsmöglichkeiten im Physikunterricht, wie man das oft als unverständlich „abgestempelte“ und ungeliebte Fach für Schüler*innen lebendig und spannend gestalten kann.

Literaturverzeichnis

- [1] INC-1 (1980) in JCGM 100:2008, S. 30: URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_F.pdf/53384399-1e6d-b598-dd17-2831a6b5b812 (Stand: 10.07.2021)
- [2] Nagel, C. (2017). Auswertung und Dokumentation experimenteller Daten. Der Umgang mit Messunsicherheiten von der Planung eines Experiments bis zur Publikation analysierter Messdaten. [Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung des Autors aus dem Sommersemester 2016]. Universität Wien. URL: https://moodle.univie.ac.at/pluginfile.php/3792555/mod_resource/content/6/Auswertung-Skript.pdf (Stand: 12.08.2021)
- [3] GUM: ISO/IEC Guide 98-3:2008(E): URL: <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications> (Stand: 16.08.2021)
- [4] Bornath, T. & Walter, G. (2020). Messunsicherheiten – Grundlagen: Für das Physikalische Praktikum (essentials) (German Edition) (1., Aufl.). Springer Spektrum.
- [5] Aschauer, W., Kloimböck, C. & Haim, K. (2017). Expedition Physik 3. Praxisteil. (1., Aufl.) Wien: E. Dornier.
- [6] WIKIPEDIA von Toews, M. W. Eigenes Werk, based (in concept) on figure by Jeremy Kemp, on 2005-02-09, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1903871> (Stand: 16.08.2021)
- [7] Wiesner, H., Schecker, H. & Hopf, M. (2018). Physikdidaktik kompakt. (4., Aufl.). Freising: Aulis-Verlag. S. 106 – 114.
- [8] Heinicke, S. (2011). Aus Fehlern wird man klug. Eine genetisch-didaktische Rekonstruktion des „Messfehlers“. (Dissertation). Berlin: Logos Verlag.
- [9] Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. (1984). Lehrpläne der allgemeinbildenden höheren Schulen. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568> (Stand: 11.07.2021)
- [10] BIFIE (Hrsg.). (2011). Kompetenzmodell Naturwissenschaften 8. Schulstufe. URL: <https://www.iqs.gv.at/themen/nationales-monitoring/bildungsstandards/grundlagen-der-bildungsstandards> (Stand: 11.07.2021)
- [11] Haagen-Schützenhöfer, C. (2015). Kumulative Habilitationsschrift mit dem Schwerpunkt Lehr- und Lernprozesse im Anfangsoptikunterricht der Sekundarstufe I. Wien: Universität Wien.
- [12] Wiesner, H. & Wodzinski, R. (1996). Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In: Duit, R., & Pädagogische Hochschule Ludwigsburg. Lernen in den Naturwissenschaften: Beiträge zu einem Workshop an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg (IPN; 151). Kiel.
- [13] Altrichter, H. & Posch, P. (2007). Lehrerinnen und Lehrer erforschen ihren Unterricht: Unterrichtsentwicklung und Unterrichtsevaluation durch Aktionsforschung (4., überarb. u. erw. Aufl.). Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- [14] Lamnek, S. & Krell, C. (2016). Qualitative Sozialforschung: Mit Online-Materialien (6., überarb. Aufl.). Weinheim: Beltz.
- [15] Jakob, N., Schoen, H. & Zerback, T. (2009). Sozialforschung im Internet: Methodologie und Praxis der Online-Befragung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- [16] Maurer, M. & Jandura, O. (2009). Masse statt Klasse? Einige kritische Anmerkungen zu Repräsentativität und Validität von Online-Befragungen. In: Jakob, N., Schoen, H., & Zerback, T. (Hrsg.). Sozialforschung im Internet: Methodologie und Praxis der Online-Befragung. (S. 61 – 73). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.

- [17] Mayring, P. (2016). Einführung in die qualitative Sozialforschung: Eine Anleitung zu qualitativem Denken (6., Aufl.). Weinheim Basel: Beltz.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gauß'sche Glockenkurve mit Angabe der Standardabweichung. 68,3 % der Messwerte befinden sich im Bereich von $\pm 1\sigma$, 95,5 % in einem Vertrauensbereich von $\pm 2\sigma$ und 99,7 % in einem Vertrauensbereich von $\pm 3\sigma$. Entnommen aus: [6].	15
Abbildung 2: Schematisches Modell des Design-Based Research [11, S. 10].	35
Abbildung 3: Die Forschungs- und Entwicklungszyklen werden dreimal durchlaufen. Die drei Zyklen werden anhand der Aufspaltung der Pfeile erkennbar. Die vorliegende Grafik wurde in Anlehnung an das D-BR-Modell aus Abbildung 2 erstellt, mod. n. [10].	40
Abbildung 4: Kategorien zur Auswertung der gesammelten Daten. Mit * versehene Kategorien wurden während der Auswertung ergänzt.	48
Abbildung 5: Scan des ausgefüllten Arbeitsblattes mit der Notiz des Schülers zur wahrscheinlich „richtigsten“ Antwort.	55
Abbildung 6: Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit anhand der bereits bekannten Skala aus der Akzeptanzbefragung.	57
Abbildung 7: Die Messreihe eines Schülers mit genaueren Messwerten, als es der Messbecher zulässt. Auch im Endergebnis erkennt man, dass der Schüler nicht in 10er Schritten abgelesen hatte.	62
Abbildung 8: Der Scan des Arbeitsblattes zeigt die auf die Zehnerstelle richtig angegebenen Messwerte, aber auch den dazugerechneten Fehler zum Endergebnis des Volumens.	63
Abbildung 9: Ankreuzen von Stufe 1 bis 2 wurde zusammengefasst zur Kategorie gar nicht vertrauenswürdig, die Stufen 3-5 fallen unter vertrauenswürdig und Stufe 6-7, sehr vertrauenswürdig, wurde von niemandem zur Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit von Item 1 markiert.	79
Abbildung 10: Dem Kreisdiagramm kann die Prozentzahl der Schüler*innen pro Antwortmöglichkeit zu Item 3 entnommen werden.	81
Abbildung 11: In der Grafik ist die Verteilung der Lehrkräfte nach Bundesland und Schulstufe abgebildet. Zwei der Lehrpersonen gaben an, sowohl in einer AHS-Unterstufe als auch in einer anderen Schulform zu unterrichten.	83
Abbildung 12: Unterrichtete statistische Kennzahlen bis zum Abschluss der 8. Schulstufe (SD = Standardabweichung). Unter „Weitere“ werden am häufigsten der Median und Modus genannt.	84
Abbildung 13: Plastikgefäß mit 500 ml Wasser und kleinem Messbecher als Versuchsaufbau für jede Schülergruppe.	91
Abbildung 14: Skala zur Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit einer Messung.	92
Abbildung 15: Zahlenstrahl mit beispielhaften Ergebnissen. Der wahre Wert liegt wahrscheinlich in der Mitte der Glockenkurve. Der Fehler der Messung wurde auf der Skala korrigiert.	93

Anhang

Anhang A	Artikel Plus Lucis
Anhang B	Schriftlicher Test
Anhang C	Beobachtungsleitfaden
Anhang D	Online-Umfrage

Umgang mit Messunsicherheiten im Unterricht 2

Hannah Loidl

Einleitung

Das Thema Messunsicherheiten mag im ersten Moment als zu nüchtern, zu unverständlich und zu trocken für den Physikunterricht in der Sekundarstufe I (Sek. I) erscheinen. Dabei übersieht man jedoch das Potential für anregende Diskussionen, die Möglichkeit der Weiterentwicklung der Bewertungskompetenz von Schüler*innen sowie den Einblick in wissenschaftliches Arbeiten und möglicherweise auch den gegebenen Anreiz für aufmerksameres Arbeiten bei Schüler*innenexperimenten. Die Wichtigkeit der Behandlung von Messunsicherheiten in der Schule wurde in weiteren Artikeln dieses Themenheftes bereits erörtert. Aus Vorarbeiten einer Bachelorarbeit zum Umgang mit Messunsicherheiten in der Sekundarstufe II sowie aus gesammelten Erfahrungen durch Unterrichtsentwürfe von Susanne Neumann, wurde ein umfassendes Unterrichtskonzept zum Umgang mit Messunsicherheiten in der Sek. I im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt und evaluiert. Ziel war es, einen Unterrichtsentwurf zu erarbeiten, der zum einen die Dauer von zwei Stunden nicht sprengen sollte und zum anderen die wichtigsten Ideen hinter dem Konzept Messunsicherheiten zu vermitteln. Die Schüler*innen sollen innerhalb eines Experiments auf die grundsätzlich bestehende Messunsicherheit einer jeden Messung und der damit verbundenen Notwendigkeit der Angabe von Messunsicherheiten zum Vergleich von Ergebnissen geleitet werden.

Die Idee hinter dem Konzept

Die Beobachtungen im Rahmen der Bachelorarbeit zeigten schnell auf, dass Messunsicherheiten in der Oberstufe zwar in ihrer Relevanz bei wissenschaftlichen Arbeiten anerkannt wurden, der Umgang mit ihnen beim eigenständigen Experimentieren jedoch schnell rezeptartig und ohne sinnvolle Anwendung verlief. Für die Erarbeitung eines Konzeptes für die Sekundarstufe I sollte daher der Fokus auf die Messunsicherheiten beim Experiment, welches absichtlich sehr simpel und kurzweilig gehalten wurde, gelegt werden. Das Thema Messunsicherheiten erscheint zunächst wenig spannend und wahrscheinlich auch nicht unmittelbar im Alltag für Schüler*innen präsent zu sein. Das Experiment wurde aus diesem Grund so gestaltet, dass die Schüler*innen in der routinemäßigen Bewältigung einer scheinbar einfachen Aufgabe auf einen kognitiven Konflikt

stoßen. Angelehnt an die Unterrichtsmethode „Schülervorstellungen aktivieren und ‚konfrontieren‘“ sollen die Schüler*innen zum Nachdenken über die Vertrauenswürdigkeit der vorgenommenen Messungen angeregt werden, vgl. [1]. Stimmen die erhaltenen Ergebnisse verglichen mit jenen der anderen Gruppen überein und wenn nicht, warum nicht?

Vorstellung des Unterrichtskonzepts

Der Unterrichtsentwurf wurde für die Sekundarstufe I entwickelt und nimmt in der Durchführung zwei Unterrichtsstunden ein. Die Erarbeitung der Idee von Messunsicherheiten soll weitestgehend selbstständig von den Schüler*innen und anhand der Durchführung eines konkreten Experiments geschehen. Das Infragestellen der Vertrauenswürdigkeit der eigenen Messungen dient als Einführung in das Themengebiet der Messunsicherheiten. Schlüsselstellen sowie Schwierigkeiten bei der mathematischen Lösung der Problemstellungen (z. B. bei der Berechnung des Mittelwertes) sollen durch geschicktes Eingreifen und Anleiten der Lehrperson vermieden werden, um so die Konzentration beispielsweise auf die *Bedeutung* des Mittelwertes für den Vergleich der Messungen zu lenken. Fragestellungen und Lückentexte am Ende der Unterrichtssequenzen sollen das Erlernete noch einmal festigen. Konkrete Beispiele aus den verwendeten Unterrichtsmaterialien sind im Anhang als Bausteine (B1 – B10) für das Unterrichten von Messunsicherheiten zu finden.

Ziel der beiden Unterrichtseinheiten ist es, eine erste Annäherung an das Konzept der Messunsicherheiten bei den Schüler*innen zu erreichen. Bereits erworbene Kenntnisse zu statistischen Kennzahlen wie dem Mittelwert, der Spannweite und der Standardabweichung aus dem Mathematikunterricht werden im Physikunterricht in ihrer Bedeutung für wissenschaftliche Arbeiten und Experimente sichtbar. Die Schüler*innen erkennen die Notwendigkeit der Angabe von Messunsicherheiten, um einen Vergleich verschiedener Ergebnisse zu ermöglichen und die Vertrauenswürdigkeit einer Messung einzuschätzen. Sie können beschreiben, dass einzelne Messungen einer Messreihe um einen Mittelwert streuen und verschiedene Ursachen Messunsicherheiten bedingen.

1. Einstieg in die Thematik der Messunsicherheiten (1. Unterrichtsstunde)

Nach einer kurzen Schilderung der Aufgabe durch die Lehrperson wird in der ersten Einheit direkt mit dem Experimentieren in Kleingruppen und Bearbeiten eines zugehörigen Arbeitsblattes begonnen. Die Schüler*innen finden pro Gruppe einen bereits mit Wasser gefüllten Behälter, wie in Abbildung 1 ersichtlich, vor.



Abbildung 1: Versuchsaufbau bestehend aus einem Behälter, gefüllt mit 500 ml Wasser und einem kleinen Messbecher zum Abschöpfen des Wassers.

Die Aufgabe besteht darin, das Wasser nach und nach mit einem kleinen Messbecher abzuschöpfen (ohne das Behältnis über die Tischkante zu kippen), die Werte jedes gefüllten Bechers abzulesen und zu notieren. Am Ende des Messvorganges bestimmen die Schüler*innen die Menge an Wasser, die sich anfangs in dem Behälter befand. Anschließend sollen die Schüler*innen auf einer Skala bewerten, wie vertrauenswürdig ihre Messung ist (siehe Abbildung 2 und B1). Die nächsten Aufgaben führen die Schüler*innen auf die Messunsicherheit des Messbechers hin (B2).

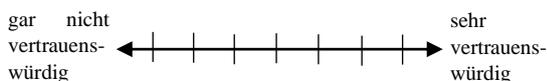


Abbildung 2: Skala zur Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit einer Messung.

Im Anschluss zeichnen die einzelnen Gruppen ihr Messergebnis auf einem vorgefertigten Zahlenstrahl auf einem Poster ein, siehe Abbildung 3. Aus dem Vergleich der unterschiedlichen Messergebnisse am Zahlenstrahl sollen die Lernenden dann Schlüsse für mögliche Quellen an Unsicherheiten, die die Messung beeinflusst haben könnten, ziehen (B3 & B4). Ein zu vervollständigender „Je-desto-Satz“ verknüpft abschließend die Vertrauenswürdigkeit einer Messung mit dem Begriff der Messunsicherheiten (B5).

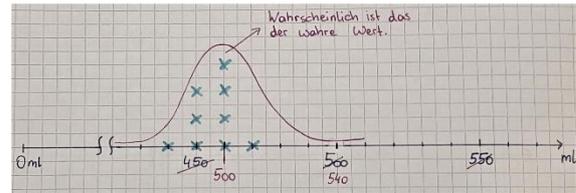


Abbildung 3: Zahlenstrahl auf Poster mit beispielhaften Markierungen. Mit einer zweiten Farbe wird eine Glockenkurve eingezeichnet und ggf. der Fehler korrigiert.

Für leistungsstarke und schnellere Gruppen ist am Ende des Arbeitsblattes eine Zusatzaufgabe zu finden, in welcher der Fehler, der bei der Messung gemacht wurde, behandelt wird. Die Schüler*innen sollen dazu die Menge an Wasser abschätzen, die am Ende im Behälter übriggeblieben ist. Daraufhin stellen die Schüler*innen Vermutungen über die Bedeutung des Fehlers für die Ergebnisse am Zahlenstrahl an.

Im Plenum wird der wahrscheinlich wahre Wert mit den Schüler*innen am Zahlenstrahl diskutiert sowie eine Glockenkurve und der geschätzte Mittelwert eingezeichnet. Den Schüler*innen wird zu diesem Zeitpunkt auch offenbart, dass sich in jedem Behälter vor Beginn des Experimentierens die „exakt“ gleiche Menge an Wasser befand. Leitfragen wie:

- „Warum haben wir nun X unterschiedliche Ergebnisse?“
- Wer hat recht? Haben alle recht? Hat keiner recht?“
- Welcher Wert ist wahrscheinlich der wahre Wert?“

sollen die Schüler*innen auf die Grundideen des Konzeptes Messunsicherheiten hinführen. Wurde in einzelnen Gruppen auch der Fehler der Messung diskutiert, so kann auch dieser anhand des Zahlenstrahls thematisiert und die Skala dementsprechend korrigiert werden. Folgende Fragen könnten in diesem Zusammenhang aufgeworfen werden:

- „Hat eine Gruppe einen Fehler bei der Messung entdeckt?“
- Ist einer Gruppe Wasser im Gefäß übriggeblieben?“
- Wie könnte man den gemachten Fehler korrigieren?“

Eine Kopie des gemeinsamen Zahlenstrahls bildet in der darauffolgenden Einheit die Basis des weiteren Unterrichtsgeschehens.

2. Arbeiten mit Messunsicherheiten (2. Unterrichtsstunde)

In einer zweiten Einheit werden die Messergebnisse der verschiedenen Gruppen anhand des Zahlenstrahles zur Wiederholung miteinander verglichen und der Mittelwert als statistische Größe errechnet. Es

wird nun auch der errechnete Mittelwert am Foto des Zahlenstrahls eingezeichnet. Die Schüler*innen erkennen, dass einzelne Messungen einer Messreihe um den Mittelwert streuen und dieser dem wahren Wert einer Messung am nächsten kommt. Durch die Berechnung der Spannweite der Messreihe wird die Verknüpfung zwischen Vertrauenswürdigkeit und Messunsicherheit weiter vertieft (B6 & B7).

Die weiteren Aufgaben auf dem Arbeitsblatt werden von den Schüler*innen in Einzel- oder Partner*innenarbeit gelöst und die Grundideen des Konzeptes Messunsicherheiten weiter vertieft und gefestigt. Für leistungsstärkere Gruppen oder einzelne Schüler*innen kann ein zusätzliches Arbeitsblatt zur Verfügung gestellt werden, auf welchem die Standardabweichung zur Bestimmung der Messunsicherheit der Messungen herangezogen wird.

Anhand eines Concept Cartoons wird das erworbene Wissen zum Schluss noch einmal in konkreten Szenarien angewendet (B9 & B10). Der Cartoon enthält zwei Aufgaben mit je zwei Jugendlichen, die sich über ein durchgeführtes Experiment unterhalten. Die Schüler*innen sollen nun die Aussagen in Zweiergruppen diskutieren und die Vertrauenswürdigkeit der Messungen bewerten.

Evaluierung des Unterrichtskonzeptes

Bei der Entwicklung des vorgestellten Unterrichtskonzeptes wurde auf das Modell des „Design-Based Research“ zurückgegriffen [2]. Dabei wurden Ergebnisse und Erkenntnisse der Produktentwicklung und forschender Tätigkeiten konsequent aufeinander bezogen. Erste Ideen wurden in theoretischen Unterrichtseinheiten anhand von Erfahrungen aus vorhergehenden Arbeiten und Praxiserfahrungen von Lehrkräften verarbeitet, mittels Akzeptanzbefragungen [3] auf ihre Eignung zur Vermittlung der zugrundeliegenden Grundideen getestet und wiederum überarbeitet. Der verbesserte Unterrichtsentwurf wurde anschließend in einem Wiener Realgymnasium getestet und unterschiedliche Methoden der empirischen Sozialforschung zur Evaluation herangezogen. Mittels teilnehmender Beobachtung nach Lamnek [4] wurden die Herangehensweisen von den Schüler*innen und dabei konstruierten Ideen, unter Zuhilfenahme eines vorbereiteten Leitfadens, aufgedeckt. Aufgrund der COVID-19 Pandemie konnte die Verfasserin nicht selbst an der Unterrichtsstunde teilnehmen. Der Unterricht wurde daher von einer erfahrenen Physiklehrerin durchgeführt und vom Physiklehrer der Klasse beobachtet. Weiters wurden die Unterrichtsgespräche zweier Gruppen mittels Handy aufgenommen sowie die Gesamtsicht der Klasse gefilmt und das Audio- und Videomaterial anschließend analysiert. Dafür wurden sowohl vorab

(deduktiv) Kategorien als auch während und nach dem Durchsehen des Materials induktiv Kategorien zur Analyse erstellt vgl. [5]. Nach drei Tagen wurde ein abschließender schriftlicher Test mit den Schüler*innen durchgeführt und die gesetzten Ziele für die Unterrichtsentwürfe mit den Ergebnissen der Tests verglichen. Über ein Zoom-Meeting berichtete die Lehrkraft, welche den Unterricht durchgeführt hatte, über Auffälligkeiten und Schwierigkeiten. Beobachtungen durch die Video- und Audio-Analysen wurden ebenfalls mit der Lehrperson abgeglichen. In einem letzten Evaluationsschritt wurden die Erkenntnisse der Intervention in das Unterrichtskonzept eingearbeitet.

Ergebnisse & Überarbeitung

Die Testung der Unterrichtsmaterialien im Klassenverband zeigte, dass sich das erdachte Experiment zur Durchführung und Einleitung in das Thema Messunsicherheiten eignet. Anfangs erschien es den Schüler*innen recht simpel, dennoch waren sie motiviert, das Experiment durchzuführen.

Die Schüler*innen diskutierten über Möglichkeiten zur „genaueren“ Messung, wodurch das erste Ziel, nämlich die Bewusstmachung von und das Nachdenken über Messunsicherheiten, erreicht wurde. Ohne Zutun kamen die Schüler*innen auf die „Genauigkeit“ der Messung zu sprechen. Was unter anderem an kurzen Konversationen wie folgender zu sehen ist:

S1: „Sind das 40? Sind das genau 40?“

S2: „Der erste ist 40.“

S3: „Stells mal auf den Tisch“

S1: „Na, das sind nicht genau 40“

S2: „Doch das sind genau 40.“

Beim Vergleich des Lückentextes im Plenum stellte sich heraus, dass die Überleitung zur Vertrauenswürdigkeit einer Messung anhand der Skala am Arbeitsblatt (Abbildung 2) zumindest bei einer aufgerufenen Schülerin nicht erfolgreich war „Genau das hab‘ ich nicht [...] und es passt auch nicht das, was wir ok fänden“. Da es sich hier um den Kern des Unterrichtskonzeptes handelt, wurde bei der Überarbeitung des Arbeitsblattes die Alltagssprache der Schüler*innen (Wie vertrauenswürdig - wie „genau“ -, glaubst du, ist eure Messung?) aufgegriffen, wodurch ein Anknüpfen an das Wissen der Schüler*innen erhofft wurde.

Als herausfordernd stellten sich die vielen neuen und vor allem ähnlichen Begriffe (Beginn der Fachbegriffe mit „Mess-“) beim Ausfüllen des Lückentextes heraus, wie auch von der durchführenden Lehrperson in der Nachbesprechung kritisch angemerkt wurde: „Es sind halt echt viele neue Begriffe und alle

fangen irgendwie mit ‚Mess-‘ an“. Eine weitere Definition sowie die Umgestaltung des Lückentextes soll Abhilfe beim Anwenden und Erlernen der Fachbegriffe schaffen.

Aus dem schriftlichen Test drei Tage nach der Testung der Unterrichtsmaterialien ging hervor, dass die Lernziele der Unterrichtsplanung weitestgehend erreicht wurden. Der Test zeigte, dass der Großteil der Schüler*innen erkannte, dass eine einzelne Messung wenig vertrauenswürdig ist. Mehr als $\frac{2}{3}$ der Schüler*innen schätzten das erste Item aus Tabelle 1 tendenziell „gar nicht vertrauenswürdig“ ein (die Vertrauenswürdigkeit war anzukreuzen wie in Abbildung 2). Als Verbesserungsvorschlag gab der Großteil an, „mehr Messungen und dann [den] Mittelwert berechnen“ bzw. den „Durchschnitt berechnen“ zu müssen. Als Verbesserungsvorschläge wurden sowohl die Typ-A-Messunsicherheit (Kategorie „Messreihe anfertigen und Mittelwert bilden“) als auch die Typ-B-Messunsicherheit (Kategorien „genaueres Messgerät“ und „Verbesserung der Versuchsanordnung“) angesprochen. Das zweite Item wurde von $\frac{3}{4}$ der Schüler*innen richtig beantwortet („die Messungen der beiden Kinder können nicht verglichen werden“). Leider begründete jedoch keine*r der Schüler*innen seine*ihre Auswahl mit der fehlenden Messreihe (bzw. dem Mittelwert) und der fehlenden Messunsicherheit. Im nächsten Schritt wurde hingegen sechs Mal mehrmaliges Messen/Berechnen des Mittelwerts als Verbesserungsvorschlag angegeben. Die übrigen Vorschläge bezogen sich vor allem auf die Typ-B-Messunsicherheit. Beim letzten Item gaben fast $\frac{2}{3}$ der Schüler*innen begründet die richtige Antwort an (Lisas Ergebnis ist vertrauenswürdiger, weil ihre Spannweite kleiner ist).

Einleitung	Martins Klasse soll im Physikunterricht folgendes Experiment durchführen: Lasse einen Tennisball von zwei Metern Höhe zu Boden fallen und stoppe die Zeit. Wie lange braucht der Ball, bis er am Boden aufprallt?
Item 1	Martin lässt den Ball aus zwei Metern Höhe fallen und stoppt die Zeit mit dem Sekundenzeiger seiner Armbanduhr. Die gestoppte Zeit beträgt 2s . Wie vertrauenswürdig ist die Messung von Martin deiner Meinung nach?
Item 2	Martin führt nun das Experiment mit der Stoppuhr seines Handys durch und vergleicht die gemessene Zeit von 0,67s mit der gemessenen Zeit seiner Sitznachbarin Lisa. Lisa hat 0,90s gestoppt. Beide haben das Experiment unter denselben Bedingungen durchgeführt. Wer von den beiden hat das vertrauenswürdiger Ergebnis?

Item 3	Martin und Lisa führen das Experiment noch einmal durch, dieses Mal machen sie 10 Messungen. Zum Schluss berechnen sie den Mittelwert und die Spannweite ihrer Messreihe. Martins Mittelwert beträgt 0,66s und die Spannweite 0,26s . Lisas Mittelwert beträgt 0,81s und die Spannweite 0,19s . Welche Messung ist deiner Meinung nach vertrauenswürdiger?
--------	---

Tabelle 1: Items der schriftlichen Befragung drei Tage nach der Testung des Unterrichtskonzeptes.

Um vor allem in der zweiten Stunde mehr Raum für die Diskussion von Messunsicherheiten zu schaffen, wurde als zusätzliche Übungsmöglichkeit ein Concept Cartoon (B9 & B10) zu den Arbeitsmaterialien hinzugefügt. Es werden noch einmal sowohl die Typ-A- als auch die Typ-B-Messunsicherheiten anhand konkreter Beispiele angesprochen, wodurch das theoretisch erlangte Wissen angewendet werden soll. Beim Erstellen der Aufgaben wurden Aussagen aus der Unterrichtsbeobachtung und Erkenntnisse aus der schriftlichen Testung aufgegriffen.

Fazit & Diskussion

Leider konnte aufgrund der spontanen Durchführung der Testung (bedingt durch den bevorstehenden zweiten Lockdown im Rahmen der COVID-19 Präventionsmaßnahmen) kein Pre-Test erhoben werden. Der fehlende Vergleich lässt daher nicht ausschließen, ob Teile des ausgefüllten Tests auf bereits vorhandenes Vorwissen zurückzuführen sind. Nach Angaben der Physiklehrerin hatten die Schüler*innen jedoch bisher keine Erfahrung mit Aufgabenstellungen mit Fokus auf die E-Kompetenz im Sinne des NaWi-Kompetenzmodells des BIFIE [6] (z. B. „im Rahmen naturwissenschaftlicher Untersuchungen oder Experimente Daten aufnehmen und analysieren“). Das überarbeitete NaWi-Kompetenzmodell findet sich auch im Lehrplan der Sek II [7] sowie im Entwurf des neuen Lehrplans für die Sek I wieder. Somit dürfte die Anwendung des aus dem Mathematik-Unterricht bekannten Mittelwerts und der Spannweite zur Auswertung eines Experiments in den Naturwissenschaften neu für die Schüler*innen gewesen sein. Die Antworten der Schüler*innen lieferten dennoch einen Beitrag zur Überarbeitung der bestehenden Unterrichtsmaterialien.

Nachdem es kaum experimenteller Vorerfahrungen für die Durchführung des vorgestellten Unterrichtskonzeptes benötigt, ist der Einsatz bereits zu Beginn der Sek. I möglich. Aus mathematischer Perspektive erscheint auch das Bilden des Mittelwerts und das Berechnen der Spannweite gegen Ende der sechsten Schulstufe durchaus machbar. Gleichmaßen kann

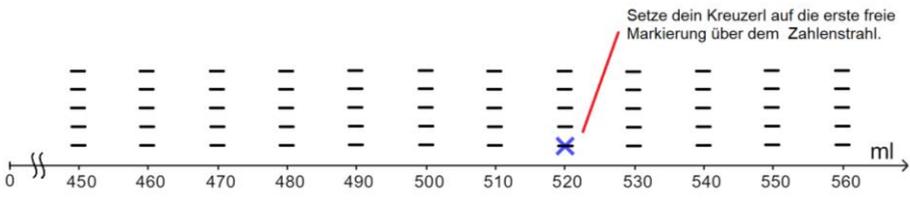
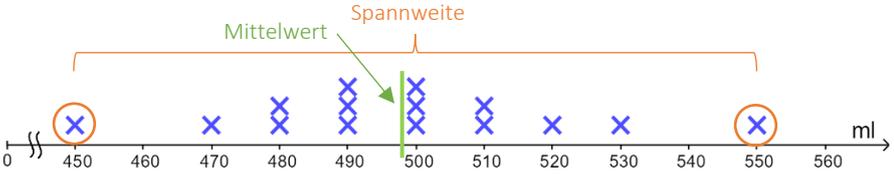
der vorliegende Unterrichtsentswurf ebenfalls in der Sek. II, zum Beispiel zu Beginn des Physikunterrichts in der neunten bzw. zehnten Schulstufe eingesetzt werden. Anstelle der Spannweite sollte hier jedenfalls die Standardabweichung (des Mittelwerts) treten.

Die Testung der Unterrichtsmaterialien lässt insgesamt den Schluss zu, dass das erarbeitete Konzept zur Einführung in den Umgang mit Messunsicherheiten in den Naturwissenschaften, insbesondere im Physikunterricht, einen wertvollen Beitrag zur Entwicklung der E-Kompetenz im wissenschaftlichen Arbeiten leistet. Im Anhang befinden sich die Bausteine der Unterrichtsmaterialien, die vollständige Sammlung der Arbeitsblätter ist in der Masterarbeit zu finden.

Literatur

- [1] Wiesner, H., Schecker, H. & Hopf, M. (2011). Physikdidaktik kompakt. Freising: Aulis-Verl.
- [2] Haagen-Schützenhöfer, C. (2015). Kumulative Habilitationsschrift mit dem Schwerpunkt Lehr- und Lernprozesse im Anfangsoptikunterricht der Sekundarstufe I. Wien: Universität Wien.
- [3] Wiesner, H. & Wodzinski, R. (1996). Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In: Duit, R., & Pädagogische Hochschule Ludwigsburg. Lernen in den Naturwissenschaften: Beiträge zu einem Workshop an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg (IPN; 151). Kiel.
- [4] Lamnek, S. & Krell, C. (2016). Qualitative Sozialforschung: Mit Online-Materialien (6., überarbeitete Auflage). Weinheim: Beltz.
- [5] Altrichter, H. & Posch, P. (2007). Lehrerinnen und Lehrer erforschen ihren Unterricht. (4., überarbeitete Auflage). Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt.
- [6] BIFIE (Hrsg.). (2011). Kompetenzmodell Naturwissenschaften 8. Schulstufe. Letzter Zugriff am 26.01.2021 unter: <https://www.iqs.gv.at/themen/nationales-monitoring/bildungsstandards/grundlagen-der-bildungsstandards>
- [7] Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. (1984). Lehrpläne der allgemeinbildenden höheren Schulen. Letzter Zugriff am 26.01.2021 unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>

Anhang

Bausteine für das Unterrichten von Messunsicherheiten	
B1 Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit	<p>Wie vertrauenswürdig („genau“), glaubst du, ist eure Messung?</p> <p>gar nicht vertrauenswürdig ←————→ sehr vertrauenswürdig</p>
B2 Messunsicherheit Messgerät (z. B. Messbecher)	<p>Wie groß ist die kleinste Menge, die ihr am Messbecher noch ablesen könnt? _____ ml</p> <p>Wie groß ist daher die Messunsicherheit des Messbechers? Überlege zur Beantwortung dieser Frage, was der maximale Wert ist, um den du nach oben oder unten runden kannst.</p> <p>$\Delta V = \text{_____ ml}$</p>
B3 Vergleich von Messergebnissen am Zahlenstrahl	<p>Zeichnet euer Ergebnis (in ml) auf dem Zahlenstrahl am vorbereiteten Poster bei der Lehrkraft ein. Vergleicht dann euren Messwert mit den Messwerten der anderen Gruppen.</p> <ol style="list-style-type: none"> Suche dein Messergebnis am Zahlenstrahl. Mache ein Kreuzerl bei der ersten freien Markierung. <p>Setze dein Kreuzerl auf die erste freie Markierung über dem Zahlenstrahl.</p> 
B4 Quellen von Unsicherheiten	<p>Welche Messunsicherheiten könnten dazu beigetragen haben, dass die Messwerte der verschiedenen Gruppen auf dem Zahlenstrahl verstreut sind?</p> <ul style="list-style-type: none"> _____ _____ _____
B5 Verbindung Vertrauenswürdigkeit und Messunsicherheit	<p>Wie wirken sich Messunsicherheiten auf die Vertrauenswürdigkeit einer Messung aus?</p> <p>Je _____ die Messunsicherheit, desto höher ist die Vertrauenswürdigkeit einer Messung.</p> <p>größer</p> <p>kleiner</p>
B6 Berechnen von Mittelwert und Spannweite	<p>Zur Bestimmung der Messunsicherheit der Messreihe ziehen wir als einfachste Methode die Spannweite heran. Die Spannweite beinhaltet die Messwerte aller Gruppen und wird aus der Differenz des größten und kleinsten Wertes einer Messreihe berechnet. Schau dir dazu die untere beispielhafte Abbildung 1 an. Berechne die Spannweite der Messreihe eurer Klasse!</p> <p>Die Spannweite des Volumens = _____ ml.</p>  <p>Abbildung 1: Zahlenstrahl mit ausgedachten Werten.</p>
B7 Verknüpfung Spannweite und Messunsicherheit	<p>Schau dir noch einmal den Zahlenstrahl aus Abbildung 1 an und stelle dir vor, dass die beiden eingekreisten Werte nicht zur Messreihe gehören.</p> <ol style="list-style-type: none"> Wäre die Spannweite der Messreihe dann größer oder kleiner? <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Die Spannweite der Messreihe wäre größer. <input type="checkbox"/> Die Spannweite der Messreihe wäre kleiner. Was bedeutet das für die Vertrauenswürdigkeit und Messunsicherheit der Messreihe? <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Die Messreihe hat eine kleinere Messunsicherheit und ist somit vertrauenswürdiger. <input type="checkbox"/> Die Messreihe hat eine größere Messunsicherheit und ist somit weniger vertrauenswürdig.

Messunsicherheiten ermöglichen es uns, Ergebnisse vergleichen zu können. Stelle dir vor, dass eure Parallelklassen das gleiche Experiment durchgeführt haben. Die Ergebnisse kannst du in der folgenden Tabelle finden:

Klasse	Ergebnis (Mittelwert)	Messunsicherheit d. Messreihe	Messunsicherheit d. Messgeräts
Klasse X	498 ml	100 ml	5 ml
Klasse Y	505 ml	70 ml	5 ml
Klasse Z	505 ml	80 ml	5 ml
Deine Klasse			

a. Ordne die Messungen der Klassen nach ihrer Messunsicherheit?

b. Welche Klasse hatte das vertrauenswürdige Ergebnis? _____

Szene 1: Julian und Marie haben beide das gleiche Experiment durchgeführt und vergleichen nun ihre Ergebnisse. **Diskutiere** mit deiner*deinem Sitznachbar*in, ob Marie oder Julian das **vertrauenswürdiger Ergebnis** hat. **Begründe** deine Vermutungen!

Marie:
 $V = 970 \text{ ml}$
 $\Delta V = \pm 40 \text{ ml}$



Marie

Julian:
 $V = 1010 \text{ ml}$
 $\Delta V = \pm 60 \text{ ml}$



Julian

Marie: *Mein Ergebnis ist sehr vertrauenswürdig, denn die Spannweite ΔV meiner Messwerte ist sehr klein.*

Julian: *Mein Ergebnis ist sehr vertrauenswürdig. Ich habe sehr viele Messungen gemacht und daher kommt mein Mittelwert dem wahren Wert sehr nahe.*

Szene 2: Mia und Enya haben beide das gleiche Experiment durchgeführt und vergleichen nun ihre Ergebnisse. **Diskutiere** mit deiner*deinem Sitznachbar*in, wer die **vertrauenswürdiger Messung** hat. Denke auch darüber nach, ob jemand einen **Fehler** gemacht hat. **Begründe** deine Vermutungen!

Mia



Mia

Enya



Enya

Mia: *Ich habe zwar ein bisschen Wasser verschüttet, aber mein Messbecher hat nur eine Messunsicherheit von $\pm 2,5 \text{ ml}$.*

Enya: *Ich habe sehr ordentlich gemessen und nichts verschüttet. Mein Messbecher hat aber eine Messunsicherheit von $\pm 5 \text{ ml}$.*

Anhang B – Schriftlicher Test

Item 1

Name: _____

Fragen zum Thema **Messunsicherheiten**

Beantworte die Fragen bitte so gut und ehrlich, wie du kannst. Sobald du die erste Frage beantwortet hast, blättere zur nächsten Seite. Arbeite von der ersten Frage (a) zur letzten Frage (b), da sie aufeinander aufbauend sind. Gehe also bitte in der Reihenfolge nicht mehr zurück, falls du schon mit der nächsten Frage begonnen hast.

Viel Dank für deine Teilnahme! 😊

Martins Klasse soll im Physikunterricht folgendes Experiment durchführen:

Lasse einen Tennisball von zwei Metern Höhe zu Boden fallen und stoppe die Zeit. Wie lange braucht der Ball, bis er am Boden aufprallt?

- a) Martin lässt den Ball aus zwei Metern Höhe fallen und stoppt die Zeit mit dem Sekundenzeiger seiner Armbanduhr. Die gestoppte Zeit beträgt **2s**.

Wie vertrauenswürdig ist die Messung von Martin deiner Meinung nach?

gar nicht vertrauenswürdig ← | | | | | | | → sehr vertrauenswürdig

Was könnte Martin an seiner Messung verbessern?

1) _____

2) _____

3) _____

Item 2

- b) Martin führt nun das Experiment mit der Stoppuhr seines Handys durch und vergleicht die gemessene Zeit von **0,67s** mit der gemessenen Zeit seiner Sitznachbarin Lisa. Lisa hat **0,90s** gestoppt. Beide haben das Experiment unter denselben Bedingungen durchgeführt.

Wer von den beiden hat das vertrauenswürdiger Ergebnis?

- Lisa hat das vertrauenswürdiger Ergebnis.
- Martin hat das vertrauenswürdiger Ergebnis.
- Das kann ich so nicht beantworten.

Begründe bitte deine Antwort:

Könnten die beiden noch etwas an ihrem Experiment verbessern? Wenn ja, was zum Beispiel?

- ---

Item 3

- c) Martin und Lisa führen das Experiment noch einmal durch, dieses Mal machen sie 10 Messungen. Zum Schluss berechnen sie den Mittelwert und die Spannweite ihrer Messreihe.

Martins Mittelwert beträgt **0,66s** und die Spannweite **0,26s**.

Lisas Mittelwert beträgt **0,81s** und die Spannweite **0,19s**.

Welche Messung ist deiner Meinung nach vertrauenswürdiger?

- Lisas Messung ist vertrauenswürdiger.
- Martins Messung ist vertrauenswürdiger.
- Keine von beiden.

Begründe bitte deine Antwort:

Anhang C – Beobachtungsleitfaden

Die Beobachtungsleitfäden wurden (mit ausreichend Platz für Notizen) auf A4-Papier ausgedruckt und Vorder- und Rückseite auf einen Karton geklebt.

Beobachtungsleitfaden

Messunsicherheiten Unterstufe

Die Unterpunkte beinhalten Hinweise für Beobachtungspunkte. Teilweise wurden Erkenntnisse aus Akzeptanzbefragungen hinzugefügt, die bei den Beobachtungen helfen könnten.

Beobachter*in:

Schule:

Klasse:

Datum:

EINHEIT 1

1. Zum Experiment

- (Wo) gibt es **Schwierigkeiten**?
- **Schwierigkeiten beim Ablesen** des Wasserstandes?

Misconception: SuS schätzen genauere Werte als es der Messbecher erlaubt.

- Was passiert mit **übrigem** Wasser, das nicht abgeschöpft werden kann?
- Sonstige Auffälligkeiten?

Misconception: SuS wollen die abgeschätzte Menge zum Volumen dazuzählen.

2. Bearbeiten der Aufgabenstellungen

- Verbinden SuS **Vertrauenswürdigkeit** der Messung mit dem Begriff Messunsicherheit?
- Schwierigkeiten in Bezug auf die Messunsicherheit des Messbechers
 - Z. B. bei der Bestimmung (Messunsicherheit = $\pm 5\text{ml}$)
- Sonstige Auffälligkeiten?

Misconception: SuS beziehen die Vertrauenswürdigkeit auf Personen und nicht auf die Messung.

EINHEIT 2

1. Bearbeitung Aufgabenstellungen 1 - 6

- Schwierigkeiten bei Verständnis der Aufgabenstellung
- **Mittelwert**
 - Mittelwert und wahrer Wert → Verständnisprobleme?
 - Mittelwert als wahrscheinlichster Wert

- **Spannweite**

- Spannweite als Indiz für Messunsicherheit der Messreihe akzeptiert?

Misconception: „Je kleiner die Spannweite, desto weniger Leute haben die Messung gemacht.“

- Schwierigkeiten bei **Vergleich** von Ergebnissen durch Unsicherheiten
- **Sonstige** Auffälligkeiten?

2. Erkenntnisse

- Schwierigkeiten mit einzelnen Key Ideas
 - Welche sind besonders schwierig für Schüler*innen?
 - Welche sind überhaupt nicht glaubwürdig für Schüler*innen?
- Bedeutung von Messunsicherheiten wird Schüler*innen bewusst?
 - In welchem Zusammenhang

3. Messunsicherheiten für Fortgeschrittene

Anhang D – Online-Umfrage

Messunsicherheiten

Page 1, Question 1: In welcher Schulform unterrichten Sie Mathematik? (Compulsory question)

31 Participant

AHS-Unterstufe	21
NMS	9
Ich unterrichte zwar Mathematik, aber nicht in der NMS oder AHS-Unterstufe.	3
Ich unterrichte nicht Mathematik.	-

Page 1, Question 2: In welchem Bundesland ist ihr Schulstandort zu finden? (Compulsory question)

31 Participant

Wien	20
Burgenland	-
Niederösterreich	6
Oberösterreich	2
Steiermark	2
Kärnten	-
Tirol	-
Salzburg	-
Vorarlberg	1
Ich unterrichte nicht in Österreich.	-

Page 1, Question 3: In welchem Dienstjahr unterrichten Sie? (Compulsory question)

31 Participant

1-3	9
4-6	4
7-10	4
>10	14

Page 1, Question 4: In welchen Fächern sind Sie geprüft? (Compulsory question)

31 Participant

Mathematik	29	
Physik	10	
Chemie	4	
anderes/weiteres Fach bzw. andere/weitere Fächer:	20	<ul style="list-style-type: none"> • PuP (2 x) • Geschichte (2 x) • Französisch (2 x) • Deutsch • Englisch • Deutsch, Informatik • Informatik • Latein • Bewegung und Sport • Latein, Deutsch • Italienisch • PP • Geographie und Wirtschaftskunde • Geographie und Wirtschaftskunde, Informatik • Musik • BSP, PuP • DG/GZ

Page 2, Question 5: Der österreichische Lehrplan in Mathematik sieht in der 8. Schulstufe unter dem Abschnitt „Arbeiten mit Modellen und Statistiken“ das „Untersuchen und Darstellen von Datenmengen unter Verwendung statistischer Kennzahlen“ vor. Beispielfähig werden hierzu die Kennzahlen Mittelwert, Quartil, relative Häufigkeit und Streudiagramme genannt.

Welche Kennzahlen verwenden Sie in ihrem Unterricht zum Untersuchen von Datenmengen? (Compulsory question)

31 Participant

Mittelwert	31	
Quartil	24	
Relative Häufigkeit	30	
Standardabweichung	12	
Spannweite	29	
Weitere:	15	<ul style="list-style-type: none"> • Median, Modus (3 x) • Modus, Median (2 x) • Median, Modus, Perzentil, Maximum, Minimum • Median, Modalwert, Minimum, Maximum • Median, Perzentil • Median, Modus, (abs. Häufigkeit) etc. • Median, Modus, arithmetisches Mittel, Boxplot • Modus, Quartil meist erst in der Oberstufe • Median • absolute Häufigkeit • Median, Modalwert, geometr. Mittel, Varianz, mittl. lineare Abweichung, Interquartilsabstand • Rangliste, Halbweite, Median, Modus, Arithmetisches Mittel, Prozentuelle Häufigkeit, Minimum, Maximum

Page 3, Question 6: Unterrichten Sie (im Normalfall) das arithmetische Mittel in der 8. Schulstufe (oder früher)? (Compulsory question)

31 Participant

Ja.	26
Nein.	5

Page 4, Question 7: Ziehen Sie die Standardabweichung normalerweise als statistische Kennzahl für Unsicherheiten in Ihren Klassen der 8. Schulstufe heran? (Compulsory question)

31 Participant

Ja, eigentlich immer.	8
Ich unterrichte die Standardabweichung nur in leistungsstarken Klassen.	6
Ich unterrichte die Standardabweichung nur, wenn ausreichend Zeit bleibt.	6
Nein, ich unterrichte die Standardabweichung nie.	11

Page 5, Question 8: Wurde die Bedeutung der Standardabweichung mit den Schüler*innen der 8. Schulstufe anhand von Beispielen aus der Naturwissenschaft erklärt? (Compulsory question)

20 Participant

Ja.	9
Nein.	11

Page 6, Question 9: Bitte nennen Sie nach Möglichkeit einige Beispiele, anhand welcher Sie die Standardabweichung mit den Schüler*innen der 8. Schulstufe diskutiert haben?

5 Participant

- Prüfungsergebnisse
 - Körpergröße
 - Gewicht
 - Umfrageergebnisse
- Bsp laut Schulbüchern Thema, Mathematik verstehen, das ist Mathematik
- Messreihe mit elektrischen Spannungen, Geschwindigkeiten, Analyse von Bewegungen, gemessene Zeiten
- Körpergröße, Schuhgröße, Temperaturen,...
- Maschinelle Befüllung von Zahnpastatuben, Müsli, Notendurchschnitt bei Schularbeit

Page 7, Question 10: Welche **Standardabweichung** unterrichten Sie in ihren Klassen der 8. Schulstufe? (Compulsory question)

8 Participant

Standardabweichung der Grundgesamtheit $\lim_{n \rightarrow \infty} s \Rightarrow \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{(x_i - \mu)^2}{n}}$	5	
Standardabweichung der Stichprobe $s_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$	2	
Standardabweichung des Mittelwerts $u_x = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$	-	
Ich bin mir nicht sicher.	-	
Andere:	1	s= Quadratwurzel aus der durchschnittlichen quadratischen Abweichung der Daten vom Mittelwert(Varianz).

Page 8, Question 11: Woran orientieren Sie sich bei der Auswahl der zu unterrichtenden **Standardabweichung** in der 8. Schulstufe?

8 Participant

- Schulbuch (3 x)
- Schulbuch, Bedeutung der Kennzahlen und Interpretation (siehe Matura Anforderungen)
- vorhandene Materialien (erklärvideos) im Rahmen eines Statistikprojektes. kein naturwissenschaftlicher Schwerpunkt.
- Schulbücher
- aus dem Schulbuch und eigenen Materialien
- Schulbuch, Kompetenzliste zur Reifeprüfung

Page 9, Question 12: Welche **Standardabweichung** wird in dem von Ihnen verwendeten Schulbuch der 8. Schulstufe unterrichtet? (Compulsory question)

8 Participant

Standardabweichung der Stichprobe $s_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$	2	
Standardabweichung der Grundgesamtheit $\lim_{n \rightarrow \infty} s \Rightarrow \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{(x_i - \mu)^2}{n}}$	4	
Standardabweichung des Mittelwerts $u_x = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$	-	
k.A.	1	
Andere:	2	<ul style="list-style-type: none"> • Die erste, aber dividiert durch n, Bemerkung: Schüler der 8. Schwülstige kenne den Grenzwert noch nicht! • siehe vorletzte Frage;

Page 10, Question 13: Ziehen Sie die **Spannweite** normalerweise als statistische Kennzahl für Unsicherheiten in Ihren Klassen der 8. Schulstufe heran? (Compulsory question)

(in der 8. Schulstufe)

31 Participant

Ja, eigentlich immer.	24
Ich unterrichte die Spannweite nur in leistungsstarken Klassen.	1
Ich unterrichte die Spannweite nur, wenn ausreichend Zeit bleibt.	3
Nein, ich unterrichte die Spannweite nie .	3

Page 11, Question 14: Nennen Sie bitte Beispiele, mit welchen den Schüler*innen versucht wurde, die Bedeutung der *Spannweite* zu erklären?

16 Participant

- Körpergröße
Einkommen
Einwohnerzahlen
- siehe Standardabweichung
- Körpergröße von Personen: Unterschied zwischen der größten und kleinsten Person, Punkte bei der Schularbeit, Etc.
- Handyrechnung, Punkte bei Test
- beim erarbeiten von datensammeln und deuten, weiters im Hinblick auf das erstellen von boxplots
- übliche Bsp aus den Schulbüchern: Körpergröße, Körpergewicht etc.
- Z.B. Körpergrößen, verschiedenste Datenreihen, Vergleich von Datenreihen, Interpretation von Daten ist wichtig, dabei sind die Streuungsmaße wichtig.
- In Boxplots
- Ich mache immer das Boxplot, heuer auch das Stängel-Blatt-Diagramm. In diesem Zusammenhang taucht der Begriff der Spannweite immer auf, da sie die Differenz zwischen Maximum und Minimum ja kennen sollten.
- siehe St.abw.
- Daten von Personen und ihrem Alter
- Körpergröße, Körpergewicht, Punkteverteilung bei Schularbeiten
- Körpergröße, Gewicht, Notendurchschnitt, Einkommen in einer Firma
- Schularbeitsergebnisse in Punkten (0-24 Pkte).
- Im Zusammenhang mit der Darstellung eines Datensatzes durch einen Boxplot
- /

Page 12, Question 15: Welche *statistischen Kennzahlen* sind Ihrer Erfahrung nach in der 8. Schulstufe am besten zur Darstellung von *Unsicherheiten* geeignet?

19 Participant

- Standardabweichung (4 x)
- ?
- arithmet. Mittel, Median
- Arithmetisches Mittel
- graphische Darstellung
- Unterschied von Mittelwert und Median
- Was sind Unsicherheiten? Daten streuen, diese Streuung wird durch Spannweite und Standardabweichung und im Boxplot beschrieben. Sie ist für die Interpretation und Aussagekraft der Daten wichtig. Damit können Daten besser beurteilt werden.
- In der achten Schulstufe geht es um Kennenlernen der statistischen Größen und um den Umgang mit dem Taschenrechner beim Berechnen von Standardabweichung. Meist bleibt für mehr keine Zeit.
- Spannweite
Am besten mit einem Boxplot
- Ich verstehe die Frage nicht. ;-)
Aber wahrscheinlich mache ich nichts dazu.
- Die Thematisierung von Unsicherheiten ist leider bei dem vorhandenen Niveau in der Klasse schwierig. Es bleibt kaum Zeit und Raum für das. Viele Schüler*innen tun sich schon sehr schwer, Textaufgaben in der deutschen Sprache richtig zu deuten.
- Relative Häufigkeit bei kleiner Stichprobe; Streuung
- Spannweite, Quartil,
- Median/Quartile vs. Mittelwert
- Spannweite, mittlere lineare Abweichung
- Mittelwert, Relative Häufigkeit

Zusammenfassung

Der Umgang mit Messunsicherheiten ist ein Thema, mit dem sich viele (Lehramt-)Studierende der Physik mühen und welches auf den ersten Blick für den Schulunterricht zunächst wenig interessant erscheint. Bei näherer Betrachtung erkennt man jedoch das große Potential, das eine Auseinandersetzung mit dieser Thematik bereits im Physikunterricht während der Schulzeit mit sich bringt. Durch Diskussionen über die Vertrauenswürdigkeit von Ergebnissen und der Einbeziehung von Fehlern und Messunsicherheiten erwerben die Schüler*innen Kompetenzen zum kritischen Hinterfragen von veröffentlichten Studien und daraus abgeleiteten allgemeinen Meinungen. Dass man Messunsicherheiten nicht erst in der universitären Bildung unterrichten muss, sondern bereits Schüler*innen der Sekundarstufe I einige interessante Überlegungen zu Quellen und Ursachen von Messunsicherheiten anstellen können, wurde in dieser Arbeit demonstriert. Für die Entwicklung und Evaluation wurde das Unterrichtskonzept im Sinne des Design-Based Research in mehreren Zyklen überarbeitet. Zur Datenerhebung wurden unter anderem Akzeptanzbefragungen, Unterrichtsbeobachtungen und schriftliche Fragebögen eingesetzt. Beim Stolpern über unerwartete Hindernisse bei der Durchführung eines simplen Experiments stießen die Schüler*innen von selbst auf Fehler und Unsicherheiten ihrer Messung. Durch aufeinander aufbauende Aufgabenstellungen wurden Denkprozesse initiiert und Handlungsstrategien erworben, um Messunsicherheiten abzuschätzen, die Vertrauenswürdigkeit der Messung zu beurteilen. Das entwickelte und erprobte Unterrichtskonzept für die Sekundarstufe I zum Umgang mit Messunsicherheiten liefert erste Möglichkeiten und Ideen für eine Umsetzung der differenzierten Datenauswertung im Physikunterricht. Die finale Unterrichtseinheit wurde zusammen mit den Unterrichtsmaterialien für Physiklehrer*innen in der Masterarbeit zur Verfügung gestellt.

Abstract

For most students at university the proper handling of measurement uncertainties is a difficult subject and does not seem to be an interesting topic for school education at first glance. Nevertheless, the examination of measurement uncertainties is worth a closer look in order to discover the benefits of dealing with this topic already in highschool. Discussing the trustworthiness of results including errors and uncertainties is supposed to contribute to the development of competences which allow students to critically examine published studies and its diverted opinions. Teaching the theory of errors and uncertainties does not necessarily have to take place solely at university level. As demonstrated in this master thesis, High-school students at the age of 13-14 years already showed interesting ideas by thinking of sources of uncertainties. Using the method of design-based research, several cycles of testing and revising were carried out for developing and evaluating an adequate teaching concept to introduce students to the concept of measurement uncertainties. Data was mainly collected through the technique of probing acceptance, observation in class and written tests. As demonstrated, pupils were led to measurement uncertainties by overcoming unexpected obstacles in a rather simple experiment. Strategies and thought processes were triggered through assisted exercises to learn how to estimate uncertainties, asses the trustworthiness of a measurement in order to compare measurands. Throughout this master thesis possibilities and insights for a differentiated data analysis in physics education were successfully realised in this teaching concept. The final teaching concept together with the teaching materials for physics teachers is provided in this master thesis.