

## Die persönliche Gleichung in der Astronomie und ihre didaktischen Implikationen

Simon F. Kraus

Universität Siegen, Didaktik der Physik, Adolf-Reichwein-Str. 2, 57068 Siegen  
kraus@physik.uni-siegen.de

### Kurzfassung

In Zeiten zunehmender Technisierung stellt sich auch für den Physikunterricht die Frage, inwieweit man sich auf komplexe Messgeräte stützt oder „herkömmliche“ Instrumente hinzuzieht. Moderne elektronische Messinstrumente verschleiern nicht selten den physikalischen Kern des Messvorgangs. Es kann deshalb vor allem aus fachdidaktischen Gründen sinnvoll sein, bewusst auf moderne elektronische Methoden der Messwerterfassung zu verzichten. Allerdings ist dabei zu beachten, dass viele Lernende analoge Messverfahren als antiquiert und ungenau ansehen - nicht zuletzt auch deshalb, weil sie der Auffassung sind, moderne Technik würde den Menschen als Fehlerquelle ausschließen.

Beim Verzicht auf klassische Messmethoden tritt jedoch eine verpasste Chance hinzu: Es kann äußerst spannend und interessant sein, das Individuum Mensch und seinen unmittelbaren Einfluss auf die Resultate von Experimenten zu betrachten. Der Blick ins 19. Jahrhundert zeigt, wie sich im Rahmen der Einführung verbesserter Instrumente zur Ermittlung der Zeitpunkte von Sternpassagen plötzlich eine neue Fehlerquelle auftut. Friedrich Wilhelm Bessel analysierte diese Einflüsse auf die Messwerte und erkannte als erster ihre Abhängigkeit von der Person des Beobachters. Durch die quantitative Beschreibung der sogenannten persönlichen Gleichung und ihrer Berücksichtigung in der Positionsastronomie gelangen ihm und anderen Beobachtern fortan signifikante Verbesserungen der Datenbestände.

### 1. Wissenschaftsgeschichte und Didaktik

Die Integration wissenschaftsgeschichtlicher Themen in den Unterricht scheint aus vielerlei Hinsicht erstrebenswert. Auf die Vorzüge, Hindernisse und möglichen Herangehensweisen soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Stattdessen sei auf die vorhandene Literatur verwiesen (siehe beispielhaft [1] - [4]). Besonders hervorgehoben werden soll dagegen der Aspekt der Förderung des Verständnisses physikalischer Aufgaben. Mit den Worten von Ziegler und Vortmeyer-Kley ist die Einbettung in den historischen Hintergrund oft eine Hilfe, „weil sie die Begriffs- und Modellbildung transparent macht und zugleich deutlich macht, dass Physik das Ergebnis eines langen und harten Ringens ist“. ([4], S. X)

Das hier präsentierte Beispiel des Erkenntnisprozesses zeigt weiterhin die Verwobenheit zwischen physikalischer Erkenntnis und der menschlichen Wahrnehmung, die gleichermaßen Voraussetzung wie Grenze der Erkenntnis ist.

### 2. Historische Rahmenbedingungen

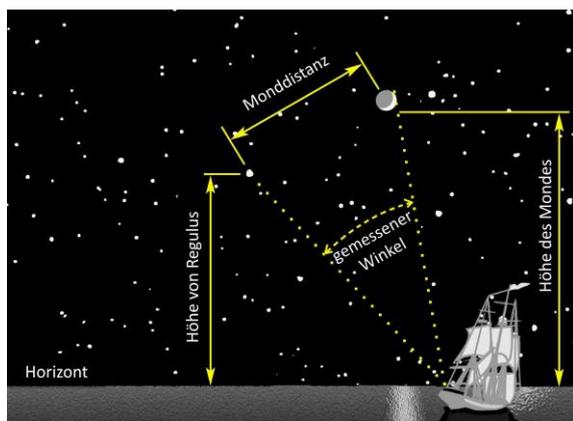
Seefahrer sahen sich über Jahrhunderte mit der Herausforderung konfrontiert, ihre Position auf hoher See zu bestimmen. Zahlreiche Schiffsunglücke, darunter auch der Verlust einer ganzen Flotte von

Kriegsschiffen vor der englischen Küste im Jahre 1707, mit ihren enormen Verlusten an Menschenleben und eingesetztem Kapital, rückten das Problem zunehmend in den Fokus von Politik und Wissenschaft (eine populärwissenschaftlich aufgearbeitete Darstellung des historischen Kontextes findet sich in [5]).

#### 2.1. Das Längengradproblem

Die sichere Navigation auf hoher See erfordert – heute wie damals – die exakte Kenntnis von Längen- und Breitengrad des Schiffs. Während die Bestimmung des Breitengrades relativ einfach durch die Bestimmung der Höhe heller Sterne, der Beobachtung der Kulminationshöhe der Sonne etc. zu ermitteln ist, ist die Bestimmung des Längengrades mit ungleich größeren Herausforderungen verbunden. Sie erfordert die Kenntnis der Referenzzeit an einem Ort bekannter Länge und die aktuelle Ortszeit.

Realisierbar wird dies durch die Beobachtung eines Ereignisses, dessen Erscheinungszeitpunkt am Referenzort vorausberechnet wurde. Die Differenz zwischen Referenzzeitpunkt und tatsächlichem Eintritt der Erscheinung am Beobachtungsort (mit seiner lokalen Zeit) ergibt dann den Längengradunterschied.



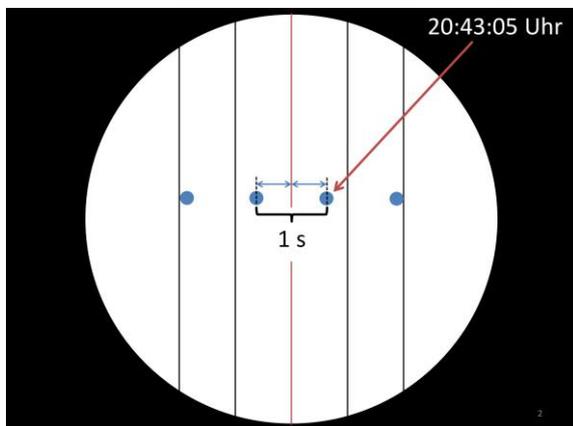
**Abb. 1** Methode der Mondsternenmessungen. Die Winkeldistanz zwischen Mond und Regulus wird für bestimmte Zeitpunkte am Bezugsmeridian vorausberechnet. Der beobachtete Eintritt des Ereignisses ergibt indirekt die Zeitdifferenz zum Bezugsmeridian. (Quelle: wikimedia.org / Michael Daly, Lizenz: CC BY-SA 4.0).

## 2.2. Lösungsansätze

Die endgültige Lösung des Längengradproblems bestand in der Mitführung hochstabiler Chronometer, die die Zeit am Nullmeridian (je nach Nation und Zeitpunkt Greenwich, Paris, San Fernando etc.) anzeigte. Sonnenbeobachtungen ergaben die lokale Zeit. Da die Konstruktion solcher Uhren jedoch lange Zeit eine nicht zu überwindende technische Hürde darstellte, die erst durch John Harrison (1693–1776) gelöst wurde, mussten zunächst andere Wege gefunden werden.

Prinzipiell geeignet wären die regelmäßigen Erscheinungen rund um die Monde des Jupiters. Diese ziehen regelmäßig vor oder hinter dem Planeten vorbei oder werden von seinem Schatten verdunkelt. Jedoch muss zur erfolgreichen Registrierung Jupiter am Ort des Beobachters in ausreichender Höhe über dem Horizont stehen und gleichzeitig die nautische Dämmerung (die Sonne steht mindestens  $12^\circ$  unter dem Horizont) vorüber sein. Im Gegensatz zu Sonnen- oder Mondfinsternissen sind die Verfinsterungen der Jupitermonde ein ausreichend häufiges Ereignis.

Die Beobachtung dieser Erscheinungen setzt jedoch



**Abb. 2** Schematische Darstellung der Beobachtungsmethode nach Bradley. Die Sternpositionen im Abstand von je 1 s sind blau markiert.

zwingend ein Teleskop voraus, welches sich nicht an Bord eines Schiffs nutzen lässt. Demensprechend waren praktikable Alternativen gefragt.

## 2.3. Die vorläufige Lösung

Eine Lösung, die bis zur Einführung der Schiffschronometer bestand haben sollte, stellt die Methode der Messung der Mondsternen dar. Dazu wurde eine Winkelmessung zwischen dem hellen Rand des Mondes und einem Bezugsstern großer Helligkeit vorgenommen. Erreicht der Mond einen vorab festgelegten und in einem Tabellenwerk dokumentierten Winkel, so wird die Höhe von Mond und Stern über dem Horizont gemessen. Der Vergleich mit der Horzhöhe am Referenzort ergibt damit den Zeit- und darüber den Längenunterschied.

Solche Winkelmessungen waren mit Quadranten oder Sextanten von geschultem Personal mit genügender Genauigkeit auch auf See durchführbar. Hierfür existieren jedoch wiederum zwei Voraussetzungen: Erstens müssen die Gesetze der Mondbewegung genau bekannt sein, die durch Bahnstörungen unterschiedlicher Herkunft keineswegs trivial sind. Zweitens muss dem Verfahren ein Fundamentalkatalog der Sterne zugrunde liegen, der selbst hinreichend genau ist.

## 2.4. Die Rolle der Astronomie bei der Problemlösung

Die eingangs erwähnten finanziellen Verluste, die durch die Navigationsfehler hervorgerufen wurden, waren der Ansporn der Regierungen der führenden Nationen, selbst Mittel zur Linderung des Problems bereitzustellen.

Das Erfordernis präziser Sternkataloge führte ab der Mitte des 17. Jahrhunderts zur Gründung von gut ausgestatteten Sternwarten in ganz Europa, darunter auch des Observatoriums von Greenwich (1676). Ihre Aufgabe lag in der Erstellung solcher Kataloge, wozu Durchgangsbeobachtungen an Meridiankreisen durchgeführt wurden.

## 3. Entdeckung der Beobachterabweichungen

### 3.1. Das Beobachtungsverfahren

Zur Messung der Durchgangszeiten kam das Verfahren nach James Bradley (1693–1762), 3. Astronomer Royal am Observatorium in Greenwich, zum Einsatz. Dabei wurde das Okular eines Teleskops mit drei bis fünf, senkrecht zur Bewegungsrichtung der Sterne angeordneten, hauchdünnen Fäden ausgestattet. Das Teleskop selbst war fest montiert und lediglich in Deklinationsrichtung, also entlang des Meridians schwenkbar.

Während die Bewegung des Sterns durch das Gesichtsfeld beobachtet wurde, schlug gleichzeitig eine Uhr im Sekunden- oder Halbsekundentakt. Aufgabe des Beobachters war es, sich zu jedem Schlag der

Uhr die Position des Sterns zu merken. Abbildung 2 stellt den Durchgang eines Sterns durch das Gesichtsfeld des Okulars dar. Die Positionen des Sterns (blau markiert) sind im Bild eingetragen. Man beachte dabei die durch das Instrument hervorgerufene Bewegung von rechts nach links. Betrachtet man die beiden inneren Positionen des Sterns, so ist erkennbar, dass der Durchgang 0,5 s nach dem Schlag der Uhr um 20:42:05 Uhr erfolgt ist.

Die hier stark vereinfachte Darstellung täuscht über die sehr hohen instrumentellen und persönlichen Anforderungen hinweg. Man denke etwa an eine notwendige Kompensation von Temperaturschwankungen oder die Szintillation des Sterns.

Auf diese Weise ließ sich der Zeitpunkt des Durchgangs des Sterns durch den zentralen Faden des Messokulars mit einer Genauigkeit von ca. 0,2 s bestimmen. ([7], S. 141-142)

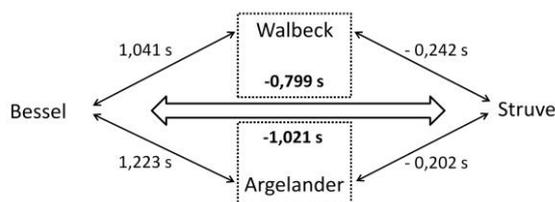
Dem vorgestellten Verfahren lag die Annahme zugrunde, dass die Genauigkeit der Messungen allein vom Geschick und der Übung des Beobachters abhing. Demzufolge wurde den Messungen, die von den Sternwartendirektoren persönlich ausgeführt wurden, das höchste Gewicht beigemessen.

### 3.2. Probleme bei der Durchführung

Nevil Maskeleyne (1732–1811), 5. Astronomer Royal, veröffentlichte in seinem Beobachtungsbericht aus dem Jahre 1799 eine kurze Anmerkung, die Einblick in die Arbeit des Observatoriums gibt und gleichzeitig in der Folgezeit ein kaum zu überwindendes Problem für die dort betriebenen hochpräzisen Messungen offenbaren sollte:

“I Think it necessary to mention my Assistant, Mr. David Kinnebrook, who had observed the transits of the stars and planets very well, in agreement with me, all the year 1794, and for great part of the present year, began, from the beginning of August last, to **set them down half a second of time later than he should do**, according to my observations; and in January of the succeeding year, 1796 he **increased his error to 8/10ths of a second.**” ([6], S. 339, Hervorhebungen durch den Verfasser)

Maskeleyne hebt hier – in völliger Übereinstimmung mit dem Kenntnisstand seiner Zeit – hervor, dass die



**Abb. 3** Ergebnisse der Vergleichsmessungen Bessels. Eingetragen sind jeweils die Mittelwerte der Abweichungen mehrerer Durchgangsbestimmungen. Ziel war der Abgleich zwischen Bessel und Struve. Die Vergleichspfade über Walbeck und Argelander ergaben jedoch abweichende Ergebnisse.

gemessenen Durchgangszeiten seines Assistenten als fehlerhaft anzusehen sind (vgl. [7]).

Es folgt sogleich eine Ausführung zu den getroffenen Maßnahmen:

“As he had unfortunately continued a considerable time in this error before I noticed it, and did **not seem to me likely ever to get over it, and return to a right method of observing**, therefore, though with reluctance, as he was a diligent and useful assistant to me in other respects, **I parted with him.**” ([6], S. 339, Hervorhebungen durch den Verfasser)

Das Unvermögen des Assistenten, der ansonsten als sorgfältig und nützlich beschrieben wird, zur richtigen Methode der Zeitnahme zurückzukehren, lässt nur eine Lösung zu. Für Maskeleyne selbst war das Problem mit der Entlassung seines Assistenten gelöst. Für weitere Nachforschungen in dieser Sache schien es keinen Bedarf zu geben.

### 4. Systematische Untersuchung

Systematische Untersuchungen erfolgten erst durch Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846), Direktor der Sternwarte in Königsberg, der auf Umwegen von der Schilderung Maskeleynes erfuhr und dem ein plötzliches Versagen des geübten Beobachters sehr unglaubwürdig erschienen sein mag.

Bessel nutzte seine Kontakte zu Friedrich Georg Wilhelm von Stuve (1793–1864) am Observatorium von Dorpat (heute: Tartu, Estland) und den Umstand das Friedrich Wilhelm Argelander (der vormals sein Assistent in Königsberg war) das Observatorium in Åbo (heute: Turku, Finnland) übernahm. Damit stand ihm die Möglichkeit zur Verfügung, Vergleichsmessungen zwischen äußerst fähigen Beobachtern an gut ausgestatteten Observatorien anzustellen.

Da ihm zunächst kein direkter Vergleich mit den Zeitbestimmungen Struves möglich war, nutzte Bessel den Umweg über seine Assistenten. Einer von ihnen war Johann Henric Walbeck, zu dem Bessel eine Differenz seiner eigenen Messungen von 1,041 s feststellte (Walbeck beobachtete den Durchgang jeweils um diese Zeitspanne später). Der Vergleich zwischen Walbeck und Struve ergab dann wiederum, dass Struve die Durchgänge 0,242 s früher angab. Zur Absicherung der Ergebnisse sollte der Abgleich auch durch Argelander, auf seiner Reise nach Åbo, erfolgen. Abbildung 3 gibt die festgestellten Zeitdifferenzen aller Beteiligten an. Aus seiner Unternehmung konnte Bessel nun zweierlei schließen: Zum einen gab es Unterschiede in der Angabe der Durchgangszeiten zwischen ihm, Struve und Argelander, d.h. zwischen drei Sternwartendirektoren, denen jeweils das höchste Maß an Genauigkeit zugebilligt wurde. Zum anderen zeigte sich, dass die auf zwei Wegen ermittelte Differenz zwischen ihm und Struve nicht das gleiche Ergebnis

erbrachte, d.h. die Differenzen waren zeitlich nicht konstant.

#### 4.1. Konsequenzen für die Beobachtungspraxis

Zum Ausgleich der Beobachtereinflüsse war zunächst eine systematische Dokumentation der Observatoren notwendig. Dies ließ sich in den Beobachtungsbüchern ohne Mehraufwand bewerkstelligen. War eine Konsolidierung und Überführung von Messungen zwischen zwei oder mehr Beobachtern notwendig, so mussten zunächst die Abweichung zwischen ihnen ermittelt und durch Addition bzw. Subtraktion des entsprechenden Wertes ausgeglichen werden. Der Begriff der persönlichen Gleichung repräsentiert diese Ausgleichsrechnung, die für jedes Beobachterpaar von neuem erstellt werden musste (vgl. [7], S. 203-212).

Anders als von Bessel anfänglich konstatiert unterliegt die persönliche Gleichung mittelfristig in der Regel keinen größeren Schwankungen. Zur Kalibrierung genügt demnach eine über mehrere Tage verteilte, abwechselnde Beobachtung mehrerer Vergleichssterne. Indirekte Abgleiche, wie derjenige zwischen Bessel und Struve, sind naturgemäß mit größeren Fehlern behaftet und kommen als Quelle für Bessels zunächst misslungenen Versuch in Betracht.

#### 4.2. Ideengeschichtlicher Einfluss

Aus ideengeschichtlicher Sicht ist hervorzuheben, dass Bessels Untersuchungen die bisherigen Grundannahmen widerlegten. Keineswegs ist die Messgenauigkeit der Durchgangsbeobachtungen allein vom Geschick des Beobachters abhängig und sie lässt sich auch durch Übung nicht beliebig steigern. Damit war der Glaube an die „Autorität“ der Sternwartendirektoren bei der Angabe „wahrer“ Messwerte als Trugschluss entlarvt. Vielmehr zeigte sich, dass es einen „wahren Wert“ mit dem klassischen Beobachtungsverfahren gar nicht geben kann.

Dagegen rückte das Individuum in den Mittelpunkt des Interesses. Fortan wurde penibel vermerkt, durch welchen Beobachter Messungen vorgenommen wurden.

### 5. Schulische Relevanz

#### 5.1. Technikgläubigkeit

Die Zeiten zunehmender Technikgläubigkeit machen auch vor dem Schulunterricht im Allgemeinen und ebenso dem Physikunterricht im Speziellen nicht halt. Praktisch jedem Lehrenden an Schule und Hochschule dürfte die leidige Diskussion um die vermeintlich größere Präzision digitaler Messgeräte gegenüber ihren analogen Pendanten bekannt sein. Mehr und mehr finden immer komplexere Messgeräte Einzug in den Unterricht – sei es in Form von „klassischen“ Messwerterfassungssystemen oder

auch durch Smartphones. Unbestritten besitzen solche Geräte eine Legitimation für den Einsatz im Unterricht, sowohl aus messtechnischen, wie auch aus motivationalen Gründen. Gleichzeitig wird durch den Charakter einer Black-Box der eigentliche Messvorgang immer weiter verschleiert und der Lernende entfremdet sich zunehmend von der eigentlichen Mess- oder Beobachtungsaufgabe. Die gesamte Prozesskette, von der physikalischen Erscheinung bis zur Dokumentation des vermeintlichen oder tatsächlichen Messwertes, an ausgewählten Beispielen in den Blick zu nehmen, sollte Bestandteil des Unterrichts sein. Damit einhergehen muss jeweils die Reflexion des eigenen Einflusses auf die angestellten Beobachtungen und Messungen.

#### 5.2. Nature of Science

Basierend auf der verbreiteten Vorstellung von Physik oder Astronomie als „exakte Wissenschaften“, sollten diese frei von subjektiven Einflüssen sein. Tatsächlich ist jedoch auch hier der Mensch elementarer Teil des Erkenntnisprozesses. Diesem Umstand sollte im Rahmen der dezidierten Thematisierung von Nature of Science-Aspekten im Unterricht Rechnung getragen werden. Ausgewählte Themen, wie die Geschichte rund um die Entdeckung der persönlichen Gleichung können ein geeigneter Anlass dazu sein.

#### 5.3. Fächerübergreifende Aspekte

Der dargestellte Einfluss grundlegender wahrnehmungsphysiologischer und –psychologischer Voraussetzungen auf Beobachtungen bietet sich auch für eine fächerübergreifende Bearbeitung an. Der physikalische Erkenntnisweg und die Physiologie sind hier untrennbar miteinander verbunden. Experimente zur Wahrnehmungsphysiologie können sich anschließen und das Bewusstsein für die Möglichkeiten und Grenzen des menschlichen Körpers schärfen.

Auch lassen sich bekannte Experimente, wie die Messung der Reaktionsgeschwindigkeit mittels einem fallendem Lineal in einen neuen Kontext stellen und bewerten. Unterschiede in den Reaktionszeiten lassen sich nicht in die üblichen Kategorien schnell/langsam und besser/schlechter einordnen, sondern erfordern eine differenzierte Betrachtung und systematische Überlegungen zu den möglichen Folgen: Welche Messungen und Beobachtungen sind unter Forschern oder Schülern austauschbar und bleiben direkt vergleichbar? Wo sind vorhergehende Korrekturen erforderlich? Die Beantwortung solcher Fragen lässt die Fächergrenzen verwischen.

#### 5.4. Einüben systematischer Naturbeobachtung

Die Stellung der Beobachtung als zentrale Erkenntnismethode der Astronomie muss an dieser Stelle nicht weiter betont werden. Jedoch ist sie auch innerhalb der Physik von großer Bedeutung und dementsprechend in den Bildungsstandards ([8], S. 9) und Physiklehrplänen (z.B. [9], S. 16) als zu entwickelnde Fähigkeit zu finden. Gegenüber dem Experiment tritt die Beobachtung hier jedoch in den Hintergrund. Dabei ist die Ausführung eines systematischen Beobachtungsauftrages ein komplexes Unterfangen, welches selbst zunächst ebenso systematisch erlernt und geübt werden muss. Der Blick in die Wissenschaftsgeschichte kann dies verdeutlichen.

#### 6. Literatur

- [1] Heering, P., Klassen S., Metz, D., (2013): Enabling Scientific Understanding through Historical Instruments and Experiments in Formal and Non-Formal Learning Environments.
- [2] Höttecke, D., Silva, C.C. (2011): Why Implementing History and Philosophy in School Science Education is a Challenge - An Analysis of Obstacles. *Science & Education* 20 (3-4), S. 293-316.
- [3] Kuhn, W. (2016): *Ideengeschichte der Physik*.
- [4] Ziegler, A., Vortmeyer-Kley, R. (2016): *Physik verständlich*.
- [5] Sobel, Dava (2015): *Längengrad. Die wahre Geschichte eines einsamen Genies, welches das größte wissenschaftliche Problem seiner Zeit löste*.
- [6] Maskelyne, Nevil (1799): *Astronomical Observations. Made at the Royal Observatory at Greenwich from M. DCC. LXXXVII. to M. DCC. XCVIII*. London (3).
- [7] Hoffmann, Christoph (2006): *Unter Beobachtung. Naturforschung in der Zeit der Sinnesapparate*. Göttingen: Wallstein (Wissenschaftsgeschichte).
- [8] KMK (2004): *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*.
- [9] Ministerium für Schule und Weiterbildung NRW (2008): *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen*.