

Tobias Ludwig¹
Marcus Kubsch²
Stefan Sorge³
Engin Kardaş¹

¹Pädagogische Hochschule Karlsruhe
²Freie Universität Berlin
³IPN Kiel

Quellen von Unsicherheit beim Experimentieren - Welche Rolle spielen verschiedene Arten von Unsicherheit beim Experimentieren?

Motivation

Naturwissenschaftliche Erkenntnisse sind unsicher, vorläufig und diskursiv (z. B. Driver et al., 2000; Rosenberg et al., 2022). Dem gegenüber steht „üblicher“ Unterricht, in dem häufig ein positivistisches Bild der Naturwissenschaften vermittelt wird (McComas, 2004). In der Folge entsteht ein Bild von Wissenschaft als „sicher“ und „unveränderlich“ (z. B. Manz & Suárez, 2018; Rosenberg et al., 2022), wobei Behauptungen als „logisch“ und offensichtlich aus begrenzten Annahmen ableitbar dargestellt werden (Osborne, 2010). Um diesem Bild entgegenzutreten hat eine Reihe von fachdidaktischen Arbeiten daher den Erkenntnisgewinnungsprozess im naturwissenschaftlichen Unterricht und dabei insbesondere den Umgang mit Unsicherheiten beim Experimentieren untersucht. Vor diesem Hintergrund adressieren einige dieser Arbeiten einen wesentlichen Teil von Unsicherheit beim Experimentieren – Messunsicherheiten statistischen und systematischen Ursprungs (z. B. Heinicke, 2012; Priemer & Hellwig, 2018). Zu diesem Bereich gibt es eine Reihe von Befunden, z. B. zu Präkonzepten von Schüler:innen zu Messunsicherheiten (Gott & Duggan, 2007; Lubben et al., 2001), zur Kompetenzmodellierung (z. B. Priemer & Hellwig, 2018; Schulz, 2022) und zur Förderung entsprechender Kompetenzen (z. B. Kardaş, 2023; Kok, 2022). Neben Messunsicherheiten kann ein Erkenntnisgewinnungsprozess beim Experimentieren jedoch weitere Quellen von Unsicherheiten aufweisen: Beispielsweise hinsichtlich der Eignung des Aufbaus, der eigenen Fähigkeit beim Experimentieren (Ludwig et al., 2021) oder der Eignung des Untersuchungsansatzes bzw. der dem Versuch zu Grunde liegenden Modellannahmen (Rosenberg et al., 2022). Diese Quellen von Unsicherheit können dazu führen, dass Erkenntnisse, die am Ende des Experimentierzyklus stehen, z. B. in Form von Schlussfolgerungen, mit einer epistemischen Unsicherheit, z. B. hinsichtlich der Gültigkeit der Schlussfolgerungen belegt sind. Dieser Aspekt wird jedoch nur selten zur Lerngelegenheit gemacht (z. B. Warren, 2020). Vor diesem Hintergrund versucht dieser Beitrag, Forschungsergebnisse, welche auf die unterschiedlichen Arten von Unsicherheiten fokussieren, zusammenzuführen und Konsequenzen für das Lernen von Naturwissenschaften abzuleiten. Ein Framework für den Zusammenhang von Arten von Unsicherheit beim Experimentieren unter Verwendung von Bayesian Updating wird motiviert und Unterstützungsmöglichkeiten für den Prozess aufgezeigt.

Arten von Unsicherheit

Im Lernkontext liegen bereits vor dem Experimentieren Präkonzepte und Vorwissen zum adressierten physikalischen Sachverhalt vor. Beispielsweise könnte die Beschaffenheit zugrunde liegender Phänomene, Mechaniken oder Eigenschaften des Experiments unsicher sein (z. B. Bao & Redish, 2002; Santostasi et al., 2017). Man denke hier z. B. an blackboxartige Messgeräte oder Unklarheiten bzgl. der Dynamik des Phänomens – schauen wir auf einen Gegenstand oder einen Prozess? Diese Unsicherheit des Zugangs zum Experiment bzw. bezüglich des Inhalts kann als ontologische Unsicherheit bezeichnet werden, die beispielsweise

in Form von Forschungshypothesen konkretisiert werden können. Der Prozess der Wissensgenerierung kann ebenfalls unsicherheitsbehaftet sein. Wie gut können Informationen gesammelt und interpretiert werden, um beispielsweise die Forschungshypothesen zu testen? Diese sogenannten epistemischen Unsicherheiten können daher vorab bei der Planung des Experiments sowie der Untersuchungsmethode und danach bei der Auswertung, Analyse und Interpretation der Ergebnisse auftreten (Gougis et al., 2017). Die epistemische Unsicherheit kann Überzeugungen und Vorwissen bezüglich des Experiments, der Datengenerierung und -auswertung beeinflussen und eine Wechselwirkung mit ontologischer Unsicherheit entwickeln. Messwerte und -ergebnisse sind ebenfalls mit einer Unsicherheit behaftet. Einerseits kann das Ziel der Messung und die damit verbundene Versuchsanordnung die Messwerte beeinflussen (z. B. Hellwig, 2013). Andererseits können Messinstrumente nicht perfekt messen und weisen eine Unsicherheit auf. Diese kann durch Rundungen, Ablesen von analogen oder digitalen Skalen oder durch statistische Fluktuationen bedingt sein (z. B. Fuller, 2009). Messergebnissen kann auf dieser Grundlage ein Vertrauensbereich zugewiesen werden, der die Messunsicherheit quantifiziert.

Herausforderung im Umgang mit Unsicherheit

Verschiedene Arten von Unsicherheit und die damit verbundenen Konzepte von Wahrscheinlichkeit und Zufall führen zu unterschiedlichen Herausforderungen im Umgang mit ebendiesen. Wahrscheinlichkeit und Zufall stellen für Schüler:innen eine Herausforderung dar. Es dominiert eine deterministische Sicht auf Messwerte (z. B. Lubben et al., 2001). Zufall wird von Lernenden als unvereinbar mit Vorhersagen und Gesetzen angesehen (z. B. Hull et al., 2021). Darüber hinaus können unzureichende Kenntnisse über den Versuchsaufbau bzw. Methode dazu führen, dass eine systematische Unsicherheit vorliegt. Anders als zufällige Unsicherheiten können diese nicht mit mehr Messungen oder Auswertemethoden verringert werden. Bedingt durch den Einfluss von Unsicherheit, besteht wenig Konsens bei den Schüler:innen darüber, was ein reliabler und valider Datensatz ist (z. B. Kok & Priemer, 2022; Pols et al., 2021). Messungen werden oft faktisch interpretiert (Manz et al., 2016) und es gibt kein Verständnis für den Messprozess (Kok et al., 2019; Leak et al., 2018). Die Annahme von Kausalitäten stellt ebenfalls eine Herausforderung für den Umgang mit Unsicherheit beim Experimentieren dar. In diesem Fall ist die ontologische Unsicherheit betroffen. Beispiele sind hier, dass Schüler:innen in verschiedenen physikalischen Experimenten von einem linearen Zusammenhang ausgehen (z. B. Kennlinie einer Glühlampe oder Zusammenhang zwischen der Periodendauer und der Pendelmasse eines Fadenpendels). In beiden Fällen beeinflusst die Annahme der Kausalität die Vorbereitung und die Auswertung des Experiments und könnte daher auf die ontologische und epistemische Unsicherheit wirken. Weiterhin können Modelle als epistemische Instrumente angesehen werden, die über Limitationen und Gültigkeitsbereiche verfügen. Diese Grenzen sind den Schüler:innen oftmals nicht bekannt. Beispielsweise wird das Hooksche Gesetz bei Federn übergeneralisiert oder die Kleinwinkelnäherung beim Fadenpendel nicht berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund lassen sich Fragestellungen ableiten: Wie hängen verschiedene Quellen von Unsicherheit in ihrem Einfluss auf Erkenntnisgewinnungsprozesse zusammen? Wie können Lernende hierbei unterstützt werden?

Unsicherheiten beim Experimentieren im Kontext von Bayesian Updating

Die vorgestellten Unsicherheiten sollen unter Verwendung von Bayesian Updating in ein Framework übersetzt werden. Dem Bayesian Updating liegt die Idee inne, die eigene Überzeugung bzw. das eigene Vorwissen auf Grundlage von empirischen Beobachtungen zu aktualisieren. Mathematisch ausgedrückt ergibt sich:

$$\underbrace{p(\theta|\text{data})}_{\text{Posterior uncertainty about parameters}} = \underbrace{p(\theta)}_{\text{Prior uncertainty about parameters}} \times \underbrace{\frac{p(\text{data}|\theta)}{p(\text{data})}}_{\text{Predictive updating factor}}$$

Der sogenannte Prior gibt die Überzeugung an, die man vor dem Experiment zu dem Sachverhalt aufweist. Der Prior kann auch Aspekte der ontologischen Unsicherheit abbilden. Der Bayesfaktor bzw. Predictive Updating Factor gibt an, wie auf Grundlage von Daten die eigene Überzeugung aktualisiert werden sollte. Diese Größe kann von epistemischer und Messunsicherheit beeinflusst werden. Der sog. Posterior ist eine Quantifizierung für die aktualisierte Überzeugung auf Grundlage von Daten. Dies kann als Quantifizierung der epistemischen Unsicherheit verstanden werden. Diese Aktivität kann mit jedem Experiment wiederholt werden. Ein Posterior des vorausgehenden stellt dann den Prior des aktuellen Durchlaufs dar.

In einem Framework für Arten von Unsicherheiten beim Experimentieren kann das Bayesian Updating wie folgt integriert werden (s. Abb. 1): Zu Beginn des Zyklus steht eine Aussage über die Welt, welche von ontologischen Unsicherheit beeinflusst werden kann und über welche es epistemische Unsicherheit



Abbildung 1: Unsicherheiten bei der Erkenntnisgewinnung im Sinne des Bayesian Updating.

gibt. Zu dieser Aussage weist die Person ein Vorwissen auf, welche die Art des zu planenden Experiments beeinflusst. Dieses Vorwissen wird von epistemischer und Messunsicherheit beeinflusst. In einem nächsten Schritt werden Daten generiert und analysiert. Der Fokus einer Unsicherheitsbetrachtung liegt in diesem Fall auf der Erfassung und Auswertung statistischer und systematischer Messunsicherheiten beim Experimentieren. Nach Abschluss dieses Schritts werden die Daten bewertet. Die Validität des Experiments basiert auf Messunsicherheiten und ermöglicht Rückschlüsse darüber, inwiefern das Experiment zum Erkenntnisgewinn beigetragen hat. Unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten wird eine neue epistemische Unsicherheit bestimmt. Auf dieser Grundlage wird das Wissen über die Welt bzw. die Aussage über die Welt „geupdated“. Zur Unterstützung von Schüler:innen im Umgang mit statistischen Messunsicherheiten liegen 12 elaboriert digitale Lernapps vor, die modular in den Unterricht eingebunden werden und wesentliche Aspekte von Messunsicherheiten beim Experimentieren in 20-25 Minuten adressieren und entsprechende Kompetenzen fördern können (Kardas & Ludwig, 2021). Den Schüler:innen werden zentrale Konzepte und Kompetenzen eines adäquaten Umgangs mit Daten und Messunsicherheiten vermittelt. Für den Umgang mit epistemischen Unsicherheiten können beispielsweise der Confidence Updater und das Model-Evidence-Link Diagramm eingesetzt werden (Kubsch & Neumann, im Druck). Diese Tools unterstützen die Schüler:innen dabei, die epistemische Unsicherheit auf Grundlage der Daten abzuschätzen und einen Posterior zu bestimmen. Mit Hilfe dieser Tools soll es möglich werden, Schüler:innen ein adäquateres Bild über den Erkenntnisgewinnungsprozess zu vermitteln.

Literatur

- Bao, L., & Redish, E. F. (2002). Understanding probabilistic interpretations of physical systems: A prerequisite to learning quantum physics. *American Journal of Physics*, 70(3), 210–217.
- Driver, R., Newton, P., & Osborne, J. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science Education*, 84(3), 287–312.

- Fuller, W. A. (2009). *Measurement Error Models*. John Wiley & Sons.
- Gott, R., & Duggan, S. (2007). A framework for practical work in science and scientific literacy through argumentation. *Research in Science & Technological Education*, 25(3), 271–291.
- Gougis, R. D., Stomberg, J. F., O'Hare, A. T., O'Reilly, C. M., Bader, N. E., Meixner, T., & Carey, C. C. (2017). Post-secondary Science Students' Explanations of Randomness and Variation and Implications for Science Learning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15(6), 1039–1056.
- Heinicke, S. (2012). *Aus Fehlern wird man klug: Eine genetisch-didaktische Rekonstruktion des „Messfehlers“*. Dissertation. Logos. Berlin.
- Hull, M. M., Jansky, A., & Hopf, M. (2021). Probability-related naïve ideas across physics topics. *Studies in Science Education*, 57(1), 45–83.
- Kardas, E. (2023). *Einfluss von Datenkompetenz auf das Argumentieren beim Experimentieren*. Dissertation Pädagogische Hochschule Karlsruhe.
- Kardas, E., & Ludwig, T. (2021). Den Umgang mit Messunsicherheiten lernen—Digitale Apps für ein wichtiges Thema. *Plus Lucis*, 4, 24–32.
- Kok, K. (2022). *Certain about uncertainty*, Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin,.
- Kok, K., & Priemer, B. (2022). Evaluating students' justifications in a data comparison problem. In S. Habig (Hrsg.), *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen* (Bd. 42). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik.
- Kok, K., Priemer, B., Musold, W., & Masnick, A. (2019). Students' conclusions from measurement data: The more decimal places, the better? *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010103.
- Kubsch, M., & Neumann, K. (im Druck). Science Denial im naturwissenschaftlichem Bereich begegnen. In N. Graulich, J. Arnold, S. Sorge, & M. Kubsch (Hrsg.), *Lehrkräftebildung von morgen*. Waxmann.
- Leak, A. E., Santos, Z., Reiter, E., Zwickl, B. M., & Martin, K. N. (2018). Hidden factors that influence success in the optics workforce. *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), 010136.
- Lubben, F., Campbell, B., Buffler, A., & Allie, S. (2001). Point and Set Reasoning in Practical Science Measurement by Entering University Freshmen. *Science Education*, 85(4), 311–327.
- Ludwig, T., Priemer, B., & Lewalter, D. (2021). Assessing Secondary School Students' Justifications for Supporting or Rejecting a Scientific Hypothesis in the Physics Lab. *Research in Science Education*, 51(3), 819–844.
- Manz, E., & Suárez, E. (2018). Supporting teachers to negotiate uncertainty for science, students, and teaching. *Science Education*, 102(4), 771–795. <https://doi.org/10.1002/scs.21343>
- McComas, W. F. (2004). Keys to teaching the nature of science. *The science teacher*, 71(9), 24.
- Osborne, J. (2010). Arguing to Learn in Science: The Role of Collaborative, Critical Discourse. *Science*, 328(5977), 463–466.
- Pols, F., Dekkers, P., & de VRIES, M. (2021). What do they know? Investigating students' ability to analyse experimental data in secondary physics education, *International Journal of Science Education* .
- Priemer, B., & Hellwig, J. (2018). Learning About Measurement Uncertainties in Secondary Education: A Model of the Subject Matter. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 16(1), 45–68.
- Rosenberg, J. M., Kubsch, M., Wagenmakers, E.-J., & Dogucu, M. (2022). Making Sense of Uncertainty in the Science Classroom. *Science & Education*, 31(5), 1239–1262.
- Santostasi, D., Malgieri, M., Montagna, P., & Vitulo, P. (2017). An experiment on radioactive equilibrium and its modelling using the 'radioactive dice' approach. *Physics Education*, 52(4), 045023.
- Schulz, J. (2022). *Entwicklung eines Testinstrumentes zur Erfassung von Kompetenzen im Umgang mit Messunsicherheiten*. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Warren, A. R. (2020). Impact of Bayesian updating activities on student epistemologies. *Physical Review Physics Education Research*, 16(1), 010101.