

# Physlets - Computersimulationen im Physikunterricht

Frank Schweickert, Wolfgang Christian, Daniel Roth und Hansjörg Jodl

Moderne Internettechnologie ermöglicht es nun Physiklehrerinnen und -lehrern mit elementaren Programmierkenntnissen, kostenlos, bei relativ geringem Zeitaufwand maßgeschneiderte Simulationsprogramme für ihren Unterricht zu erstellen. Diese können sowohl im Unterricht als auch in Hausaufgaben auf Diskette oder per Internet eingesetzt werden. Die Internet-Homepage des Davidson College, North Carolina, hält Physiksimulationen, Physlets<sup>®</sup>, zum Herunterladen für nichtkommerzielle Zwecke [1] bereit, die einen weiten Bereich physikalischer Sachgebiete abdecken. Neben einer technischen Orientierung sollen an dieser Stelle auch einige Anregungen zum praktischen Einsatz im Unterricht gegeben werden.

## Wozu Simulationsprogramme im Unterricht?

Seit Jahrzehnten gibt es didaktische motivierte Computersimulationsprogramme für den physikalischen Unterricht. Sie implementieren mathematisch-theoretische Modelle mittels numerischer Methoden und stellen physikalische Objekte meist durch bewegte Zeichnungen (Animation) bildlich dar. Damit gehört der Einsatz von Simulationen grundsätzlich zum Bereich *deduktiven* Vorgehens: Sie zeigen, welche phänomenologischen Konsequenzen aus idealisierten, theoretischen Annahmen folgen, so z.B. die Trägheit eines Massenpunkts aus den Newton'schen Axiomen und weiter dessen Ellipsenbahn bei einem bestimmten, analytisch vorgegebenen Kraftgesetz und unter bestimmten Randbedingungen.

Durch ihre Interaktivität bieten Simulationen jedoch einen besonderen, handlungsorientierten Zugang zu physikalischen Vorstellungen, die auch sehr abstrakter Art sein können, beispielsweise beim Phasenraum der theoretischen Mechanik oder den Wahrscheinlichkeitswellen der Quantenmechanik. Die Hauptaufgabe von Simulationsprogrammen im Unterricht liegt damit im Bereich der Konzeptbildung. Aber es sollte durchaus einmal kritisch diskutiert werden, inwieweit sich auch experimentelle Grundfertigkeiten, wie das Beobachten, das systematische Variieren von Parametern, die Datenanalyse bis hin zur Fehlerabschätzung ebenfalls an Simulationen üben lassen. Denn die zunehmende Verfügbarkeit von Rechnern in den Haushalten lässt erwarten, dass auch die Hausaufgaben in Zukunft eine Vielzahl interessanter Schüleraktivitäten in diesem Bereich beinhalten können. Im übrigen sei darauf hingewiesen, dass modernes Experimentieren in der Forschung auch aus Kostengründen oft mit kostensparenden Simulationen Hand in Hand geht und dass auch in vielen Bereichen der theoretischen Physik mit Simulationen "experimentiert" wird.

Die Güte einer Simulation bemisst sich danach, wie exakt sie Theorie dargestellt, und zunächst *nicht* nach der Übereinstimmung des Dargestellten mit der Natur. An letzterem muss sich natürlich sehr wohl die zugrundeliegende Theorie messen lassen. Daher müssen die Schüler dreierlei unterscheiden lernen,

wenn eine Darstellung nicht den Erwartungen entspricht: Erstens kann eine Simulation unter gewissen Umständen numerisch versagen, zweitens kann das zugrundeliegende analytische Modell die experimentelle Situation unzureichend beschreiben und drittens kann seitens des Schülers ein falsches Präkonzept vorliegen, dem die Simulation schließlich widerspricht.

Im ersten Fall haben Schüler erfahrungsgemäß Freude daran, durch extreme Wahl von einstellbaren Parametern die numerischen Grenzen akkurater Simulation auszutesten. Sie bekommen dabei gleichzeitig ein Gefühl für die Natur der dabei auftretenden Effekte. Interessant ist es auch, mit den Schülern Methoden zu erarbeiten, um die Konsistenz des Dargestellten zu überprüfen. Dazu kann der Energieerhaltungssatz der Mechanik, der Strahlensatz bei optischen Abbildungen oder einfach eine geeignete Wahl der Parameter dienen.

Der zweite Fall, die unzureichende Theorie zur Simulation, wäre z.B. beim Vernachlässigen der Reibung oder anderer Einflussgrößen gegeben. Gerade hier spielt die weiter unten vorgestellte Technik der Physlets ihre Stärke aus: Verschiedene alternative Modelle für eine Simulation können vorbereitet werden, ohne dass die Bedienung der Software für die Schüler zu komplex wird.

Den dritten Fall der unzutreffenden Vorurteile illustriert das Beispiel einer simulierten elektrischen Ladung (Abb. 1), die auf ihrer Bahn durchaus nicht den elektrischen Feldlinien folgt, wie viele Schüler vielleicht angenommen hätten. Hier vermittelt der aktive Umgang mit der Simulation einen sehr viel plastischeren Eindruck vom Einfluss der Massenträgheit auf die Bewegung der Testladung. Mit einem üblichen apparativen Aufbau, etwa mit einem Kathodenstrahl im homogenen Feld eines Kondensators, wäre das so nicht zu erreichen.

In jedem Fall müssen aber in der Schule parallele Demonstrations- und Schülerexperimente dafür sorgen, dass die Bequemlichkeit der Softwarebedienung die Schüler nicht über die Notwendigkeit der ungleich mühsameren, *induktiven* Naturbeobachtung hinwegtäuscht.

## Physlets - Was wird durch neue Techniken einfacher?

Bislang war jede Simulationssoftware unterschiedlich zu bedienen und oft auf verwirrend vielfältige Weise zu konfigurieren. Das paradoxe Ergebnis: Viele Programme waren so komplex, dass sie sich aufgrund der erforderlichen Einarbeitungszeit nur mühsam in bestehende Lehrpläne integrieren ließen. Andererseits waren sie immer noch nicht flexibel genug, um speziellen Darstellungswünschen der Lehrer zu genügen. Entsprechend gering blieb die Motivation, sich überhaupt auf die - zudem meist kostenpflichtige - Lernsoftware einzulassen. Auch die prinzipielle Möglichkeit, zumindest für entsprechend versierte Lehrkräfte, sich durch eigenes Programmieren maßgeschneiderte Lösungen zu schaffen, verschloss sich in

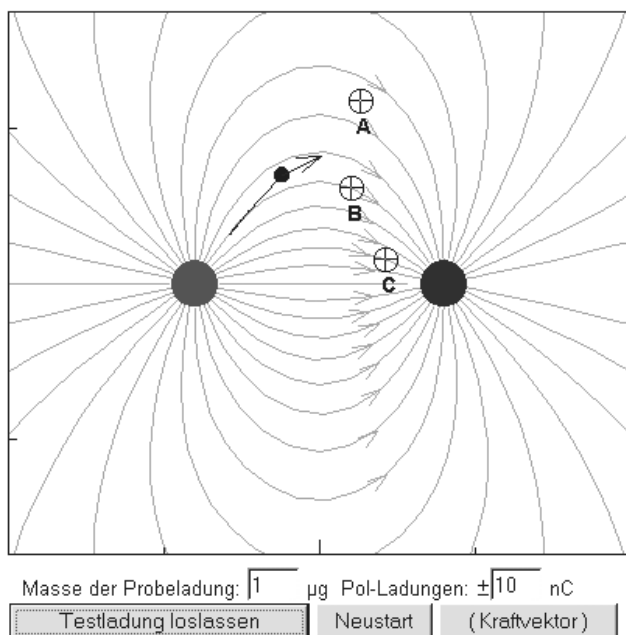


Abb. 1: Reibungsfreie Probeladungen folgen nicht den elektrischen Feldlinien. Eine Erhöhung von Ladungen und Masse verändert nicht die Bahnkurve (nur die Geschwindigkeit). Bei diesem Physlet, das Werte aus Webformularfeldern übernimmt, sind die möglichen Aktivitäten absichtlich beschränkt. Es wäre jedoch ein Leichtes, den Schülern zu gestatten, diese Anordnung durch Ziehen mit der Maus selbst umzugestalten, z.B. mit einer JavaScript-Anweisung wie `setDragable(ladung2,true)`.

dem Maße, in dem die Ansprüche an die Perfektion der Darstellung stiegen.

Inzwischen hat sich die technische Situation grundlegend verändert: In hypermedialen Lehrmaterialien, die zum Beispiel in Form von Internet-Webseiten präsentiert werden, können neben Text nicht nur Bilder, Klänge und Videoausschnitte präsentiert, sondern auch Computerprogramme - Java-Applets - eingebunden werden. Die Schüler müssen sich dazu kaum in eine neue Software einarbeiten, da jeweils immer nur diejenigen Bedienelemente angezeigt werden, die im physikalischen Kontext eines virtuellen Experiments von Bedeutung sind. Die Physik-Applets des Davidson College, die Physlets<sup>®</sup>, werden vom Lehrer mit Hilfe der einfachen Programmiersprache JavaScript an die gewünschte Erscheinungsweise angepasst. JavaScript muss dazu noch nicht einmal vollständig erlernt werden, da es meist genügt, bereits bestehende Beispiele - oft Zehnzeiler - sinnfällig abzuändern, z.B. bei einer virtuellen Optischen Bank einen Befehl `addObject("lens",...)` in `addObject("mirror",...)` abzuwandeln. Darüber hinaus entwickelt die Universität Kaiserslautern Online-Werkzeuge, "Baukästen", die JavaScript-Kommandos automatisch erstellen, sobald das gewünschte Simulationsobjekt in einer Tabelle ausgewählt wurde. Danach werden die individuellen Physlets nach Maß zum Herunterladen auf Diskette bereitgestellt [2].

Bei den Physlets handelt es sich also keineswegs nur um eine Sammlung von Java-Applets, die unverändert übernommen werden müssen und von denen im Internet bereits sehr viele angeboten werden [3], sondern um ein sehr flexibles Konzept: Jedes Physlet stellt physikalische Objekte zur Verfügung, beispielsweise elektrische Ladungen in E- und B-Feldern, elastisch stoßende Teilchen der kinetischen Gastheorie, bewegli-

che Aufbauten einer optischen Bank, Massenpunkte, die frei definierbare Kräfte aufeinander ausüben usw. Hinzu kommen Physlets mit der Funktionalität von Graphen-Plottern, Wertetabellen, Filteralgorithmen für Datensätze u.a., die z.B. zeitabhängige Daten von Objekten in anderen Physlets aufbereitet darstellen können. In der Dokumentation auf der Physlet-Homepage werden die gültigen Skript-Befehle für jedes Physlet aufgelistet, so dass ihre Konfigurierung vergleichbar ist mit dem Zusammenbau eines Demonstrationsexperimentes in der Lehrmittelsammlung. Da dies zuweilen auch interessierte Schüler unter Anleitung tun können, müssen dem Lehrer unter Umständen nur die grundsätzlichen physikalischen Darstellungsmöglichkeiten des jeweiligen Physlets bekannt sein [4].

Physlets funktionieren auch ohne Internetzugang, wenn die zugehörige Programm-Datei (.jar) einmal von der Physlet-Homepage heruntergeladen ist. Die Ansicht und die individuelle Ausgestaltung können mit Hilfe der üblichen, kostenlosen Internetprogramme, z.B. Internet-Explorer oder Netscape Communicator erfolgen. Entweder benutzt man dabei eines der derzeit entwickelten Kaiserslauterer Online-Werkzeuge oder man modifiziert die heruntergeladenen Dateien von Hand mit dem Zubehör der eben erwähnten Browser. Man erstellt oder modifiziert eine Internetseite (.htm/.html-Datei), die den Aufgabentext und ein rechteckiges Feld für die Simulation enthält. In einem integrierten Webeditor-Programm wie MSFrontpage oder Netscape Composer lässt sich komfortabel das Erscheinungsbild durch Wahl von Schriftarten, Farben und Textanordnung verändern. In einer reinen Textansicht (Quelltext) enthält diese Datei hingegen viele, möglicherweise schwer verständliche Formatierungsanweisungen (HTML). Diese kann man größtenteils getrost ignorieren, da in dieser Ansicht zumeist nur einige JavaScript-Befehle eingefügt werden, die die gewünschte physikalische Situation beschreiben. Die richtige Stelle für solcherlei Eintragungen findet man leicht, wenn man eine bereits funktionierende Physlet-Webseite abwandelt.

Das Resultat jeder vorgenommenen Änderungen lässt sich sofort im Browser überprüfen, der die lokal gespeicherte Internetseite (.html) anzeigt. Diese greift dabei ihrerseits auf die ebenfalls heruntergeladenen Physlet-Programmdateien (.jar) zurück. Das funktioniert natürlich ebenso von einer Diskette, die Schüler mit nach Hause nehmen können, und natürlich auch auf einer möglicherweise vorhandenen eigenen Schulhomepage. Mit etwas Übung kann man dann auch noch ein weiteres herausragendes Merkmal der Physlets ausnutzen: Verschiedene Physlets, die in derselben Webseite eingebaut wurden, können miteinander kommunizieren. Das heißt, dass beispielsweise die mittlere kinetische Energie eines Modellgases im Physlets *Molecular* vom Physlet *DataGraph* in einem automatisch skalierten Graphen in Abhängigkeit von der ansteigenden Temperatur dargestellt werden kann.

### Konkrete Vorschläge für den Unterricht

Unsere Erfahrungen mit Physlets im multimedialen Fernstudienengagement FiPS der Universität Kaiserslautern [5] haben gezeigt, dass interaktive Multimedia-Materialien aus Zeitmangel der Teilnehmer wesentlich weniger genutzt werden, wenn sie nur als unverbindliche Beigabe angeboten werden und nicht mit konkreten Arbeitsaufträgen verbunden sind. Vermutlich werden daher auch Schüler aus eigenem Antrieb wenig echte Lerneranstrengungen bei virtuellen Experimenten unternehmen,

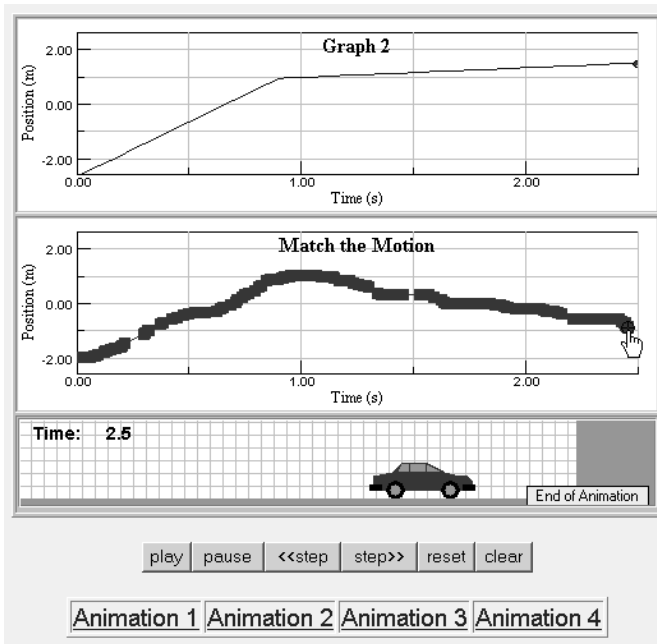


Abb. 2: Nach Anwählen einer Animation 1-4 fährt im unteren Teil ein Wagen mit konstanter Geschwindigkeit von links nach rechts, prallt rechts auf eine Wand und rollt langsam wieder nach links zurück. Zu dieser Bewegung werden ganz oben jeweils verschiedene  $s(t)$ -Graphen vorgeschlagen. Während der Diskussion dieser Vorschläge im Unterricht können im mittleren Teil eigene Graphen mit der Maus eingezeichnet werden. Mit den Bedienelementen wird die Bewegung angehalten oder die eigenen Graphen gelöscht. Drei voneinander unabhängige Applets sind auf dieser Seite gleichzeitig aktiv: Unten das Physlet Animator, das auch Grafiken im GIF-Format als Objekte bewegen kann. In der Mitte und oben das Physlet DataGraph, auf zwei verschiedene Weisen mit JavaScript konfiguriert. Hyperlinks und Bedienelemente führen jeweils unterschiedliche JavaScript-Anweisungen aus.

wenn sie nicht mit klarer Zielvorstellung in den regulären Unterricht eingebunden sind. Daher wollen wir hier kurz einige Anregungen zur Anwendung von Physlets im Unterricht geben. Natürlich sind die meisten Beispiele in verschiedenen Unterrichtssituationen denkbar, und die physikalischen Themen der Physlets werden ständig erweitert.

### 1. Erarbeitungsphasen (frontales Unterrichtsgespräch, Partnerübung, als Hausaufgabe per Arbeitsblatt...)

- Zeit- und Ortskoordinaten beliebig bewegter Objekte, auch eingefügter Bilder (.gif), lassen sich schrittweise protokollieren, in Graphen darstellen und dadurch bestimmten Bewegungstypen zuordnen (Physlet *Animator*, s. Abb. 2).
- Vergleich von elektrischen Feldlinien, Kraftvektoren, Äquipotentiallinien von verschiedenen Punktladungsverteilungen und Beobachtung der jeweiligen Bewegung einer Testladung (*EField*)
- Überlagerung von Wellen und Störungen (longitudinal und transversal) (*Pipes, Reflection*)

### 2. Sicherung

nach Erarbeitung im Computerraum (mit Beamer o.ä.) wäre als Ergänzung zum Hefteintrag z.B. auf Diskette auszuteilen:

- ein Physlet, das einen bewegten Punkt zeigt, der Kreiswellen aussendet, die sich zu Mach'schen Kegeln mit geschwindigkeitsabhängigem Öffnungswinkel überlagern. (*Doppler* oder *Animator*, s. Abb. 3)

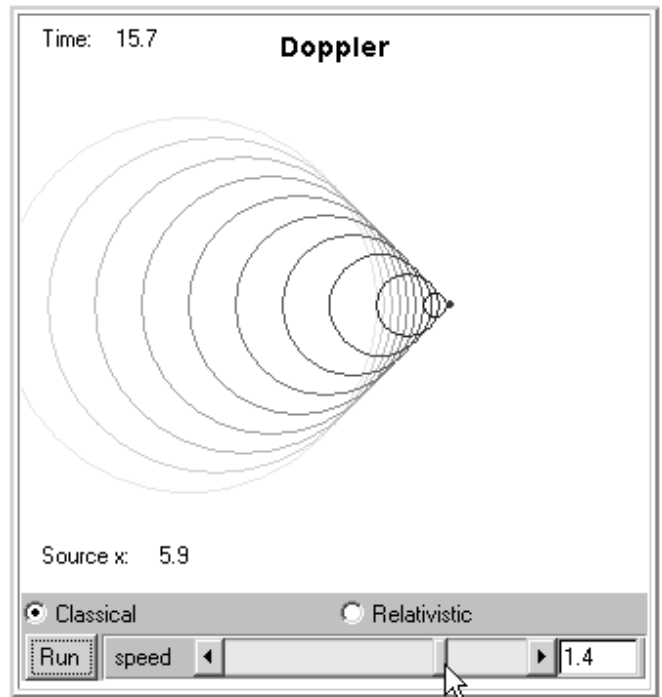


Abb. 3: Ein Physlet zum Dopplereffekt ist aussagekräftiger als zeitaufwendige Tafelbilder. Die Schüler nehmen es auf Diskette mit nach Hause oder finden es im Internet. Dieses Physlet funktioniert auch ohne eine einzige JavaScript-Zeile.

- Zwei Sinusfunktionen verschiedener Periode, die zu einer Schwebung überlagert und hörbar gemacht werden (*Sound-Out*).
- bewegte Interferenzmuster in einer simulierten Wellenwanne (*Ripple*, Abb. 5)

Diese Darstellungen sind effizienter als die üblichen umständlichen Bemühungen an der Tafel. Der instruktive Wert von zusätzlichen Konstruktionen mit Zirkel und Lineal im Schülerheft soll damit allerdings keineswegs bestritten werden.

### 3. Übungsphasen (Hausaufgaben, Rechnerraum)

- Elektrische Schwingkreise können nach Berechnung passender Parameter ( $C$ ,  $L$ ) auf eine vorgegebene Frequenz eingestellt werden. (*Circuits*)

Wer Erfahrungen mit Webservern hat, kann sich die Ergebnisse durch ein Formular auf der Webseite über das Internet übermitteln und dann auswerten lassen (CGI-Technik), andere Lehrer wünschen vielleicht eine Rückmeldung der Schüler per E-Mail.

- Ein beweglicher Draht verändert den magnetischen Fluss durch die rechteckige Leiterschleife, deren Teil er ist. Die Schüler sollen aus dem Verhalten der Induktionsspannung auf den räumlichen Verlauf des unbekanntes B-Felds durch die Schleife schließen, den der Lehrer in einer JavaScript-Anweisung vorgegeben hat. Sie skizzieren ihre Vermutung als Graph in ihr Hausaufgabenheft. (*Faraday*)

### 3. Mündliche Prüfungen (mündliche Einzelnote im Unterricht, Abitur)

- Interpretation von Bewegungsgraphen (*Animator*)
- Interpretation von Ladungs- und Feldverteilung in Dielektrika (*Poisson*, s. Abb. 1)

- Interpretation von quantenmechanischen Wellenpaketen, Tunneleffekt (*Reflection*)

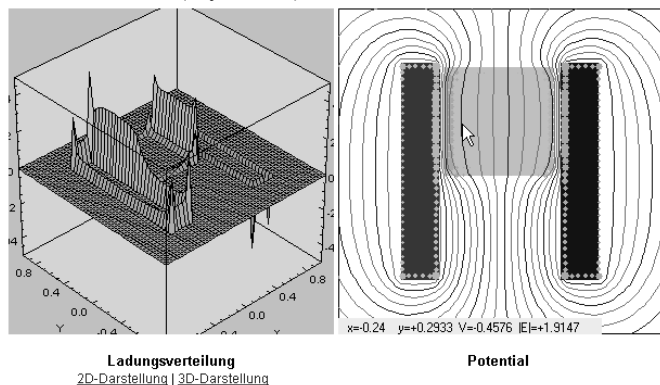


Abb. 4: Ein Beispiel für das Zusammenwirken mehrerer Physlets. Im rechten Bild wird ein quadratisches Dielektrikum zwischen zwei geladene Kondensatorplatten geschoben. Dabei verzerren sich die Äquipotentiallinien. Durch Influenz und Polarisierung entsteht die (hier zweidimensionale) Ladungsverteilung, die schematisch durch Punkte verschiedener Größe auf einem Raster dargestellt wird. Mit dem Mauszeiger lassen sich die Werte von Potential und Feldstärke ablesen. Die Daten der Ladungsverteilung stehen auch dem Physlet rechts daneben auf derselben Webseite zur Verfügung, das die Ladungsdichte in einem Flächendiagramm darstellt. Die Ansicht auf dieses dreidimensionale Diagramm lässt sich mit der Maus um zwei Achsen rotieren, wobei auch die charakteristischen Ladunganhäufungen an den Kanten der Objekte verdeutlicht werden. Das Physlet zur dreidimensionalen Darstellung (SPlotter) lässt sich aber auch mit anderen Physlets kombinieren, die entsprechende Datensätze liefern.

#### 4. Schüler konfigurieren Physlets (Facharbeiten, Physik AG, individuelle Einzelnote)

Schüler konfigurieren selbst Physlets nach physikalischen Vorgaben. Programmieraufgaben:

- Wienfilter, Massenspektrograph (*EField*)
- elektrischer Quadropol, Elektronenlinse (*EField*)
- gekoppelte Federpendel (*Animator*)
- optische Vergütung durch dünne Schichten (*Reflection*)

Auf der Physlet-Homepage des Davidson College ist eine große Auswahl an fertig konfigurierten Physlets, die von den verschiedensten Lehranstalten international zusammengetragen wurden, anzusehen und herunterzuladen. Obwohl insbesondere in den Vereinigten Staaten bereits viele Erfahrungen mit Physlets im Unterricht vorliegen [6], ist ihr Einsatz unter deutschen Verhältnissen noch wenig erprobt. Mit Veröffentlichungen und Lehrerfortbildungen versuchen wir eine Diskussion über Möglichkeiten und Grenzen dieser Technik im deutschen Physikunterricht und auch in der Hochschullehre anzuregen. Technischen Rat und Kontakte mit interessierten Lehrern und Schülern will auch das deutsche Physikernetzwerk PEN [7] der Universität Kaiserslautern vermitteln - hier befindet sich eine deutschsprachige Physlet-Seite im Aufbau. Wir hoffen, dass sich dabei eine ganze Reihe praktischer Vorschläge dafür ergeben, wie sich diese neue multimediate Lehrmethode effizient im Schulalltag bewähren kann.

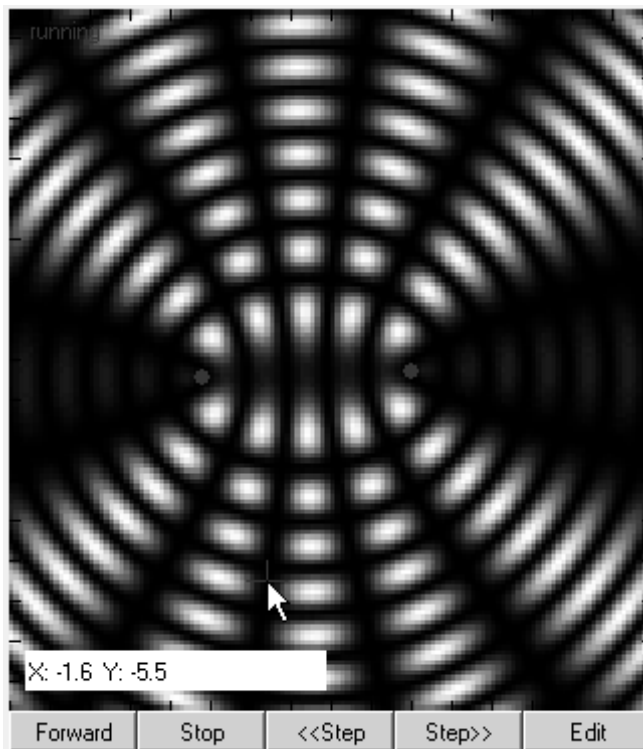


Abb. 5: Dieses bewegte Wellenbild des Physlets Ripple lässt sich mit dem Mauszeiger quantitativ auswerten. Im Edit-Modus können auch Schüler noch an der fertigen Physletseite noch individuell die Anzahl und die Positionen der Quellen verändern.

#### Anmerkungen

- [1] W. Christian, Davidson College, North Carolina: "Physlet Homepage", <http://webphysics.davidson.edu/Applets/Applets.html>
- [2] Deutschsprachige Physletseite: <http://pen.physik.uni-kl.de/physlets/>
- [3] P. Kramer, Würzburg: <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~pkrahmer/home/homepage.html>
- [4] Ein Buch zu Physlets (engl.): Wolfgang Christian und Mario Belloni: *Physlets - Teaching with Interactive Curricular Material*, Prentice Hall, 2000
- [5] Früheinstieg ins Physikstudium (FiPS), Fachbereich Physik, Universität Kaiserslautern, Fernstudium der ersten beiden Fachsemester Physik, auch während Bundeswehr, Zivildienst, Auslandsaufenthalt o.ä., <http://fips-server.physik.uni-kl.de/fips>
- [6] Dabei ist besonders das Just-in-Time-Teaching (JiTT) hervorzuheben. Hier sorgt die Vor- und Nachbereitung des Unterrichts durch die Schüler anhand von Physlets in Webformularen auch für eine automatische Rückmeldung an den Lehrer. Diese Informationen können dann wiederum in seiner Unterrichtsplanung berücksichtigen werden. (Literatur speziell für Physik: Novak, Patterson, Gavrin, Christian: *Just-In-Time-Teaching. Blending Active Learning with Web Technology*, Prentice Hall, 1999)
- [7] Physikernetzwerk/Physics Education Network (PEN, <http://pen.physik.uni-kl.de/>) hält auch einen Online-Einführungskurs zum Einrichten eigener Physlets bereit. Rückfragen gerne auch an Frank Schweickert (E-Mail: [schweick@physik.uni-kl.de](mailto:schweick@physik.uni-kl.de)).