

# Mathematisierung der Naturwissenschaften

## Formeln in der Physik

Untersuchungsergebnisse und Praxisvorschläge zur Arbeit mit Formeln im Physikunterricht

**Alexander Strahl**

### Kurzfassung

Obwohl die Mathematisierung in der Physik gerade in höheren Klassen und im Studium ein wichtiger Bestandteil ist, existieren kaum Forschungsberichte und auch so gut wie keine didaktischen Vorschläge zur Umsetzung in der Schule bzw. Hochschule. Der Artikel gibt einen Einblick in Teile der fachdidaktischen Forschung zum Thema „Formeln in der Physik“. Unter anderem wird kurz auf Formeln in Schulbüchern eingegangen. Anschließend wird zusammenfassend über SchülerInnen- bzw. Studierenden-Befragungen informiert. Aus unterschiedlichen Untersuchungen wird die für Lernende optimierte Schreibweise von Formeln abgeleitet. Abschließend werden Ratschläge zum Umgang mit Formeln im Unterricht gegeben.

### Einleitung

Landläufig werden Formeln als schwierig im Physikunterricht angesehen, doch diverse Untersuchungen zeigen, dass dies von Schülerinnen und Schülern nicht so gesehen wird [1, 2, 3].

Formeln sind ein wesentlicher Bestandteil der Physik, dennoch gibt es in der Fachdidaktik nur wenige Hinweise, wie das Arbeiten mit Formeln erleichtert werden kann. Die Mathematisierung in der Physik ist – neben dem Experiment – ein wichtiger Bestandteil des Erkenntnisprozesses, der im schulischen Unterricht für die Schülerinnen und Schüler zugänglich gestaltet werden sollte. Die Formel verkörpert eine wichtige Säule in der Physik und ist oft das Ergebnis eines langen Forschungsprozesses. In der Natur der Naturwissenschaft (NdNW) stellt die Mathematisierbarkeit einen der beiden Pfeiler der Erkenntnis dar, wobei dieser aber bei der Beschreibung der NdNW oft nicht berücksichtigt wird [4]. Laut Duden ist die Formel nicht nur eine „Folge von Buchstaben, Zahlen od. Worten zur verkürzten Bezeichnung eines mathematischen, chemischen oder physikalischen Sachverhaltes“ [5], sondern auch ein „kurzer, knapper Satz oder Ausdruck, in dem sich ein gedanklicher Zusammenhang erhellend fassen lässt“ [5].

Einer der wesentlichen Unterschiede zwischen Mathematik und Physik besteht darin, dass physikalische Formeln einen Definitionsbereich ihrer Gültigkeit besitzen [4, S. 53] und

ihren Buchstaben Bedeutungen zugeordnet werden. Galileo Galilei schrieb 1623 in seinem Werk „Il Saggiatore“ [6]: „Die Philosophie ist in jenem großen Buch geschrieben, das immer offen vor unseren Augen liegt (ich meine das Univesum); aber wir können es nicht verstehen, wenn wir nicht zuerst lernen, die Sprache zu verstehen und die Zeichen zu kennen, in denen es geschrieben ist. Es ist in mathematischer Sprache geschrieben, und die Zeichen sind Dreiecke, Kreise und andere geometrische Figuren; ohne diese Mittel ist es menschlich unmöglich, ein einziges Wort zu verstehen; ohne diese irrt man in einem dunklen Labyrinth umher.“ So trifft Galilei hier die viel zitierte Aussage, dass Mathematik die Sprache der Physik sei, jedoch ist dies nicht durchgängig haltbar. Falls diese Analogie dennoch benützt werden soll, dann entsprechen die mathematischen Strukturen der Grammatik und die Formelzeichen der Semantik.

Formeln geben uns die Möglichkeit, mit Hilfe von Zeichen und Symbolen Teile der uns umgebenden Realität in verkürzter Form abzubilden, und darüber hinaus sogar neue Zusammenhänge zu entdecken. Sie sind ein „Modell zum Verständnis der Welt“ [4, S. 50ff] und helfen uns, durch die Mathematisierung von Zusammenhängen, sehr präzise Klarheit in die Beschreibung der Natur zu bringen. Doch genau hier liegt die Ursache für die Verständnisprobleme von Schülerinnen und Schülern: die verwendeten Symbole und Begriffe sind nicht direkt aus der Beobachtung der natürlichen Phänomene ableitbar. Physik führt sichtbare Wirkungen und Phänomene auf unsichtbare Ursachen zurück, die sich letztendlich durch Formeln ausdrücken lassen.

Nach heutigem Stand ist es für jede Lehrkraft immer wieder aufs Neue eine Herausforderung, den Unterricht für die Schülerinnen und Schüler so zu gestalten, dass sie diese Formeln nicht nur benutzen, sondern auch lernen, reflektiert und sinnvoll (also verstehend) damit umzugehen. Generell rät die Fachdidaktik bezüglich der Formeln im Physikunterricht, ihre Verwendung möglichst gering zu halten (Stichworte: qualitative Betrachtung, phänomenologische Orientierung [7, 8, 9]). Dies gründet auch auf der Annahme, dass Formeln zu abstrakt und komplex, daher auch zu schwer für die Schülerinnen und Schüler seien. Dennoch haben sie nicht nur im naturwissenschaftlichen Studium und in der Physik als Wissenschaft eine hohe Bedeutung. Auch in der Schule wird Formeln weiterhin ein hoher Stellenwert zugeschrieben.

Ass.Prof. Dr. Alexander Strahl leitet die AG Didaktik der Physik an der Universität Salzburg. E-Mail: alexander.strahl@sbg.ac.at

Ziel ist es daher eine Brücke zu schlagen zwischen den Grundprinzipien des didaktischen Arbeitens und der Notwendigkeit, die schwierige Abstraktheit der Mathematisierbarkeit für die Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht zugänglicher zu gestalten.

## Schulbuchuntersuchungen

Ein permanenter Begleiter des schulischen Physikunterrichtes sind Schulbücher [10, 11]. Eine Untersuchung dieser Arbeitsgrundlage für den Unterricht verschafft einen Einblick über den Umfang und die Art und Weise, wie mit Formeln umgegangen wird.

Bei einer quantitativen Schulbuchuntersuchung von in Deutschland zugelassenen Büchern [12] wurden Formeln pro Seite gezählt. Dabei stellte sich heraus, dass die Formeldichte im Laufe der Schulzeit ansteigt. In der Schulstufe 5/6 ( $FD_{5/6} = 0,01 \pm 0,01$ ) sind noch keine Formeln in Physikbüchern zu finden, sie erscheinen erst in der Schulstufe 7/8 ( $FD_{7/8} = 0,53 \pm 0,26$ ) und steigern sich dann weiter in der Schulstufe 9/10 ( $FD_{9/10} = 0,83 \pm 0,44$ ). Von der Schulstufe 9/10 auf 11/12/13 kommt es zu einer mehr als Verdreifachung der Formeldichte ( $FD_{11/12/13} = 2,90 \pm 0,43$ ).

Die qualitative Untersuchung von 22 Schulbüchern [13] ergab, dass nur ein Buch einen eigenen Abschnitt zum Thema hatte. Alle anderen gehen zwar zum Beispiel auf die Fachsprache ein, schweigen aber über die Mathematisierung. In den untersuchten Physikschulbüchern werden somit neben der rein mathematischen Bearbeitung kaum Einführungen und nur wenige Hilfestellungen zum Umgang mit Formeln gegeben. Leider liegen für österreichische Schulbücher noch keine Forschungsergebnisse vor.

Ein durchgängiges Konzept oder ein strukturiertes Vorgehen, um den Umgang mit Formeln in kleinen Schritten von Anfang an zu erlernen, ist in keinem Schulbuch erkennbar. Auch in den zwölf untersuchten Büchern zur Fachdidaktik wird die didaktische Aufbereitung von Formeln für den Physikunterricht nur am Rande bearbeitet. Sie spielt zwar eine Rolle im Rahmen der Elementarisierung von Inhalten für den Unterricht, aber wie die Reduktion der Komplexität für Formeln im Einzelnen aussehen sollte und welche Aspekte bei der Erarbeitung, dem Umgang und dem sinnvollen Verstehen berücksichtigt werden müssen, wird nicht behandelt.

## Einstellungen zu Formeln

### Ergebnisse von SchülerInnen- und Studierenden-Befragungen

Studien zur Einstellung von SchülerInnen bzw. Studierenden gegenüber Formeln kommen zu teilweise überraschenden Ergebnissen [1, 2, 3, 14]:

- Schülerinnen und Schüler schätzen Formeln als hilfreich für das physikalische Verständnis ein.

- Formeln sind tendenziell nicht zu abstrakt, um deren physikalischen Inhalt zu verstehen.
- Formeln wird ein hoher Stellenwert zugeschrieben.
- Formeln sind eine übersichtliche Zusammenfassung für wichtige Beziehungen.
- Schwächere Schülerinnen und Schüler haben eher Probleme mit Symbolen und deren Bedeutungen innerhalb von Formeln.
- Auch Schülerinnen und Schüler, die sich in Mathematik als gut einschätzen, haben Probleme bei Formelumformungen oder -verknüpfungen.
- Schülerinnen und Schüler haben insgesamt eine positive Einstellung gegenüber Formeln.
- Schülerinnen und Schüler äußern sich laut Krey und Mikelskis eher positiv als negativ zu Formeln (97 zu 13 emotionale Äußerungen) [15].

## Umgang mit Formeln

In zwei explorativen Studien wurde gezeigt, wie SchülerInnen sowie Studierende mit Formeln umgehen [16, 17].

Dabei standen die folgenden Fragen im Fokus:

- Werden Formeln bei Anwendern in Untereinheiten oder immer als Ganzes wahrgenommen?
- Falls es Untereinheiten gibt, lassen sich diese in Kategorien zusammenfassen?
- Sind die Probandeninnen und Probanden in der Lage, den Inhalt einer Formel zu interpretieren?

Bei der Zerlegung von Formeln in ihre Bestandteile konnte die Nutzung von folgenden Untereinheiten (Strukturelemente oder Chunks [18]) für die in der Formel enthaltenen Zeichen identifiziert werden:

Oberflächenmerkmale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahlen</li> <li>• Konstanten</li> <li>• Variablen</li> <li>• physikalische Größen</li> </ul>
Funktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• abhängige Variablen</li> <li>• mathematisch (z.B. Ableitungen)</li> <li>• Ergebnis</li> <li>• Rechenzeichen</li> </ul>
Bedeutung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• physikalische Bedeutung</li> </ul>
Sonstige	<ul style="list-style-type: none"> <li>• unklar</li> </ul>

Tab. 1: Gruppierung von Formelbestandteilen

Im Rahmen der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass die Schülerinnen und Schüler bestimmte Strukturelemente in Formeln erkennen und diese funktionalen Kategorien zuordnen. Allerdings sind die genutzten Strukturierungen und deren Begründung individuell geprägt. Weniger als die Hälfte der Befragten identifizierten Formelteile nach ihrer physikalischen Bedeutung. Dass sich nur eine geringe Anzahl von Probanden bei dem Versuch einer Interpretation tatsächlich inhaltlich mit den untersuchten Formeln (aus dem Lehrplan) auseinandersetzen konnte, weist darauf hin, dass die mathematische Nutzung von Formeln in der Schulphysik Vorrang hat und nicht das Verstehen und der sinnerfassende Umgang.

## Schreibweisen von Formeln

Eine einheitliche Darstellungsweise von Formeln erleichtert Schülerinnen und Schülern den Umgang und somit auch den Zugang zu neuem Wissen. In Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Schreibweise von Formeln, also ihre Oberflächenstruktur, dazu beiträgt, dass Formeln für Schülerinnen und Schüler mehr oder weniger abschreckend wirken. So stellte sich auch heraus, dass bestimmte Darstellungsweisen klar bevorzugt werden [19, 20]. Dabei wurden sowohl die physikalische als auch die mathematische Darstellung von Formeln untersucht, wobei sich jedoch keine Unterschiede ergaben. In den Untersuchungen wurden mehrere Schreibweisen einer Formel zur Auswahl gestellt. Aus Gründen der Übersicht wird im Folgenden jeweils nur ein Negativbeispiel genannt.

### Bevorzugte Darstellungsweisen

- Produkte: Darstellung mit Multiplikationszeichen

Also nicht  $x = yz$ , sondern  $x = y \cdot z$

- Brüche (auch Einheiten): mit waagrechttem Bruchstrich, kein Schrägstrich oder hoch -1

Also nicht  $R = U / I$ , sondern  $R = \frac{U}{I}$ .

- Wurzeln: mit Wurzelzeichen, keine Potenzschreibweise

Also nicht  $T = 2\pi \left(\frac{m}{D}\right)^{0,5}$ , sondern  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}$ .

- e-Funktionen: in Exponentenschreibweise

Also nicht  $N = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$ , sondern  $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ .

- Differentiale: mit Differential, keine Punktschreibweise bei zeitlicher Ableitung

Also nicht  $v(t) = \dot{x}(t)$ , sondern  $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ .

- Vektoren mit Pfeilen, kein Fettdruck oder Unterstrich

Also nicht  $\underline{F}_{Lorentz} = q(\underline{v} \times \underline{B})$ , sondern  $\vec{F}_{Lorentz} = q(\vec{v} \times \vec{B})$ .

- Reihenfolge: Ergebnis links, sowie erlernte Reihenfolge beibehalten

Also nicht  $\vec{a} \cdot \vec{m} = \vec{F}$ , sondern  $\vec{F} = \vec{m} \cdot \vec{a}$ .

- Indizes an Symbolen ausschreiben, das ist weniger abschreckend:

Also nicht  $F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_E \cdot q_P}{r_{E-P}^2}$ ,

sondern  $F_{Coulomb} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{Elektron} \cdot q_{Proton}}{r_{Elektron-Proton}^2}$ .

- Einheiten in Gleichungen direkt am Zahlenwert:

Also nicht  $r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 8,4 \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,75 \cdot 10^{-3}}$  in  $\frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{C} \cdot \text{T}}$ ,

sondern  $r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 8,4 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ T}}$

- Schreibweise: Formelzeichen sind kursiv, Einheiten gerade zu schreiben

- Eckige Klammern bei Einheiten in Gleichungen sollen laut DIN Norm 1313 [21] nicht verwendet werden. Zulässig ist z. B. Formelzeichen / Einheit. Aus didaktischer Sicht ist aber die verständlichste Version „Formelzeichen in Einheiten“, da Schülerinnen und Schüler oft Formelzeichen und Einheit vertauschen oder durcheinander bringen. Somit kann das Wort „in“ eine kognitive Trennung darstellen, die hilft beides voneinander zu separieren. Dies ist insbesondere bei der Beschriftung von Diagrammen wichtig.

Also nicht  $R [\Omega]$  oder  $R / \Omega$ , sondern  $R$  in  $\Omega$  [22, 23].

### Weitere allgemeine Empfehlungen

- Symbole und Zeichen durchgehend einheitlich und eindeutig benutzen, um Verwirrung zu vermeiden [14]:

Also nicht  $E$ ,  $W$  und  $A$  für Energie, sondern nur eine der drei oder besser noch  $E_{kin}$ ,  $E_{pot}$ ,  $E_{elek}$ .

- Bei der Lösung von Aufgaben immer die Grundform/ den Infinitiv einer Formel aufschreiben lassen, bevor die Formel umgestellt wird. Dies reduziert Fehler beim Umstellen und erweitert die Diagnosemöglichkeiten der Lehrkraft. Des Weiteren fühlen sich Schülerinnen und Schüler sicherer, wenn sie schon etwas aufgeschrieben haben.

- Obwohl Schülerinnen und Schüler mit 58,8 % [20] die Schreibweise bevorzugen, in der sowohl Konstanten, als auch Variablen in einem Bruch stehen, nämlich:

$$F_{Coulomb} = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r_{1-2}^2}$$

wird eine andere Empfehlung ausgesprochen. Konstanten und Variablen sollten getrennt voneinander aufgeschrieben werden. Hinter dem Gleichheitszeichen erst die Konstante(n) und gegebenenfalls Zahlen und dann die Variable(n):

*Resultat = Konstanten  $\otimes$  Variablen*

$$F_{Coulomb} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{1-2}^2}$$

Schülerinnen und Schüler sollen lernen, welche Bestandteile in einer Formel wichtig sind und was nur ein Vorfaktor ist. Falls alles auf einem Bruchstrich steht oder gar die Terme in der Reihenfolge gemischt werden, ist es sehr schwierig zu erkennen, welche Größen das Ergebnis beeinflussen. Wichtig ist dabei, dass den Schülerinnen und Schülern immer wieder die Unterschiede aufgezeigt werden, damit sie die Strukturelemente erkennen und diese inhaltlich zueinander in Beziehung setzen lernen.

- Messwertdiagramme und die daraus entwickelbare Formel sollten explizit miteinander verknüpft werden, da gerade in der Schulphysik die zugehörige Formel meist aus den Messgraphen entwickelt werden kann. Die dazu nötige Zeit muss in der experimentellen Planung unbedingt bedacht werden. Oft wird nach dem Durchführen eines Experimentes, der Protokollierung der Messwerte und dem Zeichnen eines Grafen abgebrochen. Doch gerade hier wird es für die Lernenden interessant, da ein Experiment nur diskrete (zu diesem Aufbau gehörende) Messwerte liefert, Formeln aber kontinuierliche Ergebnisse möglich machen, die nicht nur für ein Experiment gelten.

## Thesen zum Umgang mit Formeln in Schule

Aus den Untersuchungsergebnissen und fachdidaktischen Überlegungen lassen sich folgende Thesen für den Unterricht ableiten:

- Schülerinnen und Schüler als mündig ansehen: Aufklären, warum Formeln wichtig sind,
- Frühzeitige Einführung der Mathematisierung im Unterricht ermöglicht einen sukzessiven Einstieg und erleichtert das Verständnis,
- Explizite Einführung, Verwendung und Reflexion von Formeln (in den meisten Schulbüchern nicht umgesetzt),
- Orientierung des Schwierigkeitsgrades an der Chunk- und Cognitive Load Theory (auf Altersstufe und Vorwissen anpassen),
- Kleinschrittige Einführung von Neuem (sonst Überlastung des Arbeitsgedächtnisses),
- Lernzeiten für den mathematischen Umgang geben (Übung

ist ein wichtiger Bestandteil zum Aufbau von Fähigkeiten),

- Häufiges Wiederholen und Üben in leicht veränderten Varianten und Aufgabenstellungen (verstärkt Schemata und ermöglicht den Aufbau von prozeduralem Wissen = Handlungswissen),
- Vorteile und Nutzen für den Alltag herausarbeiten (an Beispielen),
- einheitliche klare Schreibweisen der Formeln und Einheiten (bei unterschiedlichen Symbolen werden im Gedächtnis neue Knotenpunkte angelegt, da nicht erkannt wird, dass es sich um denselben Inhalt handelt), sowie
- Schülerinnen und Schülern mit der Methode des Forschenden Lernens die Möglichkeiten und Handwerkszeuge vermitteln, mit denen sie selbstständig Messgraphen analysieren können und eigenständig Formeln entwickeln.

## Folgerungen

Die Mathematisierbarkeit der Welt stellt einen interessanten und unglaublichen Zusammenhang dar, der auch in der Schule vermittelt werden sollte. Nicht nur, damit die Schülerinnen und Schüler anschlussfähig bleiben, sondern auch weil es zur Allgemeinbildung beiträgt. Wie gezeigt werden konnte, lehnen Schülerinnen und Schüler die Mathematisierbarkeit in der Physik nicht ab. Doch haben sie oft Schwierigkeiten, das Gelernte aus Mathematik in der Physik anzuwenden. Dies scheint zunächst verwunderlich, jedoch liegt es daran, dass keine oder nur wenige Verknüpfungen im Geist zwischen Mathematik und Physik bei den Schülerinnen und Schülern vorhanden sind, da beide meist in unterschiedlichen Netzwerken im Kopf organisiert sind [24].

Vor allem ist zu bedenken, dass ein wesentlicher Teil des mathematischen Handwerkszeugs für das Fach Physik von einem anderen Schulfach erarbeitet wird. In der Chemie werden z. B. Strukturgleichungen im Fach selbst eingeführt und können so besser eingesetzt werden, da Schülerinnen und Schüler sie direkt im Netzwerk Chemie abspeichern und nicht im Netzwerk Mathematik. Es erscheint daher ratsam, entweder konkret auf physikalische Entsprechungen des mathematischen Handwerkszeugs einzugehen, oder ein wenig physikrelevante Mathematik im Physikunterricht zu integrieren, damit entsprechende Verknüpfungen in den Netzwerken verbunden oder aufgebaut werden können.

## Literatur

- [1] Müller, R. & Heise, E. (2006): Formeln in physikalischen Texten: Einstellung und Textverständnis von Schülerinnen und Schülern. *PhyDid A 2/5*, S. 62–70.
- [2] Strahl, A., Mohr, M., Schleusner, U. & Müller R. (2009): Beurteilung von Formeln durch Schüler – eine Fragebogen Untersuchung. In: *Chemie- und Physikdidaktik*



- für die Lehramtsausbildung - D. Höttecke (Hg.) GDPC Tagungsband 29 – Lit Verlag Berlin.
- [3] Strahl, A., Mohr, M., Schleusner, U., Kreckler, M. & Müller, R. (2010): Akzeptanz von Formeln – Vergleich zweier Erhebungen. PhyDid B.
- [4] Strahl, A. & Preißler, I. (2014): Fachdidaktik der Naturwissenschaften unter besonderer Berücksichtigung der Physik. BoD, Norderstedt.
- [5] Duden (2010): Das Fremdwörterbuch. 10. Aufl. Mannheim.
- [6] Galilei, G. (1623): Il Saggiatore. In Galilei 1938 Rom: Accademico Linceo, 1623, S. 567–841.
- [7] Reinhold, P. (2006): Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion. In: Mikelskis (Hrsg.), Physikdidaktik – Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II. Cornelsen Scriptor.
- [8] Bleichroth W. (1991): Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung. In: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik 2, 1991, S. 4–11.
- [9] Wagenschein, M. (1962): Die Pädagogische Dimension der Physik. Aachen.
- [10] Merzlyn, G. (1994): Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht. Kiel: IPN.
- [11] Härtling, H., Kauertz, A. & Fischer, H.E. (2012): Das Schulbuch im Physikunterricht. In: MNU 65/4, 197–200.
- [12] Strahl, A., Thiele, S. & Müller, R. (2012): Formeln in Physik(schul)büchern – eine quantitative Untersuchung. In: S. Bernholt (Hrsg.): Inquiry-based Learning – Forschendes Lernen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Hannover, 329–331. Kiel: IPN.
- [13] Strahl, A., Franz, R. & Müller, R. (2013): Qualitative Analyse von Schulbüchern zum Thema Formeln. PhyDid B.
- [14] Strahl, A. & Müller R. (2007): Formelverständnis in der Physik: erste Ergebnisse einer Untersuchung. Didaktik der Physik. In: Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Regensburg (Hrsg.: V. Nordmeier und A. Oberländer).
- [15] Krey, O. & Mikelskis, H. (2009): Die Rolle der Mathematik in der Physik – Ergebnisse einer Schülerbefragung. PhyDid B.
- [16] Strahl, A., Schleusner, U., Mohr, M. & Müller, R. (2010): Wie Schüler Formeln gliedern – eine explorative Studie. PhyDid A.
- [17] Strahl, A., Hemme, D., Herbst, M. & Müller, R. (2015): Wie Studierende Formeln gliedern. PhyDid B.
- [18] Stindt, F. Müller, R. & Strahl, A. (2014): Chunks in Chemie- und Physikaufgaben. PhyDid B.
- [19] Strahl, A. & Müller, R. (2009):  $U=R \cdot I$  oder  $R=U/I$  – Untersuchungen zur Darstellung von Formeln. erschienen auf der CD zur DPG Frühjahrstagung – Fachverband Didaktik der Physik 2009 (V. Nordmeier, A. Oberländer (Hg.) Berlin).
- [20] Strahl, A., Grobe, J. & Müller, R. (2010): Was schreckt bei Formeln ab? – Untersuchung zur Darstellung von Formeln. PhyDid B.
- [21] DIN 22 (2009): DIN-Taschenbuch 22, Einheiten und Begriffe für physikalische Größen, 9. Auflage, Beuth, Berlin, Wien, Zürich.
- [22] Strahl, A., Jezek, J. & Müller, R. (2011): Formeln und Einheiten – Ergebnisse einer Vorstudie. In: D. Höttecke (Hrsg.), Naturwissenschaftliche Bildung als Beitrag zur Gestaltung partizipativer Demokratie. GDPC Tagungsband 31, Lit-Verlag.
- [23] Strahl, A., Hagendorf, S. & Müller, R. (2014): Oberflächeneigenschaften von Einheiten – Ergebnisse einer Studenten und Schüler Befragung. In: S. Bernholt (Hrsg.), Naturwissenschaftliche Bildung zwischen Science- und Fachunterricht. GDPC, 318-320. Kiel: IPN.
- [24] Anderson, J. (2001): Kognitive Psychologie, 3. Aufl., Heidelberg, Berlin: Spektrum Verlag.

## Links zu Veröffentlichungen:

- [14] [http://www.strahl.info/\\_veroeffentlichungen/2007\\_Strahl\\_Formelverstaendnis\\_in\\_der\\_Physik\\_DD\\_15\\_02.pdf](http://www.strahl.info/_veroeffentlichungen/2007_Strahl_Formelverstaendnis_in_der_Physik_DD_15_02.pdf) [Juli 2016]
- [19] [http://www.strahl.info/\\_veroeffentlichungen/2009\\_Strahl\\_URI\\_Untersuchung\\_zur\\_Darstellung\\_von\\_Formeln\\_DD\\_16\\_03.pdf](http://www.strahl.info/_veroeffentlichungen/2009_Strahl_URI_Untersuchung_zur_Darstellung_von_Formeln_DD_16_03.pdf) [Juli 2016]