

## Physik am Schlagzeug

Jil Hümmer\*, Thomas Wilhelm<sup>+</sup>

\* Didaktik der Physik, Institut für Physik der Universität Augsburg, Universitätsstraße 1, 86135 Augsburg  
<sup>+</sup> Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main  
[jlhummer@gmx.de](mailto:jlhummer@gmx.de); [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de)

### Kurzfassung

Das Schlagzeug ist für Schüler ein sehr attraktives Musikinstrument und Schlaginstrumente bieten vielfältige Möglichkeiten, akustisch relevante Vorgänge zu beobachten. Dazu gehören das Sichtbarmachen der Schwingung der Becken und der Fellmembran mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera oder mittels Chladnischer Klangfiguren, die durch eine Schwingungsanregung auf sandbestreuten Fellen und Platten entstehen. Eine Software zur Klanganalyse und Klangvisualisierung bietet zudem die Möglichkeit, die Klänge der Schlaginstrumente hinsichtlich verschiedener physikalischer Messgrößen zu untersuchen. Im Mechanikunterricht kann aber auch die Bewegung des Sticks mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und einer Videoanalysesoftware als komplexe Bewegung untersucht werden. Im Folgenden werden verschiedene Versuche vorgestellt, die auch von Schülern durchgeführt werden können.

### 1. Kontext Schlagzeug

Das Interesse von Schülern am Physikunterricht nimmt im Laufe der Schuljahre ab und die Schüler sehen wenig Zusammenhang zwischen Alltag und Physikunterricht. Schüler lieben dagegen moderne Pop- und Rockmusik, für die das Schlagzeug ein typisches Instrument ist, das nicht mehr wegzudenken ist. So liegt es nahe, manche physikalischen Inhalte u.a. auch am Schlagzeug zu vermitteln.

### 2. Klanganalyse

Untersuchungen zur Klanganalyse können den Schülern einen Einblick geben, wie kompliziert natürlich erzeugte akustische Signale sind. Hierbei lassen sich die Frequenz, die Amplitude und die Abklingdauer ermitteln und vergleichen. Für die Untersuchungen werden ein Schlagzeug, d.h. Trommeln und Becken, eventuell eine Pauke, verschiedene Sticks zur Anregung der Instrumente, geeignete Mikrofone sowie ein Laptop mit geeigneter Software zur Analyse der akustischen Signale wie z.B. Sounds verwendet. Der Screenshot in Abbildung 1 zeigt ein Sonogramm aus Sounds, bei dem das Frequenzspektrum (nach oben) fortlaufend mit der Zeit (nach rechts) gezeigt wird, wobei die Höhe der Amplituden farblich angezeigt wird. Frequenzen mit sehr hoher Amplitude erscheinen rot, schwächere in den Abstufungen gelb, grün und schließlich blau [1].

Hilfreicher sind Diagramme einer Fouriertransformation, die die Amplituden in Abhängigkeit der Frequenz zeigen. Beispielweise können die Anschlagstelle auf einer Trommel und die Spannung des Fells variiert werden und Instrumente und Stickarten können untereinander verglichen werden. Da die FFT im Alltag zur Speicherung von Musikdatei-

en verwendet wird, ist es sinnvoll, sie im Unterricht anzusprechen.

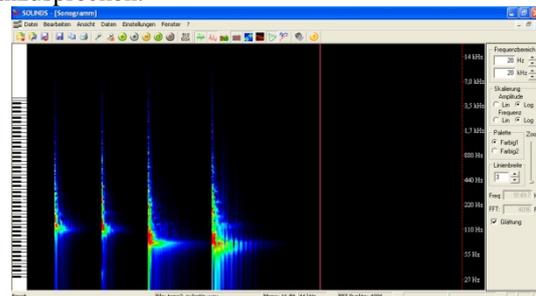


Abb. 1: Sonogramm von Trommelschlägen im Programms Sounds

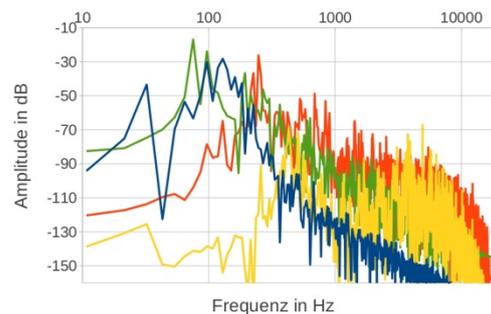


Abb. 2: Frequenz-Amplitude-Diagramme: Vergleich verschiedener Instrumente: Bassdrum (blau), Tom (grün), Snare (rot), Becken (gelb)

In Abbildung 2 sind vier verschiedene Instrumente in direktem Vergleich sichtbar. Die Bassdrum-Kurve (blau) zeigt eine hohe Amplitude über einen größeren Tieffrequenzbereich. Das Tomtom (grün) erreicht seine maximale Amplitude bei höheren Frequenzen, der zweite Peak ist an derselben Stelle wie

das zweite Maximum der Bassdrum zu sehen, was sich durch das Mitschwingen der Bassdrum beim Anschlagen der Tom erklären lässt. Das Maximum der Snare (rot) ist wiederum bei höheren Frequenzen, wobei die Amplitude im niedrigeren Frequenzbereich geringer als bei der Bassdrum und dem Tom, aber höher als beim Becken (gelb) ist. Das Crashbecken erreicht maximale Amplituden erst bei relativ hohen Frequenzen. Die ermittelten Frequenzen entsprechen qualitativ den wahrgenommenen Frequenzen, denn die Bassdrum hat die tiefste Frequenz, gefolgt von dem Tomtom, der Snare und dem Crashbecken.

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der Anschlagstelle auf der Snare: einmal im Zentrum (blau), den zweiten zwischen Zentrum und Rand (grün) und den dritten in Randnähe (orange). Der Schlag ins Zentrum zeigt die am wenigsten definierte Tonhöhe, also den breitesten Peak. Bei den anderen beiden Schlägen sind die Peaks schmaler. Der Schlag in Randnähe weist in den höheren Frequenzen noch einen Peak höherer Amplitude auf, was darauf schließen lässt, dass hier die Schwingungen des Kessels stärker angeregt werden.

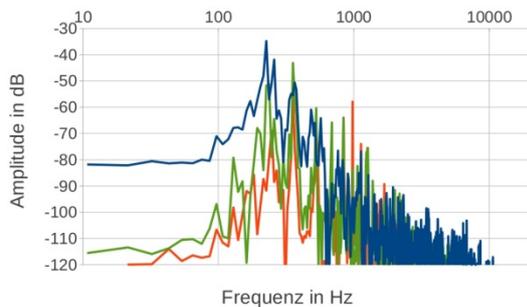


Abb. 3: Frequenz-Amplitude-Diagramme: Vergleich verschiedener Anschlagstellen auf der Snare

Die unterschiedliche Stimmung der Snare wurde in Abbildung 4 bei verschiedenen Spannungen untersucht. Erwartungsgemäß hat die höhere Spannung (blau) zu einer höheren Stimmung, also zu einer höheren Frequenz geführt.

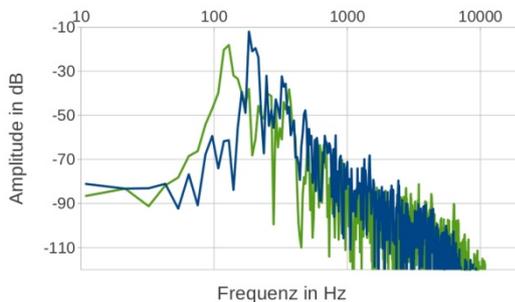


Abb. 4: Frequenz-Amplitude-Diagramme: Snare mit hoher (blau) und geringer Spannung (grün)

Aus den Frequenz-Amplitude-Diagrammen können die Frequenzen mit maximaler Amplitude der einzelnen Instrumente abgelesen werden, weshalb so z.B. ein Zusammenhang zwischen der Frequenz und

der Größe der Trommeln hergestellt werden kann (siehe Abb. 5+6).

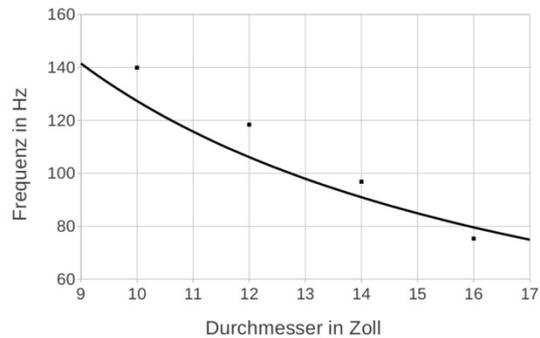


Abb. 5: Frequenz in Abhängigkeit des Durchmessers  $a$  der Toms

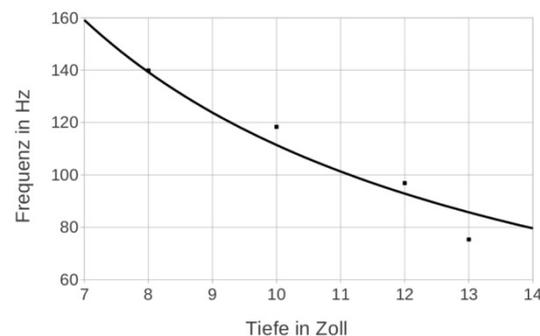


Abb. 6: Frequenz in Abhängigkeit der Tiefe der Toms

Für Pauken (nicht für Trommeln) gilt  $f_{mn} = \frac{(ka)_{mn} c_M}{2\pi a}$ , wobei  $a$  der Radius der Membran ist,  $c_M$  von der Vorspannkraft pro Längeneinheit und der Masse pro Flächeneinheit abhängt. Zwar war die Masse pro Flächeneinheit konstant, weil alle Trommeln mit einem Fell derselben Reihe ausgestattet waren, aber die Vorspannkraft pro Längeneinheit war keinesfalls für alle Trommeln gleich, genauso wenig wie der Eigenwert  $ka$ . Wurde trotzdem  $1/f$  über dem Durchmesser  $a$  aufgetragen, ergab sich doch ein linearer Zusammenhang und eine Regressionsgerade konnte berechnet werden: So ergaben sich die durchgezogene Hyperbel in Abb. 7 und 8, die zeigen, dass die Frequenz ungefähr indirekt proportional zum Durchmesser und zur Tiefe der Trommeln ist.

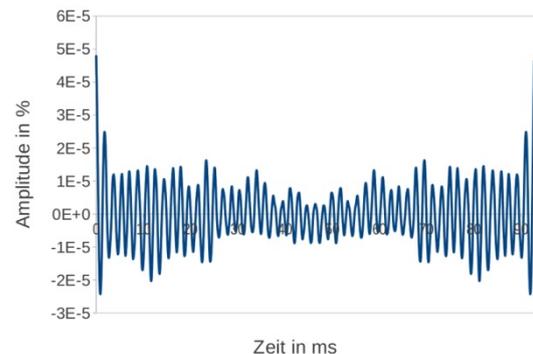


Abb. 7: Zeitreihe des Jazz-Ridebeckens

Mit der Hilfe von Sounds kann zudem die Zeitreihe einiger Instrumente, wie die des Jazz-Ridebeckens, der Snare und des Toms betrachtet werden (s. Abb. 7+8). Man sieht, dass die Frequenz des Jazz-Ridebeckens höher ist als die des Toms; die Amplitude der Trommel ist jedoch höher als die des Beckens.

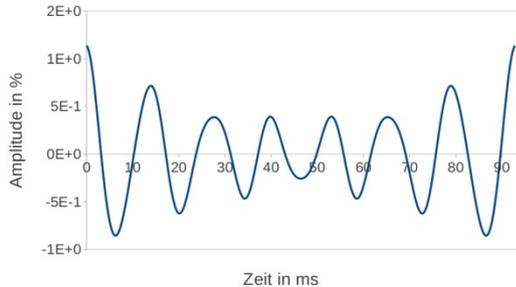


Abb. 8: Zeitreihe der Tom

### 3. Chladnische Klangfiguren

Bei diesen Versuchen können die sich ausbildenden stehenden Wellen durch Sand sichtbar gemacht werden, indem die Instrumente angeregt werden; der Sand häuft sich an den Knotenlinien an [2].

Bei den Metallplatten, als Stellvertreter für die Becken, kann die Anregung durch einen Cellobogen erfolgen, der senkrecht zur Platte kraftvoll an der Kante entlang gezogen wird. Zudem kann die Anregung hier auch über einen Lautsprecher erfolgen, der nahe an die Platte gehalten wird. Dabei ergeben sich z.B. bei der Anregung mit dem Lautsprecher bzw. mit dem Cellobogen die Muster in Abbildung 9. Die Anregung per Lautsprecher und Frequenzgenerator ermöglicht die Schwingungsmoden den zugehörigen Frequenzen zuzuordnen. Allerdings sind diese Platten in der Mitte befestigt und nicht wie Trommelfelle am Rand.

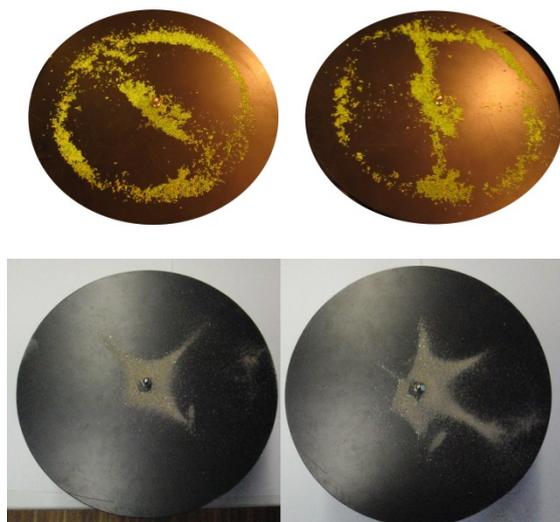


Abb. 9: Chladnische Klangfiguren auf einer Metallplatte durch einen Lautsprecher (oben) und durch einen Geigenbogen erzeugt (unten)

Die Anregung kann bei einem Trommel- bzw. Paukenfell mit Hilfe eines Frequenzgenerators und eines Lautsprechers erfolgen oder durch mehrere Lautsprecher, die zur Anregung der gewünschten Schwingungsmoden entsprechend gleich- oder gegenphasig eingestellt werden [3].

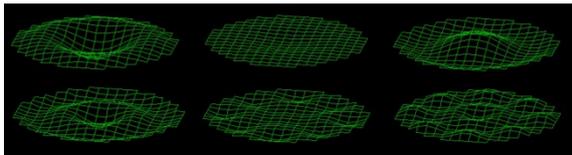


Abb. 10: Versuchsaufbau für Klangfiguren auf dem Trommelfell

Um eine Rückkopplung zu vermeiden, wird das Resonanzfell der Trommel entfernt. Der Sand wird auf dem Trommelfell mit einem Streuer gleichmäßig verteilt. Der Vibrationsgenerator wird am Frequenzgenerator angeschlossen und die Frequenz variiert. Dazu wird die Amplitude heruntergeregelt, bevor die Frequenz erhöht wird, und anschließend die Amplitude wieder langsam erhöht, um genau feststellen zu können, wo die Sandkörner ruhen und wo nicht. So wurden im Frequenzbereich von 350 bis 500 Hz verschiedene Moden gemessen – abhängig davon, ob in Randnähe oder in Nähe des Zentrums angeregt wurde (Moden 01, 02, 11 und 21). Besser würde es allerdings auf einer Pauke funktionieren.

Bei den Chladnischen Klangfiguren sind nur die Schwingungsknoten und -bäuche sichtbar, aber keine Schwingungen selbst. Mit Hilfe der sehr preisgünstigen Casio Exilim Hochgeschwindigkeitskameras und mehreren starken Lampen [4] kann jedoch die Schwingung einer Trommel oder eines Beckens auch in Zeitlupe (mit 420 fps) aufgenommen werden [5]. Durch Auszählen der Schwingungsmaxima in einer gewissen Zeit im Video ließ sich für die Trommel die gleiche Frequenz von ca. 74 Hz bestimmen wie sie in dem Frequenz-Amplitude-Diagramm als stärkste Frequenz abgelesen werden konnte.

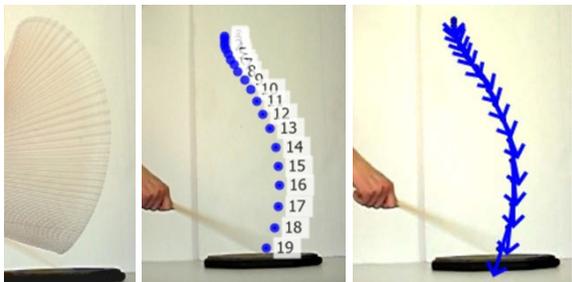
Zusätzlich kann auf das Programm MEMBRAN zurückgegriffen werden, dass die Schwingung einer Membran in einem Video zeigt [6]. Screenshots aus diesem Programm sind in Abbildung 11 zu sehen. Die Nomenklatur für diese Moden ergibt sich aus dem Zahlenpaar  $mn$ ,  $m$  steht dabei für die Anzahl der Knotendurchmesser,  $n$  steht für die der Knotenkreise [2].



**Abb. 11:** Screenshots aus dem Programm MEMBRAN: Schwingungsmoden einer Membran (d.h. mit festen Rand): 02 (erste Reihe), 03 (erstes Bild zweite Reihe) und eine Überlagerung aus 02 und 41 (zwei übrige Bilder)

#### 4. Videoanalyse der Stickbewegung

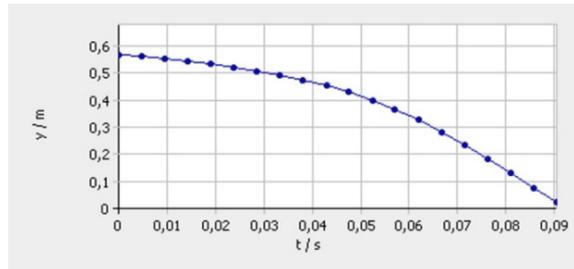
Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (210 fps) kann auch der genaue Bewegungsverlauf des Sticks bei dem Schlag auf das Trommelfell sichtbar gemacht werden. Diese Bewegung des Sticks ist eine interessante Anwendung bei der Kinematik, denn es besteht in der Physikdidaktik eine gewisse Einigkeit, dass es nicht sinnvoll ist, im Physikunterricht nur Spezialfälle gleichmäßig beschleunigter Bewegungen zu behandeln. Hier wäre eine authentische und komplexe Situation gegeben.



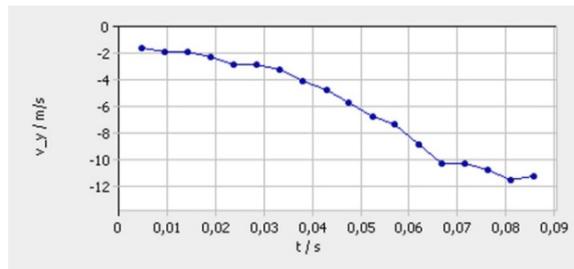
**Abb. 12:** Bilder aus der Videoanalyse mit measure dynamics von links nach rechts: Stroboskopbild, Bild mit eingeblendeten Geschwindigkeitspfeilen und Bild mit Messpunkten

Mit Hilfe eines Videoanalyseprogramms wie measure dynamics kann die Bewegung des Sticks analysiert werden. Dabei sind nicht nur die verschiedenen graphischen Darstellungen der Software hilfreich, auch die qualitative Auswertung kann mit measure dynamics erfolgen. So können Stroboskopbilder der Bewegung, Bilder mit eingeblendeten Geschwindigkeitspfeilen oder eingeblendeten Punkten der Messwerterfassung erstellt werden (s. Abb. 12). In Abbildung 12 ist dabei das Stroboskopbild der gesamten Bewegung zu sehen, die zwei übrigen Bilder zeigen lediglich die Abwärtsbewegung. Andererseits lassen sich auch Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramme erstellen (s. Abb. 13-15).

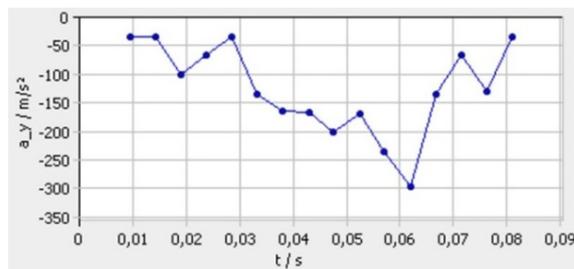
Man sieht im Video: Während sich die Hand abwärtsbewegt, wird auch noch das Handgelenk geknickt und so die Beschleunigung der Stickkopfes erhöht. In den Diagrammen sieht man, dass nicht nur das Tempo zunimmt, sondern auch der Betrag der Beschleunigung. Der Stickkopf erreicht dabei sehr große Beschleunigungen. Mit einem Beschleunigungssensor kann man dagegen nur die Beschleunigung des Armes bestimmen, die wesentlich geringer ist.



**Abb. 13:** Zeit-Orts-Diagramm der Abwärtsbewegung des Sticks aus measure dynamics



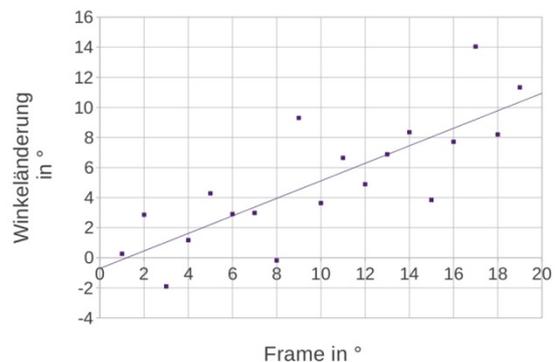
**Abb. 14:** Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm der Abwärtsbewegung des Sticks aus measure dynamics



**Abb. 15:** Zeit-Beschleunigungs-Diagramm der Abwärtsbewegung des Sticks aus measure dynamics

Da der Stick weniger als ein Bild Kontakt mit dem Trommelfell hat, ist die mittlere Beschleunigung während der Kontaktzeit nicht berechenbar, höchstens über  $a = \Delta v / \Delta t$  grob abschätzbar.

Zudem kann die Winkeländerung pro Zeitintervall (s. Abb. 16) betrachtet werden. Hier sieht man, dass die Winkelgeschwindigkeit kontinuierlich zunimmt.



**Abb. 16:** Winkeländerung pro Frame während der Abwärtsbewegung des Sticks ( $\Delta t = 4,76$  ms)

## 5. Zusammenfassung

Schlaginstrumente bieten zahlreiche anwendungsbezogene, praktikable Experimentiermöglichkeiten für den Physikunterricht [5]. Die Klanganalyse kann mit Hilfe von geeigneter Software zum Erkenntnisgewinn der Schüler beitragen, da die Klänge hier gezielt unter verschiedenen Parametern untersucht werden können. Die Chladnischen Klangfiguren bieten einen ästhetischen und qualitativen Zugang zum Phänomen der stehenden Wellen. Auch außerhalb der Akustik kann das Schlagzeug eingesetzt werden. So kann die Stickbewegung als komplexe, interessante Bewegung mit Hilfe der Videoanalyse betrachtet werden.

## 6. Literatur

- [1] Nordmeier, Volkhard; Voßkühler, Adrian (2005): Neue Wege in der Akustik – Visualisierung und Analyse von Klängen. In: CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikertagung Berlin
- [2] Bärnighausen, Eckehard (1996): Über Chladnische Klangfiguren. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 45, Heft 2, S. 10-19
- [3] Heuer, D. et al. (2003): Dorn.Bader Physik Sek II. PAKMA 2002, CD-ROM, Schroedel-Verlag, Hannover
- [4] Michel, M.; Wilhelm, T. (2010): Dynamik mit Hochgeschwindigkeitsvideos. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59, Nr. 7, S. 23 - 30
- [5] Hümmer, Jil: Ausgewählte Schlaginstrumente im Physikunterricht, Staatsexamensarbeit, Universität Augsburg, unveröffentlicht
- [6] Eckert, Bodo; Korsch, Hans Jürgen; Jodl, Hansjörg (1989): Membran – Ein Simulationsprogramm zweidimensionaler Schwingungssysteme. In: Physik und Didaktik, Heft 3, S. 191-206