

Elementarisierung in der Mechanik – Weglassen ist eine Kunst

Th. Wilhelm

1. Elementarisieren

Physiklehrkräfte, Physikdidaktiker und Physiker entwickeln ständig neue Ideen für den Physikunterricht – neue Beispiele, neue Inhalte, neues Vorgehen, neue Kompetenzen. Auch diese Zeitschrift lebt davon. Insbesondere neue technische Errungenschaften eröffnen viele Möglichkeiten im Unterricht. So kann heute beispielsweise fast jede physikalische Größe mit einem entsprechenden Sensor auch in Alltagssituationen kontinuierlich gemessen und die Ergebnisse in Echtzeit ausgewertet und dargestellt werden.

Gleichzeitig hat sich die Unterrichtszeit aber nicht erhöht. Im Rahmen von G8 und der Abschaffung von Leistungskursen (Bayern) hat sie sich eher verringert. Wer also eine neue Idee für den Physikunterricht hat, muss deshalb gleichzeitig auch sagen, wo er etwas weglassen will. Dies geschieht aber leider nur selten. Liebgewonnene Themen werden auch nur ungern weggelassen.

Einigkeit besteht darin, dass wir in der Schule nicht alles unterrichten können und auch nicht so wie in der Hochschule; wir müssen elementarisieren. Elementarisieren bedeutet u.a. Vereinfachen, d.h. Reduzieren, also Weglassen verschiedener Aspekte. Dies soll aber nicht wahllos oder bei allen Themen gleichmäßig geschehen, sondern nach physikdidaktischen Überlegungen. Deshalb ist auch der wichtigere Aspekt des Elementarisierens das Herausarbeiten des Wesentlichen, des Elementaren [1]. Wir müssen uns fragen, was die key ideas und die Kerngedanken sind. Von da aus kann die Sachstruktur des Unterrichts neu geplant und manches weggelassen werden. Dies soll am Beispiel der Mechanik aufgezeigt werden.

2. Was ist in der Mechanik wesentlich?

In früheren Zeiten, als man nur Zeiten und Wege messen konnte, reduzierte man auf das, was damit möglich war. So entstand ein Kanon wichtiger Inhalte in der Mechanik: statische Situationen, der Zusammenhang $s = \frac{1}{2}at^2$ [2] mit der Beschleunigung a sowie die Unterscheidung zwischen der gemessenen Durchschnittsgeschwindigkeit und der nicht messbaren Momentangeschwindigkeit [3]. Aber sind diese Punkte auch wesentlich?

Die Mechanik umfasst je nach Lehrplan bis zu einem Drittel des Physikunterrichts der Sekundarstufe I. Dass es dafür viele Unterrichtsideen gibt, liegt aber auch daran, dass dieses Thema als besonders schwierig und unzufriedenstellend empfunden wird. Viele Aspekte können so im Zusammenhang mit „Kraft“ und „Energie“ behandelt werden. Aber was davon ist „das Wesentliche“?

Das Wesentliche der Newton'schen Mechanik ist sicherlich das zweite Axiom, das festlegt, was unter dem Begriff „Kraft“ zu verstehen ist und deshalb auch Grundgesetz der Mechanik genannt wird. Wenn man von dem seltenen Fall absieht, dass sich die Masse eines Körpers ändert, bleibt als Kernaussage: Eine Kraft bewirkt eine Geschwindigkeitsänderung und jede Geschwindigkeitsänderung kommt von mindestens einer Kraft. Außerdem kennen wir drei Grundarten von Geschwindigkeitsänderung: Das Schnellerwerden, das Langsamerwerden und die Richtungsänderung.

Wer das zweite Newton'sche Axiom als das Zentrale der Mechanik ansieht, muss sich auch über die Konsequenzen Gedanken machen, was im Folgenden geschieht. Wer das nicht als wesentlich ansieht, sondern z.B. nur den Energiebegriff, muss hier nicht weiterlesen.

3. Weglassen in der Statik

Wenn es beim Wesentlichen um die Geschwindigkeitsänderung geht, dann ist alles nicht so wichtig, bei dem die Geschwindigkeit null oder konstant ist, also die gesamte Statik. Dazu gehört z.B. die Dehnung und das Hooke'sche Gesetz. Hier greifen zwei gegengleiche Kräfte an einem Körper an, der deshalb seine Geschwindigkeit nicht ändert, sondern sich nur verformt. Je nach Material ergibt das sehr unterschiedliche Zusammenhänge. Der Spezialfall des Hooke'schen Gesetzes war nur früher wichtig, als man Kräfte über die statische Kraftmessung einführt und den Federkraftmesser als eines der wenigen verwendeten Geräte genau verstehen wollte. Heute kann man da stark kürzen.

Kraftwandler, wie Seil, Rolle und Flaschenzüge, wurden früher behandelt, um deutlich zu machen, dass man den Angriffspunkt, den Betrag und die Richtung einer Kraft verändern kann. Das ist aber ziemlich unwichtig im Vergleich zur Wirkung einer Kraft, der Geschwindigkeitsänderung. Die Aussage bzgl. des Angriffspunktes ist zudem noch problematisch [4]. Bei den meist betrachteten punktförmigen Körpern, genannt Massepunkte, ist diese Betrachtung nicht sinnvoll. Bei einem ausgedehnten starren Körper wiederum ist der Angriffspunkt ohne Bedeutung. Für die lineare Bewegung gilt, dass die Beschleunigung aus der Vektorsumme aller angreifender Kräfte entsteht: $\vec{a} = \frac{1}{m} \cdot \sum \vec{F}$ – unabhängig vom Angriffspunkt der einzelnen Kräfte! Für die Drehbewegungen ist dagegen nur die Wirkungslinie der Kraft wichtig, nicht ihr Angriffspunkt. Im Zusammenhang mit Kräften sollte man deshalb auf Kraftwandler verzichten und diese nur als Beispiel für die Energieerhaltung verwenden.

4. Weglassen in der Kinematik

Der Impuls ist als gewichtete Geschwindigkeit eine kinematische Größe. Immer wieder wurde vorgeschlagen [5], in der kinematischen Bewegungsbeschreibung mit dem Impuls vor der Kraft zu beginnen, um den Schülern sagen zu können, dass das, was sie sich unter „Kraft“ vorstellen, in der Physik „Impuls“ heißt. Der Impulsbegriff deckt sich zwar nicht ganz mit dem Alltagsbegriff „Kraft“, kommt ihm aber näher als andere Größen. Es gibt aber keine empirischen Belege, dass dies funktioniert. Da sich die Masse der Körper in der Schule nicht

ändert und man letztlich immer die Geschwindigkeit und die Geschwindigkeitsänderung betrachtet, ist es nicht nötig, bereits in der Sek. I mit dem Impuls einen weiteren Fachbegriff einzuführen statt sich nur die Geschwindigkeit anzuschauen. Letztlich argumentiert man dann ja doch mit der Geschwindigkeit.

Wenn man die Geschwindigkeitsänderung in einem Zeitintervall als das Wesentliche ansieht, bedeutet das auch, die Änderungsrate, die Beschleunigung, ist nicht so wichtig. Für das qualitative Verständnis reicht es völlig aus, angeben zu können, ob die Geschwindigkeitsänderung groß oder klein ist und welche Richtung sie hat. Folglich genügt es, die Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ in einem festen Zeitintervall Δt anzugeben und damit beschleunigte Bewegungen zu beschreiben. Die Beschleunigung als eigene physikalische Größe bringt kein weiteres Verständnis und kann deshalb (zumindest in der Sekundarstufe I) entfallen. Wenn ein Lehrplan die Beschleunigung vorschreibt, kann man dies dadurch erfüllen, dass man einmal mitteilt, dass in der Physik die Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ dividiert durch das Zeitintervall Δt einen eigenen Namen bekommt: Beschleunigung. Das Verständnis dieser abstrakten Größe zu üben, sollte man aber auf die Sekundarstufe II verschieben.

Da auch die Richtungsänderung eine Geschwindigkeitsänderung ist, für die es eine Kraft braucht, ist es wichtig, die Geschwindigkeit als gerichtete Größe einzuführen und zu verankern [6]. Der mathematische Grenzübergang von gemessenen Durchschnittsgeschwindigkeiten zu einer idealisierten Momentangeschwindigkeit ist dagegen physikdidaktisch nicht von Bedeutung und kann guten Gewissens weggelassen werden [3]. Man kann davon ausgehen, dass heutige Messverfahren so gut sind, dass die Messwerte als Momentanwerte aufgefasst werden können. Das war früher anders, als nur Durchschnittsgeschwindigkeiten relativ großer Intervalle gemessen werden konnten.

Steht das qualitative Verständnis des Zusammenhangs von Bewegung und Kraft im Zentrum, dann spielen erstens quantitative Aufgaben keine bedeutende Rolle und zweitens ist dann die reine Kinematik ohne Kräfte uninteressant. Demgegenüber gibt es seit Jahrzehnten die Klage, dass am Gymnasium das Lösen von Rechenaufgaben gerade in der Kinematik übertrieben wird. Dabei genügt es für den Zusammenhang zwischen Ort und Geschwindigkeit die Definitionen $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ sowie deren Umformung $\Delta x = v_{\text{mittel}} \cdot \Delta t$ [2] zu kennen und damit Aufgaben zu lösen (gegebenenfalls noch $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$). Weitere Gleichungen sind nicht nötig.

Zudem ist zu bedenken, dass sich die quantitativen Aufgaben sowie auch Diagramminterpretationen fast immer nur auf eindimensionale Bewegungen beziehen. Um die Geschwindigkeit als gerichtete Größe einzuführen und auch die Änderung ihrer Richtung zu behandeln, ist es dagegen nötig, zweidimensionale Bewegungen zu thematisieren.

5. Weglassen in der Dynamik

Der Zusammenhang zwischen Kraft und Geschwindigkeitsänderung ist in der heutigen Hochschulphysik kein experimentelles Gesetz, sondern die Definition der Größe „Kraft“. Deshalb ist es auch nicht nötig, das zweite Newton'sche Axiom experimentell, induktiv und quantita-

tiv herzuleiten. Viel wichtiger ist, dass es Schüler auf viele Beispiele anwenden und damit argumentieren können. Deshalb genügt es, das zweite Newton'sche Axiom mitzuteilen und mit vielen Beispielen plausibel zu machen.

Auch die Unterscheidung zwischen träger Masse und schwerer Masse ist im Unterricht nicht nötig. Dies gilt nicht nur deshalb, weil es experimentell die gleichen Werte ergibt, sondern weil es wesensmäßig die gleiche Größe ist [6]. Diese Gleichheit von träger und schwerer Masse, auch die schwache Form des Äquivalenzprinzips genannt, hat schon Newton experimentell gezeigt und sie ist heute experimentell sehr genau nachgewiesen. Sie bildet aber auch eine wesentliche Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie.

	In der Hochschulphysik	Elementarisierung für die Schule (für $m = \text{konst.}$)
Differenzielle Form	$\vec{F} = \dot{\vec{p}}$	$\vec{F} = m \cdot \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$
Integrale Form	$\int \vec{F} dt = \Delta\vec{p}$	$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$

Tab. 1: Unterschiedliche Formulierungen des zweiten Newton'schen Axioms

Die wichtigste Vereinfachung für die Sekundarstufe I besteht aber darin, dass zweite Newton'sche Axiom ohne die abstrakte Beschleunigung zu formulieren und stattdessen die Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ in einem Zeitintervall Δt zu verwenden (siehe Tab. 1): $\vec{F} = m \cdot \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$. Streng genommen bezeichnet \vec{F} dann nicht eine momentane Kraft zu einem Zeitpunkt, sondern die mittlere Kraft des kleinen Zeitintervalls Δt . Noch einfacher wird es, wenn man den Quotienten vermeidet und die Gleichung als Produktform schreibt:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$$

Hier fällt es den Schülern deutlich leichter, Je-desto-Beziehungen für die Größen zu formulieren. Im Hinblick auf die Hochschulphysik kann man diese Gleichung auch als elementarisierte Fassung der integralen Form des zweiten Newton'schen Axioms bezeichnen, wobei die differenzielle und integrale Form in der Hochschulphysik als äquivalent und gleichwertig aufzufassen sind (siehe Tab. 1). Oder anders gesagt: Man verzichtet auf die Werte zu Zeitpunkten und betrachtet nur Zeitintervalle.

Die Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ in einem Zeitintervall Δt ist besonders einfach zu verstehen, wenn man eine zweidimensionale Bewegung hat, die abschnittsweise linear ist und nur durch eine sehr kurze Einwirkung, auch Stoß genannt, verändert wird (siehe Abb. 1). Man erhält zeichnerisch $\Delta\vec{v}$, wenn man sich fragt, was man zur Anfangsgeschwindigkeit \vec{v}_A dazuzugaddieren muss, um die Endgeschwindigkeit \vec{v}_E zu erhalten:

$$\vec{v}_E = \vec{v}_A + \Delta\vec{v}$$

Dies ist nicht nur qualitativ, z.B. in einer Tafelzeichnung möglich, sondern auch quantitativ in einem Stroboskopbild. In Abbildung 1 wurde dies allerdings in dem Videoanalyseprogramm „measure dynamics“ gemacht. Ab der Version 1.5 werden durch Anklicken des Filters „Geschwindigkeitsänderungen“ diese Pfeile eingezeichnet.

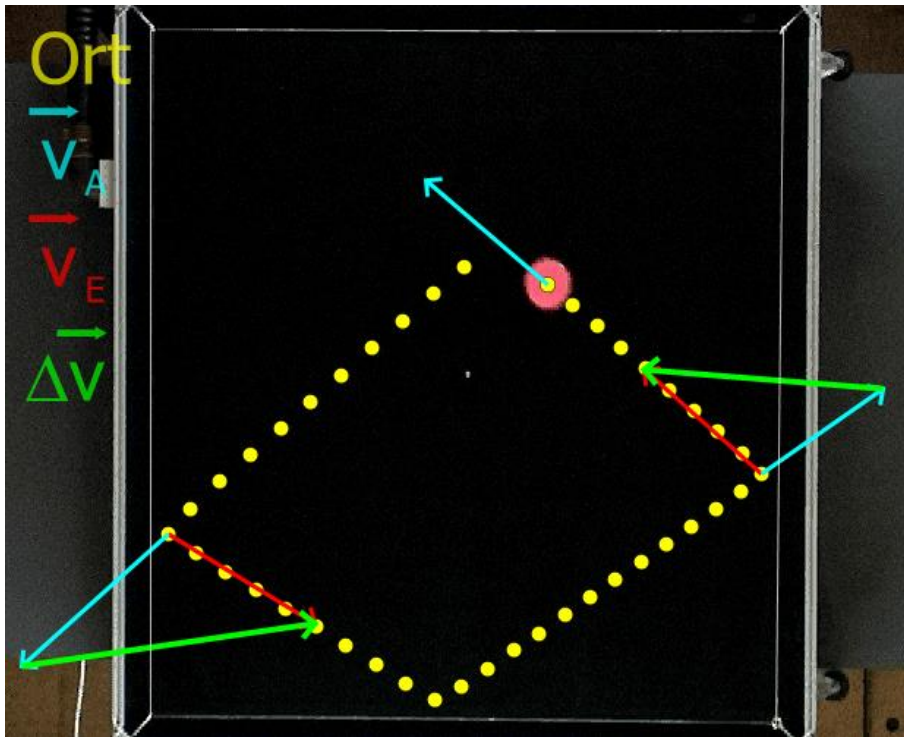


Abb. 1: Geschwindigkeitsänderung bei zwei Stößen bzw. bei abschnittsweise geradliniger Bewegung auf einem Luftkissentisch (erstellt mit measure dynamics 1.5 mit dem Filter „Geschwindigkeitsänderung“, Video aus [8])

Abbildung 2 stellt eine Bewegung dar, bei der sich die Bewegungsrichtung kontinuierlich ändert, während das Tempo bis auf die Anfangsphase konstant ist. Mit Hilfe des Filters „Geschwindigkeitsänderung“ wurde die Pfeile für \vec{v}_A , \vec{v}_E und $\Delta\vec{v}$ für verschiedene Zeitintervalle eingeblendet (zur Erstellung siehe Kasten 1).

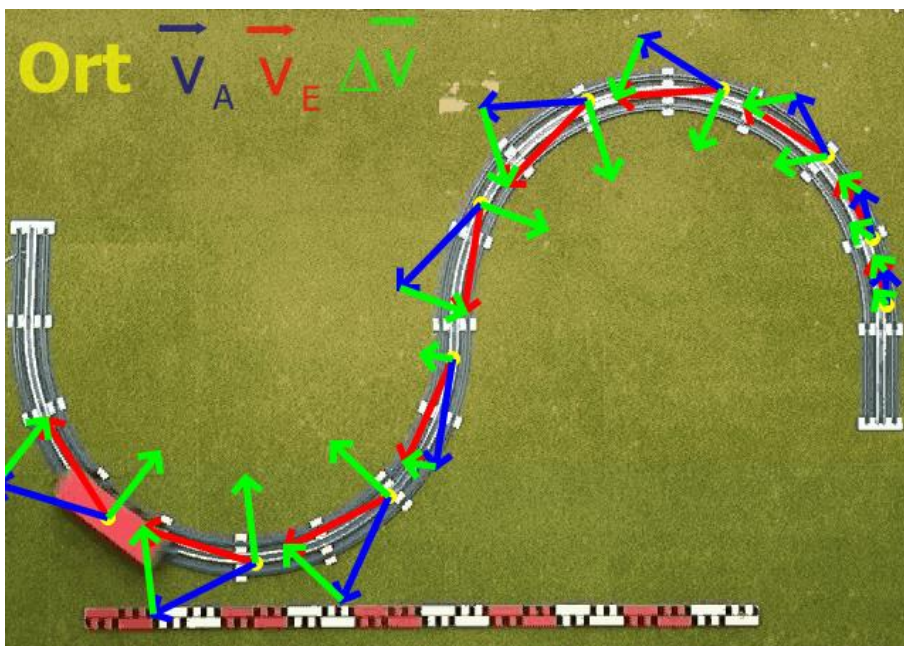


Abb. 2: Geschwindigkeitsänderung bei einer krummlinigen Bewegung einer Lego-Eisenbahn (erstellt mit measure dynamics 1.5 mit dem Filter „Geschwindigkeitsänderung“, Video aus [9])

Infos zur Abbildung 2:

Das Video der Abbildung 2 wurde mit einer alten Kamera aufgenommen (12,5 fps) und in measure dynamics analysiert. Für diese Abbildung wurde eingestellt, dass der Filter „Geschwindigkeitsänderung“ nur für jedes vierte Bild angezeigt wird (Einstellung: Symbol / Schrittweite = 4). Außerdem wurde der Filter so eingestellt, dass die jeweilige Endgeschwindigkeit \vec{v}_E jeweils die ist, die für zwei Bilder später als der aktuelle Ort berechnet wurde (Einstellung: Datenquelle / Endpunkt / Zeit = +2). Und es wurde eingestellt, dass die jeweilige Anfangsgeschwindigkeit \vec{v}_A diejenige ist, die zwei Bilder früher als der aktuelle Ort berechnet wurde (Einstellung: Zusätzliche Pfeile / Zeitschritt $\Delta t = 4$, da vier Zeitintervalle vor der Endgeschwindigkeit). Die Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ wird hier nicht nur als Verbindungspfeil zwischen \vec{v}_A und \vec{v}_E gezeichnet, sondern zusätzlich nochmals an die jeweilige Ortsmarke.

Durch dieses Vorgehen sind zwei Aspekte gut erkennbar: 1. Die gezeichnete Anfangsgeschwindigkeit an einem Ort entspricht der Endgeschwindigkeit am vorhergehenden Ort. 2. Die Geschwindigkeitsänderung $\Delta\vec{v}$ (und damit auch die Beschleunigung \vec{a}) ist außer beim Losfahren stets senkrecht zur Bahn, da mit konstantem Tempo gefahren wurde.

Kasten 1: Informationen zur Erstellung der Abbildung 2

6. Fazit

Es genügt nicht, sich zu überlegen, wie physikalische Inhalte vereinfacht werden können. Es muss auch überlegt werden, welche Inhalte weglassen oder in ihrem Umfang reduziert werden können.

Leider gibt es viele Überlegungen, was man zusätzlich im Physikunterricht unterrichten könnte, aber zu wenig Überlegungen, was weniger unterrichtet werden kann. Was hier beispielhaft für die Mechanik aufgezeigt wurde, ist auch bei anderen Themen nötig. Dabei geht es nicht darum, das fachliche Anspruchsniveau zu senken, sondern darum, das fachliche Verständnis zu erhöhen, indem das Wesentliche stärker betont wird. Denn auch bei den vielen heute geforderten Kompetenzen ist das fachliche Verständnis das Wichtigste, auf das andere Kompetenzen aufbauen.

Die hier dargelegte Elementarisierung der Mechanik wurde in zwei Lehrerhandbüchern [8+9] umgesetzt. Dort finden sich viele Vorschläge und Unterrichtsmaterialien als Angebot, die nach obigen Kriterien weiter gekürzt werden können. Der Schwerpunkt in diesem Konzept liegt darin, die Geschwindigkeit als gerichtete Größe an zweidimensionalen Bewegungen einzuführen und statt der Beschleunigung die Geschwindigkeitsänderung zu betrachten [10]. Dass ein solcher Unterricht erfolgreich ist, konnte in einer Studie gezeigt werden [11]. In diesem Beitrag sollten aber nicht die neuen Ideen dieses Konzeptes vorgestellt werden, sondern was an alten Inhalten reduziert wurde.

Literatur

- [1] Bleichroth, W.; Dahncke, H.; Jung, W.; Kuhn, W.; Merzyn, G.; Weltner, K.: Fachdidaktik Physik, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Aulis-Verlag Deubner, Köln, 1999
- [2] Wilhelm, T.: Moment mal ... (12): $s = \frac{1}{2} a t^2$? - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 63, Nr. 8, 2014, S. 48 – 49
- [3] Wilhelm, T.: Moment mal ... (23): Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit? - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 65, Nr. 2, 2015, S. 42 - 43
- [4] Wilhelm, T.: Moment mal ... (27): Was sind die Bestimmungsstücke einer Kraft? - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 65, Nr. 5, 2016, S. 42 - 43
- [5] Thijs, G. (1992): Evaluation of an Introductory Course on “Force” Considering Students’ Preconceptions - In: Wollmann, W. T. (Abschnitt-Hrsg.): Science Education 76, Nr. 2, S. 155 – 174
- [6] Wilhelm, T.: Moment mal ... (6): Geschwindigkeit oder Tempo? - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 63, Nr. 1, 2014, S. 48 – 49
- [7] Herrmann, F.: Inertialsystem und Trägheitsgesetz - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 64, Nr. 1, 2015, S. 8 - 10
- [8] Wilhelm, T.; Wiesner, H.; Hopf, M.; Rachel, A.: Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik - In: Reihe Unterricht Physik, Band 6, Aulis-Verlag, ISBN 978-3-7614-2897-9, 2013
- [9] Wiesner, H.; Wilhelm, T.; Waltner, C; Tobias, V.; Rachel, A.; Hopf, M.; Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung, Reihe Unterricht Physik, Band 5, Aulis-Verlag, 2011
- [10] Waltner, C; Tobias, V.; Wiesner, H.; Hopf, M.; Wilhelm, T.: Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7, 2010, S. 9 – 22
- [11] Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wiesner, H.: Zweidimensionaldynamische Mechanik – Ergebnisse einer Studie - In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDCP in Potsdam 2010, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 31, Lit-Verlag, Münster, 2011, S. 438 - 440

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, www.thomas-wilhelm.net