

Mit der Zweiten lernt man mehr

Ein dynamisches Unterrichtsmodell bietet einen zweidimensionalen Zugang zur Mechanik und zeigt viele Erfolge.

Martin Hopf, Thomas Wilhelm, Hartmut Wiesner, Verena Tobias und Christine Waltner

Mechanik ist schwer. Das weiß jeder, der dieses Gebiet schon einmal unterrichtet hat. Die Lehrkräfte stehen dabei vor der Aufgabe, die Konzepte der Newtonschen Gesetze so verständlich zu machen, dass Schülerinnen und Schüler nicht nur Gleichungen lösen, sondern begrifflich damit umgehen können. Ein erfolgversprechender Ansatz knüpft an Alltagsvorstellungen an und arbeitet von Beginn an mit vektoriellen Größen.

Ein kleines Beispiel soll verdeutlichen, welche Schwierigkeiten selbst Studierende mit den Konzepten der Mechanik haben: In einer Befragung testeten wir an mehreren Universitäten zu Beginn des ersten Semesters das Verständnis der Newtonschen Mechanik mit einem Standard-Messinstrument, dem „Force Concept Inventory“ [1]. Dieser Multiple-Choice-Test kommt weltweit in vergleichbaren Populationen zum Einsatz. Eine Aufgabe besteht beispielsweise darin, die Kraft auf eine Kugel während des senkrechten Wurfs anzugeben (Infokasten). Diese Frage konnten in unserer Befragung nur 15 bis 40 Prozent der Studienanfänger richtig lösen. Trotz vorhergegangenen Unterrichts in Mechanik sind sich unsere Testpersonen – die immerhin so überzeugt von ihren Fähigkeiten in Physik sind, dass sie dieses Fach studieren – sicher, dass bis zum Umkehrpunkt neben der Schwerkraft eine weitere, nach oben gerichtete Kraft auf die Kugel wirken muss.

Wie internationale Vergleichsstudien zeigen, sind solche Ergebnisse relativ typisch. Weltweit haben Jugendliche und junge Erwachsene erhebliche Schwierigkeiten, die Grundbegriffe der Newtonschen Mechanik selbst auf einfache Probleme korrekt anzu-



Spielerisch lernen: Mit einem Stift versucht eine Schülerin, der Kugel eine

solche Zusatzgeschwindigkeit mitzugeben, dass die Kugel das Tor trifft.

wenden [2]. Eine Hauptursache dafür sind Schülervorstellungen [3]: Kinder und Jugendliche legen sich, lange bevor systematisch Physik unterrichtet wird, Vorstellungen davon zurecht, wie sich die Welt um sie herum verhält. Bei jedem von uns hat sich z. B. verfestigt, dass es im Wesentlichen nur zwei Zustände gibt: Bewegung und Ruhe. Und wir haben gelernt, dass eine Bewegung nur durch ständige Einwirkung aufrechtzuerhalten ist. Dieses Alltagsverständnis hat sich immer wieder als verlässlich und plausibel erwiesen. Daher ist nicht zu erwarten, dass Menschen eine so feste Überzeugung schnell aufgeben, nur weil eine Lehrkraft sagt, in Wirklichkeit sei es anders. Die physikdidaktische Forschung hat sich in den letzten Jahrzehnten intensiv damit beschäftigt, solche Schülervorstellungen zu identifizieren. Die Forschungslage dazu ist beeindruckend: Schülervorstellungen existieren bei allen Kindern, Jugendlichen (und Erwachsenen) in allen Gebieten der Physik [4]. Man-

che davon erweisen sich als relativ oberflächlich oder entstehen sogar ad hoc: Das bekannteste Beispiel ist die Erklärung der Jahreszeiten mit der Entfernung zur Sonne. Andere Schülervorstellungen hingegen sind tief verwurzelt, wie die Überzeugung „von nichts kommt nichts“, die sich bei Fragen des Energie„verbrauchs“ und in der Dynamik wiederfindet. Physikunterricht, der diese bestehenden Vorstellungen nicht berücksichtigt, kann nur wenig erfolgreich sein.

Konsequenzen für den Unterricht

Es gibt verschiedene Strategien, im Physikunterricht mit Schülervorstellungen umzugehen. Am bekanntesten ist die Konfrontationsstrategie. Sie basiert darauf, Schülerinnen und Schülern zunächst klarzumachen, dass die im Alltag verwendeten Konzepte in dieser Form nicht richtig sein können („kognitiver Konflikt“). Erst danach stellt die Lehrkraft

Prof. Dr. Martin Hopf, Österreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Physik, Universität Wien, Österreich, Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Prof. Dr. Hartmut Wiesner, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, LMU München, Dr. Verena Tobias, Hanns-Seidel-Gymnasium Hösbach und Otto-Friedrich-Universität Bamberg und Dr. Christine Waltner, Lise-Meitner-Gymnasium Unterhaching

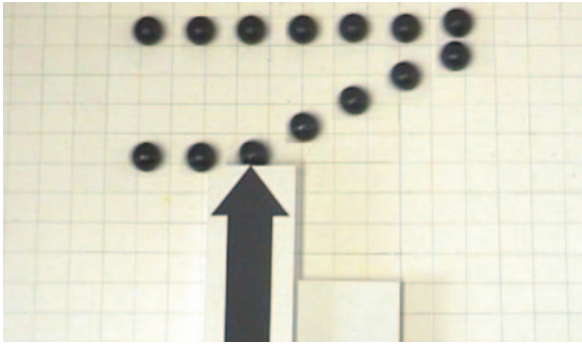


Abb. 1 Zwei Kugeln rollen von links nach rechts. Die untere wird an der dritten Position senkrecht zur Bewegung gestoßen. Das Stroboskopbild zeigt, wie sich die Bahnen beider Kugeln schließlich kreuzen.

neue, physikalisch angemessene Konzepte vor, erläutert diese und übt sie mit den Schülern ein. Dieses für den Einzelunterricht exzellent funktionierende Verfahren ist für den Physikunterricht in Schulklassen nur eingeschränkt brauchbar. So ist es sehr schwierig, für mehr als 30 Jugendliche einen kognitiven Konflikt herzustellen. Das bedarf sorgfältiger Planung und ist nicht in allen Situationen zu erreichen [5]. Die Aktivierung von Schüler Vorstellungen am Anfang einer Unterrichtseinheit kann sogar dazu führen, dass die meisten Schülerinnen und Schüler umso fester an ihren – ja überaus plausiblen – Vorstellungen festhalten.

Unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten basieren auf der Anknüpfungsstrategie. Dabei geht man davon aus, dass manche Vorstellung nicht (oder nur wenig) mit der physikalischen Betrachtungsweise kollidiert. Wir konstruieren Unterrichtssequenzen, die auf solchen Vorstellungen aufbauen.

Gleichzeitig gilt es, lernhinderliche Vorstellungen zu vermeiden. Die Konstruktion solcher Unterrichtssequenzen im Rahmen von „Design-Based Research“ ist ein langjähriger und zum Teil mühevoller Prozess.¹⁾ In der Regel beginnt er mit der Erhebung der Schülervorstellungen. Danach werden kleine Teile von Unterrichtssequenzen entworfen und in Einzel-Instruktions-Interviews, den sog. Teaching Experiments, mit den Jugendlichen bearbeitet. Aus der Analyse einer Vielzahl solcher Interviews lässt sich relativ genau vorhersagen, welche Lernangebote die meisten Schülerinnen und Schüler als verständlich erleben. Damit existiert eine Abfolge von Unterrichtsschritten, die für den realen Unterricht aufzubereiten und empirisch zu überprüfen ist. Curricula, die auf diese Weise entwickelt wurden, haben sich in Studien immer wieder erstaunlich überlegen gegenüber traditionellem Physikunterricht gezeigt [7]. Egal, ob es um Optik, Quantenmechanik, Wärmelehre, Elektrizitätslehre oder Mechanik geht, war das Verständnis von Schülerinnen und Schülern, die nach den forschungsbasierten Curricula unterrichtet wurden, deutlich höher als in Vergleichsgruppen.

Zweidimensionaler Zugang

Im Folgenden wollen wir ein Ergebnis unserer Arbeit vorstellen: ein Unterrichtskonzept zur Newtonschen Mechanik, dessen Lernwirksamkeit bereits nachgewiesen wur-

de.²⁾ Ein solches Projekt kann nach unserer Einschätzung nur gelingen, wenn über viele Jahre hinweg kontinuierlich mit unterschiedlichen Methoden an den Fragen und Problemfeldern gearbeitet wird. Im Bereich Mechanik reichen die physikdidaktischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, auf denen das aktuelle Projekt basiert, bis in die 1970er-Jahre zurück [6]. Die allgemeine Rahmenvorstellung, an welcher der Unterricht anknüpft, ist dabei: „Von nichts kommt nichts“ bzw. „ohne Einwirkung keine Änderung“. Hauptziel des Kurses ist es, den Schülerinnen und Schülern glaubhaft zu machen, dass sich die Geschwindigkeit ändert, wenn man auf den bewegten Körper einwirkt. Um dies zu erreichen, sind folgende Schritte notwendig:

Die Geschwindigkeit als gerichtete Größe verstehen

Üblicherweise beginnt der Mechanikunterricht damit, die eindimensionale Kinematik zu diskutieren. Dazu führt die Lehrkraft Fahrbahnversuche durch, diskutiert Diagramme usw. Allerdings ist bekannt, wie schwierig die Analyse solcher Bewegungen für Jugendliche ist, besonders bei einer Richtungsänderung. Außerdem behindert die Beschränkung auf eine Dimension den weiteren Lernverlauf: Schülerinnen und Schüler erlernen skalare Begriffe von Geschwindigkeit und Beschleunigung. Spätestens bei der Kreisbewegung sind diese Konzepte nicht mehr hilfreich.

Unser Curriculum beginnt mit der Einführung der Geschwindigkeit als gerichtete Größe, selbst wenn die Vektorrechnung noch nicht Thema im Mathematikunterricht war. Moderne Formen, Messwerte zu gewinnen, z. B. die Videoanalyse, erweisen sich dabei als äußerst hilfreich. Schnell zeigt sich, dass es für Kinder und Jugendliche kein Problem darstellt, Geschwindigkeiten durch Pfeile zu symbolisieren und damit zu agieren. Lehrkräfte, die nach wie vor Wert auf skalare Betrachtungen legen, müssen an dieser Stelle das Tempo (als Betrag der Geschwindigkeit) einführen.

EINE AUFGABE DES FORCE CONCEPT INVENTORY

Ein Junge wirft eine Stahlkugel senkrecht nach oben. Alle Effekte von Luftreibungskräften sollen außer Acht gelassen werden. Welche Kraft bzw. Kräfte wirken auf die Kugel während ihrer Flugphase, also nachdem sie die Hand des Jungen verlassen hat und bevor sie auf den Boden trifft?

- Das Gewicht der Kugel vertikal nach unten, zusammen mit einer stetig abnehmenden nach oben gerichteten Kraft.
- Keine der genannten Kräfte. Die Kugel fällt zur Erde zurück, weil das ihrem natürlichen Verhalten entspricht.
- Eine stetig abnehmende nach oben

gerichtete Kraft für den Zeitraum nach dem Verlassen der Hand bis zum höchsten Punkt. Danach wirkt eine stetig zunehmende Gravitationskraft nach unten, wenn sich das Objekt der Erde nähert.

- Eine konstante nach unten gerichtete Gravitationskraft, zusammen mit einer nach oben gerichteten Kraft, die stetig abnimmt, bis die Kugel ihren höchsten Punkt erreicht. Danach wirkt nur die konstante nach unten gerichtete Gravitationskraft.
- Nur eine konstante nach unten gerichtete Gravitationskraft.

1) Ziel dabei ist es, wissenschaftliche und praktische Maßnahmen miteinander zu verbinden, also z. B. Lernumgebungen zu entwickeln und gleichzeitig einen Fortschritt in der Theoriebildung zu erzielen [6].

2) Das Projekt wurde 2011 mit einem zweiten Preis beim Polytechnikpreis für die Didaktik der Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik als einziges physikdidaktisches Projekt ausgezeichnet.

Die Zusatzgeschwindigkeit als Kernbegriff einführen

Mithilfe der genauen Analyse von Bewegungen gilt es, die „Zusatzgeschwindigkeit“ $\Delta\vec{v}$ als Kernbegriff des Lehrgangs zu erarbeiten. Diese eigenständige Größe gibt an, wie sich die Geschwindigkeit in einem Zeitintervall Δt ändert. Die Idee dabei ist folgende: Eine Bewegungsänderung lässt sich in der Art deuten, dass zu einer Anfangsgeschwindigkeit eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ hinzukommen muss, damit die Endgeschwindigkeit resultiert. Die Pfeile von Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit addieren sich dabei grafisch und ergeben gemeinsam den Pfeil der Endgeschwindigkeit. Das Schlüsselexperiment ist der Stoß von Stahlkugeln (Abb. 1): Zwei Kugeln rollen (von einer geneigten Ebene kommend) von links nach rechts. Durch einen Stoß erhält die untere Kugel zur ursprünglichen Geschwindigkeit eine Zusatzgeschwindigkeit in Stoßrichtung. Schülerinnen und Schüler haben keine Probleme mit dieser Argumentation. Hilfreich ist aber, verschiedene Beispiele von Bewegungsänderungen in der Ebene zu diskutieren und auch auf den Spezialfall eindimensionaler Bewegungen einzugehen. Es ist nicht nötig, die Bedeutung des Buchstaben Delta zu strapazieren. Nach unseren Erfahrungen hinterfragen die wenigsten Schülerinnen und Schüler diese Bezeichnung.

Die Newtonsche Bewegungsgleichung in Vektorform herleiten

Bereits im letzten Schritt war immer eine Einwirkung von außen vorhanden, wenn sich die Geschwindigkeit änderte. Dies ist der Grundgedanke der Newtonschen Bewegungsgleichung und Kernstück des vorliegenden Lehrgangs. Dabei vermittelt die Lehrkraft: Eine Einwirkung, z. B. ein Stoß, fügt zur Anfangs- eine Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ in Einwirkungs- bzw. Stoßrichtung hinzu. Schülerinnen und Schülern lernen diesen Zusammenhang in verschiedenen Anwendungsaufgaben.

Anschließend geht es darum zu verstehen, welche Bedingungen sich wie auf die Zusatzgeschwindigkeit

auswirken. Ziel ist zunächst, verschiedene Je-Desto-Beziehungen zu identifizieren. Hier lassen sich recht einfach Plausibilitätsüberlegungen anstellen, welche die Schülerinnen und Schüler glaubhaft finden: Je stärker die Einwirkung ist, desto größer fällt die Zusatzgeschwindigkeit $\Delta\vec{v}$ aus (ein stärkerer Stoß/Schlag, ein stärkerer Magnet oder ein „stärkerer“ Motor führen zu einer größeren Geschwindigkeitsänderung beim Einwirkungspartner). Bei jeweils gleicher Stärke der Einwirkung ist die Zusatzgeschwindigkeit umso größer, je länger die Einwirkung dauert (Anfahren eines Autos, freier Fall, ...). Dass außerdem die Masse des Körpers eine Rolle spielt, ist den Lernenden ebenfalls klar.

Aus den drei Je-Desto-Beziehungen leitet sich nun die Newtonsche Bewegungsgleichung in der Form $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$ ab. Diese Formel ermöglicht es, komplexe Bewegungen des Alltags ohne den Begriff der Beschleunigung zu diskutieren, beispielsweise die Sicherheit beim Autounfall oder den Tritt gegen einen Fußball.

Das zu diesem Kurs entwickelte Schulbuch sowie eine Vielzahl begleitender Materialien sind frei im Internet [8] bzw. als Materialsammlung verfügbar [9]. Zur Erprobung verwendeten im Herbst 2008 in einer Vorstudie 14 Lehrkräfte in 19 Klassen die Lehrermaterialien und das Schülerbuch [10].

Empirische Überprüfung

Eine empirische Studie diente dazu, die Wirksamkeit des Lehrgangs zu überprüfen. Die Studie wurde in siebten Klassen bayerischer Gymnasien durchgeführt. Für diese Jahrgangsstufe sieht der Lehrplan in etwa 22 Unterrichtsstunden die Einführung in die Mechanik vor. Das ausgefeilte Untersuchungsdesign berücksichtigte Kontroll- und Experimentalgruppen: Im Sommer 2008 unterrichteten 10 Lehrkräfte in 14 siebten Klassen nach ihren eigenen, traditionellen Vorstellungen. Genau diese Lehrkräfte

unterrichteten im darauffolgenden Sommer neue (dieses Mal 13) siebte Klassen nach dem neuen Lehrgang. Wir gingen davon aus, dass dies den Einfluss der „Lehrvariable“ minimieren dürfte: Jeweils gleiche Lehrkräfte unterrichteten in Kontroll- und in Experimentalgruppe. Außerdem sollten an einer Schule auch in unterschiedlichen Jahrgängen vergleichbare Voraussetzungen herrschen. Kontrolluntersuchungen bestätigten diese Annahmen weitgehend.

Im April 2009 (also nach dem Unterricht in der Kontrollgruppe) wurden die Lehrkräfte an einem Nachmittag in das neue Konzept eingewiesen und erhielten einen Klassensatz Schulbücher sowie das Unterrichtsmaterial. Nach aktuellem Forschungsstand sollte dabei die Beeinflussung durch die Lehrkräfte so gering sein, dass keine Veränderung bei den Ergebnissen der Schülerinnen und Schüler zu erwarten ist. In allen Gruppen fanden Wissenstests statt, die Einstellung der Schüler wurde direkt vor und nach der Unterrichtseinheit sowie drei Monate später gemessen, zudem wurden alle Lehrkräfte und ausgewählte Jugendliche interviewt.

Auf qualitativer Ebene lässt sich festhalten, dass die Beschreibung von Bewegungen mit Pfeilen den Lernenden keinerlei Schwierigkeiten bereitet. Die Zusammenhänge zwischen Kraft, Masse, Einwirkdauer und Zusatzgeschwindigkeit haben fast alle interviewten Jugendlichen verstanden. Sie haben zwar Schwierigkeiten, die



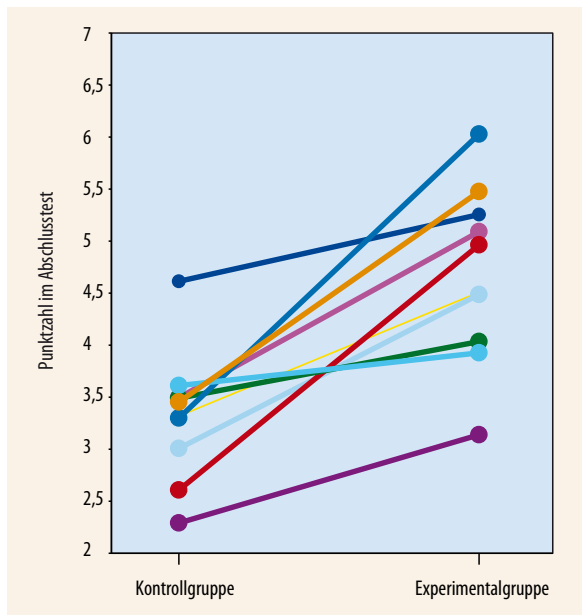


Abb. 2 Unabhängig von der Lehrkraft hat das neue Curriculum durchschnittlich in allen Klassen zu besseren Ergebnissen im Abschlusstest geführt. Für jede Lehrkraft gibt es eine Linie.

Newtonsche Bewegungsgleichung wiederzugeben, nutzen die Formel aber, um Probleme argumentativ zu bearbeiten. Die Hälfte der Interviewten kann Zusatz- und Endgeschwindigkeit quantitativ konstruieren. Auch die Lehrkräfte sind mit dem neuen Konzept sehr zufrieden und geben an, in Zukunft so unterrichten zu wollen.

Auch quantitativ verfügte die Experimentalgruppe über signifikant mehr Wissen mit mittlerer Effektstärke ($d = 0,56$).³⁾ Ein Wert von 0,5 bedeutet, dass sich die Gruppen um eine halbe Standardabweichung unterscheiden. Detailanalysen zeigen, dass Unterschiede in der Leistung von Mädchen und Jungen, die in unseren Vortests noch auftraten, in der Experimentalgruppe nach dem Unterricht nicht mehr signifikant sind. Bei jeder einzelnen Lehrkraft schneiden die Schülerinnen und Schüler der Experimentalgruppe besser ab als die der Kontrollgruppe (Abb. 2), zum Teil ist der Unterschied erheblich. Eine Nachfolgestudie in den Jahren 2009 und 2010 konnte alle diese Effekte bestätigen.

Lediglich bei den Einstellungen von Schülerinnen und Schülern sehen wir kaum Unterschiede der Gruppen. Interesse sowie Selbsteinschätzung der eigenen Fähigkeiten, entwickeln sich gleich. Unsere Hypothese, dass sich besseres Verständnis positiv auf das Interesse auswirkt, bestätigte sich nicht [11].

Zusammenfassung

Wie dieses Projekt zeigt, ist es möglich, das Verständnis von Schülerinnen und Schülern zur Newtonschen Mechanik deutlich zu steigern. Schlüssel zum Erfolg war es, die Sachstruktur des Unterrichts so zu verändern, dass Jugendliche die aufeinander folgenden Erklärungen gut nachvollziehen können. Dabei hat sich als positiv erwiesen, Alltagsvorstellungen nicht von vornherein anzusprechen, sondern zunächst ein konsistentes Erklärungsmodell anzubieten, das an Grundvorstellungen anknüpft. Erst im Nachhinein diskutierte die Lehrkraft mit den Schülerinnen und Schülern, welche alternativen Vorstellungen es gibt und weshalb diese nicht zur physikalischen Betrachtungsweise passen. Im Rahmen des Projektes entstand ein Materialpaket, das es für interessierte Lehrkräfte leicht macht, dieses Konzept für den eigenen Unterricht zu übernehmen.

Erstaunlich war, dass eine halbtägige Lehrerfortbildung zu deutlichen Effekten bei Schülerinnen und Schülern geführt hat. Interessant wäre zu untersuchen, ob längerfristige Fortbildungen den positiven Effekt weiter steigern. Um herauszufinden, wieso sich die Leistungsunterschiede zwischen Jungen und Mädchen verringerten, sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

Die Studie war als Design-Based Research angelegt. Dabei hat sich gezeigt, dass diese Forschungsagenda erfolgreich dazu beitragen kann, Physikunterricht weiterzuentwickeln. Allerdings erlaubt dieser Ansatz es nicht, Aussagen darüber zu treffen, welche der verschiedenen Aspekte unserer Intervention die größten Effekte verursacht hat.

Auch wenn unsere Untersuchung mit relativ jungen Schülerinnen und Schülern stattgefunden hat, lässt sich nach unseren Erfahrungen das vorgestellte Unterrichtskonzept problemlos auf andere Jahrgangsstufen übertragen. Wiederholt haben uns Lehrkräfte begeistert davon berichtet, wie dramatisch dieses Konzept ihren Unterricht in der Oberstufe verbessert hat.

Leider gibt es für viele andere Gebiete der Physik bislang keine vergleichbaren Konzepte. Hier ist noch sehr viel physikdidaktische Forschung und Entwicklung erforderlich.

Literatur

- [1] I. Halloun et al.: Force Concept Inventory (Revised 1995), <http://modeling.la.asu.edu/R&E/Research.html> (1995)
- [2] R. R. Hake, Am. J. of Phys. **66**, 64 (1998)
- [3] R. Müller, R. Wodzinski und M. Hopf (Hrsg.), Schülervorstellungen in der Physik, Aulis, Köln (2007)
- [4] R. Duit, Students' and Teachers' Conceptions and Science Education, IPN Kiel (2009)
- [5] R. H. Duit und D. F. Treagust, Iss. and Chall. in Science Ed. Res. **xx**, 43 (2012)
- [6] T. Wilhelm et al., Design-Based Research am Beispiel der zweidimensional-dynamischen Mechanik, in: Konzepte fachdidaktischer Strukturierung, Jahrestagung der GDPC in Oldenburg, Lit, Münster (2011)
- [7] H. Wiesner und M. Hopf, Schülervorstellungen und Unterricht, in: Physikdidaktik kompakt, Aulis, Hallbergmoos (2011)
- [8] vgl. www.thomas-wilhelm.net
- [9] H. Wiesner et al., Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung, Aulis, Hallbergmoos (2011) und T. Wilhelm et al., Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik, Aulis, Hallbergmoos (2013)
- [10] T. Wilhelm et al., Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht, Lehmanns Media, Bochum und Bonn (2009)
- [11] V. Tobias, Newtonsche Mechanik im Anfangsunterricht, Logos-Verlag, Berlin (2010)

3) Die Effektstärke ist ein statistisches Maß, das die (relative) Größe eines Effektes angibt. Sie vergleicht den Unterschied der Mittelwerte in Einheiten der Standardabweichung.