

# Immer wieder neu...

**Liebe Kolleginnen und Kollegen,**

wissen Sie, was mich zutiefst an unserem Fach, der Physik, beeindruckt? Immer wieder (und auch mit zunehmender Erfahrung und Lebensalter nicht weniger werdend) stoße ich auf einfache physikalische Phänomene, Zusammenhänge oder Erklärungen, die ich zunächst nicht verstehe. Das klingt fast ein wenig peinlich für jemanden, der sein Geld damit verdient, sich gut in der Physik auszukennen. Ich fand das auch immer ein wenig beschämend, aber inzwischen habe ich begriffen, wie viel ich aus solchen Situationen lernen kann. Und fast immer erschließt sich mir eine Fülle an neuen Einsichten, vertieftem Verständnis physikalischer Zusammenhänge und neuen Experimenten. Oft ergibt sich dann auch die Möglichkeit, etwas darüber zu schreiben. Und was mich wirklich immer wieder aufs Neue tief beeindruckt, ist, dass sich die meisten Dinge mit relativ einfachen physikalischen Modellen gut abbilden lassen.

Lassen Sie mich ein Beispiel geben: Seit Wochen diskutieren wir hier in der Arbeitsgruppe über die Brechung des Sonnenlichtes an der Atmosphäre. Ausgangspunkt dabei war der wunderbare Artikel von Udo Backhaus, den Sie im vorliegenden Heft finden werden. Wir modellieren, experimentieren, diskutieren, streiten und einigen uns wieder und verstehen so immer besser, was da eigentlich los ist. Wir hoffen sehr, darüber im nächsten Heft von Plus Lucis mehr berichten zu können. Aber es gab noch viele andere solcher Situationen: Die Drehrichtung des einfachsten Elektromotors der Welt, die Schrittspannung beim Gewitter, ein Kinderspielzeug zur Streuung von Licht sind nur einige darunter.

Immer wieder bin ich auf solche Situationen auch durch Fragen von Kindern und Jugendlichen gestoßen. Ich bin mir sicher, dass auch Sie ähnliches erlebt haben. Es würde mich sehr freuen, wenn Sie uns an solchen Fragen (und vielleicht sogar den Lösungen) teilhaben lassen – Plus Lucis steht immer offen für Beiträge.

Das führt mich zur nächsten Bitte an Sie: Wie ich in den letzten Jahren wiederholt festgestellt habe, gibt es verblüffend viele Kolleginnen und Kollegen an den Schulen, die unseren Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts nicht kennen, noch nie etwas von Plus Lucis gehört haben und auch nichts von der Fortbildungswoche wissen. Ich wäre Ihnen allen sehr dankbar, wenn Sie dazu beitragen könnten, das zu ändern.

Sprechen Sie doch einmal mit den Kolleginnen und Kollegen an Ihrer Schule oder auf einer der nächsten Schilfs, Schülfis oder PH-Fortbildung über den Verein. Informieren Sie die jüngeren KollegInnen, die UnterrichtspraktikantInnen und Studierenden, die bei Ihnen schulpraktische Erfahrungen sammeln. Werben Sie für die Zeitschrift und für die Fort



bildungswoche. Wir senden auch gerne einige Ansichtsexemplare von Plus Lucis zu, wenn Sie welche benötigen. Ich bin sicher, dass der Gegenwert für Ihren Mitgliedsbeitrag diesen aufwiegt. (Falls Sie nicht dieser Meinung sind, lassen Sie uns wissen, was wir ändern sollten!) Das Beitrittsformular findet sich auf unserer Homepage (<http://pluslucis.univie.ac.at/vfpc/Beitritt.doc>). Ich würde mich sehr freuen, wenn wir so die Zahl unserer Mitglieder noch weiter erhöhen könnten.

Dank der engagierten Mitarbeit vieler Kolleginnen und Kollegen bin ich wieder einmal in der glücklichen Lage, Ihnen ein neues Heft von Plus Lucis präsentieren zu können. Auch dieses Mal wieder finden Sie eine große Anzahl spannender und aufschlussreicher Beiträge. In gewohnter Weise enthält das Heft Beiträge zur Fachwissenschaft und zur Fachdidaktik, darüber hinaus Anregungen für die Unterrichtspraxis und vieles andere mehr. Viel Vergnügen bei der Lektüre!

Martin Hopf

# Gedanken beim Sonnenuntergang

Udo Backhaus

*"... sah ich nichts als das tiefe Becken des Nachthimmels, denn ich lag mit ausgebreiteten Armen rücklings auf einem Dünengrat und sah ins Sternengewimmel. Ich war mir damals noch nicht so recht klar, wie tief dieses Meer ist, und so fasste mich der Schwindel, als ich es plötzlich entdeckte. Ich fand keine Wurzel, an die ich mich klammern konnte, und kein Dach und kein Zweig waren zwischen diesem Abgrund und mir. Ich war schon losgelöst und begann hineinzufallen wie ein Taucher ins Meer. Aber ich fiel nicht. Ich fühlte mich von Kopf zu den Zehen mit unzählbaren Banden der Erde verknüpft. ... Schwebend hing ich an der Erde ..."*

(Saint-Exupery, 1999).

## Das Erlebnis eines Sonnenunterganges

Eine der Initialzündungen für mein astronomisches Interesse, für meine Beobachtungen des Tages- und des Sternenhimmels und für die Faszination, die für mich von den dabei gemachten Erfahrungen ausgeht und die ich versuche, unseren Lehramtsstudierenden zu vermitteln, war die Lektüre von Martin Wagenscheins Aufsatz „Die Erfahrung des Erdballs“ (Wagenschein, 1988). Wagenschein plädiert dort am Beispiel der Beobachtungen, die mit der Kugelgestalt der Erde, ihrer Rotation und ihrem Umlauf um die Sonne zusammenhängen, eindrucksvoll dafür, dass es nicht genüge, Sätze zu lehren, auch nicht, sie zu veranschaulichen, dass es vielmehr darauf ankomme, verstehen zu lehren. Und das heiße, „sie (die Schüler) einsehen (zu) lassen, wie die Menschheit auf den Gedanken („Die Erde ist eine Kugel.“) kommen konnte (und kann), so etwas nachzuweisen, weil die Natur es ihr anbot (und weiter anbietet). Und wie es dann gelang und je neu gelingt.“

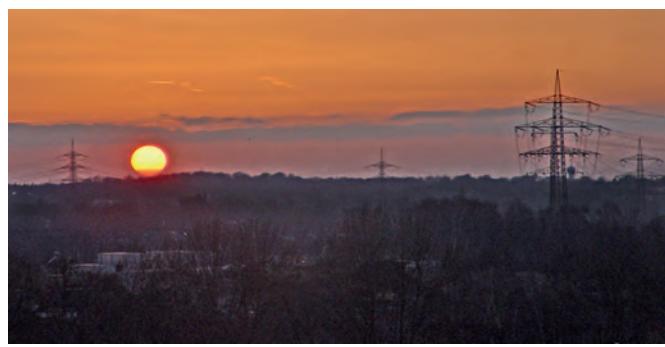


Abb. 1: Sonnenuntergang am 22. März 2010,  
beobachtet von meinem Dienstzimmer aus.

Seit vielen Jahren verfolge ich den täglichen Sonnenlauf und seine Veränderung während des Jahres<sup>1</sup>. Ich beobachte

<sup>1</sup> Eine fotografische Dokumentation der Veränderung des Sonnenuntergangspunktes ist zu finden unter <http://www.didaktik.physik.uni-duisburg-essen.de/~backhaus/Sonnenuntergaenge/>.

Univ.-Prof. i.R. Dr. Udo Backhaus, Fakultät für Physik der Universität Duisburg-Essen. E-Mail: udo.backhaus@uni-due.de

und genieße Sonnenuntergänge auf Spaziergängen, am Meer und im Gebirge und habe das auch schon auf der Südhalbkugel getan. Ich denke und fühle mich dabei in die Erdkugel und ihre Drehung ein und ärgere mich immer wieder über voreilige Belehrungen, die Bewegung der Sonne über den Himmel als nur scheinbar abzutun. Stattdessen versuche ich, die Erde trotzdem als Heimat im Sinne Wagenscheins zu behalten, indem ich mich „von jeder Scholle des riesigen mütterlichen Erdleibes“ gehalten fühle.

*„Wer die Erdkugel als Heimat gewinnen will, lernt es am besten auf weiten Reisen. ... Für den, der so weit nicht kommt, ist das Schwierige, dass die Erde so groß ist, dass wir das Kippen (der Himmelskuppel) erst bei weiten Reisen merken. ... Wir müssen lernen, uns gleichzeitig an allen Orten zu wähnen.“*

Mit den Überlegungen dieses Aufsatzes möchte ich darauf aufmerksam machen, dass man bereits *im Liegen auf einer Sommerwiese*, bei der Beobachtung eines Sonnenuntergangs, der Erdkugel auf die Spur kommen kann. Darüber hinaus wird es sich als möglich erweisen, sogar die Größe der Erde abzuschätzen.

## Einfache Beobachtungen — überraschende Folgerungen

Dieser Aufsatz wurde durch einen sehr lesenswerten Artikel in der Zeitschrift Astronomie+Raumfahrt angeregt, in dem W. Schlosser (2003) kritische Anmerkungen zu Gestalt und Ausrichtung der Mondsichel und zur Methode von Aristarch macht, die Entfernung zur Sonne bei Halbmond zu messen. Darüber hinaus befasst sich Schlosser ausführlich mit den Schlussfolgerungen, die sich aus der Beobachtung von Sonnenuntergängen ziehen lassen. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Überlegungen sind:

- Aus der Erfahrung, dass die Sonne direkt am Horizont untergeht (Abb. 1), kann man schließen, dass die Erdoberfläche gekrümmt sein muss.
- Aus dem zusätzlichen Wissen, dass Sonnenuntergänge überall auf der Erde gleich aussehen, folgt dann die Kugelgestalt der Erde.
- Aus der Beobachtung, dass die Sonne beim Untergang deutlich abgeplattet erscheint (Abb. 2), folgt, dass die Atmosphäre nicht homogen sein kann, sondern dass ihre Dichte mit zunehmender Höhe abnehmen muss; denn bei einer Atmosphäre mit konstanter Dichte sähe die untergehende Sonne kreisrund aus. Dieser Schluss ist allerdings nicht leicht zu ziehen: Es sind Beispielrechnungen unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre erforderlich.



Abb. 2: Ausschnittsvergrößerung aus Abb. 1.  
Die Abplattung, d. h. das Verhältnis aus der Differenz zwischen horizontalem und vertikalem Durchmesser und dem horizontalen Durchmesser  $A = \frac{r_h - r_v}{r_v}$  beträgt etwa 0.14.

Solche Schlussfolgerungen könnten einen naturwissenschaftlich Gebildeten, der träumend, aber mit voller Hinwendung einen Sonnenuntergang beobachtet, veranlassen, die Kugelgestalt der Erde wahrzunehmen, ja zu fühlen, ganz ähnlich wie sich der auf einem Tafelberg gelandete Pilot in Saint-Exupéry's Erzählung „Das Flugzeug und der Planet“, aus der eingangs zitiert wurde, von der Erde gehalten fühlt. Etwa folgendermaßen:

*Ich sehe die Sonne deutlich abgeplattet untergehen; ihre vertikale Ausdehnung scheint kleiner zu sein als die horizontale. Wenn ich davon ausgehe, dass die Sonne als physikalischer Körper immer noch kugelrund ist, dann muss es sich um einen Scheineffekt handeln, der dadurch erzeugt wird, dass das Licht auf dem Wege von der Sonne zu mir aus der Geradlinigkeit (vertikal) abgelenkt wird. Die nächstliegende Vermutung: Das Licht wird beim Eintritt in die Lufthülle der Erde, eventuell auch auf seinem Wege durch die Atmosphäre, gebrochen. Vielleicht wäre die Sonne ohne die durch diese Lichtbrechung hervorgerufene Hebung bereits untergegangen.*

Wenn es sich aber um Lichtbrechung beim Übergang vom optisch dünneren Medium (dem Vakuum des Weltraums) in die optisch dichtere Atmosphäre handelt, dann gibt es einen maximal möglichen Ablenkungswinkel, der bei streifendem Auftreffen auf die Atmosphäre auftritt. Wenn die Erde eine Scheibe wäre, könnte mich das Sonnenlicht deshalb nicht vom Horizont erreichen, sondern mit einem Höhenwinkel gegen den Horizont, der diesem maximalen Ablenkungswinkel gleicht. Vorausgesetzt, dass dieser Grenzwinkel nicht unbeobachtbar klein ist, müsste die Sonne oberhalb des Horizonts untergehen. Ich sehe aber die Sonne deutlich direkt am Horizont untergehen (Abb. 3).



Abb. 3: Die untergehende Sonne taucht ins Meer ein.

Und selbst wenn Dunst den Horizont unkenntlich macht, wird er mir von der Lichtbahn zur Sonne, dem Sonnenschwert, angezeigt (Abb. 4). Die Erde kann also keine Scheibe sein; ihre Oberfläche muss gekrümmmt sein.



Abb. 4: Das Schwert der Sonne macht den Horizont auch bei Dunst sichtbar.

Mich würde sehr interessieren, ob dieser Effekt groß genug wäre, um bei flacher Erde beobachtbar zu sein!

Aber selbst wenn sich die Untergangshöhe unbeobachtbar wenig von  $0^\circ$  unterscheidet, wäre ein anderer Effekt unübersehbar: Bei Annäherung an den Horizont würde die Sonne immer flacher aussehen, bis sie schließlich als horizontaler Strich verschwände: In der Nähe des streifenden Einfalls werden alle auftreffenden Lichtstrahlen nahezu in dieselbe Richtung gebrochen. Das widerspricht aber meiner Erfahrung. Auch aus diesem Grunde kann die Erde keine Scheibe sein!

Die Probleme mit dem Sonnenuntergang am Horizont und mit der nur geringen Abplattung der untergehenden Sonne lassen sich durch die Annahme beseitigen, dass die Erdoberfläche gekrümmt ist. Dann können mich die Strahlen der untergehenden Sonne vom Horizont erreichen, ohne dass sie streifend auf die Atmosphäre treffen.

Ich kann mich erinnern, dass die Form der untergehenden Sonne zu jeder Jahreszeit gleich aussieht. Sie ist also unabhängig davon, in welcher Himmelsrichtung die Sonne untergeht. Gleiche Beobach-

tungen habe ich an mehreren Orten der Erde gemacht, und viele Fotos überzeugen mich davon, dass die untergehende Sonne an jedem Ort der Erde und zu jeder Zeit im Jahr gleich aussieht. Die Krümmung der Erde muss also an allen Orten und in allen Richtungen gleich sein: Die Erde ist eine Kugel!

Die bisherigen Überlegungen sind unabhängig davon, wie die Atmosphäre im Detail aufgebaut ist. Sie lassen sich sogar am leichtesten unter der Annahme verstehen, dass die Lufthülle der Erde homogen, die Dichte der Luft unabhängig von der Höhe über dem Erdboden ist. Bei homogener Atmosphäre aber würde eine zunehmende Krümmung der Erdoberfläche sehr schnell dazu führen, dass der Einfallswinkel der Strahlen der untergehenden Sonne kleiner wird. Dadurch würde die Abplattung der Sonne schnell kleiner, und die Sonne würde (annähernd) kreisrund untergehen. Die deutliche Abplattung kann deshalb zwei Ursachen haben: Entweder ist die Lufthülle homogen, dann muss die Erde sehr groß sein. Oder die Dichte der Luft muss nach oben abnehmen.

Mich würde interessieren, ob sich diese Überlegungen auch quantitativ präzisieren lassen: Lässt sich mit ihrer Hilfe aus den beobachteten Werten für optische Hebung<sup>2</sup> und Abplattung der Sonne vielleicht sogar die Größe der Erde abschätzen?

## Simulationen

Der Schluss aus der Beobachtung eines Sonnenuntergangs am Horizont auf die Kugelgestalt der Erde leuchtete mir beim Lesen von Schlossers Aufsatz unmittelbar ein. Auch die Folgerungen aus der Abplattung der Sonne faszinierten mich. Zu meiner Überraschung aber fanden Freunde und Kollegen die Überlegungen weniger überzeugend. So wurden die Effekte zwar nicht grundsätzlich abgestritten, aber sie wurden für so klein gehalten, dass die Erscheinungen beim Sonnenuntergang trotzdem noch mit einer flachen Erde verträglich wären.

Tatsächlich sind quantitative Abschätzungen nicht ganz einfach, und insbesondere das Argument für eine Atmosphäre mit einer nach oben abnehmenden Dichte wird erst durch Rechnungen richtig überzeugend. Außerdem scheint der Versuch lohnend, zu weiteren, quantitativen, Schlussfolgerungen zu gelangen. Deshalb sollen die Beobachtungen im Folgenden simuliert und grafisch dargestellt werden. Dabei wird, wenn nicht eine Atmosphäre mit konstanter Dichte vorausgesetzt wird, von einer isothermen Atmosphäre ausgegangen, deren Druck gemäß

$$p(h) = p_0 e^{-kh} \quad (1)$$

mit der Höhe  $h$  über dem Erdboden exponentiell abnimmt. Die Abhängigkeit zwischen Druck  $p$ , absoluter Temperatur  $T$  und Brechungsindex  $n$  der Luft wird nach Liljeqvist & Cehak (1994) folgendermaßen näherungsweise berechnet:

$$n(h, T) = 1.0 + \left( \frac{77.6K}{T} \left( \frac{p(h)}{mb} + 4810 \frac{K}{T} \frac{e(h)}{mb} \right) \right) 10^{-6} \quad (2)$$

In den Simulationen wird von trockener Luft ausgegangen, der Partialdruck  $e$  des Wasserdampfes wird also null gesetzt. Die Temperatur wird mit  $T = 273$  K angenommen.

Der Simulation liegt ein Raytracing-Verfahren zugrunde, bei dem der Sonnenuntergang „fotografiert“ wird: Für jeden Punkt der Bildebene wird der auftreffende Lichtstrahl durch das Objektiv einer Kamera zurückverfolgt, bis man auf das Objekt stößt, von dem der Strahl ausgegangen ist. Der Bildpunkt erhält dann die Farbe dieses Objektes. Zentrale Prozedur bei dieser Strahlverfolgung ist die Anwendung des Brechungsgesetzes. Im Falle der inhomogenen Atmosphäre wird es nach einer vorgegebenen Weglänge (z. B. 1000 m) immer wieder angewendet, indem für die erreichte Höhe erneut der Brechungsindex nach Gleichung (2) berechnet wird. Da die Geometrie der Szene sehr einfach ist, braucht das nur für die vertikale Symmetriechse durchgeführt zu werden. Die horizontale Ausdehnung der Sonne ergibt sich aus der Objektivbrennweite, die vertikal durch den Abstand der beiden Strahlen, die die Sonne gerade noch treffen. Die genaue Form der Sonne muss dann noch durch Abtasten der Sonnenumgebung ermittelt werden.

Um das Untergehen der Sonne am Horizont, bzw. ihr Eintauchen ins Meer, wie in der Realität noch deutlicher und die Simulation insgesamt realistischer zu machen, wird zusätzlich das so genannte „Schwert der Sonne“ (vgl. Schlichting, 1998, und Schlichting, 1999, siehe Abb. 4) berechnet. Dabei wird von einer leicht gekrüselten Wasseroberfläche ausgegangen, deren Neigung gegen die Horizontale kleiner als ein vorgegebener Maximalwinkel  $\alpha_{\max}$  ist. Dazu wird jeder Punkt der Wasseroberfläche als potentieller Spiegel betrachtet, der Licht von der Sonne in die Kamera reflektiert. Es werden nur die Punkte der Wasseroberfläche hell abgebildet, für die das zu diesem Strahlverlauf gehörige Einfallsslot weniger als  $\alpha_{\max}$  gegen die Vertikale geneigt ist.

## Mit diesem Programm<sup>3</sup> erzielt man folgende Ergebnisse:

- Durch Variation der Parameter (geometrische Position der Sonne,  $\alpha_{\max}$ , Höhe des Beobachtungsstandortes, Temperatur, Erdradius  $R$ ) lassen sich befriedigende Übereinstimmungen zwischen Fotografien und Simulationen erzielen (siehe z. B. Abb. 5).
- Für realistische Parameter ( $T = 273$  K,  $p_0 = 10^5$  Pa,  $R = 6370$  km) erhält man am Horizont mit einer Abplattung der Sonne von  $A \approx 0.18$  und einer optischen Hebung von  $\delta = 0.59^\circ$  Werte, die fast exakt mit der Realität (Abplattung  $\approx 0.17$ , Hebung  $\approx 0.58^\circ$ ) übereinstimmen (Abb. 6).

<sup>2</sup> Tatsächlich ist die optische Hebung nicht einfach zu beobachten. Sie ergibt sich erst, wenn man die im Laufe des Tages vermessene Bewegung der Sonne (Tatsächlich macht man es mit Sternen.) bis zum Horizont extrapoliert und dort eine Abweichung von der gleichförmigen Kreisbewegung feststellt.

<sup>3</sup> Das Programm kann beim Autor angefordert werden.



Abb. 5: Schwert der untergehenden Sonne, fotografiert mit einem Teleobjektiv (aus Schlichting, 1998), und die entsprechende Simulation ( $f = 400$  mm,  $\alpha_{\max} = 1.2^\circ$ )

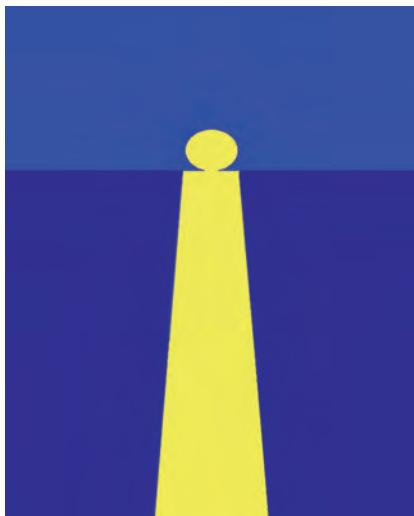


Abb. 6: Simulation eines Sonnenuntergangs am Meer mit realistischen Parametern ( $R = 6370$  km,  $T = 273$  K,  $\alpha_{\max} = 5^\circ$ ). Geometrisch befindet sich die Sonne bereits  $0.4^\circ$  unter dem Horizont.



Abb. 7: Bei scheibenförmiger Erde ginge die Sonne als schmaler Strich etwa  $1.4^\circ$  oberhalb des Horizonts unter. In den grau gezeichneten Bereich zwischen Untergangshöhe und Horizont gelangt kein Licht von außen. Das total reflektierte Licht von der Erdoberfläche dürfte nicht intensiv genug sein.

- Bei scheibenförmiger Erde geht die Sonne, unabhängig vom Aufbau der Atmosphäre, als sehr flache Ellipse in einer Höhe von etwa  $1.4^\circ$  unter (Abb. 7), wenn die Sonne geometrisch gerade unter dem Horizont verschwunden ist. Die optische Hebung beträgt  $\delta \approx 1.6^\circ$ .

- Bei realer Größe der Erde ergibt sich bei homogener Atmosphäre für die optische Hebung mit  $0.36^\circ$  ein ungefähr richtiger Wert. Allerdings geht die Sonne fast kreisrund unter (Abb. 8).

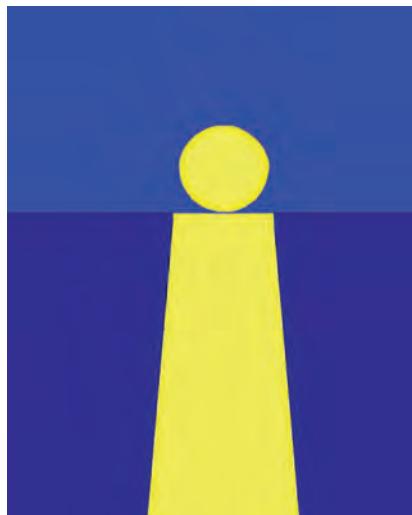


Abb. 8:  
Bei homogener Atmosphäre würde man auf der Erde einen kreisrunden Sonnenuntergang beobachten.

- Nahezu unabhängig vom Aufbau der Atmosphäre geht die Sonne bei einem Erdradius  $R < 28000$  km am Horizont unter<sup>4</sup>. Allerdings würden Sonnenuntergänge auch bei deutlich kleineren Werten für den Erdradius ganz anders aussehen (Abb. 9), als wir es gewohnt sind.



Abb. 9: Bei einem Erdradius von  $R = 20000$  km würden Sonnenuntergänge deutlich anders aussehen.

- Bei homogener Atmosphäre ergibt sich für  $R \approx 14000$  km die tatsächlich beobachtete optische Hebung am Horizont (siehe Anhang). Allerdings geht dann die Sonne kreisrund unter.

Um herauszufinden, welche Größe der Erde mit den beobachteten Werten für optische Hebung und Abplattung verträglich ist, bestimmt man sie nummerisch als Funktion

<sup>4</sup> Das lässt sich für die homogene Atmosphäre auch leicht theoretisch verstehen (siehe Anhang).

des Erdradius. Dazu wird mit dem Simulationsprogramm die geometrische Höhe der Sonne so eingestellt, dass der untere Rand der scheinbaren Sonne gerade den Horizont berührt. Dabei ergibt sich, dass sich realistische Werte ( $A \approx 0.17$ ,  $\delta \approx 0.58^\circ$ ) nur im Intervall  $5500 \text{ km} < R < 7000 \text{ km}$  ergeben (Abb. 10).

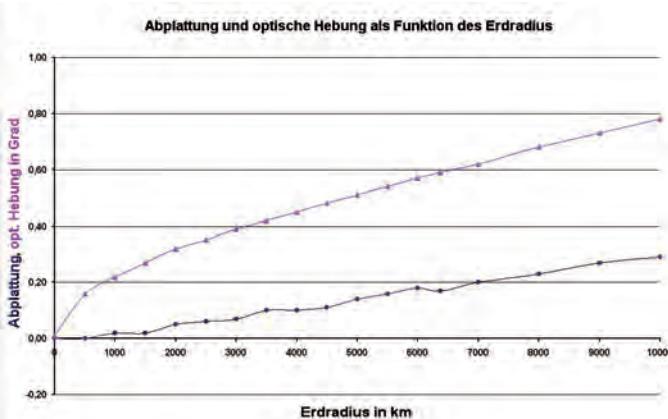


Abb. 10: Veränderung von optischer Hebung (Quadrat) und Abplattung (Kreise) der untergehenden Sonne in Abhängigkeit vom Erdradius (isotherme Atmosphäre)

Bei homogener Atmosphäre dagegen ist es unmöglich, für eine bestimmte Erdgröße realistische Werte für Abplattung und optische Hebung gleichzeitig zu erreichen (Abb. 11).

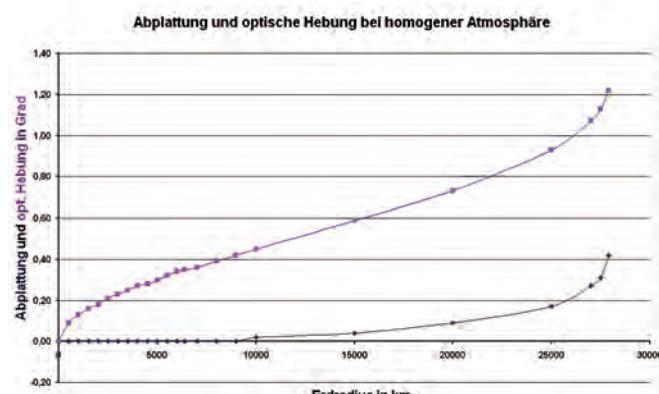


Abb. 11: Veränderung von optischer Hebung (Quadrat) und Abplattung (Kreis) der untergehenden Sonne in Abhängigkeit vom Erdradius (homogene Atmosphäre)

## Fazit

Der Träumende, der liegend den Sonnenuntergang verfolgte, ist mit der Erdkugel vertraut geworden. Er ist nicht nur der Krümmung der Oberfläche auf die Spur gekommen, sondern hat die Erde als Kugel erkannt, deren Größe er abschätzen konnte. Vielleicht gelingt es ihm, nachdem die Sonne untergegangen ist, sich vorzustellen, wie er sich gerade mit der ganzen Erde zusammen aus dem Sonnenlicht hinauswälzt.

Grundlegend war dabei seine Kenntnis des Phänomens der Lichtbrechung. Für erste quantitative Abschätzungen

brauchte er den Brechungsindex der Luft und den Luftdruck am Boden. Für genauere Abschätzungen, die ihn zur Erkenntnis der nach oben abnehmenden Dichte der Atmosphäre und schließlich zur richtigen Größenordnung für den Erdradius führten, musste er allerdings nach Hause gehen, um genauere Annahmen über die optische Hebung am Horizont, die Abnahme der Dichte mit der Höhe und den Zusammenhang zwischen Brechungsindex und Luftdruck zu erlangen.

Typisch für astronomische und astrophysikalische Überlegungen ist dabei, dass Kenntnisse aus ganz verschiedenen Bereichen zusammengeführt werden müssen. Der Reiz, aber auch die Herausforderung besteht gerade in dieser „Vernetzung“, die bisher im Physikunterricht, aber auch in der universitären Physikausbildung, zu kurz kommt.

## Literatur

- Liljeqvist, G. H. & Cehak, K. (1994): *Allgemeine Meteorologie*. Springer: Berlin.
- Saint-Exupéry, A. (1999): *Wind, Sand und Sterne, Rauch*: Düsseldorf, 85.
- Schlichting, H.-J. (1998): Das Schwert der Sonne – Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. Teil 1: Überblick und Phänomene, *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 51/7, 387-397
- Schlichting, H.-J. (1999): Das Schwert der Sonne – Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. Teil 2: Mathematische Modellierung und Simulation, *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 52/6, 330-336.
- Schlosser, W. (2003): Einfache Beobachtungen – überraschende Folgerungen, *Astronomie + Raumfahrt* 42/1, 4-7.
- Wagenschein, M. (1988): Die Erfahrung des Erdballs. In: M. Wagenschein, *Naturphänomene sehen und verstehen – Genetische Lehrgänge*. Klett: Stuttgart (im Internet unter <http://martin-wagenschein.de/Archiv/W-010.pdf>)

# Anhang

## Quantitative Abschätzungen für eine Atmosphäre konstanter Dichte

### Die Dicke der homogenen Atmosphäre

Für den Luftdruck  $p_0$  an der Erdoberfläche gilt:

$$p_0 = \frac{mg}{A} = \frac{nM_L g}{A}$$

Dabei ist  $A$  eine beliebige Fläche,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $n$  die Masse der Luft über der Fläche und  $M_L$  die molare Masse von Luft.

Bei konstanter Dichte der Luft gilt für das Volumen  $V$  der über der Fläche befindlichen Luft

$$V = Ah = nV_m$$

Dabei sind  $h$  die Dicke der Luftsicht und  $V_m$  das Volumen eines Mols Luft. Bei vorgegebener Temperatur  $T$  gilt nach der allgemeinen Gasgleichung ( $R$  allgemeine Gaskonstante)

$$p_0 V_m = RT$$

Fasst man diese Gleichungen zusammen, ergibt sich

$$h = \frac{nV_m}{A} = \frac{p_0 V_m}{M_L g} = \frac{RT}{M_L g}$$

Die Dicke der Atmosphäre hängt also nur von der vorgegebenen Temperatur ab:

$$h = \frac{RT}{M_L g} \quad (3)$$

Wenn die Dichte der Luft konstant wäre, wäre demnach (bei  $T = 273$  K) die Atmosphäre ungefähr 8 km dick.

### Abschätzung des Erdradius aus der am Horizont beobachtbaren atmosphärischen Hebung

Sei  $\delta$  die beobachtete optische Hebung am Horizont.

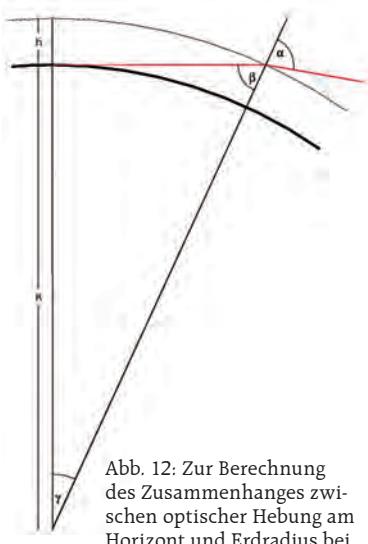


Abb. 12: Zur Berechnung des Zusammenhangs zwischen optischer Hebung am Horizont und Erdradius bei homogener Atmosphäre

Dann gilt, bei angenommener Homogenität der Atmosphäre, nach Abb. 12

$$n_{Luft} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin(\beta + \delta)}{\sin \beta}.$$

Wegen

$$\sin \beta = \frac{R}{R+h} \quad (4)$$

und

$$\begin{aligned} \sin(\beta + \delta) &= \\ &= \sin \beta \cos \delta + \cos \beta \sin \delta \end{aligned}$$

ergibt sich daraus

$$\begin{aligned} \frac{\sin \beta \cos \delta + \sin \delta \sqrt{1 - \sin^2 \beta}}{\sin \beta} &= n \Rightarrow \\ \cos \delta + \sin \delta \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \beta} - 1} &= n \Rightarrow \\ \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \beta} - 1} &= \frac{n - \cos \delta}{\sin \delta} \Rightarrow \\ \frac{1}{\sin^2 \beta} &= \left( \frac{n - \cos \delta}{\sin \delta} \right)^2 + 1 = \frac{n^2 - 2n \cos \delta + 1}{\sin^2 \delta} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich

$$\sin^2 \beta = \frac{\sin^2 \delta}{n^2 - 2n \cos \delta + 1} \quad (5)$$

Wenn aber  $\sin \beta$  bekannt ist, lässt sich nach (4) der zugehörige Erdradius berechnen:

$$R = \frac{\sin \beta}{1 - \sin \beta} h \quad (6)$$

Für  $T = 273$  K,  $\delta = 0.58^\circ$ ,  $h = 8040$  m und  $n = 1.000288$  ergibt sich z. B.  $R = 14300$  km. Das ist zwar kein sehr guter Wert, aber die Größenordnung ist richtig – mehr konnte bei der groben Näherung nicht erwartet werden!

### Grenzgröße der Erde für Sonnenuntergänge am Horizont

Um herauszufinden, ab welcher Größe der Erde kein Sonnenlicht mehr die Erdoberfläche streifend erreichen kann, verändere man in Abb. 12 den Erdradius so, dass der Sonnenstrahl, der streifend auf die Erdoberfläche trifft, auch den äußeren Rand der Atmosphäre streifend erreicht. Nach Gleichung (4) muss man dazu den Erdradius vergrößern.

In diesem Fall entspricht der Eintrittswinkel  $\beta$  in die Atmosphäre dem Grenzwinkel der Totalreflexion  $\beta_{gr}$  für den gilt

$$\sin \beta_{gr} = \frac{1}{n}$$

Damit wird aus (4)

$$\sin \beta_{gr} = \frac{R_{gr}}{R_{gr} + h} \Rightarrow R_{gr} + h = nR_{gr},$$

und daraus folgt

$$R_{gr} = \frac{h}{n-1}. \quad (7)$$

Setzt man für den Brechungsindex der Luft den Wert ein, der sich nach (2) für  $T = 273$  K und  $p_0 = 1013$  mb ergibt,  $n = 1.000288$ , dann ergibt sich für den Erdradius, von dem ab es bei homogener Atmosphäre keinen Sonnenuntergang am Horizont mehr geben kann,  $R_{gr} \approx 3472$  h  $\approx 28000$  km. Man kann also bereits mit einfachsten Überlegungen aus der Beobachtung der untergehenden Sonne schließen, dass die Erdoberfläche nicht eben sein kann, sondern mindestens so gekrümmmt sein muss, wie es dem Radius  $R_{gr}$  entspricht.

# Smartphones im Physikunterricht

Gerhard Rath

## Smartphones in der Schule?

Aus dem Alltag der Jugendlichen sind die kleinen Geräte nicht mehr wegzudenken. Schon in der Unterstufe können wir von einer faktischen Vollversorgung ausgehen: „Mit 12 Jahren nutzt die große Mehrheit der Jugendlichen ein Smartphone“ [1]. Dabei steht die Kommunikation an erster Stelle, allerdings nicht mehr das Telefonieren, sondern textbasier- te Dienste, gefolgt von Spielen, Musik und Fotos/Videos.

Etwas anders sieht es in den Schulen aus, wo der Gebrauch mobiler Medien eingeschränkt und reglementiert ist, im Extremfall bis zu völligen Verboten. Handys lenken vom Lernen ab, stören den Unterricht und ermöglichen Zugänge zu fragwürdigen bis gar gefährlichen Quellen. Eine Art Glau- benskrieg scheint sich hier zu inszenieren mit glühenden Befürwortern und Gegnern des Handyeinsatzes in Schulen (vgl. [2]).

Obwohl die Bedenken und Probleme durchaus ernst zu nehmen sind, wird hier für den gezielten Einsatz von Smartphones Stellung bezogen. Gerade für den Physikunterricht bieten diese Geräte ein derartiges Potenzial, dass wir gar nicht umhin kommen, Smartphones zu verwenden – soweit meine Ausgangshypothese.

Abgesehen von den später auszuführenden physikspezi- fischen Möglichkeiten sprechen die folgenden Argumente generell für eine Verwendung von Smartphones im Unter- richt:

- Es lässt sich eine Steigerung der Motivation und des Interesses erwarten, wenn Schülerinnen und Schüler die bei ihnen beliebten Geräte verwenden dürfen.
- Mit den Smartphones wird die aktuelle Lebenswelt der Jugendlichen in den Unterricht einbezogen, was authentische und situierte Lernumgebungen ermöglicht.
- Die Verwendung von Smartphones ist mit (oft auch kommunikativen und kooperativen) Aktivitäten der Schülerinnen und Schüler verbunden, wodurch Kompetenzorientierung unterstützt werden kann.
- Im Speziellen geht es dabei auch um Medienkom- petenzen wie den kritischen, reflektierten Umgang mit den eigenen Mobilgeräten [3].

## Smartphones im Physikunterricht

Zu den allgemeinen Möglichkeiten und Tools wie Taschenrechner oder Stoppuhr kommt für den Physikunterricht das multiple Messpotenzial. Smartphones sind nicht bloß

Dr. Gerhard Rath, BRG Kepler Graz und Fachdidaktikzentrum Physik, Universität Graz. E-Mail: gerhard.rath@uni-graz.at

bessere Telefone, sie sind mobile Computer im Kleinformat, bestückt mit einer Vielzahl von Sensoren, wahre digitale Schweizermesser. Mit Beschleunigungs-, Rotations- und Magnetfeldsensoren in drei Raumrichtungen sowie mit dem GPS-Empfänger erfassen sie ständig ihre Lage und Bewegungen im Raum. Weniger auffällig sind Kamera und Mikrofon, doch auch die haben es in sich: Der CCD-Chip eröffnet das Potenzial für Lux- und Farbmessungen bis hin zur Feststellung von Gammastrahlung [4].

Es gibt eine Reihe von Apps, welche die Daten der verbauten Sensoren anzeigen und auslesen. Abb. 1 zeigt die empfehlenswerte Anwendung Sensor Kinetics, welche für alle Plattformen gratis erhältlich ist [5].



Abb. 1: Anzeige von Sensorwerten

Allein mit diesem kleinen Programm lässt sich eine Reihe von Messungen durchführen, wobei sehr viel über Technik und Möglichkeiten des eigenen Smartphones gelernt werden kann. Abb. 1 zeigt, dass in dem entsprechenden Gerät drei jeweils dreidimensionale Sensoren verbaut sind. Sie definieren x/y/z-Achsen des Smartphones und messen Beschleunigung, Drehwinkel und Magnetfeld. Das gerätebe- zogene Koordinatensystem zeigt Abb. 2, es wird etwa für Beschleunigungsdetektion verwendet.

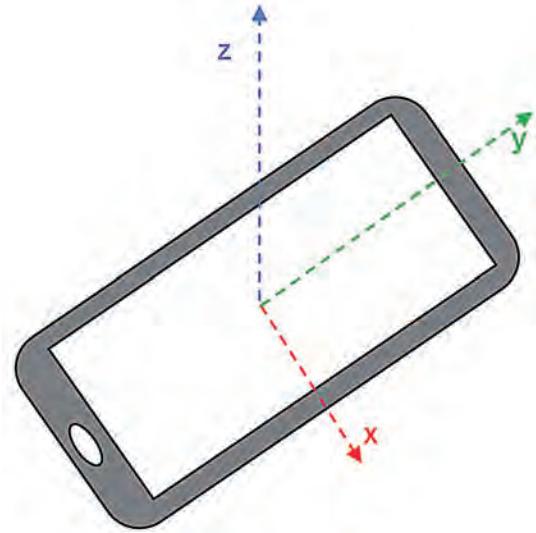


Abb. 2: Achsenrichtungen für Sensoren



Abb. 3: Besschleunigungsmessung

Abb. 3 zeigt das Zeit-Beschleunigungs-Diagramm des Accelerometers, das die Daten der Sensoren direkt darstellt. Bei 2 Sekunden wurde das Handy kurz nach rechts bewegt und wieder gestoppt. Wir sehen daher zuerst eine kurze positive Beschleunigung (ca.  $2 \text{ m/s}^2$ ), gleich darauf eine negative. Entsprechend erfolgten kurze Bewegungen bei 4 s nach vorne und bei 6 s nach oben. Zur Auswertung der Daten wurde ein screenshot genommen, das Exportieren von Messergebnissen in Form von Tabellen ist nur in der kostenpflichtigen Pro-Version möglich. Ähnlich werten die Gyroskop-Sensoren Drehbewegungen um die drei Achsen aus.

Das Magnetometer gibt hingegen eine Orientierung im Raum, es misst die Lage des Smartphones in Bezug auf das lokale Erdmagnetfeld. In Abb. 4 wurde das Handy zuerst senkrecht gehalten (gerätebezogene y-Achse nach oben), mit der x-Achse nach Osten. Der x-Anteil des Magnetfeldes liegt

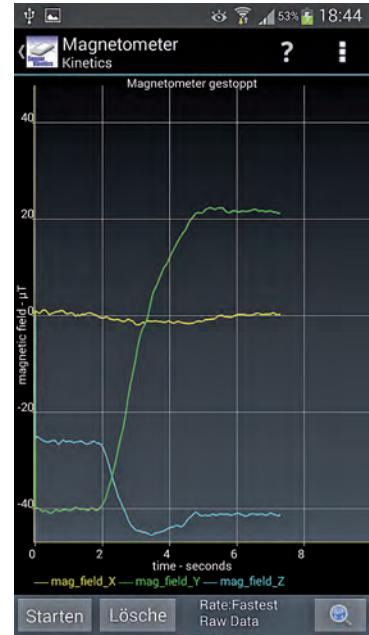


Abb. 4: Komponenten des Erdmagnetfelds

daher bei Null. In senkrechter Lage entfällt der größere Teil ( $40 \mu\text{T}$ ) auf die y-Achse (negativ, weil nach unten zeigend – Inkination!), etwas weniger auf die z-Achse. Bei 2 Sekunden wurde das Smartphone langsam um die x-Achse in die waagrechte Position gedreht. Nun sehen wir den größeren Anteil in der z-Achse.

Ohne hier weiter darauf eingehen zu können, lässt sich eine Vielfalt von unterrichtspraktischen Möglichkeiten erahnen. Eigentlich lässt sich jede Bewegung messen und analysieren, bei der das Smartphone teilnehmen kann, sei es im Alltag (Gehen, Laufen, Springen, Stiegensteigen; Anfahren/Bremsen von Straßenbahnen; Vergnügungspark; Lift...) oder auch mit Experimentiergerät (Wagerl, Pendel...).



Abb. 5: Handy als Theodolit

Entsprechende Apps greifen auf die Originaldaten der Sensoren zu, werten diese (meist kombiniert) aus und stellen sie grafisch dar, z.B. als Kompass oder Winkelmesse. Abb. 5 zeigt die App Theodolite Droid, welche die Kamera mit den Lage- und Ortungssensoren kombiniert. Horizontwinkel (Im Querformat → y-Achse) und Höhenwinkel (z-Achse) werden aus den Beschleunigungs- und Gyroskop-Sensoren ermittelt, das Azimut (Himmelsrichtung) magnetisch. Oben im Bild erkennt man den Zugriff auf GPS-Daten.

Schon dieser kleine Einblick in die vielfältigen Möglichkeiten lässt das enorme Potenzial von Smartphones erkennen. Was wie ein Zauberding wirkt, ist aber andererseits nichts Neues. Entsprechende Messgeräte gab es und gibt es – oft mit wesentlich besserer Technik und mit Anbindung an den PC. Die Technik der Bewegungsanalyse mit Videos, mit der aus Einzelbildern Bewegungsdaten gewonnen und analysiert werden (siehe dazu den Beitrag von Richard Sadek über seine App VidAnalysis), war schon mit VHS-Videos möglich. Schallpegel- oder Beleuchtungsstärkemesser gibt es im Elektronik-Handel.

Was aber neu ist, neben der Konzentration all dieser Messeinheiten in einem kompakten Gerät, ist die ständige Verfügbarkeit für die Lernenden, auch und gerade außerhalb der Schule. Sein Schulbuch vergisst man schon mal, das Handy nicht – es ist immer dabei. Die Jugendlichen verfügen also über ein mobiles Vielfachmessgerät mit Internetanbindung, dessen Möglichkeiten etwa im Projekt Physics2Go dargestellt und untersucht werden (vgl. [6]).

## Notwendige Kompetenzen der Lehrenden

Die Verwendung im Unterricht liegt für mich auf der Hand, eine wesentliche Frage betrifft die Lehrkräfte: Über welche Kompetenzen müssen sie verfügen, um Unterricht mit Smartphones zielführend organisieren zu können? Das Modell TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge) kann diesbezüglich zur Orientierung beitragen [7].

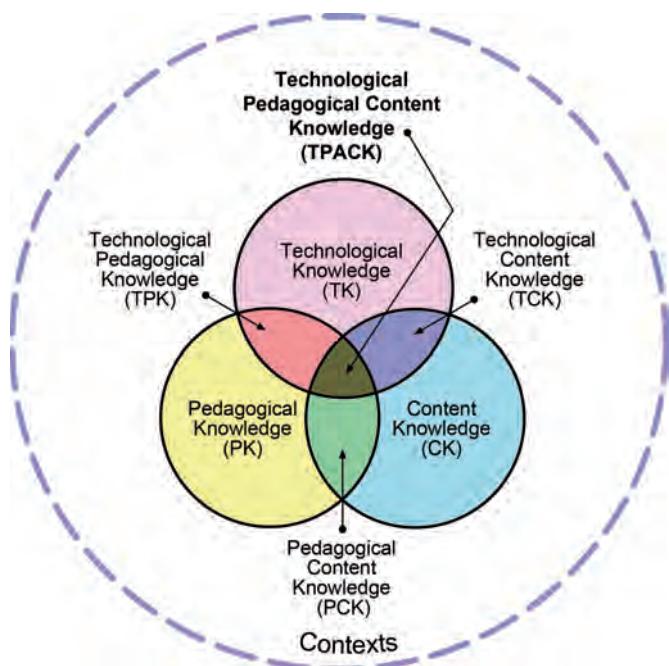


Abb. 6: Geforderte Kompetenzen für das Unterrichten (aus [7])

Die unteren beiden Bereiche betreffen jeden Unterricht. Content Knowledge (CK) meint das Fachwissen sowie Wissen über die Physik (Nature of Science). Pedagogical Knowledge (PK) Kompetenzen im Bereich Pädagogik, etwa Unterrichtsorganisation, Klassenführung oder Diagnose des Lernstandes. Auch die Schnittmenge (PCK) ist geläufig –

hier findet sich die Fachdidaktik, das pädagogische Wissen wird auf das spezielle Fach angewendet.

Was beim Einsatz von Smartphones hinzukommt, ist zuerst der Bereich der Technologischen Kompetenzen (TK). Als Lehrperson muss man sein eigenes Smartphone gut kennen und verwenden können, zum Beispiel die Arbeit mit Fotos und Videos, das Installieren und Verwenden von Apps oder auch Möglichkeiten der Datenspeicherung und Kommunikation.

Die Ausführungen im Punkt 2 dieses Artikels lassen sich im Feld TCK einordnen, im Schnittbereich Technologie-Fach. Was können Mess-Apps? Wie genau messen sie? Zu welchen Bereichen des Faches passen sie? Darüber hinaus geht es hier um die Technik des Gerätes selbst: Wie arbeiten die Sensoren, wie funktioniert der Touchscreen, was passiert eigentlich bei einem mobilen Telefongespräch?

Im nächsten Abschnitt werde ich vor allem auf den zweiten Schnittbereich (TPK) eingehen. Dieser betrifft vor allem die „Wie?“-Frage des Unterrichtens. Wie setzt man Smartphones zielführend ein? Wie organisiert man den Unterricht, etwa mit den eigenen Mobilgeräten der Schülerinnen und Schüler? Wie sichert man die Ergebnisse? Das zentrale Feld (TPACK), in welchem die fachlichen Kompetenzen einzbezogen werden, kann hier nur kurz angeschnitten werden. Gerade dieser Bereich stellt allerdings letztendlich das Ziel entsprechender Lehreraus- und fortbildung dar.

## Einige unterrichtspraktische Fragen beim Einsatz von Smartphones

### Wie integriert man die Smartphones der Jugendlichen?

Arbeitet man mit vorgegebenen Sätzen gleicher Endgeräte, die der Schule gehören und bei Bedarf ausgegeben werden oder verwendet man die privaten Geräte der SchülerInnen und Schüler? Für beide Möglichkeiten gibt es pro und contra, sie schließen einander auch nicht notwendigerweise aus. Ich beziehe mich hier nur auf den zweiten Weg, der in der Arbeitswelt als BYOD (Bring Your Own Device) zunehmend aktuell wird [8]. Neben anderen Argumenten scheint es mir spannend und interessant, wie wir das große Potenzial der Mobilgeräte in den Händen der Schülerinnen und Schüler nutzen können.

Für die Vorbereitung zur Verwendung der eigenen Smartphones empfiehlt sich eine Befragung, gründliche Information über Sinn und Zweck sowie klare Regeln. Ein kleiner Fragebogen dazu könnte folgende Fragen enthalten:

- Welches Mobilgerät (System: iOS, Android, Windows) besitzt du?
- Stimmst du zu, dieses im Physikunterricht zu verwenden?
- Stimmst du zu, physikalische Apps zu installieren?
- Welcher Art der Kommunikation (Datenaustausch) stimmst du zu? (E-Mail, Cloud (z.B. Dropbox), WhatsApp...)

In der Unterstufe ist auch eine Information der Eltern notwendig.

Bezüglich der Regeln muss die Hausordnung der Schule beachtet werden. Es empfiehlt sich, in entsprechenden Stunden die Smartphones gleich am Tisch und somit für die Lehrkraft sichtbar liegen zu haben. Ganz wichtig ist die strikte Beschränkung auf unterrichtsspezifische Zwecke: Es dürfen keine Personen fotografiert oder gefilmt werden, es dürfen keine privaten Nachrichten verschickt oder andere Tätigkeiten ausgeführt werden. Nur die gerade notwendigen Aktionen sind erlaubt.

### Wie geht man mit den unterschiedlichen Endgeräten um?

Diese Frage ist insoferne heikel, da sie über technische und organisatorische Aspekte in soziale Bereiche geht. Handys sind auch Statussymbole, vom einfachen Telefon bis zur letzten iPhone-Generation findet sich das ganze dazugehörige Spektrum typischerweise in einer Klasse. Eine Möglichkeit ist, grundsätzlich in Gruppen zu arbeiten, wo nur ein geeignetes Smartphone verfügbar sein muss, mit dem dann gearbeitet wird. Dies entschärft auch das Problem, dass nicht jede App für jedes Betriebssystem vorhanden ist.

Je einfacher die Anwendung ist, desto mehr Geräte können verwendet werden. Z.B. funktioniert das Filmen von Experimenten praktisch mit jeder Art von Mobilgeräten. Ansonsten sind Programme günstig, die zumindest für Android und iOS vorhanden sind, wie die beiden oben erwähnten Apps. Ein Vorteil verschiedener Endgeräte ist, dass Vergleiche zwischen Smartphones auf eine quantifizierbare Ebene gebracht werden können, weg von bloßer Mode oder von Äußerlichkeiten.



Abb. 7: Schüler vergleichen verschiedene Apps

Abb. 7 zeigt Ergebnisse einer Messung mit dem „Rotation Sensor“ von Sensor Kinetics. Dieser kombiniert Gyroskop und Magnetometer, wodurch die Lage im Raum in Winkel-

graden angezeigt wird. Aufgabe war hier, eine Null-Lage aller 3 Achsen herzustellen und zu überlegen, wie diese vom Gerät ermittelt wird. Dabei zeigte sich, dass nicht nur leicht unterschiedliche Ergebnisse infolge der verschiedenen kalibrierten Magnetsensoren erkennbar sind, sondern dass iOS und Android Achsen zum Teil verschieden bezeichnen. Fragen nach Messgenauigkeit und Kalibrierung von Sensoren entstehen hier praktisch von selbst.

### Wie kann man Apps zeigen und installieren?

Um der gesamten Klasse etwas zu zeigen, ist eine Verbindung vom Smartphone der Lehrperson zu einem Beamer unerlässlich. Aktuell bietet sich der Miracast Standard an, der es allen Systemen (Android, iOS, Windows) ermöglicht, über ein eigens erzeugtes WiFi den Bildschirm des Handys (oder auch Tablets) zu spiegeln [9]. An Hardware benötigt man ein Miracast Dongle, das ist eine Art Stick, der in den HDMI Eingang eines Beamers (oder TV-Geräts) gesteckt wird. Dieser erzeugt das Funknetz, das von Mobilgeräten erkannt wird, wenn dort die entsprechende Funktion aktiviert wird. Unter Android (ab 4.2) heißt diese „Screen mirroring“ und findet sich unter den Schnellstart-Symbolen der Werkzeugsleiste. Ein Vorteil dieser Technologie gegenüber Kabelanschlüssen (Adapter vom Micro-USB Ausgang des Smartphones auf HDMI) ist, dass der Beamer für jedes geeignete Mobilgerät im Raum verfügbar ist, es können also auch direkt Screens der Schülerinnen und Schüler gezeigt werden.

Für das Herunterladen und Installieren der notwendigen Apps sollte die Schule über ein möglichst schnelles WLAN verfügen, falls die Apps im Unterricht installiert werden. Es ist natürlich möglich und zeitsparend, dies zwischen den Stunden zu Hause machen zu lassen. Im Unterricht arbeite ich nur mit kostenfreien Apps, obwohl die Bezahlversionen meist wenig kosten, leistungsfähiger und werbefrei sind. Es ist eine (altersabhängige) Frage, ob die Schülerinnen und Schüler überhaupt etwas in den entsprechenden Stores kaufen dürfen, auf jeden Fall müsste dies mit den Eltern abgeklärt werden. Für Unterrichtszwecke bin ich bisher mit den Gratisversionen bestens ausgekommen. Die Werbung kann man vermeiden, indem man den Internetzugang während der Messungen abschaltet, die Mess-Apps arbeiten alle im Offline-Modus. Auch beim Vorzeigen am Beamer empfiehlt es sich, das eigene Smartphone in den Flugmodus zu schalten. Es kann zwar passieren, dass sich mit Miracast ein vorhandenes Schul-WLAN einschaltet und Werbung erscheint, immerhin kann man aber keinen Anruf erhalten, der für alle sichtbar in die Vorführung hineinplatzt.

### Wie kann die Kommunikation erfolgen?

Diese Frage halte ich für eine entscheidende, denn sie reicht von der Vergabe von Aufgabenstellungen bis zur Sicherung der Ergebnisse. Anzustreben ist, möglichst den ganzen Prozess auf den Mobilgeräten durchzuführen zu können, ohne notwendige Zwischenschritte an PCs. Was natürlich eine weitere Bearbeitung von Ergebnissen auf Computern nicht ausschließt.

Für die unmittelbare Kommunikation verwende ich meist WhatsApp Gruppen. Dieses System funktioniert schnell und einfach und ist unter Jugendlichen weit verbreitet. Üblicherweise schlagen die Klassen bei der Befragung über eine sinnvolle Art der Kommunikation diese Form vor, und haben offenbar kein Problem mit der Sichtbarkeit ihrer privaten Telefonnummern. Fraglich ist eher, ob Lehrkräfte ihre Nummern in solche Gruppen geben, außerdem sollten die Eltern gefragt werden. Bedacht werden muss weiters, wie damit umgegangen wird, wenn nicht alle Schülerinnen und Schüler einer Klasse WhatsApp verwenden. Auch hier bieten sich Team- oder Gruppenlösungen an.

So schnell und einfach WhatsApp zu bedienen ist, für Austausch und Weiterarbeit mit den Ergebnissen ist seine Funktionalität begrenzt. Fotos, Screenshots, kurze Videos und Texte können gepostet werden, gründlichere Analysen sind nicht möglich. Durch das einfache Aufeinanderfolgen der Einträge gibt es keine Ordnung, direkte Kommentare sind nur möglich, wenn man antwortet, bevor die nächste Meldung kommt.

Zum Hochladen von Dateien kommen Cloud-basierte Plattformen in Frage, etwa Google Drive, das mit Google Docs Möglichkeiten der Bearbeitung von Dokumenten am Smartphone bietet. Besser organisierbar wären Lernplattformen wie das verbreitete Moodle. Leider sind die entsprechenden Apps bisher funktionell sehr begrenzt. Hochladen oder Editteren ist nicht möglich. Eine umfangreiche funktionelle Plattform stellt Microsoft OneNote dar, das in entsprechenden Projekten als Heft-Ersatz getestet wurde [10]. In der neuesten Version (Office 365) bietet es die Möglichkeit, kollaborative Schülerhefte anzulegen, mit einfacherem Zugang über die entsprechenden Apps.

Die unmittelbarste Art der Verbreitung von Ergebnissen ist das Herzeigen, etwa innerhalb der Gruppe oder für die Klasse mit der erwähnten Miracast Technologie. Will man etwas auch gespeichert haben, bieten sich zuerst Screenshots (Bildschirmkopien) an. Vor allem bei Diagrammen reichen diese meist schon aus, um in die Diskussion und Interpretation zu kommen. Die meisten Abbildungen in diesem Artikel sind zum Beispiel Screenshots meines Smartphones. Für eine detailliertere Weiterarbeit ist der Export von Daten notwendig, bei Messungen meist als .csv-Dateien, die von EXCEL gelesen werden können. Es hängt von der App ab, ob diese Möglichkeit in der Gratisversion zugänglich ist.

### Wie findet man geeignete Apps?

Die Anzahl der kleinen Programme sprengt zahlenmäßig jede bewältigbare Dimension, ein zielloses Stöbern nach physikspezifischen Apps kann leicht zu Frustrationzuständen führen. Zum Glück gibt es schon eine Reihe von Apps mit unterrichtsbezogenen Erfahrungsberichten oder gar mit konkreten Experimentievorschlägen.

In der Broschüre iStage2 [11], herausgegeben von Science on Stage, haben internationale gemischte Teams von Lehr-

kräften konkrete Unterrichtseinheiten entwickelt und dokumentiert, die verwendeten Apps finden sich jeweils am Anfang einer Einheit (Abb. 8).

Die Zeitschrift „Physik in unserer Zeit“ bringt regelmäßig Artikel über Experimente mit Smartphones in der Reihe „Smarte Physik“, etwa den erwähnten Beitrag zum Smartphone als Geigerzähler.

Die gleiche Gruppe von Autoren ist verantwortliche für eine ähnliche Serie in der Zeitschrift „The physics teacher“, diese nennt sich „iPhysicsLab“. Über diese Artikel findet man die geeigneten Apps, welche dort auch beschrieben werden.

Die Plattform Austria Forum bietet eine Seite mit Beschreibungen empfehlenswerter Apps [12]

Für Fortbildungsveranstaltungen habe ich moodle-Kurs angelegt [13]. Er zeigt eine Liste empfehlenswerter Apps, nach Fachbereichen geordnet, und enthält elektronische Versionen der erwähnten Artikelserien. Auf Anfrage per mail schicke ich einen Zugang dazu.

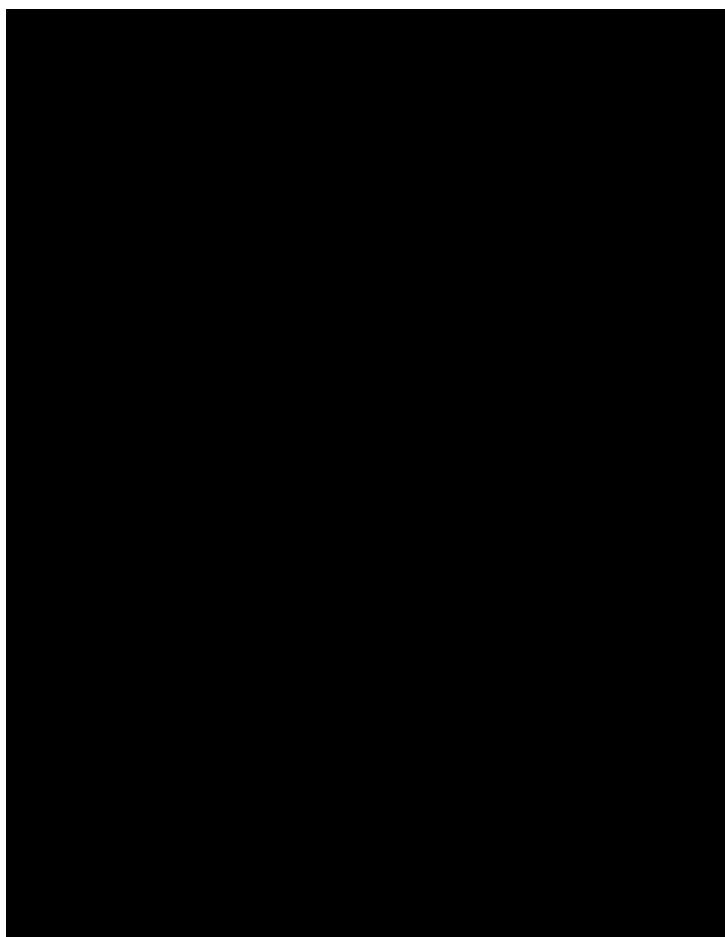


Abb. 8: Die Broschüre iStage2 enthält zahlreiche Beispiele für den naturwissenschaftlichen Unterricht

## Fazit

Ein Politiker sprach einmal von der „normativen Kraft des Faktischen“. Dieser werden wir auf dem Feld der Mobilgeräte im Unterricht begegnen, egal wie wir zu Handys in der Schule stehen. Für den Physikunterricht gilt das in besonderem Maße, wie ich mit einem kleinen Einblick zu zeigen versuchte. Dieses aktuelle Schlaglicht zeigt aber auch, dass sich hier alles im Fluss befindet, technisch, sozial und didaktisch-methodisch. Daher gibt es auch bisher kaum gesuchte empirische Ergebnisse über Effektivität oder Mehrwert des Einsatzes von Mobilgeräten im Unterricht.

Eine entscheidende Frage wird die Implementation in der Aus- und Weiterbildung der Lehrkräfte sein. Zurzeit fokussieren sich die entsprechenden Aktivitäten notwendigerweise auf inhaltlich-technische Fragen, vor allem das Kennenlernen der Möglichkeiten des Smartphones und den eigenen Umgang damit. Jedenfalls wird uns die „Wie?“-Frage des Einsatzes noch länger beschäftigen, auf unterrichtspraktischer und auf didaktisch-forschender Ebene.

## Quellenverzeichnis

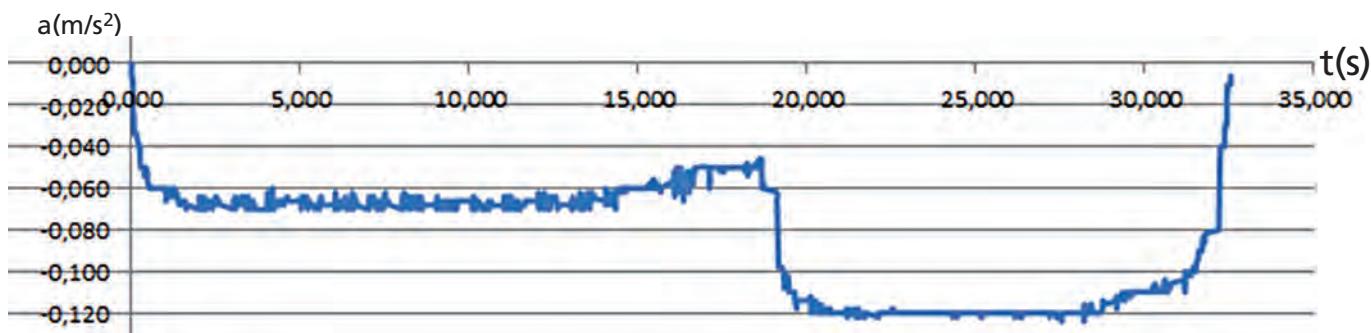
Dieser Artikel verwendet Teile einer gleichnamigen Veröffentlichung im Tagungsband „Lernen abseits festgelegter Formen“ (Anastasia Sfiri, Julia Weinzödl (Hrsg.), FH Joanneum Graz, e-learning Tag 2015, S. 62 ff).

- [1]: BITCOM (2014): Jung und vernetzt. BITCOM Studie, [http://www.bitkom.org/de/publikationen/38338\\_81089.aspx](http://www.bitkom.org/de/publikationen/38338_81089.aspx) [10.10.2015]
- [2] Muuß-Merholz, J. (2015): Schule in der Digitalen Gesellschaft: Warum wir neu lernen müssen. In: LOG IN 180 (2/2015)
- [3] Kuhn, J. u.a. (2015): Experimentieren mit Smartphone

und Tablet-PC. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 145, S.4ff

- [4] Kuhn, J., Frübis, J., Wilhelm, T., Lück, S. (2013): Smartphone als Geigerzähler. In: Physik in unserer Zeit 5/2013 (44), S. 253ff
- [5] Sensor Kinetics Webseite: [http://www.rotoview.com/sensor\\_kinetics.htm](http://www.rotoview.com/sensor_kinetics.htm) (10.10.2015)
- [6] Vogt, P. u.a. (2014): Smartphone Physics. Neue Experimente und Fragestellungen rund um das Messwerterfassungssystem Smartphone. Didaktik der Physik Frühjahrstagung, Frankfurt 2014
- [7] Koehler, M. J. & Mishra, P. (2009): What is technological pedagogical content knowledge? In: Contemporary Issues in Technology and Teacher Education, 9(1), 60-70. Siehe auch: [www.tpack.org](http://www.tpack.org)
- [8] BITCOM (2013): Leitfaden Bring Your Own Device. [http://www.bitkom.org/de/themen/50792\\_75275.aspx](http://www.bitkom.org/de/themen/50792_75275.aspx) (10.10.2015)
- [9] Siehe dazu etwa den Wikipedia Eintrag <https://de.wikipedia.org/wiki/Miracast> (10.10.2015)
- [10] Söser, K. (2014): Microsoft OneNote als kollaboratives Schulübungsheft. IMST-Projekt. [http://www.imst.ac.at/imst-wiki/index.php/Microsoft\\_OneNote\\_als\\_als\\_kollaboratives\\_Schul%C3%BCbungsheft](http://www.imst.ac.at/imst-wiki/index.php/Microsoft_OneNote_als_als_kollaboratives_Schul%C3%BCbungsheft) (10.10.2015)
- [11] Science on Stage (2014). iStage2: Smartphones im naturwissenschaftlichen Unterricht. Science on Stage Deutschland, Berlin 2014. Das pdf ist als download verfügbar: <http://www.science-on-stage.de/page/display/de/7/7/678/istage-2-smartphones-im-naturwissenschaftlichen-unterricht1> (10.10.2015)
- [12] Empfehlenswerte Smartphone Apps für den Physikunterricht: [http://austria-forum.org/af/Unterrichtsmaterialien/Physik\\_Chemie/Appbeschreibungen\\_Physikunterricht](http://austria-forum.org/af/Unterrichtsmaterialien/Physik_Chemie/Appbeschreibungen_Physikunterricht) (10.10.2015)
- [13] Moodle Kurs: <http://www4.edumoodle.at/physiklernen/course/view.php?id=99> (10.10.2015)

# Handy am Plattenspieler



Mit der App *Physics\_Toolbox\_Accelerometer* wurde die Radialbeschleunigung bei 33 bzw. 45 Umdrehungen pro Minute gemessen.

Verwendet wurde ein Samsung Galaxy Lite, dessen Position während der Messung gleich blieb. Die Daten wurden als csv-File auf einen PC übertragen und mit EXCEL ausgewertet. Wie man sieht, schwanken die Messwerte des Beschleunigungssensors, der Werte von einigen  $g$  messen kann, bei

kleinen Beschleunigungen um  $0.01 \text{ m/s}^2$ . Die Mittelwerte sind  $-0.067 \text{ m/s}^2$  bzw.  $-0.117 \text{ m/s}^2$  für 33 bzw. 45 Umdrehungen pro Minute. Ihr Verhältnis  $(117/67) = 1.75$  stimmt mit dem Verhältnis der Quadrate der Frequenzen  $(45/33)^2 = 1.86$  auf etwa 5% überein.

Helmut Kühnelt

# Stroboskopbilder mit „Live Video Strobe“

Thomas Wilhelm, Michael Suleder

## Stroboskopbilder

Ein Stroboskopbild zeigt ein bewegtes Objekt zu verschiedenen Zeitpunkten in ein und demselben Bild. Ein fotografisches Stroboskopbild entsteht durch eine Langzeitaufnahme einer Bewegung, d.h. die Blende der Fotokamera bleibt während der gesamten Bewegung geöffnet. Um die daraus resultierende Bewegungsunschärfe zu vermeiden, wird die Aufnahme in einem abgedunkelten Raum gemacht und das bewegte Objekt mit einer Stroboskoplampe angeblitzt. Meistens wird als Hintergrund eine schwarze Wand gewählt, so dass das Licht im Idealfall nur durch das Objekt und nicht durch den Hintergrund gestreut wird. So entstehen in ein und derselben Aufnahme mehrere scharfe Abbilder des Objekts entlang seiner Bahnkurve. Wenn die Stroboskoplampe in konstanten Zeitabständen blitzt, dann lässt sich aus dem Bild auch das Zeit-Ort-Verhalten des Objekts ablesen, wobei sowohl qualitative als auch quantitative Auswertungen möglich sind. Solche fotografischen Stroboskopbilder sind allerdings in der Erstellung sehr aufwändig und man erhält das Ergebnis erst nach Ende der Bewegung.

Digitale Stroboskopbilder lassen sich mit geringem Aufwand aus Videoclips herstellen [1]. Da die Einzelbilder eines digitalen Videos in der Regel in konstanten Zeitabständen aufgenommen werden, können auch hier die Bahnkurve und das Zeitverhalten abgelesen werden. Auch bei den digitalen Stroboskopbildern aus zu erstellenden Videoclips ist noch ein gewisser Aufwand nötig. Auch hier erhält man das Stroboskopbild erst nach Aufnahme der Bewegung.

Der Vorteil des Stroboskopbildes gegenüber der Realbewegung bzw. dem Videoclip liegt darin, dass schnell ablaufende Bewegungsvorgänge – wie beispielweise der Wurf eines Balles – quasi eingefroren werden und so in aller Ruhe betrachtet und ausgewertet werden können. Darüber hinaus kann ein Stroboskopbild leicht ausgedruckt und an Schüler verteilt werden. Neben der Ermittlung von Messwerten können Stroboskopbilder auch zur Einführung der Geschwindigkeit und als Hinführung zu Diagrammen und ihrer Interpretation verwendet werden [2, 3].

---

Prof. Dr. Thomas Wilhelm war Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik, promovierte an der Universität Würzburg über ein verändertes Mechanikkonzept, habilitierte dort über die Videoanalyse von Bewegungen, hatte eine Professur an der Universität Augsburg und ist nun Professor und Geschäftsführender Direktor am Institut für Didaktik der Physik der Universität Frankfurt. E-Mail: wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Dipl.-Phys. StR Michael Suleder studierte Physik an der Universität Karlsruhe, arbeitete am Lehrstuhl für Didaktik der Physik der Universität Würzburg und ist seit 2004 in Bayern Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik. Bekannt wurde er als Programmierer der Software „FeldLab“ und der Videoanalysesoftware „measure dynamics“.

## Die Software „Live Video Strobe“

Bisher war es nur möglich, Stroboskopbilder nach Ablauf der Belichtungszeit zu betrachten. Mit dem neuen Freeware Programm „Live Video Strobe“ wird das stroboskopische Bild während des Bewegungsablaufs in Echtzeit generiert. Der Benutzer sieht schon während der Bewegung, wie aus dem Video das Stroboskopbild entsteht. Beispielsweise entsteht die Stroboskopaufnahme eines geworfenen Balles vor den Augen des Betrachters, während sich der Ball noch in der Luft befindet. Gleich nach der Bewegung kann mit dem fertigen Bild gearbeitet werden.

Systemvoraussetzungen für die Benutzung der Software „Live Video Strobe“ sind ein PC mit Windows-Betriebssystem ab Windows XP und eine Kamera, die im Live-Modus an den Computer angeschlossen werden kann, d.h. eine Webcam oder PC-Kamera.

Die Software besteht nur aus einer ausführbaren Datei (exe-Datei) und kann von Festplatte, CD oder USB-Stick direkt gestartet werden – eine Installation ist nicht notwendig. Sofern eine Schreibberechtigung besteht, speichert das Programm einige Einstellungen in einer Konfigurationsdatei (ini-Datei) am selben Ort wie die ausführbare Datei. Beim ersten Start werden für den Nutzer Benutzungsbedingungen und -hinweise eingeblendet.

Nach dem Start der Software muss zunächst die Verbindung zur Kamera hergestellt werden. Dies geschieht durch Auswahl der Videoquelle aus einer Liste und anschließendes Klicken des Knopfes „Verbinden“. Es erscheint das Livebild der Kamera. Der Knopf „Spiegeln“ ermöglicht es, das Bild entweder wie beim Blick in einen Spiegel oder wie aus der Sicht einer gegenüber stehenden Person erscheinen zu lassen. Die Stroboskopaufnahme kann durch die Knöpfe „Start“ und „Stop“ begonnen und beendet werden (siehe Abb. 1). In den „Einstellungen“ kann vorher gewählt werden, jedes wievielte Kamerabild für das Stroboskopbild verwendet wird (Schrittweite n bedeutet: jedes n-te Kamerabild wird verwendet). Außerdem kann eingestellt werden, dass die Bildrate im Stroboskopbild eingeblendet wird. Sie liegt üblicherweise bei 25 Bildern pro Sekunde (PAL-Standard) bei Webcams sind auch abweichende Werte möglich. Alle Aufnahmen können automatisch in ein frei wählbares Verzeichnis gespeichert werden. Alternativ können die zehn letzten Aufnahmen über eine Bildleiste am unteren Bildschirmrand betrachtet werden (siehe Abb. 1).

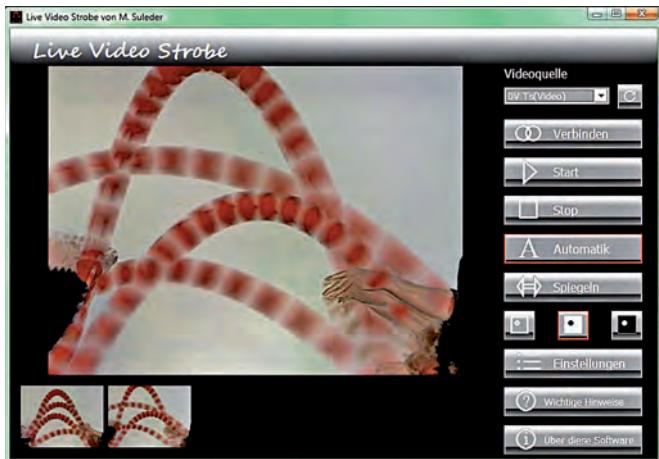


Abb. 1: Programmfenster „Live Video Strobe“.

Alternativ zur Start/Stopp-Steuerung kann der Knopf „Automatik“ betätigt werden, um in bestimmten Zeitabständen automatisch neue Stroboskopbilder aufzunehmen. Die Aufnahmedauer  $T$  (in Sekunden) und die Schrittweite können auch hier vorher in den Einstellungen festgelegt werden und zwar getrennt für die Modi „schnelle Bewegung“ (Standardeinstellungen:  $n = 1; T = 4$ ), „mittlere Bewegung“ (Standardeinstellungen:  $n = 2; T = 6$ ) und „langsame Bewegung“ (Standardeinstellungen:  $n = 4; T = 8$ ). Im Automatikmodus wird zunächst ein Countdown bis zur nächsten Aufnahme gezeigt, dessen Dauer in Sekunden ebenfalls einstellbar ist. Dies ermöglicht dem Benutzer, sich oder sein Experiment in die Ausgangssituation für die aufzuzeichnende Bewegung zu bringen. Danach beginnt die Stroboskopaufnahme mit der gewählten Schrittweite und Aufnahmedauer. Das fertige Stroboskopbild bleibt noch einige Sekunden (ebenfalls in den Einstellungen wählbar) zur Betrachtung stehen. Nach einer kurzen Einblendung des „About“-Fensters beginnt der Vorgang dann erneut.

Der Automatikmodus startet standardmäßig in Vollbilddarstellung und bedarf keiner weiteren Interaktion durch die Benutzer, so dass sich das Programm auch sehr gut für Physikausstellungen eignet. Sofern den Benutzern die Verwendung der Maus gestattet wird, kann während des Countdowns ein Fenster zur Auswahl der Aufnahmemodi „schnell“, „mittel“ und „langsam“ eingeblendet werden. Bei Benutzung des Vollbildmodus können die zehn letzten Aufnahmen erst nach Beenden des Automatikmodus gesehen werden.

Die Aufnahme sollte in jedem Fall in einem gut ausgeleuchteten Raum durchgeführt werden, um lange Verschlusszeiten der Kamera und damit Bewegungsunschärfen zu vermindern. In den mit „Live Video Strobe“ erzeugten Stroboskopbildern erscheinen die bewegten Objekte in der Regel halbtransparent, da der gesamte Raum beleuchtet wird und nicht nur das bewegte Objekt. Gute Aufnahmen erhält man, wenn Objekte mit hoher Farbsättigung vor einer weißen Wand bewegt werden. Die Einstellung „helle Wand“ bewirkt dann, dass die Objekte nicht mehr halbtransparent sondern opak erscheinen.

Eine andere Möglichkeit sind Aufnahmen heller bzw. leuchtender Objekte vor einer dunklen Wand bzw. in einem abgedunkelten Raum. Dann wird die Einstellung „dunkle Wand“ empfohlen.

## Anwendungen

### Spaßbilder

Ermöglicht man Kindern mit dieser Software Bilder zu erzeugen, dann versuchen diese zunächst, durch verschiedene Lauf- und Sprungbewegungen interessante Bilder zu erzeugen und haben dabei einen Spaß (siehe Abb. 2).



Abb. 2: Spielerische Bewegung einer Person vor der Kamera.

Auch dabei kann schon einiges gelernt werden. Für besonders interessante Bilder sind einige Überlegungen nötig. So kann damit experimentiert werden, dass manche Körperteile unbewegt bleiben, während andere bewusst bewegt werden. So entstand auch die Abb. 3, bei der die Person wie ein Engel aussieht.



Abb. 3: Spaßbild Engel

### Qualitative Analysen

Im Physikunterricht eignen sich die Stroboskopbilder gut für qualitative Betrachtungen, da sowohl die Bahnkurve als

auch das Zeitverhalten abgelesen werden kann. Die Ortsänderung zwischen zwei Teilbildern zeigt die Geschwindigkeit (Tempo und Richtung). Änderungen der Geschwindigkeit lassen wiederum auf Einwirkungen schließen. Beispielsweise zeigt Abb. 4 die Bahnkurve eines schießen Wurfes, die wie eine Parabel aussieht. An den Abständen zwischen den Teilbildern sieht man, dass der Ball beim Hochsteigen langsamer wird und beim Herunterfallen schneller wird. In Abb. 2 wird dagegen die Person beim Aufsteigen schneller und beim Absinken langsamer.

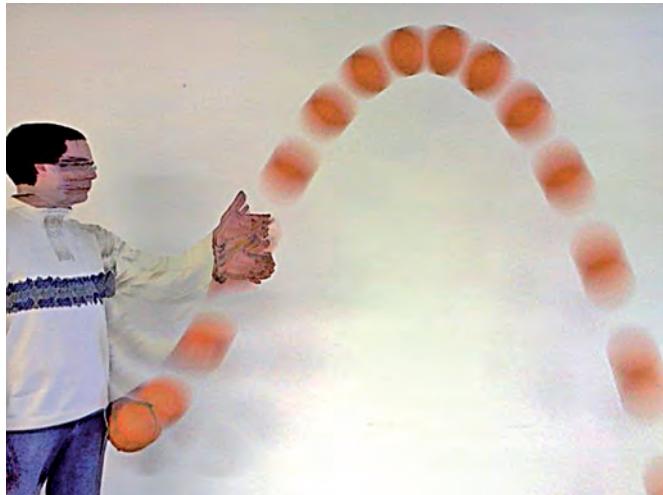


Abb. 4: Bahnkurve beim schießen Wurf

Auch ein Vergleich verschiedener Bewegungen ist möglich. So sieht man beim Fallen des Balles in Abb. 5, dass die Bewegung ständig schneller wird. Dagegen zeigt Abb. 6 einen Bahrdtschen Fallkegel [4], der bereits nach sehr kurzer Fallstrecke mit einer nahezu konstanten Geschwindigkeit fällt.



Abb. 5: Fallbewegung einer Kugel

Auch anspruchsvollere Bewegungen wie Gehen oder Laufen können betrachtet werden. In Abb. 7 geht eine Person durchs Bild, die zur Verdeutlichung noch einen Maßstab wie ein Gewehr über der Schulter trägt. Man sieht in diesem Stroboskopbild an dem Maßstab, dass die horizontale Komponente der Geschwindigkeit des Kopfes fast konstant ist, während man an den dunklen Haaren sieht, dass der Kopf

in vertikaler Richtung eine fast harmonische Schwingung vollführt. Dies ist sowohl beim Gehen als auch beim Laufen so, damit die Beschleunigungen für das Gehirn möglichst klein sind [5]. Betrachtet man dagegen die Bewegungen der Füße oder Knie, erhält man völlig andere Bewegungen mit großen Beschleunigungen [5, 6].

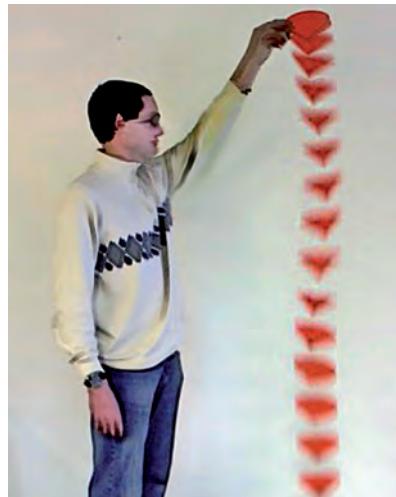


Abb. 6: Fallbewegung eines Papierkegels



Abb. 7: Gehen einer Person mit Maßstab im Arm

### Quantitative Analysen

Legt man wie in Abb. 8 einen Maßstab ins Bild, lässt sich die Ortsänderung  $\Delta \vec{r}$  zwischen zwei Teilbildern auch quantitativ bestimmen. Hat man vorher unter „Einstellungen“ → „Bilder“ eingestellt, dass die Bildrate ins Stroboskopbild eingeblendet werden soll, kann man nun auch die Zeit  $\Delta t$  zwischen zwei Teilbildern und damit das Tempo  $v$  berechnen. Zusammen mit der Bewegungsrichtung hat man damit auch die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  [3, S. 55]. Bestimmt man zwei aufeinander folgende Geschwindigkeiten, kann man auch die Geschwindigkeitsänderung bzw. Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  zeichnerisch bestimmen [3, S. 79] und daraus auch die Beschleunigung  $\vec{a}$  [7, S. 114]. Interessiert nur die Richtung der Größen, aber nicht ihr Wert, kann man die

Pfeile für die Ortsänderungen  $\Delta \vec{r}$  zwischen zwei Teilbildern als Geschwindigkeitspfeile auffassen und daraus Geschwindigkeitsänderungspfeile konstruieren. Betrachtet man stattdessen nur die  $x$ - oder  $y$ -Komponente, kann man auch die Abhängigkeiten  $y(x)$ ,  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $v_x(t)$ ,  $v_y(t)$ ,  $a_x(t)$  oder  $a_y(t)$  ermitteln [7, S. 90+114].

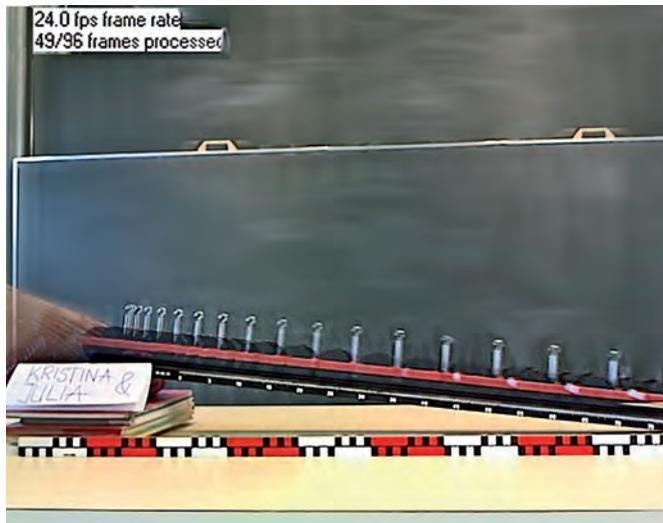


Abb. 8: Von Schülern angefertigtes Bild eines Wagens auf der schiefen Ebene. Für die Auswertung befindet sich ein Meterstab im Bild. Links oben ist die Bildrate eingeblendet.

Abb. 8 zeigt eine Stroboskopaufnahme an einer schiefen Ebene, die im Physikunterricht einer 10. Jahrgangsstufe entstanden ist. Zu Beginn einer Doppelstunde recherchierten die Schüler über die Fallrinnenversuche Galileo Galileis zur Erforschung beschleunigter Bewegungen, z.B. in [8]. Insbesondere wurde diskutiert, wie mit Hilfe kleiner Glöckchen zeitlich gleich weit auseinander liegende Streckenabschnitte markiert werden können. Die folgende Einführung in das Programm „Live Video Strobe“ verdeutlichte, dass einem Stroboskopbild das gleiche Prinzip zugrunde liegt – es werden in konstanten Zeitintervallen Objektpositionen markiert. Im Anschluss bauten die Schüler in Gruppen selbst schiefe Ebenen auf und ließen entweder Fahrbahnwägen oder Kugeln hinabrollen, während im Automatikmodus Stroboskopbilder aufgenommen wurden.

Jede Schülergruppe erhielt einen Ausdruck ihres Stroboskopbildes zur Auswertung. Unter Anleitung ermittelten die Schüler aus dem Bild die zurückgelegten Strecken, die Geschwindigkeiten und schließlich die Beschleunigung innerhalb jedes Zeitintervalls. Zuletzt konnte mit Hilfe des Neigungswinkels der Bahn, der ebenfalls aus dem Bild ermittelt wurde, näherungsweise auf die Fallbeschleunigung  $g$  geschlossen werden.

## Außerunterrichtlicher Einsatz

„Live Video Strobe“ eignet sich nicht nur für den Physikunterricht, sondern auch außerhalb des Unterrichts für eine spielerische Begegnung mit Physik.

### Tag der offenen Tür

Abb. 2 zeigt den Aufbau von PC, Kamera, Bildschirm und Beamer für den Tag der offenen Tür des Bertha-von-Suttner-Gymnasiums in Neu-Ulm. Die Besucher bewegen sich vor einer weißen Wand. Ihnen gegenüber steht der PC mit Kamera und Bildschirm, so dass sie die Bewegungen am Monitor verfolgen können und gleichzeitig in Richtung Kamera blicken. Für die umstehenden Besucher wird das Bildschirmbild zusätzlich per Beamer an die seitlich angrenzende Wand projiziert. Vor allem Kinder und Jugendliche aller Jahrgangsstufen experimentierten mit viel Begeisterung vor dem Bildschirm. Dabei wurden in erster Linie Hüpf- und Sprungbewegungen, sowie Fall- und Wurfbewegungen mit verschiedenen Gegenständen (Bälle, Luftballons, hantelförmige Körper) erforscht. Auf eine Beleuchtung zusätzlich zur vorhandenen Flurbeleuchtung wurde verzichtet.



Abb. 9: Zwei Schüler werfen sich Bälle zu. Rechts PC mit Kamera, im Hintergrund die Beamerprojektion.

## Science-Center ExperiMINTa

Das Frankfurter Science Center ExperiMINTa ist ein noch junges Mitmach-Museum, das am 1. März 2011 durch das ehrenamtliche Engagement von Frankfurter Bürgerinnen und Bürgern eröffnet wurde und in vielen Bereichen in ehrenamtlichem Einsatz läuft [9]. Im Jahr 2012 gab es bereits ca. 90.000 Besucher. Etwa 120 Experimentierstationen sind zehn Themenkreisen zugeordnet.

2013 wurde in der ExperiMINTa eine neue Station mit „Live Video Strobe“ erstellt. Besucher sehen an einer Wand eine Kamera und einen großen Touchscreen, auf dem die Software im Automatikmodus läuft (Abb. 10 oder 11). Sie können sich nun vor der gegenüberliegenden weißen Wand bewegen oder sich Jonglierbälle oder Fallkegel ausleihen und damit experimentieren.



Abb. 10: Die Experimentierstation „Live Video Strobe“ in der ExperiMINTa: Links die Kamera, mittig der Touchscreen und rechts eine Schülerin, die ein Bild von sich mit vierzehn Armen erzeugt – ähnlich der indischen Göttin Durga oder Kali.



Abb. 11: Die Experimentierstation „Live Video Strobe“ in der ExperiMINTa: Rechts der Touchscreen, mittig die Kamera und links eine Schülerin, die ein Rad schlägt.

Diese Station ist für Schüler sehr attraktiv, insbesondere für Mädchen (siehe Abb. 10 und 11). Dabei werden kaum physikalische Abläufe wie Fall- und Wurfbewegungen untersucht, sondern vor allem versucht, attraktive Bilder mit dem eigenen Körper zu erzeugen – auch im Teamwork. Diese Bilder werden währenddessen zunehmend attraktiver, da die Schüler beim Experimentieren dazulernen.

Die ExperiMINTa bietet außerdem experimentelle Bühnenshows an. Für diesen Zweck wurde ein Computer mit Kamera auf einem fahrbaren Tisch vorbereitet, der bei einer solchen Experimentiershow eingesetzt werden kann. Lehrkräfte können mit ihren Schulklassen hier auch bestimmte Angebote bestellen. So ist es möglich, die Bühne nur für die Erstellung und Behandlung von Stroboskopbildern zu buchen.

## Erfahrungen

Die Echtzeitstroboskopbilder haben bei Erprobungen in verschiedenen Schulklassen große Begeisterung hervorgerufen. Das Miterleben des Entstehungsprozesses der Bilder schien dabei eine besondere Rolle zu spielen. Vermutlich wirkt hier die zeitliche Korrelation zwischen dem Ablauf des realen Experiments und des fotorealistischen, durch frühere Objektabbildungen angereicherten Stroboskopbildes so motivierend. Auch viele Lehrkräfte äußerten sich sehr positiv darüber, dass die Entstehung eines Stroboskopbildes in Echtzeit mitverfolgt werden kann. Vor allem schätzen sie an der Software, dass man sehr schnell ohne viele Einstellungen zu einem Stroboskopbild kommt. Dies gilt insbesondere für Lehrkräfte, die nicht computeraffin sind und deshalb nicht mit Videoanalyse und digitalen Stroboskopbildern aus Videoclips arbeiten wollen.

## Downloadmöglichkeiten

Die Software „Live Video Strobe“ wird vom Autor für nicht-kommerzielle Zwecke unter <http://www.thomas-wilhelm.net/software.htm> und <http://www.videoanalyse.lima-city.de> kostenlos zur Verfügung gestellt. Die Verwendung in Ausstellungen und Science Centern ist mit schriftlicher Genehmigung des Autors möglich.

## Literatur

- [1] Suleder, Michael (2009): Stroboskopbilder – lehrreich und leicht gemacht. In: Mathematischer und naturwissenschaftlicher Unterricht MNU 5/62, S. 285-287
- [2] Suleder, Michael (2010): Videoanalyse und Physikunterricht, Aulis Verlag, Hallbergmoos
- [3] Wiesner, Hartmut; Wilhelm, Thomas; Waltner, Christine; Tobias, Verena; Rachel, Alexander; Hopf, Martin (2011): Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung. Reihe Unterricht Sek. I Physik, Band 5, Aulis Verlag, Hallbergmoos
- [4] Wilhelm, Thomas (2000): Der alte Fallkegel – modern behandelt. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik 49, Heft 6, S. 28 – 31
- [5] Weidt, Martin; Wilhelm, Thomas (2011): Bewegungen des eigenen Körpers – Möglichkeiten der Messwerterfassung im Vergleich. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Münster 2011, ([www.phydid.de](http://www.phydid.de))
- [6] Scheler, Stefan; Wilhelm, Thomas (2009): Neue Möglichkeiten durch Funksensoren. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 58, Nr. 7, S. 28 – 35
- [7] Wilhelm, Thomas; Wiesner, Hartmut; Hopf, Martin; Rachel, Alexander (2013): Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik, Reihe Unterricht Sek. I Physik, Band 6, Aulis-Verlag, Hallbergmoos
- [8] Homepage des Museo Galileo, Florenz: <http://catalogue.museogalileo.it/object/InclinedPlane.html> (Stand 8/2015)
- [9] <http://www.experimenta.de>

# Experimente skalieren

Jan-Peter Meyn

## Zusammenfassung

Bei der Skalierung von Experimenten gibt es oft einen Parameter, auf den es eigentlich ankommt, der aber nicht die Größe ist, mit der man im Unterricht gerade zu tun hat. An Beispielen aus verschiedenen Gebieten wird gezeigt, wie eine physikalisch begründete technische Optimierung aussehen kann.

## Einleitung

Physikalische Experimente sollen im Unterricht ganz verschiedene Aufgaben erfüllen, von der Entdeckung eines Phänomens über die Förderung der sozialen Kompetenz bei arbeitsteiligen Schülerexperimenten bis zum Widerspruch zu bestimmten Alltagsvorstellungen. Ein Experiment muss immer auf die jeweiligen Ziele ausgerichtet sein. Die hier besprochene technische Optimierung ist eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung, dass die pädagogischen und didaktischen Ziele wirkungsvoll verfolgt werden können.

Es werden Beispiele gegeben, wie eine physikalisch begründete Optimierung aussehen kann. Oft kommt es darauf an, den richtigen Parameter zu finden, den man mit geringem Aufwand und gutem Ergebnis steuern kann. Es geht nicht darum, Experimente mit besonderen technischen Hilfsmitteln aufzuwerten, sondern sich bewusst zu machen, was man für den Versuch eigentlich braucht. Die Beispiele sollen anregen, bei weiteren Experimenten die richtigen Parameter zu finden und Unwesentliches wegzulassen. Technische Hintergründe und weitere Beispiele findet man in [1].

## Mechanik

### Länge: Elastischer Stab als Modell der Eisenbahnschiene

Ein bekanntes Alltagsbeispiel zur Wärmedehnung sind Dehnfugen in Eisenbahnschienen, welche *heute allerdings geschweißt sind*. Auf welche Weise die Wärmedehnung bei geschweißten Schienen zum Tragen kommt, ist weitgehend unbekannt. Tatsächlich sind die Schienen so im Gleisbett befestigt, dass sie nicht senkrecht zur Fahrtrichtung ausweichen können. In Längsrichtung sind die Schienen bei etwa 20°C im Gleichgewicht, bei anderer Temperatur werden sie elastisch gedehnt oder gestaucht. Das ist für viele Schüler (und auch für Lehramtsstudenten) schwer vorstellbar. Dabei lässt sich die Dehnung eines massiven Eisenstabes leicht

Prof. Dr. Jan-Peter Meyn, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Physikalisches Institut, Didaktik der Physik, Staudtstraße 7, D-91058 Erlangen. E-Mail: jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de

in der Schule zeigen, wenn man Länge und Durchmesser richtig aussucht. Zunächst mache man sich klar, dass bei gegebenem Durchmesser die Längsdehnung proportional zur Länge ist, welche daher zu maximieren ist. Im Physiksaal oder im Flur findet man eine Strecke von etwa zehn Metern für ein Dehnungsexperiment. Zweitens wählt man die Zugkraft so, dass ein Schüler mit kräftigem Zug den Stab gerade nicht zerreißen, da wäre 100 N ein sinnvoller Wert.

Die mechanische Spannung  $\sigma$  ist proportional zur relativen Längenänderung  $\varepsilon$  (Hooke'sches Gesetz); das Elastizitätsmodul  $E$  ist eine Materialkonstante:  $\sigma = E\varepsilon$ . Eine weitere Materialkonstante ist die Bruchspannung, bei der das Material auseinandergerissen wird.

Aus Bruchkraft  $F_B$  und Bruchspannung  $\sigma_B = F_B/\pi r^2$  berechnet man den Durchmesser  $2r$  zu 0,3 mm. Mit dem Elastizitätsmodul  $E = 170$  kN/mm findet man, dass der 10 m lange Eisenstab – besser gesagt Eisendraht –, um etwa 1 cm gedehnt wird, wenn mit 10 N gezogen wird. Bleibt man einen Faktor zwei unter der Bruchgrenze, kann man den Draht mit 50 N um stattliche 5 cm dehnen. Dieser Weg ist durchaus vergleichbar mit einem Federkraftmesser und tatsächlich fühlt sich der Draht auch an wie eine richtige Feder. Abb. 1 zeigt den einfachen Aufbau.

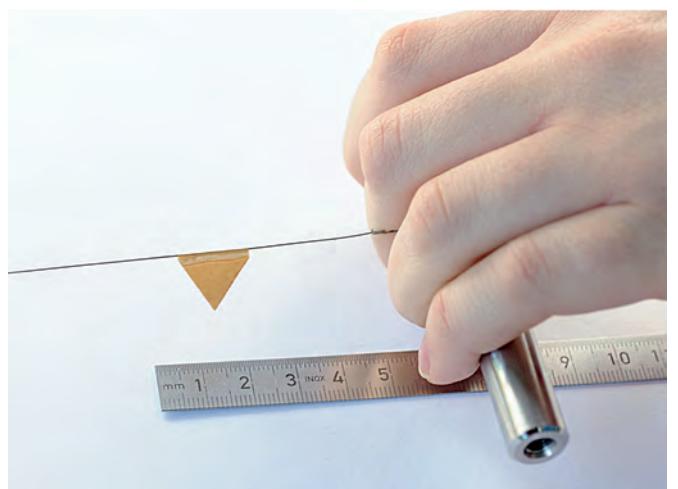


Abb. 1: Streckung eines Eisendrahtes mit der Hand.

Es lohnt sich, als Eisendraht eine Klaviersaite zu beschaffen, weil diese aufgrund des Herstellungsverfahrens eine etwa fünfmal höhere Bruchgrenze hat als geglätteter Eisendraht. Im vorliegenden Fall wurde eine Cembalo-Saite mit Durchmesser 0,309 mm verwendet. Die Spule mit 50 m Draht kostet etwa 20 Euro und wird geliefert mit einem Messprotokoll, in dem Bruchgrenze, Elastizitätsmodul und ein Dehnungsdiagramm angegeben sind [2]. Damit kann man die eigene Messung (Abb. 2) überprüfen.

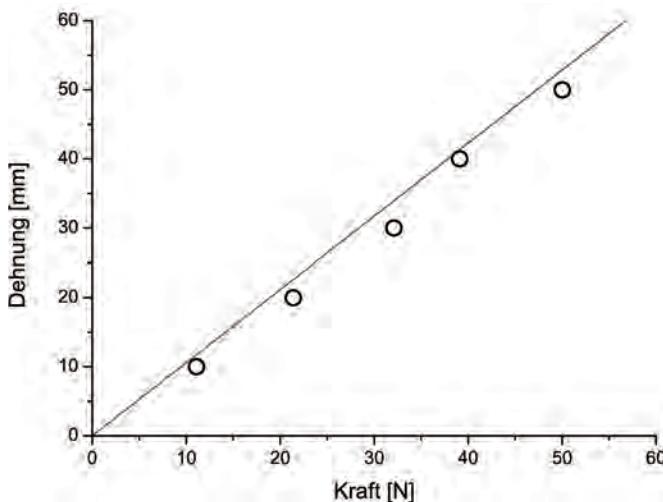


Abb. 2: Dehnung eines 13 m langen Drahtes als Funktion der Zugkraft. Die Gerade repräsentiert das Hookesche Gesetz, berechnet für das vom Hersteller [2] angegebene Elastizitätsmodul des Drahtes.

Ist so ein Draht ein gutes Modell für die Eisenbahnschiene? Bei 0,3 mm Durchmesser und 13 m Länge ist das Verhältnis 1:40000. Eine Eisenbahnschiene mit vergleichbarer Gestalt ist 70 mm breit und 3 km lang, so dass sich die Frage bejahen lässt. Einen zehnminütigen Film über das Schienenschweißen, der sehr gut für den Unterricht geeignet ist, findet man bei [3].

### Dämpfung: Schallpuls zur Zeitmessung

Für die Messung der Schallgeschwindigkeit und für die quantitative Analyse von Fallexperimenten (z.B. Fallschnur) benötigt man kurze prägnante Schallpulse, die man mit Mikrofon und Messwerterfassung bzw. PC und Audiosoftware aufnimmt. Es liegt nahe, Metallteile wie Stativstangen aufeinander zu schlagen, doch die aufgenommenen Pulse enttäuschen: Die Amplitude ist vergleichsweise klein, weil die Stangen aufgrund ihrer geringen Größe schlecht abstrahlen und das Geräusch ist insgesamt recht lang, weil die Stangen mit geringer innerer Dämpfung lange nachschwingen. Mit der Einsicht in diese Mechanismen baut man sich einen Stoßkörper mit großer Oberfläche und großer innerer Dämpfung, beispielsweise ein Stück Spanplatte.

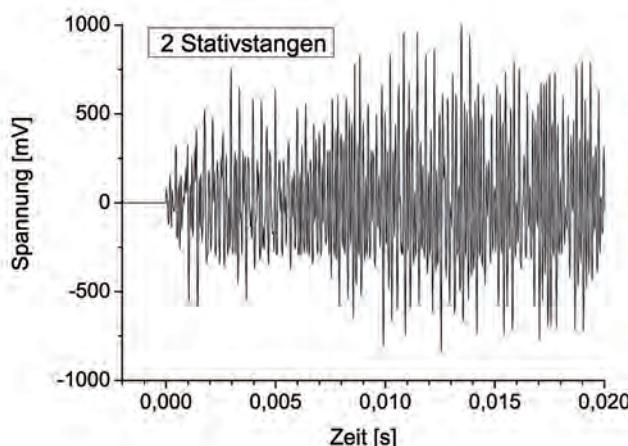


Abb. 3: Schallpulse mit unterschiedlichen Materialkombinationen. Entscheidend für eine gute Zeitauflösung ist die Höhe des ersten Maximums im Vergleich zum folgenden Signal, vor allem bei Mehrfachpulsen.

Der Stoß klingt dumpf und vergleichsweise leise, doch das elektrische Signal am Mikrofon lässt sich viel besser auswerten, weil es einen klaren Startpunkt gibt und das Geräusch schnell ausklingt, siehe Abb. 3.

### Wärme

#### Volumen und Form: Thermische Ausdehnung

Bei vielen Experimenten zur Wärmelehre muss man lange warten, bis sich der gewünschte Effekt zeigt. Entscheidend für den Erfolg bei Experimenten zur Wärmelehre ist eine leistungsfähige Heizung, also ein Camping-Kocher mit Gaskartusche oder eine elektrische Herdplatte. Bei Temperaturen unterhalb 100°C verwendet man heißes Wasser als Wärmereservoir. Das Wasser kann man vor der Unterrichtsstunde erwärmen und in Thermoskannen aufbewahren, oder mit einem Haushaltswasserkocher in Minuten schnelle bereiten.

Thermische Ausdehnung von Flüssigkeiten und Festkörpern ist ein kleiner Effekt. Daher sind verschiedene Tricks eronnen worden, die thermische Ausdehnung verstärkt darzustellen. Bei Flüssigkeiten nimmt man ein geschlossenes Gefäß mit großem Querschnitt  $A_1$  und einem Steigrohr mit kleinem Querschnitt  $A_2$ . Bei zylindrischer Geometrie wird die Ausdehnung  $\Delta x$  um den Faktor  $A_1/A_2$  verstärkt (Prinzip des Thermometers). Nachteil dieser Anordnung ist der große Querschnitt  $A_1$ , welcher oft als Rundkolben ausgeführt ist, und die damit verbundene langsame Erwärmung der gesamten Flüssigkeitsmenge.

Alternativ nimmt man einen relativ schmalen Zylinder (Reagenzglas) und verzichtet auf den Verstärkungseffekt. Die Gläser werden mit unterschiedlichen Substanzen gefüllt und der Stand der Flüssigkeitsspiegel wird markiert. Die nunmehr geringen Flüssigkeitsmengen nehmen schnell die Temperatur des Wasserbades an, welches sich bei hinreichendem Volumen kaum abkühlt. Bei einer Temperaturerhöhung um 50 K steigt der Flüssigkeitsspiegel im Reagenzglas um 3 mm bis 10 mm, und die Unterschiede zwischen verschiedenen Stoffen sind deutlich, siehe Abb. 4.

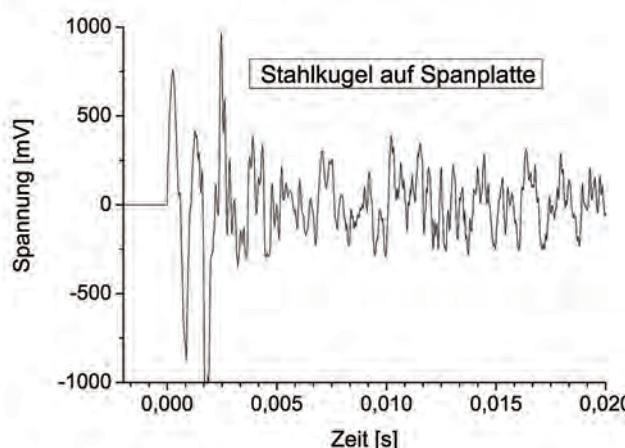




Abb. 4: Thermische Ausdehnung von Flüssigkeiten im Reagenzglas.  
Oben: Bei Raumtemperatur ist der Meniskus jeweils an der Oberkante der Holzleiste.  
Unten: Nach Befüllung des großen Bechers mit 1 Liter Wasser von 75°C steigt die Flüssigkeit innerhalb von zwei Minuten auf die neue Gleichgewichtslage. Die Flüssigkeiten sind, von links nach rechts, Ethanol, Glycerin und Wasser.  
Das Wasser dehnt sich um 2%. Die Notwendigkeit des Volumenausgleiches in einer Heizungsanlage oder beim Autokühler wird unmittelbar einsichtig.

Abgesehen davon, dass dieses Experiment schneller und zuverlässiger funktioniert als die üblichen Glaskolben mit Steigrohr, ist diese Anordnung auch leichter zu durchschauen. Nicht zuletzt ist die Anordnung gut für Schülerexperimente geeignet. Einen Klassensatz Reagenzgläser hat man in jeder Schule zur Verfügung, doch wer kann schon auf einen Klassensatz Glaskolben mit Stopfen zurückgreifen? Abbau und Reinigung sind ebenfalls einfacher, vor allem wenn man mit Pflanzenöl gearbeitet hat.

Bei der thermischen Ausdehnung von Festkörpern wendet man das gleiche Prinzip an: Man sorgt dafür, dass ein langer Probekörper schnell und gleichmäßig erwärmt wird. Dann kann man auf ein Anzeigegerät mit Übersetzung (z.B. rollender Zahnstocher mit Zeiger) verzichten.

Eine zuverlässige Methode ist das Heizen von Röhren mit Wasserdampf. Die etwa 1 m langen Röhren werden an einem Ende fest eingespannt und am anderen Ende lose aufgelegt. Wasserdampf wird im Kolben mit dem Gasbrenner oder in einer Dampfente erzeugt und durch die Röhren geleitet. Aufgrund der hohen Verdampfungswärme des Wassers werden die Röhren effizient auf 100°C geheizt. Die thermische Ausdehnung 1 m langer Röhren beträgt bei Erwärmung um 80 K für Aluminium 1,85 mm, für Kupfer 1,3 mm und für Eisen 0,95 mm. Die Materialunterschiede sind also gut zu erkennen.

## Temperaturgradient statt Temperatur: Konvektion

Konvektionströmung in Wasser wird gern mit farbiger Tinte markiert. Schon nach kurzer Zeit verteilt sich der Farbstoff im ganzen Becken und der Effekt ist schwierig zu erkennen, weil nach einiger Zeit der Zusammenhang von Temperatur und Färbung verloren geht. Mit der Schlierenmethode zeigt man Dichtegradienten, die direkt mit Temperaturgradienten zusammenhängen.

Dazu wird ein Aquarium vor einer Projektionswand aufgestellt und mit einer möglichst kleinen Lampe beleuchtet. Abb. 5 zeigt ein typisches Ergebnis. Man wähle das Aquarium nicht zu klein, denn mit der Größe nehmen die Trägheitserscheinungen gegenüber den Reibungsscheinungen zu (die Reynoldszahl ist größer) und die Verwirbelungen sind deutlicher.



Abb. 5: Konvektion sichtbar gemacht durch Schattenprojektion mit einer Halogenlampe ohne Kondensor.  
Links: Zwei Glaskolben mit heißem bzw. kaltem Wasser  
Rechts: Konvektion in Luft oberhalb einer Kerze.

## Elektrizität

### Stromdichte: Elektromagnet

Der Elektromagnet ist ein attraktives Demonstrationsexperiment, wenn man ein Paket Nägel oder Schraubenmuttern auf einen Schlag entleert. Dazu braucht man die passende Spule. Das kann der in der Anleitung empfohlene Typ sein, oder eine Spule mit vielen Windungen, weil man noch eine Formel erinnert, nach der das Magnetfeld mit der Zahl der Windungen wächst. Das ist wohl richtig, doch ist die maximale Stromstärke in Spulen mit vielen Windungen viel kleiner als in Spulen mit kleiner Windungszahl. Die Formel für das  $B$ -Feld einer langen Spule lautet

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{l} \quad (1)$$

mit der Windungszahl  $N$ , der maximalen Stromstärke  $I$  und der Länge  $l$ , die für die Spulen des Aufbautransformators immer gleich ist. Wertet man die angegebenen Werte für Lehrmittelspulen aus, so findet man, dass alle Spulen ähnlich gut geeignet sind. Das kann man so verstehen: Zwei benachbarte Wicklungen sind in Reihe geschaltet. Man kann Sie aber auch parallel schalten und zu einem dickeren Draht zusammenfassen. Am Ende kommt es nur auf die Stromdichte an.

Man kann sich also auf das Netzgerätekonzentrieren. Hier sollte man nicht den Gleichspannungsausgang des Stelltransformators nehmen, da dessen Ausgangsspannung periodisch einbricht, so dass ins Feld gehaltene Eisenteile vibrieren. Besser ist ein elektronisch stabiliertes Netzgerät oder eine Batterie.

Nachdem der Aufbau elektrisch optimiert ist, kann man den Effekt weiter steigern durch bewusstes Überschreiten der angegebenen maximalen Stromstärke in der Spule. Diese ist nämlich für Dauerbetrieb ausgelegt und so angegeben, dass die Spule nicht übermäßig erwärmt wird. Wie weit man gehen kann, hängt von der Betriebsdauer und der Zahl der beabsichtigten Wiederholungen ab. Jedenfalls beachte man, dass die Leistung quadratisch mit der Stromstärke (und der magnetischen Feldstärke) wächst. Abb. 6 zeigt einen Elektromagneten, bei dem der Maximalstrom um einen Faktor zwei überschritten wurde. Mit der Stromstärkeanzeige am Netzgerät man eine gute Kontrolle.

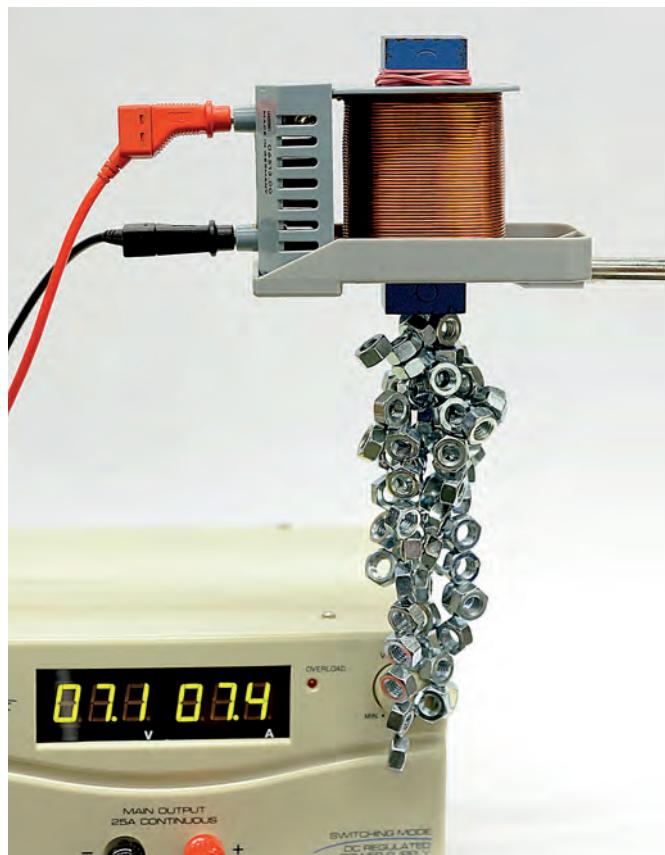


Abb. 6: Einfacher Elektromagnet mit Transformatorspule und sinnvoll ausgesuchtem Netzgerät

### Leistungsanpassung: Elektromagnet für Schülerexperimente

Ein NiMH-Akku mit 2300 mAh Kapazität kann für kurze Zeit eine Stromstärke von etwa 7 A ermöglichen. Als Spulendraht dient Schaltlitze mit  $0.14 \text{ mm}^2$  Querschnitt. Man dimensioniert die Länge des Drahtes durch Berechnung und experimentelle Überprüfung so, dass bei Nennspannung 1,2 V die Stromstärke 7 A beträgt und lässt die Schüler den Draht um eine eiserne Schraube wickeln. Ein Schalter

macht den Aufbau noch besser. Zwar kann man mit diesem Elektromagneten keine größeren Lasten heben, doch ist die Freude der Schüler am eigenen Ergebnis ist abzuwegen gegen den Effekt des Demonstrationsexperiments.

### Stromstärke: Oerstedt-Versuch

Eine Variation des Elektromagneten ist der Versuch von Oerstedt, mit dem man die magnetische Wirkung eines stromdurchflossenen Leiters auf eine Kompassnadel zeigt. Dazu legt man ein etwa 20 m langes Kabel durch die Klasse. Es kommt nun darauf an, dass das Magnetfeld stark genug für das freie Experimentieren mit der Kompassnadel ist. Vorsichtig wird man verlangen, dass das Feld des Leiters in  $r = 5 \text{ cm}$  Abstand dreimal stärker als das Erdmagnetfeld ( $50 \mu\text{T}$ ) sein sollte. Aus der Formel für das Magnetfeld  $B$  eines geraden stromdurchflossenen Leiters

$$B(r) = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad (2)$$

erhält man  $I = 38 \text{ A}$  für die angegebenen Werte. Das ist mehr, als die meisten schulüblichen Netzgeräte hergeben. Vielfach wird versucht, mit einer kleineren Stromstärke auszukommen, doch das Naturgesetz schlägt gnadenlos zu: Der Effekt ist nicht überzeugend. Es keine Alternative, die Stromstärke muss aufgebracht werden. Neben einem Schaltnetzgerät, im Elektronikhandel erhältlich, ist auch eine Parallelschaltung von NiMH-Akkumulatoren geeignet. Bei gegebenem Widerstand des Kabels wächst die Spannung mit der Stromstärke, die Leistung wächst quadratisch. Daher muss man die Spannung umso geringer machen, je größer die Stromstärke ist und letztlich den Widerstand minimieren, indem man den Kabelquerschnitt groß wählt. Der Aufbau ist also ein bewusster Kurzschluss des Netzgerätes. Das ist ungefährlich, sofern das Gerät dafür ausgelegt ist und man den Stromkreis vorher durchgerechnet hat.

Manchmal findet man den Vorschlag, Kompassnadeln in einem Kreis um ein senkrecht aufgehängtes Kabel zu stellen. Da die Kompassse als magnetische Dipole sich gegenseitig beeinflussen, müssen sie ausreichend Abstand haben, d.h. der Kreisradius muss viel größer sein als die oben diskutierten 5 cm. Mit einer Bleizelle oder einem Ultrakondensator erreicht man mehr als 300 A bis 600 A bei 2,2 V für mehrere Sekunden [4], so dass das Magnetfeld in 50 cm Abstand nachweisbar ist. Feldlinienbilder mit Eisenfeilspänen profitieren ebenfalls von einer so hohen Stromstärke, siehe Abb. 7.



Abb. 7: Feldlinienbild zweier Kupferleiter im Abstand von 120 mm, welche antiparallel mit einem Strom von 600 A durchflossen werden.

## Optik

Ein Klischee besagt, dass für Optikexperimente die Raumverdunklung betätigt werden muss, weil man sonst nichts sieht. Der Tageslichtprojektor erzeugt eine helle, quadratische Fläche von etwa 1,5 m Kantenlänge mit einer Lampenleistung von 250 W bis 400 W, die unter Tageslichtbedingungen gut erkennbar ist – sonst würde man das Gerät so nicht nennen können. Dann kann man erwarten, dass mit schulüblichen Laborlampen (25 W – 40 W) wenigstens ein Zehntel der Fläche, also 40 cm Kantenlänge genauso hell ausgeleuchtet werden kann, wenn man alles richtig macht. Da man aber nicht mit optimierten optischen Komponenten arbeitet und Kompromisse eingehen muss, genehmigen wir uns einen Faktor zehn für Verluste, entsprechend einem Faktor drei in der Kantenlänge. Ein schultypischer Projektionsschirm von 10 cm bis 15 cm Kantenlänge kann demnach mit Laborlampen prinzipiell so hell beleuchtet werden, dass die zu zeigenden Strukturen bei normalem Umgebungslicht zu sehen sind.

### Effizienzgewinne multiplizieren: Thermisches Spektrum

Die Demonstration des Spektrums eines thermischen Strahlers kann ästhetisch sehr ansprechend sein, doch der erste Versuch eines Aufbaus enttäuscht meist. An diesem Beispiel soll gezeigt werden, wie die Kombination mehrerer, für sich jeweils spitzfindiger Verbesserungen zu einer neuen Qualität führt.

Der Aufbau nach Anleitung wäre: Standard-Netzgerät (Kleinspannungsstelltransformator, "Würfel" mit Einstellung 12 V Gleichspannung, Laborleuchte 50 W mit Kondensator, variabler Spalt, Bikonvex-Linse, Prisma, Schirm. Es sind eine Reihe von Verbesserungen möglich:

1. Die Überprüfung der Spannung unter Last ergibt 8,9 V, obwohl die Leerlaufspannung  $U = 12 \text{ V}$  korrekt eingestellt wurde. Ursache ist der Innenwiderstand des Netzgerätes. Die Spannung wird im belasteten Zustand gemessen und auf 12 V hochgeregelt. Gewinn an subjektiver Helligkeit: Faktor 3.
2. Der Reflexionsspiegel in der Laborlampe wird eingebaut bzw. richtig justiert: Gewinn: Faktor 1,5. Die korrekte Anordnung des Lampen-Spiegelbildes zeigt Abb. 8.
3. Der Abstand Lampe-Kondensator wird so eingestellt, dass das Lampenbild in der Projektionslinse erscheint. Damit ist der Spalt homogen ausgeleuchtet. Der Gewinn ist abhängig von der vorherigen Einstellung.
4. Die Bikonvexlinse wird durch eine achromatische Linse ersetzt. Man hat ein schärferes Bild und 10 Prozent mehr Licht aufgrund der AR-Beschichtung.
5. Die Halogenlampe wird durch eine spezielle Projektionslampe ersetzt, z.B. Osram Xenophot Nr. 64610. Die Lampe hat einen Lichtstrom von 1600 lm bei einer Leistung von 50 W Gewinn: Faktor 2

6. Der Spalt wird so weit verbreitert, dass die spektrale Auflösung im Bereich 50 nm bis 100 nm liegt. Eine schmalere Bandbreite bringt keinen nennenswerten Gewinn in der Farbsättigung, man verliert nur Intensität. Bei der optimalen Einstellung ist das Spektrum bis etwa 6 mal breiter als das Bild des Spaltes auf dem Schirm, denn das gesamte Spektrum ist 300 nm breit.



Abb. 8: Korrekte Anordnung von Lampenwendel und Spiegelbild mit Verdopplung der Leuchtfläche

Insgesamt steigt der Lichtstrom mindestens um einen Faktor 10, es ist aber je nach Ausgangslage auch erheblich mehr möglich. Die Fläche des rechteckigen Spektrum wird über das Abbildungsverhältnis der optischen Abbildung gesteuert. Die Breite des Spektrums steigt mit der Dispersion des Prismas bzw. Gitters. Bei konstanter spektraler Auflösung ist die Spaltbreite proportional zur Breite des Spektrums. Man verliert also keine Intensität mit bei stärkerer Dispersion, wenn man den Spalt nachregelt. Bei Reflexionsgittern [1] mit 600 oder 1200 Linien pro mm reicht die Öffnung der gewöhnlichen Lehrmittelpalte nicht aus, um die optimale Auflösung zu erreichen; man baut einen breiten Spalt aus Pappe.

### Beobachter einbinden: Beugung

Durch die Verbreitung von Laser-Pointern ist es üblich geworden, diese für Beugungsexperimente zu verwenden. Dabei wird oft übersehen, dass Laser-Licht keine experimentelle Voraussetzung ist. Jede Lampe mit einer scheinbaren Größe von weniger als 10 Bogenminuten (Größe/Entfernung  $< 1 : 1000$ ) ist hinreichend räumlich kohärent, um Beugungsfiguren zu zeigen. Die Projektion von Beugungsbildern mit konventioneller Halogenlampe liefert keine besonders hellen Bilder, so dass die gleichzeitige Beobachtung der Beugungsfiguren durch die ganze Klasse schwierig ist.

Man beachte, dass das Licht auf dem Schirm in alle Rich-

tungen gestreut wird und die Augen der Schüler nur einen sehr kleinen Anteil aufnehmen. Es ist viel effizienter, wenn man eine kleine Lampe in hinreichender Entfernung aufstellt und die Schüler diese durch verschiedene Beugungsobjekte anschauen. Die Netzhaut im Auge übernimmt dann die Rolle des Projektionsschirms, wie in Abb. 9 skizziert ist.

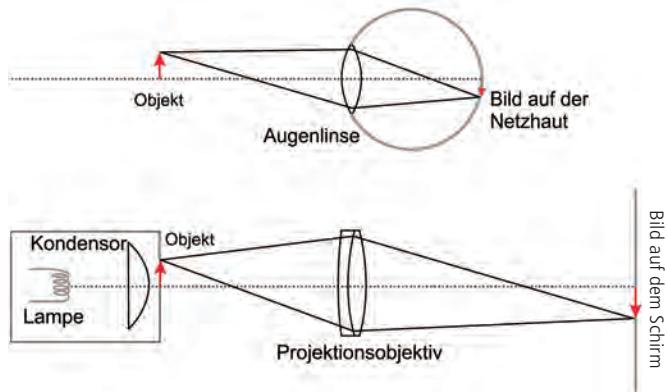


Abb. 9: Eingebundener Beobachter (oben) und Projektion auf einen Schirm (unten). Die Augenlinse des Beobachters entspricht dem Projektionsobjektiv, seine Netzhaut dem Schirm. Nach diesem Prinzip kann man alle Projektionsexperimente zu Experimenten mit eingebundenem Beobachter machen.

Eine Kerze mit 1 cm breiter Flamme muss mindestens 10 m von den Schülern entfernt sein, um hinreichend räumlich kohärent zu sein; das lässt sich im Physiksaal in der Regel realisieren. Nur bei besonderer Enge müsste man auf eine kleine Glühbirne oder einen beleuchteten Spalt ausweichen. Die Beobachtung von Beugungsmustern im Schülertextperiment ist nicht kompatibel mit der üblichen Schulausstattung; wer hat schon einen Klassensatz Doppelspalte? Die Beugungsobjekte müssen also selbst hergestellt werden, durch Nadelstiche in starker Alufolie oder durch Ritzen von Oberflächenspiegeln [5] mit einer Schraubendreherklinge. Schüler, die auf diese Weise für Beugungssphänomene sensibilisiert sind, könnten im Alltag weitere entdecken [6].

#### Voraussetzungen minimieren: Michelson-Interferometer

Wenn Beugungssphänomene im Licht einer Kerze sichtbar sind, dann muss das auch für die Interferenz möglich sein. Das Michelson-Interferometer [7] kann in verschiedene Kontexte des Schulunterrichts eingebunden werden: historisch in Bezug auf die Entstehung der Relativitätstheorie, wegen seiner Bedeutung in der Präzisionsmesstechnik und nicht zuletzt als besonders eindrückliche Demonstration eines Interferenzphänomens. Das Michelson-Interferometer wird fast immer mit dem Laser gezeigt, obwohl die Justage im inkohärenten Licht prinzipiell einfach ist. An Stelle des Lasers und des Projektionsschirm tritt eine helle Fläche mit Markierung und der eingebundene Beobachter (Abb. 10).

Da die Kohärenzlänge von thermischen Licht nur wenige Mikrometer beträgt, müssen die Interferometerarme mit dieser Genauigkeit gleich lang sein. Dazu verschiebt man einen der Spiegel auf einem geeigneten Verschiebetisch [8].

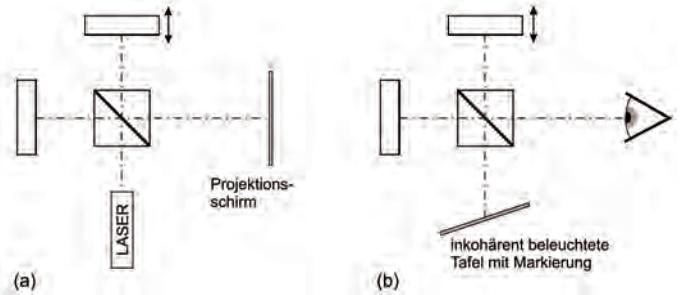


Abb. 10: Michelson-Interferometer. (a) mit Laser, (b) mit inkohärenter Beleuchtung durch Quecksilberdampflampe oder diffuses Tageslicht auf einer weißen Tafel

Die Armlängen werden zuerst mit dem Maßstab ausgemessen. Die Genauigkeit reicht, um mit einer Spektrallampe Ringe zu sehen und die Justage wie in Abb. 11 durchzuführen.

Ohne Verschiebetisch zum präzisen Abgleich der Armlängen bräuchte man eine Spektrallampe mit großer zeitlicher Kohärenz (kleine Frequenzbandbreite), doch auf die räumliche Kohärenz kann man im jedem Fall verzichten. Das ist keine unwesentliche Verallgemeinerung im Bezug auf viele andere Experimente zur Wellennatur des Lichts, welche die räumliche Kohärenz tatsächlich voraussetzen!

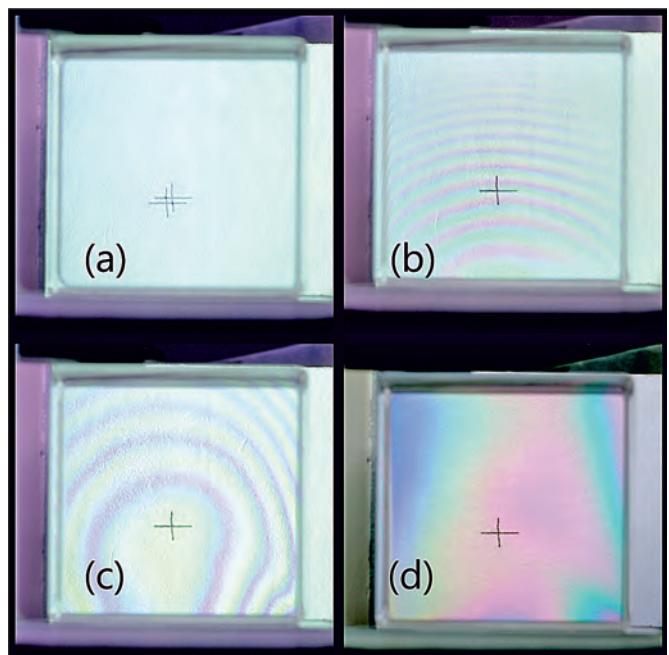


Abb. 11: Justage des Michelson-Interferometers mit diffuser Beleuchtung durch Quecksilberdampflampe.

- (a) Die Kreuze der beiden Spiegelräume [6] werden durch Verkippen eines Spiegels übereinander gelegt.
- (b) Interferenzringe nach feinerer Justage. Das Zentrum der Ringe wird in die Mitte gebracht.
- (c) Bei geringer werdender Armlängendifferenz werden die Ringe größer.
- (d) Weißlichtinterferenz im Tageslicht.

## Fazit

Den hier besprochenen Beispielen ist gemeinsam, dass die physikalisch begründete Optimierung nicht nach dem naheliegenden Muster erfolgt. Bei der mechanischen Dehnung eines Eisenstabes musste zuerst Abstand von der Vorstellung genommen werden, dass ein Eisenstab ein starrer Körper ist. Die Länge bestimmt die absolute Dehnung, der Durchmesser die dafür notwendige Kraft. Die Schallpulse zur Zeitmessung müssen möglichst gut gedämpft sein, was dem Alltagskonzept eines lauten Schlags widerspricht.

Beim Thermometer wird mit den länglichen Reagenzgläsern die Oberfläche vergrößert und damit die Erwärmung der Probe erleichtert. Bei der Wärmedehnung von Festkörpern macht man sich zusätzlich die sehr große Heizleistung von kondensierendem Wasserdampf zunutze. In beiden Fällen wird der Effekt so deutlich, dass man auf eine mechanische Übersetzung, welche für viele Schüler auch eine Verschleierung bedeutet, verzichten kann. Die Konvektion wird deutlicher, wenn man Temperaturunterschiede und nicht die absolute Temperatur markiert.

Die Beispiele Elektromagnet und Oerstedt-Versuch zeigen, dass der entscheidene Parameter verschieden sein kann, obwohl es in beiden Fällen um die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes geht. In der Spule entscheidet die Stromdichte, und nicht die Windungszahl oder die Stromstärke. Beim langen Draht muss die Stromstärke groß sein. Praktisch erfordert das nicht eine große, sondern eine geringe Spannung, weil sonst die Verlustleistung zu groß wird. Letztlich kommt es also darauf an, den Innenwiderstand der Stromquelle zu minimieren.

Das Spektrum des Lichts gelingt durch Zusammenwirken kleiner Änderungen, die nur als Produkt einen großen Unterschied machen, dieses Prinzip hilft natürlich auch in anderen Zusammenhängen. Die Beugung am Doppelspalt wird mit der Einbindung des Beobachters zu einem Frei-

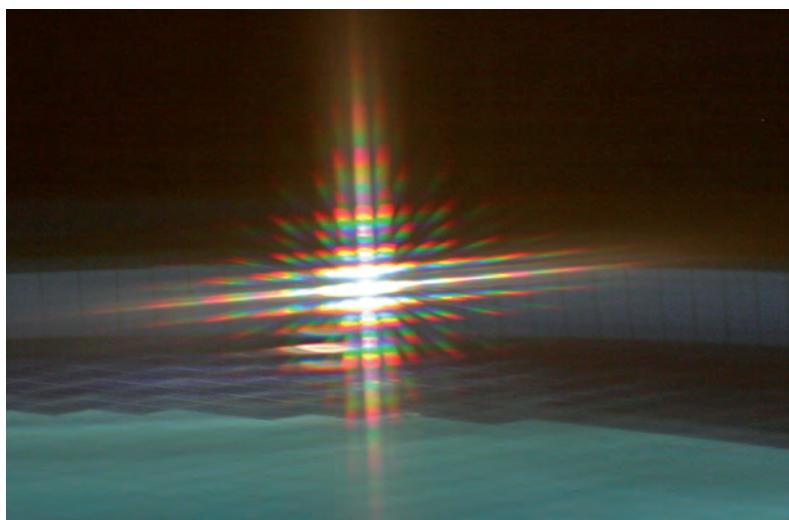
hand-Experiment, das Michelson-Interferometer funktioniert mit vollständig inkohärentem Licht als Überlagerung zweier ausgedehnter Spiegelräume.

Die beiden wichtigsten Fragen beim Aufbau eines Experiments sind: Was will ich zeigen? Was sieht man? Da gibt es oft schon unterschiedliche Antworten. Nach der Klärung folgt die technische Frage: Auf welchen Parameter kommt es an? Das ist oft nicht die physikalische Größe, die gerade Unterrichtsgegenstand ist, wie hier an Beispielen aufgezeigt wurde. Das Experimentieren erscheint deshalb zunächst als anspruchsvolle Aufgabe, die doch mit zunehmender Erfahrung und physikalischer Intuition immer mehr Freude macht.

## Literatur

- [1] Jan-Peter Meyn: *Grundlegende Experimentiertechnik im Physikunterricht*. Oldenbourg, München, 2. Auflage, 2013.
- [2] Westfälisches Eisen Nr. 41-4578 bei: Marc Vogel GmbH, Talgasse 2, D-79798 Jestetten. [www.vogel-scheer.de](http://www.vogel-scheer.de).
- [3] Isabel Hecker: Wieso verbiegen sich Eisenbahnschienen bei großen Temperatur-Unterschieden nicht? Bayerischer Rundfunk, Rundfunkplatz 1, D-80300 München. <http://www.wdr.de/tv/kopfball/sendungsbeitraege/2010/1121/schienenschweissen.jsp>.
- [4] Jan-Peter Meyn: Ultra-capacitor based current source for magnetic field demonstration. *European Journal of Physics*, 31:L1– L4, 2010.
- [5] AstroMedia-Versand, Zuckerdamm 15, D-23730 Neustadt in Holstein. [www.astromedia.de](http://www.astromedia.de).
- [6] Georg Maier: *Optik der Bilder*. Verlag der Kooperativen Dürnau, Dürnau, 4. Auflage, 2003.
- [7] Albert Abraham Michelson: The relative motion of the earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, 22:120–129, 1881.
- [8] Verschiebetisch PT1/M von Thorlabs GmbH, Hans-Boeckler-Str. 6, D-85221 Dachau. [www.thorlabs.de](http://www.thorlabs.de).

## Nächtlicher Blick aus dem Hotelzimmer



Beim Blick durch den Netzvorhang des Fensters auf einen Unterwasserscheinwerfer im Hotelpool klärt sich die Frage nach dem Leuchtmittel – kein thermischer Strahler. (Foto: Helmut Kühnelt)

# Luft ist überall

Monika Musilek

Das Konzept „Luft ist überall“ ist ein grundlegendes und wesentliches Konzept zum Thema Luft. Es wird in vielen Facetten benötigt, um darauf aufbauend anschlussfähiges Wissen konstruieren zu können. Kinder im Grundschulalter sind sich der Existenz von Luft bewusst, sie wissen, dass Luft überall ist, obwohl man sie nicht sehen kann. Und doch haben Kinder im Grundschulalter Schwierigkeiten zu entscheiden, wo dieses „Überall“ tatsächlich ist.

Dieser Artikel zeigt ein Konzept auf, anhand dessen man „Luft ist überall“ mit einfachsten Mitteln untersuchen kann. Dazu benötigt man lediglich Dinge, die Kinder von zu Hause kennen: Luftballon, vakuumierte Lebensmittel, Rasierschaum, Schwedenbomben und ein Vakuumierset. Ein Vakuumierset besteht aus einem Behälter, der sich mit einem Deckel luftdicht verschließen lässt. Der Deckel wird auf den Behälter gelegt, und mit Hilfe einer Vakuumierpumpe die Luft aus dem Behälter abgesaugt.

Zu Beginn muss den Kindern erklärt werden, dass Luft ein Gas ist und Gase eine herausragende Eigenschaft haben: Gase nutzen stets den gesamten ihnen zur Verfügung stehenden Raum aus. Um dies zu illustrieren, wird gemeinsam folgendes Experiment durchgeführt:

Es wird ein mit Luft aufgeblasener Luftballon in den Behälter gelegt und die Luft abgesaugt. Dem naturwissenschaftlichen Prinzip folgend, wird mit den Kindern eine Hypothese aufgestellt, die dann durch das Experiment verifiziert wird und in eine Erklärung auf Basis des Beobachteten und der Hypothese mündet. Der Luftballon verändert während des Absaugens der Luft seine Größe. Er wird immer größer, weil sich die Luft im Ballon ausdehnt.



Abb. 1:  
links: Ausgangsgröße  
des Luftballons  
rechts: Luftballon nach  
dem Absaugen der Luft  
im Vakuumierset

Dieses Kriterium „wird größer, wenn die Luft aus dem Behälter gesaugt wird“ kann nun als Entscheidungshilfe für die Kinder herangezogen werden, ob Luft in etwas drinnen steckt oder nicht ...

Mag. Dr. Monika Musilek, BAKIP Pressbaum und Pädagogische Hochschule Wien/RECC für Naturwissenschaften und Mathematik.  
E-Mail: monika.musilek@phwien.ac.at

Nun kann es an eigenständige Untersuchungen gehen, wo Luft überall ist. siehe Arbeitsblatt [1]. Die auf dem Arbeitsblatt erwähnten Experimente werden hier erläutert:

## Experiment 1: „Vakuum-Verpackung“

Man legt eine Vakuum-Verpackung in den Behälter und saugt die Luft ab. Je länger mit der Pumpe abgesaugt wird, desto mehr bläht sich die Verpackung auf. Lässt man Luft wieder einströmen, geht die Verpackung wieder in den Originalzustand zurück.

Zwischen den vakuumverpackten Gegenständen befinden sich meist noch Luftreservoirs. Wenn die Luft aus dem Behälter abgesaugt wird, dehnt sich die Luft, die noch in der Vakuumverpackung enthalten ist, aus.

Für die Kinder ist dies wohl ein eher unwahrscheinlicher Versuchsausgang, weil ja „vakuumdicht“ verpackt suggeriert, dass da tatsächlich keine Luft mehr enthalten ist.

Eine Vakuumverpackung ist eine gasdichte Verpackung eines Produkts, bei dem versucht wurde, die Gase in den Zwischenräumen des Produkts zu entfernen. Meist herrscht in diesen Verpackungen sogenanntes Grobvakuum, d.h. ein Druck zwischen 300 mbar und 1 mbar. Die Vorteile von Vakuumverpackungen liegen in der längeren Haltbarkeit der Produkte und in der Volumenreduktion.

## Experiment 2: Rasierschaum

Gibt man Rasierschaum in Vakuum, so dehnt er sich aus. Schaum (von lat. spuma) besteht aus gasförmigen Bläschen, die von festen oder flüssigen Wänden eingeschlossen sind. Die Luft in den Bläschen dehnt sich also aus. Wenn man wieder Luft in den Behälter lässt, verflüssigt sich der Schaum. Die sich ausdehnenden Luftbläschen überschreiten meist den Punkt der Elastizität und die „Wände“ der Bläschen zerplatzen. Wenn man die Luft wieder reinlässt, gibt es die Wände nicht mehr, d.h. der Schaum verflüssigt sich.



Abb. 2: a) Rasierschaum, b) „vakuumierter“ Rasierschaum und  
c) Rasierschaum nach neuerlicher Luftzufuhr

„Schaum“ gibt es in vielen Variationen: Man könnte an dieser Stelle natürlich auch mit den Kindern diskutieren, woher denn die Schaumblasen eines Geschirrspülmittels kommen.

Es gibt noch einen weiteren Schaum in der Küche: Durch Einschlagen von Luft entsteht aus Eiklar Schnee.

### Experiment 3: Schwedenbombe

Um zu zeigen, wie stark sich die Luft ausdehnt, d.h. das Einbrechen der Wände sichtbar zu machen, wird ein „umschlossener Schaum“ genauer untersucht: eine Schwedenbombe. Eine Schwedenbombe ist eine Süßigkeit aus Eiweißschaum als Füllung mit einem Überzug aus Schokolade auf einer Waffel.



Abb. 3:  
a) aufgeschnittene  
Schwedenbombe  
b) „vakuumierte“  
Schwedenbombe

Die Schwedenbombe wird in den Behälter gelegt und die Luft abgesaugt: Wie man der Abbildung gut entnehmen kann, enthält der Schaum Luftbläschen.



Abb. 4:  
Schwedenbombe:  
Schaum enthält viele  
Luftlöcher

Die Luft in den Bläschen dehnt sich während des Absaugens so stark aus, dass es dabei sogar zum Zerbersten der Schokoschicht kommt. Durch das Absaugen der Luft bricht die Schokoschicht, aber auch (wie schon beim Rasierschaum) die Eiweißhüllen um die Luftbläschen brechen aufgrund des sich aufblähenden Schaumes. Lässt man Luft wieder einströmen, so fällt die Eiweißmasse in sich zusammen und verflüssigt sich.

Hier würde sich auch eine tiefergehende zusätzliche Fragestellung anbieten: Warum wird die Waffel nicht zerstört, obwohl sie auch Luflöcher hat?

Ab jetzt sind den Kindern keine Grenzen mehr gesetzt. An vielen unterschiedlichen Dingen kann man nun untersuchen, ob sie „luftleer“ sind oder nicht. Zum Beispiel kann man überprüfen, ob in einem Blatt Papier, in einem Radiergummi, in ... Luft ist.

[1] Arbeitsblatt "Luft ist überall":  
<http://pluslucis.univie.ac.at/PlusLucis/151/Luft.pdf>

## Wer eine Reise macht, kann manches beobachten...



Luftdichte Verpackungen von Knabbereien und Snacks zeigen ähnlich wie im obigen Artikel, dass Luft Druck ausübt. Das linke Foto entstand im Inneren eines AUA-Airbus nach Erreichen der Reise-Flughöhe, das rechte nach der Landung auf ca. 400 m Höhe – jeweils bei etwa 20°C. Es ist dasselbe Gebäck. Der Luftdruck in der Kabine entspricht ungefähr dem Luftdruck auf 2000 m Höhe, rund 800 mbar. Am Bo-



den betrug der Luftdruck etwa 960 mbar. Das Volumen des Schutzgases in der Packung nimmt daher um den Faktor  $960/800 = 1,2$  während des Flugs zu. Bleibt die Frage, wie sehr sich die gasgefüllten Bläschen im Gebäck ausdehnen – oder: Ist das Gebäck nach der Landung noch so (wenig) knusprig wie vor dem Start? (Foto: Helmut Kühnelt)

# Mit elektrischem Druck die Spannung verstehen lernen

## Die Spannung als schwierige physikalische Größe

Jan-Philipp Burde, Thomas Wilhelm

Viele Schülerinnen und Schüler besitzen auch nach der Sekundarstufe I keine angemessene Vorstellung davon, was die elektrische Spannung ist und wie man sich diese vorstellen kann. Stattdessen wird die elektrische Spannung häufig als Eigenschaft bzw. als Bestandteil des elektrischen Stromes gesehen, der die Vorstellung der meisten Schüler zu Stromkreisen dominiert [1]. Dies ist nicht nur bedauerlich, weil die Spannung eine der physikalischen Größen darstellt, welche im Alltag der Schüler eine große Bedeutung haben, sondern auch, weil ohne die Spannung ein elementares Verständnis der Elektrizitätslehre unmöglich ist.

Die Spannung ist keine einfache physikalische Größe, da sie die Differenz zweier Potenzialwerte darstellt und sich immer auf zwei Punkte in einem Stromkreis bezieht. Sie ist damit komplexer als das elektrische Potenzial, das einem Punkt bzw. einem Leiterabschnitt zugeordnet werden kann. Paradoxeise wird von den Schülern insbesondere im Anfangsunterricht aber häufig erwartet, ein Verständnis für die Spannung zu entwickeln, ohne die dahinterstehende Größe selbst, nämlich das Potenzial, zu kennen, geschweige denn zu verstehen [2, S. 477]. Passend zu dieser grundlegenden Überlegung hat sich in der physikdidaktischen Forschung gezeigt, dass Unterrichtsansätze, die auf dem Potenzialgedanken aufbauen und mit einer visuellen Modelldarstellung des elektrischen Potenzials arbeiten (wie beispielsweise das Stäbchenmodell oder der geschlossene Wasserkreislauf mit Doppelwassersäule) zu vergleichsweisen großen Lernerfolgen bei den Schülern führen [3, S. 35; 4, S. 70].

Das hier vorgeschlagene Elektronengasmodell stellt einen solchen Potenzialansatz dar, versucht durch den Vergleich des elektrischen Potenzials mit dem Luftdruck bzw. „elektrischen Druck“ jedoch neue Wege zu gehen. Dabei wird besonderer Wert auf ein qualitativ fundiertes Verständnis der für die Elektrizitätslehre grundlegenden Basiskonzepte „Spannung“, „Stromstärke“ und „Widerstand“ gelegt.

---

Jan-Philipp Burde studierte Lehramt für Physik und Englisch an der Universität Kassel, machte sein Referendariat in England und promoviert nun am Institut für Didaktik der Physik der Universität Frankfurt über das Elektronengasmodell (burde@physik.uni-frankfurt.de).

Prof. Dr. Thomas Wilhelm war Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik, promovierte an der Universität Würzburg über ein verändertes Mechanikkonzept, habilitierte dort über die Videoanalyse von Bewegungen, hatte eine Professur an der Universität Augsburg und ist nun Professor und Geschäftsführender Direktor am Institut für Didaktik der Physik der Universität Frankfurt.

## Die Grundidee des Elektronengasmodells

Zunächst besteht die Idee darin, auf der intuitiven Luftdruckvorstellung der Schüler im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“ aufzubauen und zu klären, dass Luftströmungen immer eine Folge von Luftdruckunterschieden sind. Nachdem an Hand einiger Beispiele geklärt wurde, dass Strömungen immer eine Folge von Druckunterschieden sind, wird dieses Verständnis auf elektrische Stromkreise übertragen, um zu erklären, wie es überhaupt zum elektrischen Strom kommt. Die Grundidee des Elektronengasmodells ist dabei, dass sich in Metallen Elektronen in Teilchenform befinden und sich dort frei bewegen können. Da die Elektronen negativ geladen sind, werden sie durch Abstoßung so weit wie möglich auseinandergetrieben, weshalb sie den ihnen zur Verfügung stehenden Raum im gesamten Leiter gleichmäßig ausfüllen. Im Leiter kommt es aufgrund der gegenseitigen Coulomb-Abstoßung der Elektronen zu einem von der Elektronendichte abhängigen elektrischen Druck (für eine fachliche Auseinandersetzung sei auf [5] verwiesen).

Ursächlich für die Ungleichverteilung der Elektronen im Leiter sind dabei die Pole der Batterie. Da am Minuspol ein Elektronenüberschuss herrscht, kommt es in dem mit ihm verbundenen Leiterabschnitt zu einer erhöhten Elektronendichte und damit zu einem erhöhten „elektrischen Druck“. Der positiv geladene Pluspol hingegen „saugt“ ähnlich einem Staubsauger die negativen Elektronen aus dem mit ihm verbundenen Leiterabschnitt, weshalb es hier zu einer verringerten Elektronendichte und damit einem geringeren elektrischen Druck kommt. Durch Gleichsetzen des elektrischen Drucks mit dem elektrischen Potenzial kann so die Spannung als elektrischer Druckunterschied interpretiert werden, der die Elektronenströmung in Stromkreisen bewirkt.

## Das Unterrichtskonzept

Das hier vorgeschlagene Unterrichtskonzept nach dem Elektronengasmodell legt besonderen Wert auf die Entwicklung eines fundierten qualitativen Verständnisses der Grundgrößen „Spannung“, „Stromstärke“ und „Widerstand“. Dabei wird einer bildhaft-anschauungsorientierten Vorstellung des Potenzials als elektrischem Druck und der Spannung als

elektrischem Druckunterschied eine besondere Bedeutung zugeschrieben. Um den Schülern eine angemessene Vorstellung des elektrischen Drucks zu ermöglichen, ist eine kurze Auseinandersetzung mit der Elektrostatik und dem Luftdruck zu Beginn der Unterrichtsreihe vorgesehen.

### 1. Elektrostatik und Atomvorstellung

Sofern die Schüler aus ihrem bisherigen Unterricht keine Kenntnisse zur Elektrostatik mitbringen, wird zunächst erarbeitet, dass geladene Körper elektrische Kräfte aufeinander ausüben und diese mit zunehmendem Abstand kleiner werden. Vor dem Hintergrund der für das Elektronengasmödell wichtigen Vorstellung der sich gegenseitig abstoßenden Elektronen wird insbesondere die elektrostatische Abstoßung demonstriert, z.B. mit negativ geladenen und an Fäden aufgehängten leitend beschichteten Tischtennisbällen. Mit Blick auf die für das Unterrichtskonzept zentrale Idee des Elektronengases wird im Anschluss am Beispiel von Kupfer der atomare Aufbau elektrisch geladener Metalle besprochen. Ziel ist hier, die Vorstellung zu vermitteln, dass beispielsweise Körper deshalb elektrisch negativ geladen sind, weil sie mehr negativ geladene, frei bewegliche Elektronen besitzen als positiv geladene, ortsfeste Atomrumpfe.

### 2. Luftströmungen durch Druckunterschiede

Als nächstes wird an das aus dem Alltag gewonnene Wissen der Schüler zu Luftdruckphänomenen angeknüpft, indem am Beispiel eines aufgeblasenen Luftballons oder Fahrradreifens besprochen wird, dass die Luft von Überdruck zu Normaldruck strömt. Ergebnis sollte die Erkenntnis sein, dass eine Luftströmung immer eine Folge von Druckunterschieden ist und dass zwischen den Größen Druck und Druckunterschied klar differenziert werden muss. Mit Hilfe einer Einwegspritze aus Kunststoff, deren Öffnung auf der einen Seite mit dem Daumen zugehalten werden kann und deren Kolben auf der anderen Seite verschoben werden kann, kann jeder Schüler nicht nur Primärerfahrungen zum Druck und Druckunterschied sammeln, sondern ebenso erfahren, dass die Luft auch von Normaldruck zu Unterdruck strömt. Abgeschlossen wird die Einheit mit einer Einführung zur Widerstandsvorstellung, indem die Schülerinnen ein Stück Stoff (z.B. ein Schal, Kragen oder Ärmel) nehmen und Luft durch dieses blasen. Je dicker das Stück Stoff dabei gefaltet wird, desto stärker ist die Hemmung bzw. Behinderung der Luftströmung (siehe Abb. 1). Die Hemmung bzw. Behinderung der Luftströmung durch den Stoff wird dann als Widerstand bezeichnet.

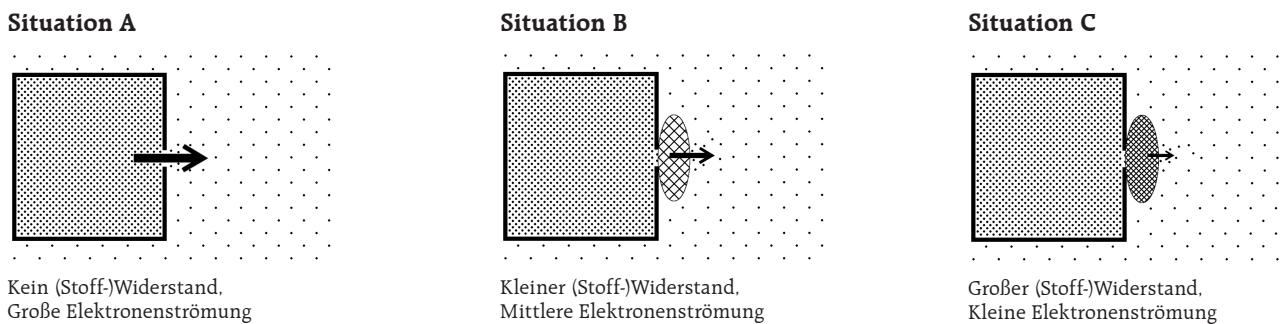


Abb. 1: Intensität der Luftströmung in Abhängigkeit vom Druckunterschied und dem (Stoff-)Widerstand

### 3. Batterie, elektrisches Potenzial und Spannung

In dieser Einheit wird die Vorstellung vom Luftdruck auf den in Leitern herrschenden elektrischen Druck übertragen. Hierzu wird angenommen, dass am Minuspol einer Batterie ein Elektronenüberschuss herrscht und am Pluspol ein Elektronenmangel. In Folge herrscht also am Minuspol ein elektrischer Überdruck, während am Pluspol ein elektrischer Unterdruck herrscht (siehe Abb. 2). Wird nun ein bisher neutrales Leiterstück mit dem Minuspol verbunden, so strömen

Elektronen aufgrund des elektrischen Druckunterschieds in den Leiter, bis in diesem der gleiche elektrische Überdruck herrscht wie zuvor am Minuspol der Batterie. Analog führt das Verbinden eines bisher neutralen Leiterstücks mit dem Pluspol dazu, dass Elektronen vom bisherigen elektrischen Normaldruck im Leiter zum elektrischen Unterdruck am Pluspol strömen, bis sich im Leiter der gleiche elektrische Unterdruck einstellt wie am Pluspol. Da keine absoluten Werte für das Potential eingeführt werden, wird auf eine explizite Diskussion der Erdung einzelner Leiterabschnitte im Rahmen der Elementarisierung des Unterrichtskonzepts bewusst verzichtet.

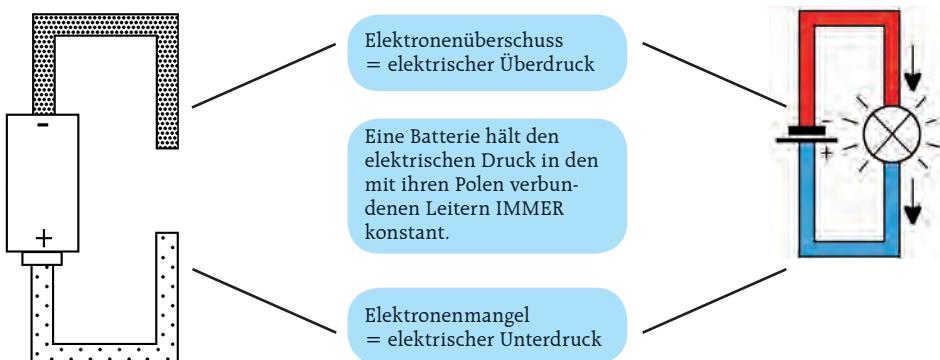
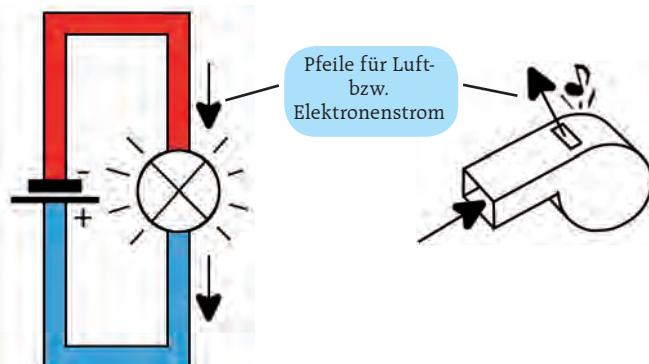


Abb. 2: Punktedichtedarstellung (links) und Farbdarstellung (rechts) des elektrischen Drucks.

Während zum unmittelbaren Einstieg in die Diskussion von elektrischem Über- und Unterdruck in elektrischen Schaltungen auf die von den Luftdruckbeispielen bekannte Punktedichtetedarstellung zurückgegriffen wird, erscheint ein baldiger Wechsel auf die Farbdarstellung des elektrischen Drucks sinnvoll (siehe Abb. 2). Der Grund hierfür ist, dass Schüler den elektrischen Druck mit Farbstiften nicht nur viel leichter einzeichnen können, sondern so auch eine potentiell verwirrende Diskussion der Strömungsgeschwindigkeiten der Elektronen vor und nach einem Widerstand unnötig wird. An verschiedenen offenen Schaltungen wird anschließend der Unterschied zwischen elektrischem Druck und elektrischem Druckunterschied eingeübt sowie typische Spannungswerte im Alltag (Batterie, Steckdose, Hochspannungsleitung) besprochen. Dabei wird insbesondere immer wieder betont, dass Druck und Druckunterschied nicht das Gleiche ist. Auch ist es wichtig, den Schülern bewusst zu machen, dass der elektrische Druck in den Leitern ausschließlich von den Batteriepolen bestimmt wird und nicht von der Länge oder Abmessung der Leiter abhängt.

#### 4. Der elektrische Strom und Widerstand

Nachdem die Vorstellung vom elektrischen Druck am Beispiel offener Schaltungen ohne Stromfluss etabliert wurde, werden die elektrischen Druckunterschiede analog zur vorherigen Betrachtung von Luftdruckunterschieden nun als Ursache für Elektronenströmungen in Stromkreisen eingeführt. Hierzu wird an einem einfachen Stromkreis bestehend aus Batterie und Lämpchen besprochen, dass in Folge des am Lämpchen anliegenden elektrischen Druckunterschieds Elektronen durch das Lämpchen strömen und dieses zum Leuchten bringen (siehe Abb. 3).



Alle Elektronen, die auf der einen Seite in das Lämpchen hineinströmen, strömen auf der anderen Seite auch wieder heraus.

Alle Luftteilchen, die in die Trillerpfeife geblasen werden, strömen auch wieder durch das obere Loch heraus.

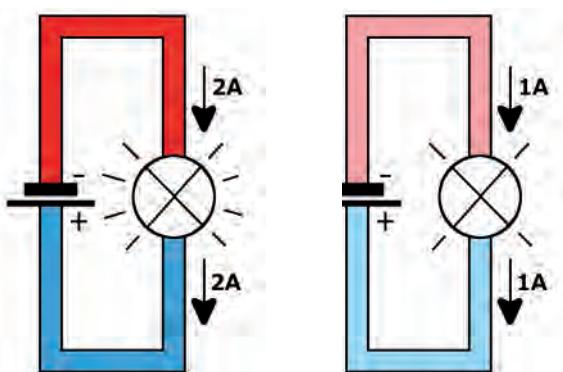
Abb. 3: Gegenüberstellung von Elektronen- und Luftströmung um der Stromverbrauchs-vorstellung entgegenzuwirken.

Für jedes Elektron, das vom elektrischen Überdruck durch das Lämpchen zum elektrischen Unterdruck strömt, pumpt die Batterie ein Elektron vom Unterdruck in den Bereich des Überdrucks, weshalb der am Lämpchen anliegende Druckunterschied konstant bleibt und nicht abnimmt. Durch den Vergleich des Lämpchens mit einer Trillerpfeife, die pfeift

und dabei keine Luftteilchen verbraucht, wird der Stromverbrauchsvorstellung begegnet. Die Stromstärke selber wird als „Intensität der Elektronenströmung“ eingeführt, da so einerseits Assoziationen mit dem alltäglichen Kraftbegriff vermieden werden und andererseits das Formelzeichen I (für Intensität) leichter verständlich wird.

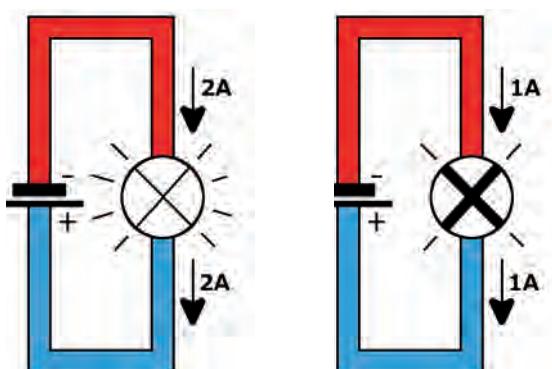
Im Anschluss wird der Einfluss der Spannung auf die Elektronenströmung sowie vom Widerstand auf die Elektronenströmung halb-quantitativ über „je ... desto ...“ Beziehungen erarbeitet. Dabei ist das Ziel, bei den Schülern ein qualitatives Verständnis der Wirkzusammenhänge im Stromkreis zu erreichen, wonach die Spannung die Elektronenströmung kausal bewirkt und der Widerstand diese lediglich beeinflusst. Die Höhe des Potenzials wird in der Farbdarstellung mit Hilfe unterschiedlicher Farbtensitäten visualisiert. Dabei gilt, dass der Druck bzw. das Potenzial umso höher ist, je intensiver das Rot ist, bzw. umso niedriger ist, desto intensiver das Blau ist (siehe Abb. 4).

#### Zusammenhang: Spannung – Elektronenströmung



Umso größer die Spannung (Druckunterschied), desto größer die Elektronenströmung

#### Zusammenhang: Widerstand – Elektronenströmung



Umso größer der Widerstand, desto schwerer ist es für die Elektronen, durch das Lämpchen zu strömen und desto kleiner ist daher die Elektronenströmung.

Abb. 4: Die Abhängigkeit der Intensität der Elektronenströmung von Spannung und Widerstand.

## 5. Die Parallelschaltung

Parallelschaltungen eignen sich im Elektronengasmodell hervorragend zur weiteren Festigung und gegenseitigen Abgrenzung der grundlegenden Größen „elektrischer Druck“, „elektrischer Druckunterschied“ und „Intensität der Elektronenströmung“. Eingeführt wird die Parallelschaltung damit, dass ein zweites identisches Lämpchen parallel zum ersten geschaltet wird. Nun muss herausgearbeitet werden, dass eine (ideale) Batterie die elektrischen Drücke in den mit ihren Polen direkt verbunden Leitern konstant hält – unabhängig von deren Länge oder der Anzahl der parallelgeschalteten Lämpchen. Der Druckunterschied am ersten Lämpchen hat sich also nicht verändert, weshalb sich auch die Intensität der Elektronenströmung durch das erste Lämpchen nicht geändert haben kann. Da am zweiten Lämpchen der gleiche Druckunterschied wie am ersten anliegt, muss die Elektronenströmung durch das zweite Lämpchen genauso groß sein wie durch das erste. Die nun zusätzlich vorhandene Elektronenströmung durch das zweite Lämpchen muss von der Batterie bereitgestellt werden, weshalb sich die Intensität der Elektronenströmung durch die direkt mit den Polen der Batterie verbundenen Leiterstücke verdoppelt.

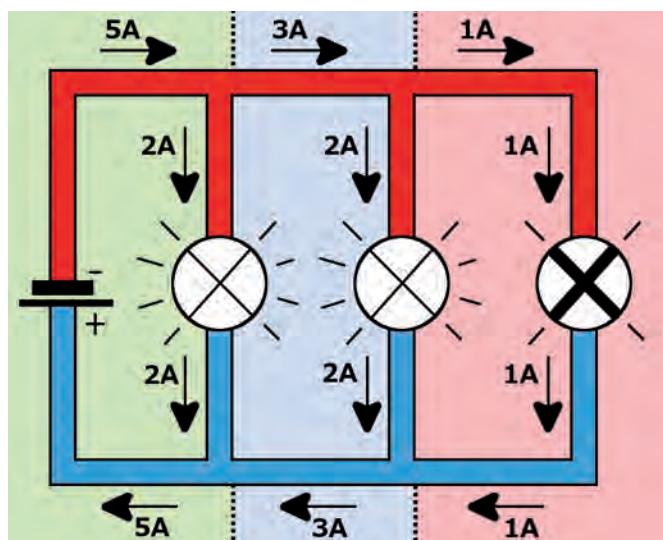


Abb. 5: Parallelschaltung von drei Lämpchen inklusive möglicher Elektronenströmungen. Das rechte Lämpchen hat einen doppelt so großen Widerstand wie die anderen beiden.

Wird nun ein weiteres Lämpchen mit doppelt so großem Widerstand zu den beiden bisherigen Lämpchen parallel geschaltet (siehe Abb. 5), so liegt auch an diesem der gleiche elektrische Druckunterschied an. Da nun aber der Widerstand doppelt so groß ist, ist die Intensität der Elektronenströmung durch dieses Lämpchen nur halb so groß. Trotzdem muss die Batterie auch diese Elektronenströmung bereitstellen und entsprechend mehr Elektronen pro Zeit vom Plus- zum Minuspol „pumpen“.

An verschiedenen Parallelschaltungen wird im Anschluss erarbeitet, dass zwei Lämpchen immer dann parallel geschaltet sind, wenn an ihren Seiten jeweils die gleichen elektrischen Drücke bzw. Farben anliegen. Im Anschluss kann geschaut werden, wo im Alltag überall Parallelschaltungen vorkommen und weshalb es beispielsweise gefährlich ist, viele Mehrfachsteckdosen hintereinanderzuschalten.

## 6. Der Kondensator

Die Analyse der Lade- und Entladevorgänge von Kondensatoren ermöglicht es, die Schüler an das Denken in Übergangszuständen heranzuführen, was eine Vorbereitung zum Verständnis der Vorgänge bei Reihenschaltungen darstellt. Die Grundidee hinter den Übergangszuständen ist dabei, dass sich die elektrischen Drücke und Elektronenströmungen zwar äußerst schnell im Stromkreis einstellen, der stationäre Gleichgewichtszustand (hier Endzustand genannt) jedoch nur schrittweise über sogenannte Zwischenzustände erreicht wird.

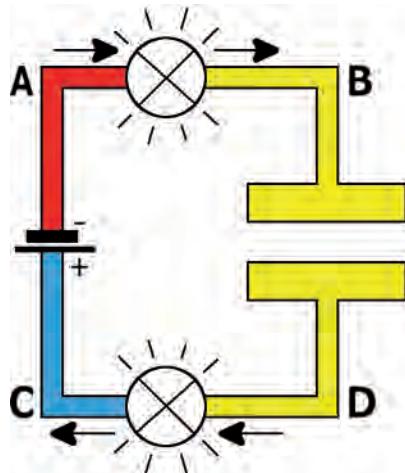


Abb. 6: Übergangszustand beim Laden eines Kondensators.

Die schrittweise Diskussion von Lade- und Entladevorgängen bei Kondensatoren mit Hilfe von Übergangszuständen eignet sich ferner in besonderer Weise dazu, den Schülern bewusst zu machen, dass Elektronenströmungen ausschließlich eine Folge von elektrischen Druckunterschieden sind. Wird wie in Abb. 6 jeweils ein passendes Lämpchen vor jede der beiden Kondensatorplatten geschaltet (z.B. ein Kondensator mit einer Kapazität von  $20.000 \mu\text{F}$  in Kombination mit zwei Lämpchen von  $6 \text{ V}$  und  $0.05 \text{ A}$ ), lässt sich gut beobachten, dass diese zunächst hell und dann immer schwächer leuchten, weil mit jedem Elektron, das durch die Lämpchen strömt, der an den Lämpchen anliegende elektrische Druckunterschied und damit der Antrieb der Elektronenströmung schwächer wird. Dass dabei auch das untere Lämpchen zeitgleich mit dem oberen anfängt zu leuchten, kann von den Schülern damit erklärt werden, dass sich auch in der unteren Kondensatorplatte bereits Elektronen befinden (Bereich D, gelb), die dann in Folge des elektrischen Unterdrucks im mit dem Pluspol verbundenen Leiterstück (Bereich C, blau) anfangen, durch das Lämpchen zu strömen. So kann insbesondere der weitverbreiteten Strom-aussendevorstellung begegnet werden, wonach die Batterie die einzige „Stromquelle“ in einem Stromkreis sei und aus dieser „Strom“ vom Minuspol ausgehend in den Stromkreis strömt – wie Öl, dass aus einem Fass ausläuft.

## 7. Die Reihenschaltung

Reihenschaltungen werden im Elektronengasmodell mit Hilfe der bereits erwähnten Übergangszustände analysiert. Wie in Abb. 7 an einer Reihenschaltung von vier identischen Lämpchen dargestellt, herrscht im Anfangszustand,

d.h. so lange der Stromkreis noch nicht mit der Batterie verbunden ist, in allen Leiterleitungen ein elektrischer Normaldruck (gelb). Sobald die Pole dann mit den Leitern verbunden werden, stellen sich zunächst ein elektrischer Überdruck (intensives Rot) im Leiterstück bis zum oberen Lämpchen und ein elektrischer Unterdruck (intensives Blau) im Leiterstück bis zum unteren Lämpchen ein. In den anderen Leiterstücken verändert sich der elektrische Druck zunächst noch nicht, da im Übergangszustand noch keine Elektronen durch die Lämpchen geflossen sind. Im nächsten Schritt strömen Elektronen in Folge der am oberen und unteren Lämpchen anliegenden Druckunterschiede durch die Lämpchen. Dies führt dazu, dass der Druck im oberen rechten Leiterabschnitt in Folge der einströmenden Elektronen ansteigt (blasses Rot), während er im unteren rechten Leiterabschnitt aufgrund der in Richtung Pluspol wegströmenden Elektronen absinkt (blasses Blau). Im mittleren rechten Leiterabschnitt bleibt der elektrische Normaldruck (gelb) bestehen, da in Folge der gleich großen elektrischen Druckunterschiede am mittleren oberen und mittleren unteren Lämpchen gleich viele Elektronen von oben einströmen wie Elektronen nach unten wegströmen. Im Modell nimmt mit zunehmender Anzahl an Widerständen im Stromkreis die Intensität der Elektronenströmung ab, da sich der von der Batterie erzeugte elektrische Druckunterschied auf mehr Widerstände aufteilen muss.

Anfangszustand    Übergangszustand    Endzustand

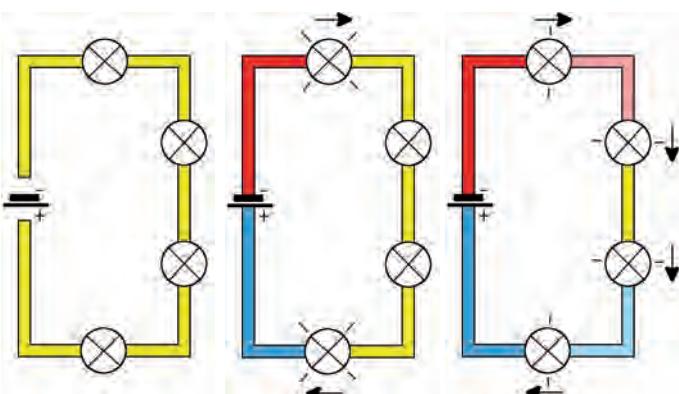


Abb. 7: Schrittweise Analyse einer Reihenschaltung von vier identischen Lämpchen mit Hilfe von Übergangszuständen.

Werden zwei Lämpchen mit unterschiedlichem Widerstand in Reihe geschaltet, so lassen sich auch hier die elektrischen Drücke und Elektronenströmungen mit Hilfe von Übergangszuständen herleiten (siehe Abb. 8). Im Anfangszustand herrscht überall im Stromkreis ein elektrischer Normaldruck (gelb), da noch keine Batterie angeschlossen ist. Nach Anschluss der Batterie herrscht im oberen Leiterabschnitt ein elektrischer Überdruck (rot) und im unteren Leiterabschnitt ein elektrischer Unterdruck (blau). Im mittleren Leiterabschnitt herrscht noch elektrischer Normaldruck (gelb), weil gedacht noch keine Elektronen durch die Lämpchen gestromt sind. Da nun an beiden Lämpchen die gleichen elektrischen Druckunterschiede anliegen, der Widerstand am oberen Lämpchen aber doppelt so groß ist wie am unteren, strömen weniger Elektronen von oben in den mittleren Leiterabschnitt rein als Elektronen durch das untere Lämpchen

mit dem geringeren Widerstand wegströmen. In Folge sinkt der elektrische Druck im mittleren Leiterabschnitt so lange (gelb → blasses Blau), bis der elektrische Druckunterschied über dem oberen Lämpchen so groß ist, dass die Intensität der Elektronenströmung durch beide Lämpchen exakt gleich groß ist. Da sich jetzt sowohl die elektrischen Drücke als auch die Elektronenströmungen nicht mehr ändern, ist der Endzustand erreicht.

Anfangszustand    Übergangszustand    Endzustand

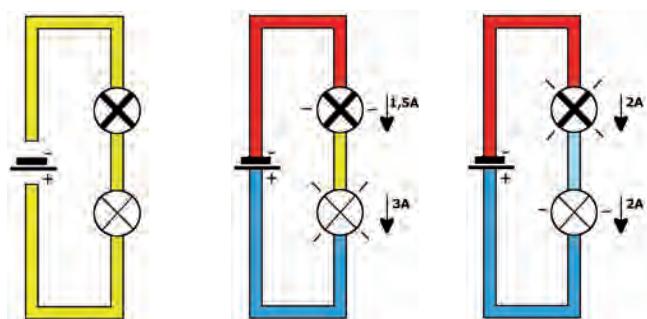


Abb. 8: Schrittweise Analyse einer Reihenschaltung von zwei Lämpchen mit unterschiedlichem Widerstand.

## 8. Messung und Berechnung von Stromstärke, Spannung und Widerstand

Nachdem bei den Schülern ein qualitatives Verständnis der grundlegenden Größen Spannung, Stromstärke und Widerstand aufgebaut wurde, werden diese dann mit Hilfe der Widerstandsdefinition  $R := U/I$  auch quantitativ in direkten Zusammenhang miteinander gebracht. Zur Bestimmung der Spannung und der Stromstärke werden daher zunächst die beiden Messgeräte Volt- und Ampermeter eingeführt und zur klaren optischen Abgrenzung vom restlichen Stromkreis dreidimensional dargestellt. Das Voltmeter ist dabei mit zwei „Fühler-Kabeln“ ausgestattet, mit deren Hilfe es die elektrischen Drücke in den Leiterabschnitten vor und nach einem Widerstand misst und so den jeweiligen elektrischen Druckunterschied bestimmt (siehe Abb. 9). Ab diesem Punkt wird ferner auf die bisher verwendete Darstellung breiter Leiterschläuche zu Gunsten der üblichen Leiterbahnen verzichtet.

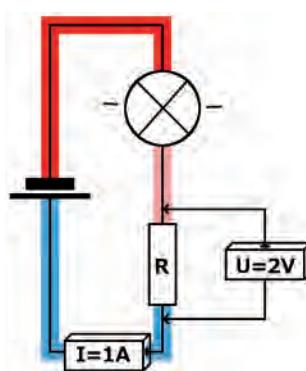


Abb. 9: Darstellung der Anschlussbedingungen von Volt- und Ampermetern in einem einfachen Stromkreis.

Entsprechend der Widerstandsdefinition  $R := U/I$  wird der so berechnete Widerstandswert dann im Modell interpretiert als der elektrische Druckunterschied, der nötig ist, um eine Elektronenströmung von 1 A durch den Widerstand zu treiben. Bei den meisten Widerständen steigt dieser Widerstandswert mit zunehmender Stromstärke an. Im Unterrichtskonzept wird das Ohm'sche Gesetz, d.h. die Konstanz des Widerstandwertes deshalb als Spezial- und nicht als Regelfall behandelt. Zum Schluss wird der den Schülern bereits bekannte Wirkzusammenhang, wonach die Spannung die Elektronenströmung kausal bewirkt und der Widerstand diese lediglich beeinflusst, wieder aufgegriffen, um ihn für Ohm'sche Widerstände in die quantifizierte Form  $I = U/R$  zu bringen (siehe Abb. 10). An dieser Stelle wird den Schülern auch mitgeteilt, dass die Intensität der Elektronenströmung üblicherweise „Stromstärke“ genannt wird.

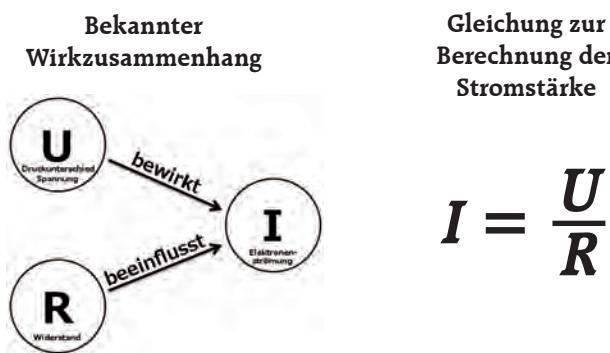


Abb. 10: Übergang vom qualitativen zum quantitativen Zusammenhang der Größen I, U und R.

## Bisherige Erfahrungen

In Einzelunterricht (sogenannte Teaching Experiments) mit neun Gymnasialschülern (sechste Schulstufe) wurde bereits untersucht, inwiefern Schülerinnen und Schüler das Elektronengasmodell akzeptieren und verstehen. Die Teaching Experiments hatten dabei einen Umfang von ca. drei Schulstunden und wurden ausschließlich mit Schülern durchgeführt, die bisher noch keinen Elektrizitätslehreunterricht bekommen hatten. Dabei zeigte sich, dass das Unterrichtskonzept von den Schülern angenommen wird und sie mit den Grundkonzepten hinter dem Elektronengasmodell wie der Elektrostatik sowie der Atom- und Luftdruckvorstellung keine nennenswerten Schwierigkeiten zu haben scheinen. Die anfängliche Einführung in die Elektrostatik bereitet den Schülern also ebenso wenige Probleme wie die Vorstellung von freibeweglichen, sich gegenseitig abstoßenden Elektronen und ortsfesten Atomrümpfen in Metallen. Auch hat sich gezeigt, dass die Schüler aufgrund ihrer Alltagserfahrungen beispielsweise mit Fahrradreifen bereits ein intuitives Luftdruckverständnis im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“ mitbringen, was für das hier vorgeschlagene Unterrichtskonzept völlig ausreichend ist. Die genutzten Schülerexperimente mit (Luft-)Spritzen zur Festigung und Vertiefung dieser Vorstellung wurden von den Schülern als hilfreich empfunden.

Besonders positiv hervorzuheben ist, dass allen Schülern der anschließende Transfer dieses für das Unterrichtskonzept zentralen Luftdruckverständnisses auf den nach dem Modell in elektrischen Stromkreisen herrschenden elektrischen Druck ohne Weiteres gelang. So entwickelten die meisten Schüler bereits nach kurzer Zeit ein grundlegendes, aber anschauliches Spannungskonzept und besaßen mit dem Verständnis der Spannung als Druckunterschied eine plausible Erklärung dafür, wie es überhaupt zu einem elektrischen Strom in Stromkreisen kommen kann. Im Gegensatz zu traditionellen Ansätzen wurde die Spannung also als Differenzgröße und Ursache des elektrischen Stroms wahrgenommen und nicht als Eigenschaft desselben.

Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass sich die grundlegenden Ansätze, Konzepte und Ideen hinter dem Elektronengasmodell als vielversprechend erwiesen haben und den Schülern in verhältnismäßig kurzer Zeit ein fundiertes Verständnis des Spannungsbegriffs vermittelt werden konnte. Vor dem Hintergrund, dass viele Schüler bei traditionellen Ansätzen auch nach der Sek I kein angemessenes Spannungskonzept besitzen, sondern vielmehr glauben, die Spannung sei die Stärke bzw. Kraft des Stromes [6], ist dies ein sehr positives und ermutigendes Ergebnis.

Als nächstes werden wir das Konzept in der Unterrichtspraxis evaluieren und suchen hierzu noch Kolleginnen und Kollegen, die mitmachen. Ein vollständiges Paket von Unterrichtsmaterialien inkl. Arbeitsblättern, Merkblättern, Overheadfolien und einem dazu passenden Lehrerleitfaden sowie weiteren Anregungen werden selbstverständlich von uns kostenfrei bereitgestellt. Wer sich vorstellen kann, die Elektrizitätslehre einmal mit Hilfe des Elektronengasmodells zu unterrichten, ist herzlich eingeladen, mit uns in Kontakt zu treten. Für die Zukunft ist ferner geplant, das Unterrichtskonzept inkl. aller Unterrichtsmaterialien auch online zur Verfügung zu stellen.

## Literatur

- [1] Rhöneck, C. v. (1986): Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand, Naturwissenschaften im Unterricht-Physik, 34 (1986) 13, S. 108–112.
- [2] Herrmann, F.; Schmälzle, P. (1984): Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I. In: MNU 37 (1984) 8, S. 476–482.
- [3] Schwedes, H.; Dudeck, W.-G.; Seibel, C. (1995): Elektrizitätslehre mit Wassermodellen, Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 44 (1995) 2, S. 28–36.
- [4] Gleixner, C. (1998): Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial, Dissertation LMU München.
- [5] Burde, J.-P.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2014): Das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I. In: PhyDid-B – Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Frankfurt 2014, [www.phydid.de](http://www.phydid.de)
- [6] Rhöneck, C. v.; Völker, B. (1984): Vorstellungen vom Stromkreis und ihr Einfluss auf den Lernprozess. Der Physikunterricht 18 (1984) 2, S. 4–16.

# Der Quantenradierer

## Quantentheorie in der Schule

### Peter Schmid, Nikolaus Unterrainer

In der Aprilausgabe 2007 der Zeitschrift Scientific American [1] wurde unter dem etwas plakativen Titel „A Do-It-Yourself Quantum Eraser“ ein einfacher Versuch vorgestellt, wie in einem Doppelspaltversuch mit polarisiertem Laserlicht Quanteneigenschaften demonstriert werden können.

Nach längerer Beschäftigung mit diesem Versuch kamen wir zur Überzeugung, dass er eine ausgezeichnete Einführung in die Problematik der Quantenphysik auf Sekundarstufenniveau bietet.

Quantenphysik ist die grundlegende Theorie für den Aufbau der Materie und deren chemischen Eigenschaften. Einige Quantenphänomene sind heute Teil der Alltagsphysik (Laser, Supraleitung), andere versprechen neue Anwendungen (Quantenkryptografie, Quantencomputing). Quantenphysik wurde daher zu einem verpflichtenden Teil des Physikcurriculums der Sekundarstufe. Nun ist es für die meisten Bereiche der modernen Physik und besonders für die Quantenphysik schwierig, die theoretischen Aussagen mit Experimenten zu veranschaulichen, die mit Schulmitteln durchgeführt werden können. Gerade der Quantenradierer ist jedoch mit einfachen Mitteln und mit aktiver Beteiligung der Schüler aufzubauen und führt unmittelbar in die Grundproblematik der Quantenmechanik ein.

In der klassischen Physik spielt die Unterscheidung zwischen Teilchen und Wellen eine fundamentale Rolle. Beugungs- und Interferenzerscheinungen „bewiesen“ die Wellennatur des Lichtes, die durch die Maxwell-Gleichungen als elektromagnetisches Phänomen ihre „endgültige“ Erklärung fand. Materielle Objekte sollten sich hingegen nach den Gesetzen der klassischen Mechanik bewegen, in der Interferenzerscheinungen ausgeschlossen sind. Der Unterschied zwischen Teilchen- und Welleneigenschaften kann im Verhalten von Objekten beim Durchgang eines Strahls durch eine Lochblende oder einen Spalt demonstriert werden. Noch eindrucksvoller ist das Verhalten der Objekte beim Doppelspaltversuch. Während klassische Teilchen die beiden Spalte am Beobachtungsschirm getreu abbilden, erzeugt Licht für jeden Spalt ein Beugungsbild. Das Beugungsbild des Doppelspaltes unterscheidet sich aber noch einmal ganz wesentlich von der Summe der Beugungsbilder der Einzelspalte.

Dr. Peter Schmid, Experimentalphysiker, war am CERN in leitender Stellung tätig. E-Mail: Uandpschmid@aon.at

Mag. Klaus Unterrainer unterrichtet am BG Salzburg/Zaunergasse und ist Lehrbeauftragter für Physikdidaktik an der School of Education/Universität Salzburg. E-Mail: nikolausunterrainer@yahoo.de

Eine grundlegende Erkenntnis der Quantenphysik ist die Aufhebung des klassischen Gegensatzes von Teilchen- und Wellenverhalten für Mikroobjekte. An Stelle des Gegensatzes tritt die „Dualität“, d.h., dass sich Mikroobjekte je nach experimentellem Aufbau eher wie Teilchen oder wie Wellen verhalten.

Der Quantenradierer ermöglicht eine Veranschaulichung der Teilchen-Welle Dualität und damit des Konzeptes eines „Quantenobjektes“. Er zeigt auch die Abhängigkeit der Messergebnisse vom konkreten Versuchsaufbau. Die Verwendung polarisierten Laserlichts und verschiedene Anordnungen von Polarisationsfiltern zwischen Lichtquelle, Doppelspalt und Beobachtungsschirm bilden den „Versuchsraum“.

## Polarisation und ihre Deutung als elektromagnetische Eigenschaft

Der Aufbau der Versuche und die Logik der Interpretation sind in der Literatur ausführlich dargestellt [2]. Eine bei der Fortbildungswöche 2015 verwendete Powerpoint-Präsentation ist auf der Website von Plus Lucis zu finden [3]. In diesem Artikel sollen daher die drei Stufen des Versuchsaufbaus nur schematisch dargestellt werden, um die Ergebnisse und ihre Bedeutung im Rahmen der Quantenphysik besprechen zu können.

**Versuch 1:** Streuung des polarisierten Laserlichtes an einem Draht.



Abb. 1: Beugung am Draht

Bei geeigneten Durchmessern des Laserstrahls und des Drahtes entspricht dieser Aufbau einem „Doppelspaltversuch des armen Mannes“: Die beiden durch den Draht nicht blockierten (Zylinder-)Segmente des Strahls interferieren hinter dem Draht genau so, wie Licht einer ausgedehnten

ebenen Welle an einem Doppelspalt. Die besondere Segmentform in der Drahtrichtung ist für die Beugung normal dazu irrelevant. Das Beugungsmuster ist von der Ausrichtung der Polarisation des Laserstrahls relativ zur Richtung des Drahtes unabhängig.

**Versuch 2:** Anbringen von Polarisationsfiltern an beiden Seiten des Drahtes (in der Drahtebene).

**Versuch 2a:** Gleiche Orientierung der Polarisationsfilter auf beiden Seiten des Drahtes.

**Ergebnis:** Das Beugungsmuster am Schirm ist gleich wie in Versuch 1, die Intensität hängt jedoch vom Winkel zwischen der Polarisationsrichtung des Strahls und jener der Filter ab: maximale Intensität bei paralleler Ausrichtung, völlige Auslöschung bei aufeinander senkrechter Ausrichtung.

Das Licht hinter der Drahtebene ist in Richtung der Filter polarisiert, unabhängig von der Polarisationsebene des ursprünglichen Laserlichtes. Dies sollte mit einem weiteren Polarisationsfilter hinter der Drahtebene nachgeprüft werden. Die Eigenschaft des Lichtes wird also durch die Versuchsanordnung verändert. Es ist wichtig, an dieser Stelle das Versuchsergebnis hinsichtlich der Polarisation des durchgelassenen Lichtes durch Vektorprojektion (in der Ebene) zu erklären. Diese Vektorprojektionen sind für die Erklärung der weiteren Versuche wesentlich.

**Versuch 2b:** Orientierung der Polarisationsfilter in der Drahtebene in aufeinander normalen Richtungen. Orientierung der Laserpolarisation in  $45^\circ$  zu diesen beiden Richtungen („diagonal“).

**Ergebnis:** Das Beugungsmuster am Schirm verschwindet; der Schirm ist gleichmäßig ausgeleuchtet.

**Erklärung:** Das Licht der an den beiden Seiten des Drahtes durchgelassenen Komponenten hat aufeinander normal stehende Polarisationen. Die Lichtintensität am Schirm ist einfach die Summe der Intensitäten der beiden Komponenten ohne Möglichkeit einer Interferenz.

**Versuch 3:** Versuchsanordnung wie in Versuch 2b; zusätzliche Polarisationsfilter in einer zweiten Ebene zwischen Draht und Schirm.

**Versuch 3a:** Hat das zusätzliche Polarisationsfilter die Orientierung der Laserpolarisation („diagonal“), so erscheint wieder das Beugungsmuster des Versuchs 1, natürlich mit abgeschwächter Intensität.

**Erklärung:** Aus den beiden Lichtanteilen, die rechts und links vom Draht durchgelassen werden und aufeinander normale Polarisation haben, wird jeweils die Komponente in Diagonalrichtung herausgefiltert und so können diese hinter dem zweiten Filter wieder interferieren.

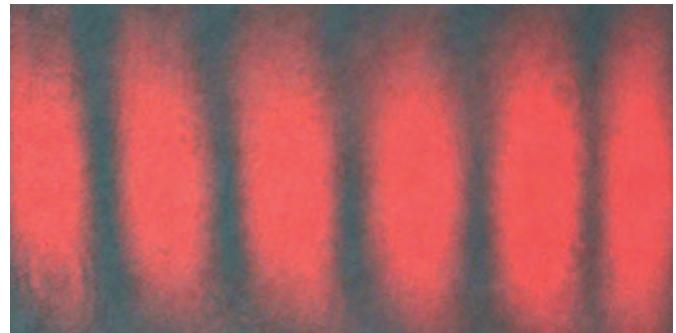


Abb. 2: Quantenradierer mit Diagonalfilter

**Versuch 3b:** Hat das zusätzliche Polarisationsfilter eine Orientierung normal zur Laserpolarisation („antidiagonal“), so ergibt sich ein Beugungsmuster, dessen Maxima genau auf die Minima des Musters des Versuchs 3a fallen und umgekehrt.

**Erklärung:** Aus den beiden normal aufeinander polarisierten Lichtanteilen werden die Komponenten in der „Antidiagonalrichtung“ herausgefiltert, die wieder interferieren können, wobei allerdings eine Komponente invers ausgerichtet ist. In diesem Fall ist die Polarisation des Lichtes nach dem zweiten Filter normal zur Polarisation des ursprünglichen Laserlichts. Der Versuchsaufbau erzeugt einen Zustand des Lichts, der im ursprünglichen Laserlicht nicht vorhanden ist. Die Filter selektieren also nicht einfach etwas Vorhandenes, sondern sie modifizieren den Zustand.

Durch gleichzeitige Verwendung von entgegengesetzt orientierten Filtern im oberen und unteren Lichtbereich ist es möglich, die beiden versetzten Beugungsmuster der Versuche 3a und 3b gleichzeitig sichtbar zu machen.

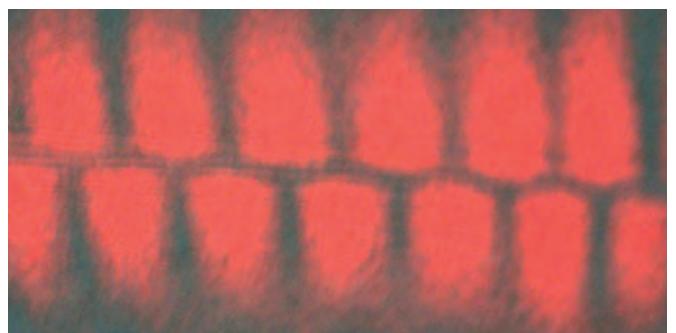


Abb. 3: Quantenradierer mit Diagonal- und Antidiagonalfilter

## Deutung der Versuche in der Quantentheorie

Alle Versuche ließen sich durch die Beugungs- und Polarisations-eigenschaften des Lichtes als elektromagnetische Welle vollständig erklären. Wie sollten sie etwas über Quantenphysik veranschaulichen können?

Zunächst ist festzustellen, dass materielle Mikroteilchen (Elektronen, Protonen, Neutronen, ...) am Doppelspalt das-selbe Streu- und Interferenzverhalten zeigen wie Licht. Für

Elektronen wurde dies experimentell zum ersten Mal 1961 von C. Jönsson gezeigt [4]. Diese Versuche sind allerdings wegen ihrer apparativen Komplexität an Schulen nicht durchführbar. Wie bereits erwähnt, braucht es den Übergang von der klassischen Mechanik zur Quantenmechanik, um dieses Verhalten beschreiben zu können. Durch „glückliche Umstände“ (siehe den nächsten Abschnitt) lassen sich nun die oben beschriebenen Versuche auch als quantenmechanische Ausbreitung von **Photonen** interpretieren, womit eine „natürliche“ Brücke zwischen klassischer Elektrodynamik und der Quantentheorie hergestellt wird.

In der Interpretation des Laserlichts als Photonenstrahl ist die Streuung am Spalt eine Folge der Heisenbergschen Unschärferelation. Je enger der Spalt, d.h. je genauer der Ort normal zur Spaltrichtung bestimmt wird, umso größer wird die Impulsunschärfe in dieser Richtung (ausgehend von 0 in der einlaufenden ebenen Welle zu den die Nebenmaxima bildenden abgelenkten Photonen). Die Möglichkeit der Interferenz der Beiträge im beschriebenen Experiment ergibt sich aus der kohärenten Überlagerung der Wellenfunktionen der beiden Teilstrahlen. Diese Kohärenz ist allerdings nur dann gegeben, wenn ungemessen bleibt, welchen Weg die einzelnen Photonen gehen.

Die in Abschnitt 2 beschriebenen Versuche lassen sich nun quantenmechanisch folgendermaßen deuten:

**Versuch 1:** Beugungsmuster durch quantenmechanische Interferenz der von beiden Spalten auslaufenden Wellenpakete.

**Versuch 2a:** Keine Veränderung gegenüber Versuch 1, da parallele Polarisationsfilter keine Weginformation liefern.

**Versuch 2b:** Bei aufeinander normal stehenden Polarisationsrichtungen der beiden Filter in der Drahtebene kann man für jedes Photon mit Hilfe seiner Polarisation entscheiden, ob es rechts oder links vom Draht vorbei ging. Nach den Regeln der Quantenmechanik zerstört diese Weginformation die Möglichkeit der Interferenz der beiden Wellenpakete.

**Versuch 3a und 3b:** Zusätzliche Filter mit Polarisationsrichtungen in  $45^\circ$  (diagonal oder antidiagonal) relativ zu den Filtern in der Drahtebene zerstören die durch die Filter in der Drahtebene gewonnene Information vollständig, wodurch die Interferenz wieder möglich wird. (Die Information wird „ausradiert“.)

Das für die quantentheoretische Interpretation der Versuche entscheidende Charakteristikum ist also die Kombination des Beugungsversuchs mit der Möglichkeit der Wegbestimmung durch die Polarisationsfilter. Uns sind keine weiteren Versuche bekannt, in denen die für quantentheoretische Versuche notwendigen Bedingungen in so einfacher Weise realisiert werden können.

## Ergänzende Bemerkungen

Die folgenden Bemerkungen sind für eine Durchführung der Versuche in der Schule in keiner Weise notwendig. Sie sind hier angeführt, um die Bedeutung der Versuche in einem weiteren Kontext der Physik zu beleuchten.

Die im vorigen Abschnitt erwähnten „günstigen Umstände“ bestehen darin, dass die Versuchsergebnisse mit zwei völlig verschiedenen Theorien vollständig und präzise beschrieben werden können. Die Möglichkeit gleichwertiger Theorien unter Zugrundelegung ontologisch völlig verschiedener Objekte ist wissenschaftstheoretisch interessant. Es zeigt, dass auch erfolgreiche Theorien keineswegs die Natur der Objekte „endgültig“ festlegen. Die theoretisch eingeführten Objekte bleiben immer zur Beschreibung experimenteller Daten konstruierte Begriffe [5].

Die unterschiedliche Erklärung der Interferenz in den beiden Theorien wurde oben bereits beschrieben. Die für die Weginformation wichtige Polarisation entspricht in der elektromagnetischen Theorie des Lichtes einer in bestimmter Weise eingeschränkten Schwingungsform des elektrischen Feldvektors. In der Photonentheorie ist Polarisation ein charakteristischer Zustand der quantenmechanischen Variable „Spin“. Diese für alle Quantenobjekte definierte Variable hat für Photonen den Betrag 1, woraus im Allgemeinen drei mögliche Zustände folgen. Für masselose Photonen reduziert sich die Anzahl möglicher Zustände allerdings auf zwei, in voller Analogie zu den zwei möglichen Komponenten des Polarisationsvektors im 3-dimensionalen Raum der Elektrodynamik.

Die in der Diskussion der Veränderung der Polarisation in den verschiedenen Stufen der Versuche verwendete Vektorprojektion ist eine nicht nur formal, sondern auch inhaltlich gültige Analogie zu der in der Quantentheorie verwendeten Vektoralgebra im Hilbertraum zur Beschreibung der quantenmechanischen Zustände und der bei Messungen zu erwartenden Wahrscheinlichkeiten. Dies kann am einfachsten in der Beschreibung möglicher Spinzustände in niedrig-dimensionalen Hilberträumen gezeigt werden.

Selbstverständlich ist die Gleichwertigkeit der Theorien auf den vorgestellten Versuchsaufbau beschränkt. Die Quantentheorie ist die wesentlich allgemeinere Theorie, die in der Form der Quantenelektrodynamik Phänomene beschreibt, die die klassische Elektrodynamik nicht erklären kann (z.B. die Verschränkung in Mehrphotonensystemen). Im konkreten Versuchsaufbau erklärt die Photonentheorie das Auftreten der Beugungs- und Interferenzmuster statistisch auch dann, wenn zeitlich aufgelöst jeweils nur ein Photon die Lichtquelle verlässt und nach dem Durchgang durch die Versuchsanordnung den Schirm trifft. Die Interferenz entsteht also nicht durch eine Wechselwirkung mehrerer Photonen untereinander; jedes einzelne Photon „interferiert mit sich selbst“. Eine Beschreibung durch elektromagnetische Felder ist hier nicht mehr sinnvoll; das Streuverhalten folgt aus der Entwicklung der Wellenfunktion des Quantenobjektes.

Zuletzt soll noch erwähnt werden, dass das Löschen der in einem Teil eines Versuchs gewonnenen Information durch weitere Elemente in wesentlich komplexeren Versuchsaufbauten für verschiedene quantenmechanische Variablen durchgeführt wurde. Insofern sind die hier vorgestellten Versuche die einfachste Realisierung einer Klasse von „Quantenradierern“ [6].

## Referenzen

- [1] R. Hillmer, P. Kwiat: „A Do-It-Yourself Quantum Eraser“, Scientific American, 14. April, 2007; Spektrum der Wissenschaft, Juli 2007, S. 68
- [2] [http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenradierer\\_und\\_darin\\_an gegebene\\_Ref erenzen](http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenradierer_und_darin_an gegebene_Ref erenzen); abgefragt März 2015.
- [3] [http://pluslucis.univie.ac.at/FBW0/FBW2015/Material/index\\_Material\\_2015.html](http://pluslucis.univie.ac.at/FBW0/FBW2015/Material/index_Material_2015.html)
- [4] C. Jönsson: „Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten“, Zeitschrift für Physik, Nr. 161/4 (1961), S. 454
- [5] D. Ertl: „Sechs Kernaspekte der Natur der Naturwissenschaft“, Plus Lucis 1-2/2013, S. 16
- [6] [http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenradierer#Experimentelle\\_Realisierung](http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenradierer#Experimentelle_Realisierung); abgefragt März 2015.

Wir danken Frau Priv.-Doz. Dr. Beatrix Hiesmayr für wertvolle Kommentare und Ergänzungen.

# Experimentierbox für die mündliche Matura

Michael Schwarzer

## Grundlagen

Die Durchführung der neuen Reifeprüfung wird im Bundesgesetzblatt vom 30. Mai 2012, 174. Prüfungsordnung AHS im Paragraph §29 geregelt [1].

*§ 29. (1) Im Rahmen der mündlichen Teilprüfung ist jeder Prüfungskandidatin und jedem Prüfungskandidaten im gewählten Themenbereich eine kompetenzorientierte Aufgabenstellung, welche in voneinander unabhängige Aufgaben mit Anforderungen in den Bereichen der Reproduktions- und Transferleistungen sowie der Reflexion und Problemlösung gegliedert sein kann, schriftlich vorzulegen [1].* Der Begriff „kompetenzorientiert“ wird dabei nicht näher beschrieben. Dieser wird im Leitfaden „Die kompetenzorientierte Reifeprüfung aus Physik“ [2] definiert und erläutert. Dabei werden die drei Handlungskompetenzen Wissen organisieren, Erkenntnisse gewinnen und Schlüsse ziehen beschrieben. Für die Durchführung von Experimenten im Rahmen der Matura ist der Bereich Erkenntnisse gewinnen wichtig. Dort heißt es in Punkt 3: „Ich kann zu Fragestellungen eine passende Untersuchung oder ein Experiment planen, durchführen und protokollieren.“ Dadurch wird der Einsatz von Experimenten bei der mündlichen Reifeprüfung impliziert.

Ein Experiment stellt auch immer eine kompetenzorientierte Aufgabe im Sinne der Anforderungsbereiche dar. Experimente, die mit bekannten Techniken arbeiten, sind ein Stück weit eine Reproduktion. Die Schülerin / der Schüler muss bekanntes Wissen über experimentelle Techniken reproduzieren. Eine leichte Veränderung der Aufgabenstellung erfordert vom Schüler Transferleistung und eine Diskussion der Ergebnisse bzw. möglicher Messfehler gehört eindeutig zur Reflexion.

## Durchführung

Bei der Vorbereitungszeit wird im Gesetz nur eine Mindestdauer vorgeschrieben:

*Zur Vorbereitung auf jede mündliche Teilprüfung ist eine im Hinblick auf das Prüfungsgebiet und die Aufgabenstellung angemessene Frist von mindestens 20 Minuten [...]. In Gegenständen der Gegenstandsgruppe der NAWI, wo experimentelle Aufgabenstellungen einfließen sollen [...] sollte aufgrund dieser Bestimmung die Vorbereitungszeit angemessen erhöht werden können. [3]*

Das größte Problem bei der Durchführung von Experimenten ist die Ziehung der Fragen. Die Lehrkraft muss alle

Mag. Dr. Michael Schwarzer unterrichtet Physik am BRG Reutte.  
E-Mail: m.schwarzer@tsn.at

Experimente des Fragenpools so weit vorbereiten, dass das gewählte Experiment sofort bereitgestellt werden kann. Dabei kann man Demonstrations-, bzw. Freihandexperimente, Applets usw. einsetzen. Die einfachste Variante ist die Erstellung einer Materialsammlung (z.B. NTL-Baukästen), aus der das gewünschte Experiment aufgebaut werden kann. Die im Artikel vorgestellte Materialsammlung kann auch als Vorbereitungs- und Übungsbox eingesetzt werden. Damit werden zwei Probleme mit einer Box gelöst.

Wenn man für Aufgaben mit experimentellem Anteil eine größere Vorbereitungszeit festlegt, wird die je nach Ziehung unterschiedliche Vorbereitungszeit zum Problem. An unserer Schule hat man sich auf 30 Minuten für alle Prüfungen geeinigt. Das Experiment darf nicht länger dauern und für eine reine Theoriefrage kann man etwas mehr Quellen oder Fragestellungen einplanen. Die Experimente dauern in der Vorbereitung maximal 15 Minuten und sind meist quantitativ. Damit das Experiment nicht zu lange dauert, kann der Lehrer einen Teil vorher aufbauen.

## Die Box

### Entstehung

In den letzten Jahren wurden mehrere Varianten der Box ausprobiert. Am Anfang gab es nur wenige genau zum Stoff passende Versuche rund um das Multimeter, die dann schrittweise erweitert wurden. Aufbauend auf den Erfahrungen wurde letztes Jahr ein Gesamtkonzept für die Hausübungsbox entwickelt. Dabei wurden alle Gebiete (Mechanik, Optik, Wärme und Elektrizität) und alle für Experimente wichtigen Kompetenzen in der Box berücksichtigt. Zu den experimentellen Kompetenzen gehören neben der korrekten Verwendung eines Multimeters, der genauen Bestimmung von Längen und Zeiten auch die Auswertung mit Hilfe von Diagrammen, Mittelwerten und die Erstellung von Protokollen. Im Schuljahr 2014/15 wurde die Box für die mündliche Matura adaptiert. Alle Versuche wurden überarbeitet und um ein paar Versuchsvorschläge ohne Anleitung erweitert.

### Einsatz

Die Box wird in der Schularbeitengruppe ab der 7. Klasse als Hausübungsbox (Abb. 1) und bei Schularbeiten eingesetzt. Bei jeder Schularbeit und bei der schriftlichen Matura gibt es ein Experiment im Ausmaß eines Viertels der Prüfung. Bei der vierstündigen Matura dauert das Experiment mit Auswertung eine Stunde.

Typische Versuche sind Spektrallinien von Dioden, Abkühlung von Wasser, elektrische Leistung und Kennlinien von Bauteilen, Pendel. Die Versuche werden vor der Prüfung auf



Abb. 1: Hausübungsbox in der derzeitigen Form

dem Schülertisch oder auf einem Rollwagen bereitgestellt. Bei manchen Versuchen wird auch die HÜ-Box von den Schülern/innen mitgebracht und verwendet. Die Schülerin / der Schüler kann sich mit Hilfe der Versuche der Box zu Hause auf Prüfungen vorbereiten. Der Lehrer kontrolliert die Protokolle und gibt gezielt Hausübungen. Natürlich werden parallel dazu auch Experimente im Unterricht eingesetzt. Da die Schule die Bauteile für die HÜ-Box auch für den Unterricht angeschafft hat, kann im Unterricht mit denselben Materialien geübt werden. Diese Materialien dienen auch als Ersatz für die Boxen.

Maturanten verwenden die Box als Vorbereitung für die mündliche Matura. Die Finanzierung läuft über eine Kauktion, die momentan 25 EUR beträgt. Das System funktioniert sehr gut, da die Schüler/innen besser auf die Box aufpassen und sich am Ende der achten Klasse selbst um die Rückgabe kümmern. Bei der Matura (Abb. 2) werden meist Schulgeräte eingesetzt. Statt einer Potentiometerschaltung



Abb. 2: Ein Schüler misst bei der schriftlichen Matura die Leistung einer Solarzelle.

wird ein Netzgerät mit variabler Spannung verwendet. Wir verwenden auch bei den Prüfungen das billige Multimeter aus der HÜ-Box, da die Schüler/innen den Umgang mit diesem Gerät gewohnt sind. Im Rahmen der Prüfung führt die Kandidatin / der Kandidat den Versuch nur teilweise durch und erklärt die Vorgangsweise.

## Inhalt

Die Box enthält 15 Versuche aus allen Bereichen der Physik: Dichtemessung, Gitterbeugung Pendelschwingung, Brennweite einer Linse, Abkühlung von Wasser, Stromstärke und Spannung, Kennlinie einer Glühlampe, u.s.w.

Für diese Versuche gibt es eine genaue Anleitung. Vorschläge für weitere Versuche finden sich in der Anleitung auf [4].

## Erfahrungen

Die Evaluationen im Rahmen von IMST zeigten, dass die Schüler/innen sehr froh sind, eine Box zum Üben zu haben [5]. Die Versuche aus der Box werden immer wieder für die Wiederholung bestimmter Techniken verwendet. Inzwischen setzen alle Physiklehrer der Schule die Box in der Schularbeitengruppe ein. Schüler/innen wissen also bei der Wahl zwischen Darstellender Geometrie und Biologie/Physik schon, dass sie Versuche durchführen müssen. Ein Ergebnis der Evaluation ist, dass Mädchen mehr Angst haben, etwas kaputt zu machen, und Jungs weniger üben.

Bereits bei der ersten gezogenen Frage an unserer Schule wurde ein Experiment gezogen. Die Schülerin musste die Kenndaten einer Solarzelle vermessen und dabei die Verwendung des Multimeters erklären. Die Kandidatin erledigte die Aufgabe mit großer experimenteller Sicherheit. Sie konnte auch über das Multimeter reflektieren und die Genauigkeit der Messergebnisse analysieren.

## Ausblick

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass man bei den Geräten nicht sparen sollte. Besser legt man am Start etwas mehr Geld aus und verlangt etwas mehr Kaution. Mit billigen Geräten macht nämlich das Experimentieren weniger Spaß. Die Box wird an unserer Schule mit besseren Geräten ausgestattet. Für die variable Spannungsquelle setzen wir gelötete Potentiometer ein. Im nächsten Schuljahr wird die Box um eine paar Smartphone-Experimente erweitert. Dabei sollen eine Stoppuhr, ein Beschleunigungsmesser und ein Videoanalyseprogramm verwendet werden.

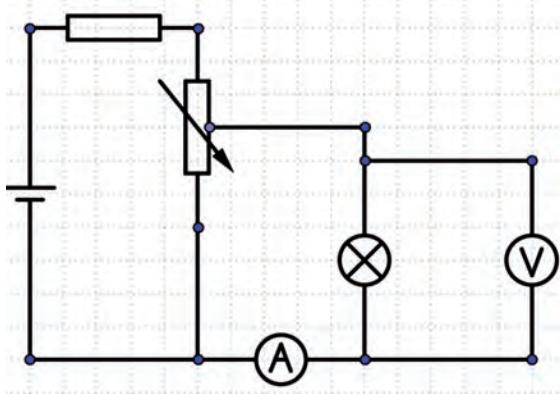
## Literatur

- [1] BUNDESGESETZBLATT FÜR DIE REPUBLIK ÖSTERREICH, Jahrgang 2012, ausgegeben am 30. Mai 2012, Teil II; 174. Verordnung der Bundesministerin für Unterricht, Kunst und Kultur über die Reifeprüfung in den allgemein bildenden höheren Schulen (Prüfungsordnung AHS)
- [2] BMUKK 2012: Die kompetenzorientierte Reifeprüfung aus Physik; Herausgeber und Verleger: Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur, 1010 Wien
- [3] BMUKK2013: <https://www.bmbf.gv.at/schulen/unterricht/ba/reifepruefung.html> (15.8.2015)
- [4] <http://recc.tsn.at/content/experimentierbox> (15.7.2015)
- [5] SCHWARZER Michael, TSCHAUKO Otto: Experimente bei der mündlichen Physikmatura (ID1155), IMST-Projektbericht 2014.

# HÜ-Box – Kennlinie einer Glühlampe

Material: 4,5 V Kompaktbatterie, Multimeter, Kabel, Potentiometer, Glühlampe (12 V, 2 W)

## Aufbau:



## Durchführung:

Erstelle einen Schaltkreis nach obigem Schaltplan. Variiere die Einstellungen des Potentiometers und miss jeweils die an der Glühbirne anliegende Spannung U und die Stromstärke I (siehe Schaltplan).

Trage die so gewonnenen Messwerte in die Tabelle ein und erstelle die Kennlinie der Glühlampe im U-I-Diagramm.

## Messwerte:

U [V]					
I [A]					

## Auswertung:



# HÜ-Box – Bestell-Liste

Art.Nr	Artikel	Firma (Beispiel)	Preis
	Maßband	Aus & Raus	0,99 €
	Kugelschreiber	Aus & Raus	1 €
	Lineal	Aus & Raus	0,15 €
	Gummischnur	Aus & Raus	1 €/25 m
	Teelicht	Aus & Raus	2 €/100 Stück
	Schnapsglas	Aus & Raus	5 €/50 Stück
839096	Linse f = 106 mm	Opitec	1,40 €
309.0ML	Linse f = 170 mm	Astromedia	1,40 €
275.GFB	Goethebrille	Astromedia	2,20 €
500622-62	NTC	Conrad	0,42 €
405175-62	Widerstände 220 Ohm	Conrad	0,11 €
418536-62	Widerstand 220 kOhm	Conrad	0,13 €
614386-62	Batterie	Conrad	2,45 €
100853-62	Kabel	Conrad	0,54 €
445113-62	Potentiometer 470 Ohm	Conrad	2,09 €
445112-62	Kondensator 1000 µF	Conrad	0,12 €
184543-62	Diode	Conrad	0,08 €
209448	Multimeter	Opitec	12,19 €
	Elektroden	EIGENBAU	
101287-62	Thermometer	Conrad	2,84 €

# Anwendung des Maschensatzes bei einer Photovoltaikzelle

Axel Donges

## Kurzfassung

Es wird mit Hilfe des Maschensatzes gezeigt, dass die Spannung zwischen Anode und Kathode einer Photovoltaikzelle i.d.R. kleiner ist als die angelegte Spannung. Die Konsequenzen für den bekannten Gegenspannungsversuch (Bestimmung der Planck-Konstante) werden aufgezeigt

## Einleitung

Die experimentelle Bestimmung der Planck-Konstanten  $h$  mit Hilfe einer Photovoltaikzelle gehört zu den klassischen Versuchen der Schul- und Hochschulphysik. Bei diesem Versuch bestrahlt wird die Kathode einer Photovoltaikzelle mit Licht unterschiedlicher Frequenzen  $f$  bestrahlt und die angelegte Gegenspannung  $U < 0$  zwischen Anode und Kathode so lange variiert, bis der Fotostrom  $I$  gerade verschwindet [1]. Wird die positive Spannung  $-U_{I=0}$ , d.h. bis auf das Vorzeichen diejenige Spannung  $U$ , bei der der Fotostrom gerade verschwindet, über  $f$  aufgetragen, ergibt sich eine Gerade mit der Steigung  $h/e$ .

$$-U_{I=0} = (h/e)f - W_A/e \quad (1)$$

Hierbei sind  $h$  die Planck-Konstante,  $e$  die Elementarladung und  $W_A$  die Elektronenaustrittsarbeiten des Anodenmaterials. Die Gerade (1) schneidet die Ordinate bei  $-W_A/e$  und die Abszisse bei  $W_A/h$  [2].

In vielen Lehrbüchern der Schul- und Hochschulphysik wird dieser Sachverhalt falsch dargestellt. In Gleichung (1) wird oft – statt der Austrittsarbeits  $W_A$  des Anodenmaterials – die Austrittsarbeits  $W_K$  des Kathodenmaterials angegeben. Ursächlich für diesen Fehler ist die Nichtberücksichtigung von Kontaktspannungen.

## Kontaktspannung

Werden zwei unterschiedliche Metalle I und II in Kontakt gebracht, so lädt sich das Metall mit der geringeren Elektronenaustrittsarbeits positiv, das andere negativ auf [3]. An der Kontaktfläche zwischen den beiden Metallen tritt daher eine Kontaktspannung  $U_{I,II}$  auf. Für sie gilt [4]

$$U_{I,II} = (W_{II} - W_I)/e. \quad (2)$$

Prof. Dr. Axel Donges unterrichtet Physik an der Fachhochschule und Berufskolleg Naturwissenschaftlich-Technische Akademie Isny/Allgäu.

Hierbei sind  $W_I$  und  $W_{II}$  die Elektronenaustrittsarbeiten der beiden Metalle.

## Spannungsabfall zwischen Anode und Kathode

Wir betrachten eine Photovoltaikzelle, deren Anode (A) und Kathode (K) aus zwei unterschiedlichen Metallen besteht. Anode und Kathode sind mit Leitungen, die aus einem dritten Metall (L) bestehen, mit einer Konstantspannungsquelle verbunden (siehe Abb. 1). Die angelegte Spannung  $U$  teilt sich nach dem Maschensatz wie folgt aus:

$$U = U_{LA} + U_B + U_{KL}. \quad (3)$$

Hierbei sind  $U_{LA}$  und  $U_{KL}$  die Kontaktspannungen zwischen dem Leiter- und Anodenmaterial bzw. dem Kathoden- und Leitermaterial.  $U_B$  ist die Spannung zwischen Anode und Kathode. Die Kontaktspannungen lassen sich mit Hilfe der Elektronenaustrittsarbeiten ( $W_L$ ,  $W_A$ ,  $W_K$ ) der drei Materialien berechnen.

$$U_{LA} = (W_A - W_L)/e \quad (4)$$

$$U_{KL} = (W_L - W_K)/e \quad (5)$$

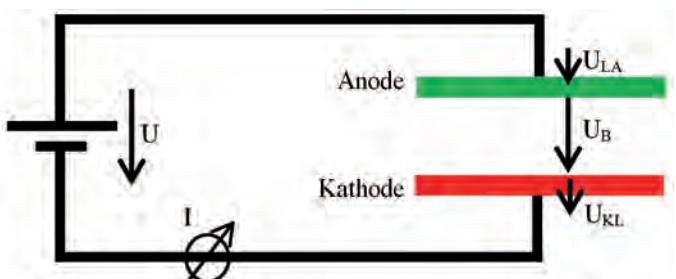


Abb. 1: Schaltbild einer Photovoltaikzelle

Aus (3) bis (5) folgt unmittelbar

$$U_B = U + U_{AK} \quad (6)$$

mit

$$U_{AK} = (W_K - W_A)/e. \quad (7)$$

$U_{AK}$  ist die Kontaktspannung, die sich zwischen dem Anoden- und Kathodenmaterial einstellt. Üblicherweise ist bei einer Photovoltaikzelle  $W_A > W_K$ <sup>1</sup>, weshalb  $U_{AK} < 0$  und somit auch

$U_B < U$  sind. Die Spannung  $U_B$  zwischen Anode und Kathode ist somit kleiner als die angelegte Spannung  $U$ .

## Gegenspannungsmethode

Wird nun die Kathode der Fotozelle mit Licht ausreichend hoher Frequenz  $f$  beleuchtet, werden Photoelektronen ausgelöst. Für die maximale kinetische Energie der Photoelektronen gilt

$$W_{\text{kin},\text{max}} = hf - W_K . \quad (8)$$

Bei dem bekannten Gegenspannungsversuch zur Bestimmung der Planck-Konstanten [1, 5] wird experimentell diejenige Gegenspannung  $U < 0$  bestimmt, bei der der Fotostrom  $I$  gleich null wird (Abb. 1). In diesem Fall gilt

$$W_{\text{kin},\text{max}} = hf - W_K = -eU_{B,I} = 0 \quad (9)$$

bzw. bei Berücksichtigung von (6)

$$hf - W_K = -e(U_{I=0} + U_{A,K}) \quad (10)$$

Hierbei sind  $U_{B,I} = 0$  und  $U_{I=0}$  jeweils diejenigen Spannungen  $U_B$  und  $U$ , bei denen der Fotostrom gerade verschwindet ( $I = 0$ ). Mit (7) folgt aus (10) die bereits in der Einleitung zitierte Formel

$$-U_{I=0} = (h/e)f - W_A/e. \quad (1)$$

## Schlussbemerkung

Die Tatsache, dass  $U_B \neq U$  ist, bleibt oft unberücksichtigt. In vielen Lehrbüchern findet man daher fälschlicher Weise in (1) statt der Austrittsarbeit des Anodenmaterials die des

Kathodenmaterials, d.h.

$$-U_{I=0} = (h/e)f - W_K/e \text{ (falsch).} \quad (11)$$

V. Baltz, Herrmann und Pohlig geben in [2] eine schülergerechte Herleitung der korrekten Formel (1). Die hier alternativ vorgeschlagene Herleitung mit Hilfe des Maschensatzes erachtet der Autor als noch elementarer. Sie setzt allerdings die Kenntnis/Akzeptanz der Gleichung (2) voraus, die den Schülerinnen und Schülern jedoch auf einfache Weise plausibel gemacht werden kann.

## Anmerkung

<sup>1</sup> Um eine Fotozelle auch für längere Wellenlängen des sichtbaren Spektrums empfindlich zu machen, wählt man ein Kathodenmaterial mit möglichst geringer Austrittsarbeit. Dies erreicht man, indem man die Kathode z.B. mit Caesium oder einer Caesium-Verbindung beschichtet.

## Literatur

- [1] <http://www.ld-didactic.de/ga/5/558/55879/55879.pdf> (Stand: 01.12.2013)
- [2] R. v. Baltz, F. Herrmann, M. Pohlig: Altlasten der Physik (115): Der photoelektrische Effekt. PdN-PhiS 6/58 (2009), S. 47-49
- [3] Bergmann-Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik Bd. II (Elektrizität und Magnetismus). Berlin: Walter de Gruyter (1971), S. 79
- [4] U. Leute: Physik und ihre Anwendungen in Technik und Umwelt. München: Hanser (2004), S. 211
- [5] <http://www.walter-fendt.de/ph14d/photo-effekt.htm> (Stand: 17.07.2013)

# Vor 100 Jahren

Robert A. Millikan: A direct photoelectric determination of Planck's "h". Phys. Rev., 7(3):355–388, 1916.

[Robert Millikan begann bereits 1905, Einsteins Lichtquantenhypothese zu überprüfen. Nach 10 Jahren konnte er ihre Gültigkeit nachweisen und  $h$  bestimmen. Er zeigte den Konflikt zwischen der Wellenvorstellung vom Licht und der Lichtquantenhypothese auf. Kontaktspannungen und Oberflächenreinheit waren die experimentellen Hürden. Er schreibt:]

"... It was in 1905 that Einstein made the first coupling of photo effects and with any form of quantum theory by bringing forward the bold, not to say the reckless, hypothesis of an electro-magnetic light corpuscle of energy  $hv$ , which energy was transferred upon absorption to an electron. This hypothesis may well be called reckless first because an electromagnetic disturbance which remains localized in space seems a violation of the very conception of an electromagnetic disturbance, and second because it flies in the

face of the thoroughly established facts of interference. The hypothesis was apparently made solely because it furnished a ready explanation of one of the most remarkable facts ..., viz., that the energy with which an electron is thrown out of a metal by ultra-violet light or X-rays is independent of the intensity of the light while it depends on its frequency. This fact alone seems to demand some modification of classical theory ..." [S. 355]

"... [the Einstein equation] must certainly be regarded as one of the most fundamental and far reaching of the equations of physics; ... Yet the semi-corpuscular theory by which Einstein arrived at his equation seems at present to be wholly untenable. ... [S. 383]

Anmerkung: Der von Millikan angegebene Wert  $h = 6,57 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  ist etwa 1% kleiner als der heutige beste Wert.

# Beschleunigung geht durch den Magen oder – Was macht die Achterbahn so attraktiv?

Martin Apolin

Achterbahnen oder Hochschaubahnen, wie man sie in Österreich auch nennt, sind unverzichtbare Attraktionen in Vergnügungsparks. Schon als kleines Kind war ich im Wiener Prater von diesen Dingern am meisten begeistert. Natürlich hatte ich damals noch keine Ahnung, welche Physik dahintersteckt. Ich werde Ihnen zum Aufwärmen eine Frage aus dem Alltag stellen, nämlich zum Autofahren. Die Auflösung dieser Frage führt uns dann direkt zur Faszination Achterbahn!

Stellen Sie sich vor, Sie fahren mit Ihrem Auto durch eine Kurve (Abb. 10). Die Tachonadel soll dabei wie festgenagelt immer genau auf denselben Wert zeigen. Dieser ist für die folgende Fragestellung zwar egal, aber nehmen wir konkret 80 km/h an. Ändert sich während der Kurvenfahrt Ihre Geschwindigkeit oder nicht? Diese Frage kommtt harmlos durch die Kurve daher, ist aber heimtückisch gemein und schürft physikalisch sehr tief. Sie werden eventuell denken, ich will Sie verschaukeln?! Ich habe doch ausdrücklich dazugesagt, dass der Tachometer immer denselben Wert zeigt! Also ändert sich die Geschwindigkeit offensichtlich nicht! Die verblüffende Antwort lautet aber: Auch wenn Sie mit konstant 80 km/h durch die Kurve fahren, ändert sich Ihre Geschwindigkeit! Wie das jetzt??!

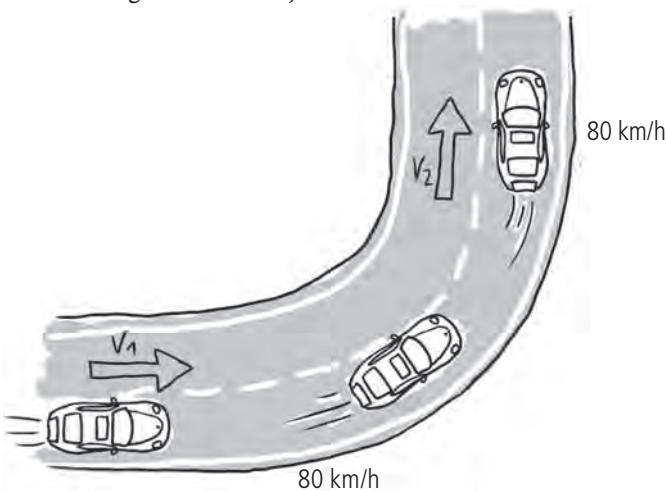


Abb. 1: Mit 80 km/h durch eine Kurve.  
Ändert sich dabei Ihre Geschwindigkeit?

Die Geschwindigkeit wird in der Physik durch einen Vektor dargestellt, also quasi einen Pfeil. So ein Vektor hat Länge und Richtung. Es ist zwingend logisch, dass die Geschwindigkeit auch eine Richtung hat. Wenn Sie mit Ihrem Auto in den Süden nach Italien wollen, dann darf Ihr Geschwindigkeitsvektor klarerweise nicht zur Nordsee zeigen. Der springende Punkt ist nun der: Die Geschwindigkeit ändert sich immer dann, wenn sich irgendetwas an diesem Vektor verändert - also Länge und/oder Richtung - und man den Vektor vorher mit dem nachher durch Verschieben nicht zur Deckung bringen kann.

Der Geschwindigkeitsvektor wird zum Beispiel länger, wenn Sie auf gerader Strecke aufs Gas steigen (Abb. 2a), und kürzer, wenn Sie bremsen (Abb. 2b). Der Vektor kann sich aber auch drehen, und zwar, wenn Sie durch eine Kurve fahren (Abb. 2c). Es ist offensichtlich, dass Sie den Vektor von Kurvenein- und -ausfahrt durch Verschieben nicht zur Deckung bringen können. Bei einer Kurvenfahrt ändert sich also Ihre Geschwindigkeit, auch wenn der Tacho immer denselben Wert zeigt. Das, was der Tacho anzeigt, könnte man das Tempo nennen, das der Länge des Geschwindigkeitsvektors entspricht – der Tacho zeigt ja keine Richtung an. Sie können also pointiert sagen: Bei einer Kurvenfahrt ändert sich Ihre Geschwindigkeit, ohne dass sich dabei das Tempo ändert. Das müssen Sie erst einmal in Ruhe verdauen!

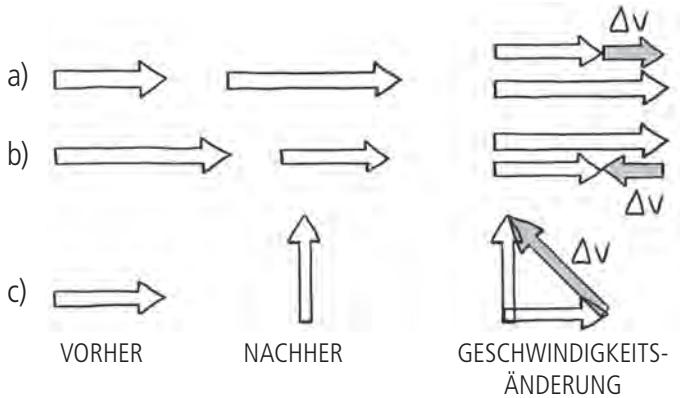


Abb. 2: Formen von Geschwindigkeitsänderungen bzw. Beschleunigungen  
Fall c) entspricht der Kurvenfahrt aus Abb. 10

DDr. Martin Apolin ist Physiker und Sportwissenschaftler. Er arbeitet als Lehrer an einer Wiener AHS. Nebenbei lehrte er früher am Institut für Sportwissenschaften und nun an der Fakultät für Physik/Didaktik. Er ist Autor zahlreicher Schul- und Sachbücher. Der Beitrag ist Teil des kürzlich erschienenen Buches „Physik für echte Männer“ (Wiedergabe mit Genehmigung des Verlags).

Geschwindigkeitsänderungen bezeichnet man in der Physik generell mit  $\Delta v$  (sprich: Delta v). Als Beschleunigung  $a$  gilt jede Art der Geschwindigkeitsänderung in einer bestimmten Zeit  $\Delta t$ . Formelmäßig würde man das so aufschreiben:  $a = \Delta v / \Delta t$ . Die Beschleunigung ist also immer proportional zur Geschwindigkeitsänderung. Ihr Körper ist in der Lage, Beschleunigungen zu spüren. Nicht nur die Liebe geht durch den Magen, sondern auch die Achterbahn! Wann immer Sie eine Beschleunigung spüren, hat sich in diesem Moment auch Ihre Geschwindigkeit in irgend einer Form geändert. Genau von diesen Beschleunigungen lebt die Fahrt auf einer Achterbahn, weil das in unserem Körper alle möglichen ungewohnten Empfindungen hervorruft. Mit diesen Körperimpressionen macht der Betreiber sein Geschäft.

Man vergleicht die Größe der auftretenden Beschleunigungen immer mit der Fallbeschleunigung  $g$  (siehe S. 14, Kap. 1). 1  $g$  entspricht der normalen Belastung durch die Schwerkraft, der Sie pausenlos ausgesetzt sind – zum Beispiel jetzt. Wie groß sind die  $g$ -Kräfte bei einer Achterbahn? Die *Blue Fire* im Vergnügungspark in *Rust* in Deutschland ist ein sogenannter launched coaster. Man wird nicht vorher auf einen Hügel gezogen, sondern horizontal beschleu-

nigt, und zwar von 0 auf 100 km/h (27,8 m/s) in nur 2,5 Sekunden. Es ist wie beim Start eines Supersportwagens – ziemlich saftig! Mit Hilfe der Gleichung oben kann man ausrechnen, dass die Beschleunigung aber nur rund 11 m/s<sup>2</sup>, also etwa 1,1  $g$  beträgt. Das klingt enttäuschend wenig, ist für den Magen aber trotzdem ein Erlebnis, weil diese Beschleunigung erstens horizontal und zweitens zusätzlich zum alltäglichen  $g$  wirkt.

Wenn Sie von der höchsten Stelle einer normalen Achterbahn den *first drop* hinunterrasen, dann wirkt ein ähnlicher Effekt wie bei Parabelflügen und es treten  $g$ -Werte unter 1 auf. Auch das ist für den Magen sehr interessant. Wenn Sie dann am Fuße der Bahn in die erste Senke fahren, werden Sie extrem in den Sitz gedrückt (Abb. 3). Zusätzlich zur Fallbeschleunigung können dann durch die Geschwindigkeitsänderung fast 4  $g$  dazukommen, macht also in Summe 5  $g$ . Würden Sie auf einer Waage sitzen, würde diese das Fünffache des gewohnten Werts anzeigen – beziehungsweise wahrscheinlich w.o. geben. Die größten Beschleunigungen, die man auf einem Rollercoaster erzielt, schafft man immer durch Richtungsänderungen! Und das funktioniert nur, weil die Geschwindigkeit ein Vektor ist!

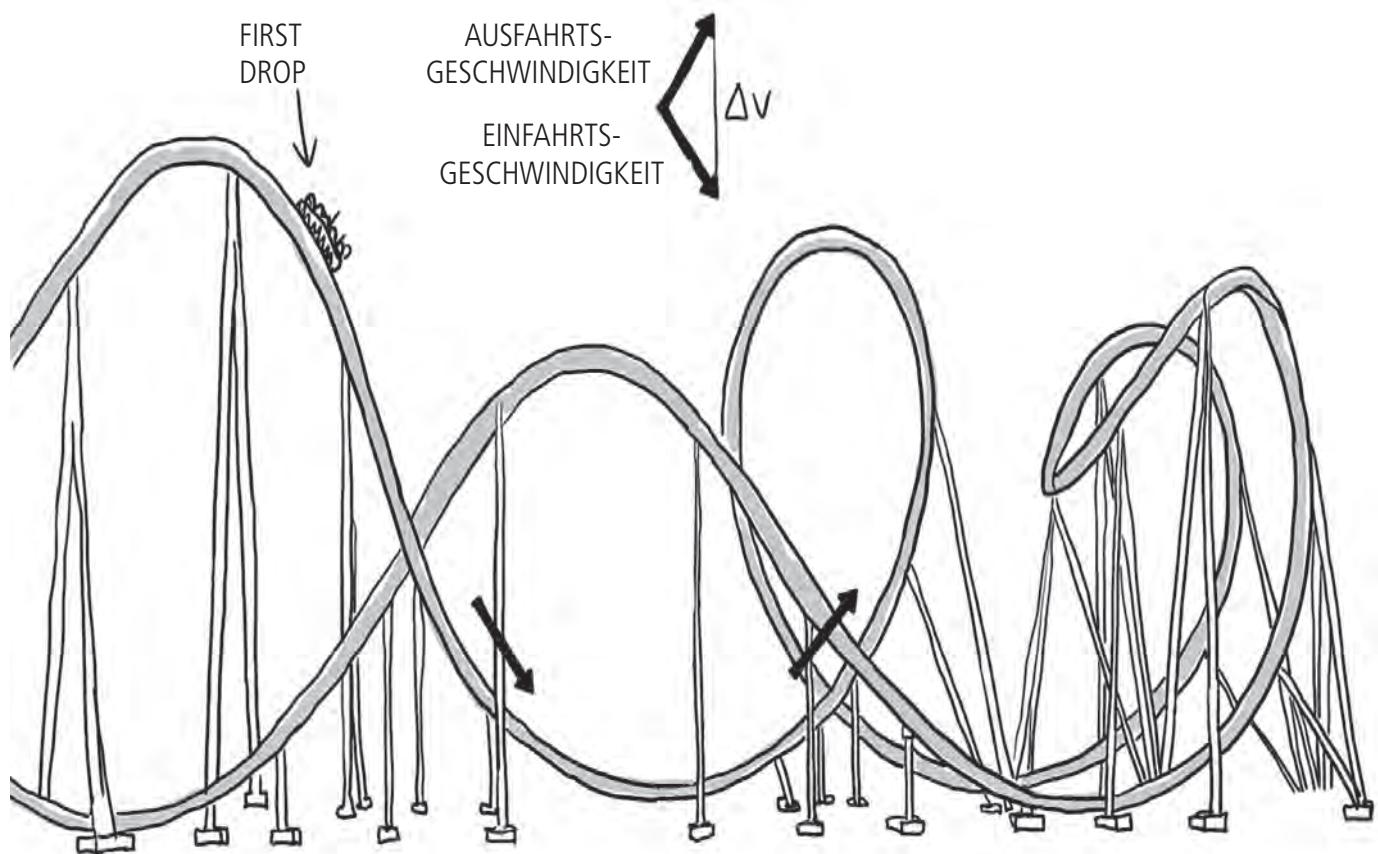


Abb. 3: First Drop auf einer Achterbahn.  
Zusätzliche Belastung, die durch die Geschwindigkeitsänderung am Fuße des Hügels zustande kommt.

# VidAnalysis – Videoanalyse für Android

Richard Sadek

Videoanalyse ist ein „alter Hut“. Entsprechende Programme wie VIMPS oder EVA werden schon lange im Physikunterricht eingesetzt. Relativ neu ist der Einsatz von Smartphones für die Videoanalyse. Bis vor kurzem hat es nicht einmal eine App im Android Play Store dafür gegeben. In diesem Artikel will ich die App *VidAnalysis* vorstellen, die ich am Ende meiner Schulzeit entwickelt habe.



Für all jene, die noch nicht mit dem Prinzip der Videoanalyse vertraut sind, hier eine kurze Einführung. Ein kinematischer Vorgang wird mit einer Kamera gefilmt. Da ein Video aus mehreren Einzelbildern besteht, kann die Bewegungsinformation schnell extrahiert werden: Jedes Einzelbild stellt eine Momentaufnahme der gesamten Situation dar – man könnte fast sagen, jedes Einzelbild stellt eine Messung dar. Nun muss nur mehr das bewegte Objekt in jedem Einzelbild markiert werden. Die Zeit zwischen den Einzelbildern ist bekannt, sie ist der Kehrwert der Bildwiederholrate (FPS). Sind alle Punkte markiert, kann also schon ein Zeit-Weg-Diagramm erstellt werden.

Für das Markieren der Punkte könnte man das Video in einen Videoplayer laden und in jedem Bild am Bildschirm nachmessen, an welcher Position sich das bewegte Objekt gerade befindet. Diese Methode würde ich allerdings nicht empfehlen, denn sie ist sehr aufwendig. Viel komfortabler geht das mit Programmen, die genau für diesen Zweck erstellt wurden. Meine App namens *VidAnalysis* ist eines von diesen. *VidAnalysis* ist aber nicht auf den Prozess der Analyse (also des Punkte-Markierens) beschränkt, viel mehr macht sie ein Smartphone oder Tablet zu einem Multifunktionsstool: Das Experiment für die Videoanalyse kann zunächst mit der eingebauten Kamera gefilmt werden, dann kann die eigentliche Analyse durchgeführt werden und zum Schluss werden auch schon die ersten Analysewerte in Form von Diagrammen präsentiert.

In meiner Schulzeit habe ich im Physikunterricht verschiedene Videoanalyseprogramme für den PC nutzen dürfen. Dabei traten einige Probleme auf. So wurde etwa das Kabel für Handy oder Digitalkamera zu Hause vergessen und das Video vom Experiment konnte nicht auf den Computer übertragen werden.

---

Richard Sadek, Maturant am BRG Kepler Graz, stellte bei der ÖPG-Tagung 2015 seine prämierte VWA vor.

Ein weiteres Problem waren die Videoformate. Weil das verwendete Programm schon etwas älter war, unterstützte es sehr wenige davon. Da konnte schon einmal die gesamte Stunde gebraucht werden, bis alle Schülerinnen und Schüler ihre Videos mit der Videoanalysesoftware öffnen konnten.

Mit einer App fallen diese Probleme natürlich alle weg. Ein Übertragungskabel wird gar nicht mehr benötigt und das Videoformat, das die Kamera auf Android erstellt, wird standardmäßig unterstützt.

## Bedienung von *VidAnalysis*

Gehen wir ins Detail: Wie schaut eine Analyse bei *VidAnalysis* aus? Wird die App das erste Mal geöffnet, wird ein mehr oder weniger weißer Bildschirm präsentiert. Ganz rechts oben sind zwei Buttons: mit dem einen kann sofort ein Video aufgezeichnet werden, der andere erlaubt die Auswahl eines Videos aus dem Speicher. Die gefilmten und ausgewählten Videos werden zur Liste der zur Analyse ausgewählten Videos hinzugefügt, die bei jedem Start der App als erstes angezeigt wird. Klickt man ein Video an, startet ein Videoplayer.

Zunächst muss zur Stelle, an der die Bewegung stattfindet, vorgespult werden. Dann kann mit dem Button rechts oben die Analyse gestartet werden. Am Anfang muss ein Referenzmaßstab markiert werden (Abb. 1). Er muss in der Ebene der Bewegung sein und seine Länge muss bekannt sein. Sie dient später dazu, die Längen von Pixel in Meter umzuwandeln.

Zur besseren Lesbarkeit der Ergebnisse der Analyse kann auch der Ursprung des Koordinatensystems der Messwerte frei gewählt werden.

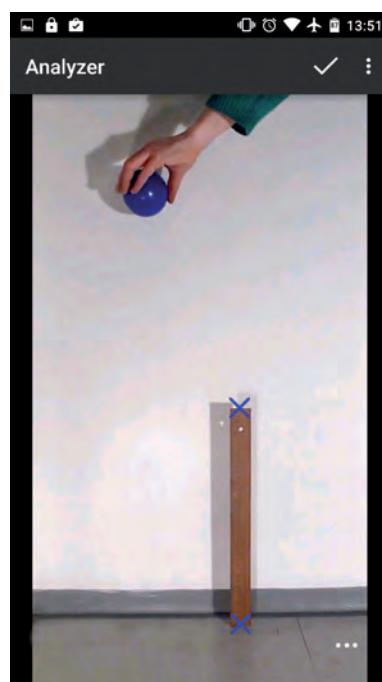


Abb. 1: Zur Kalibrierung wird eine Referenzlänge markiert.

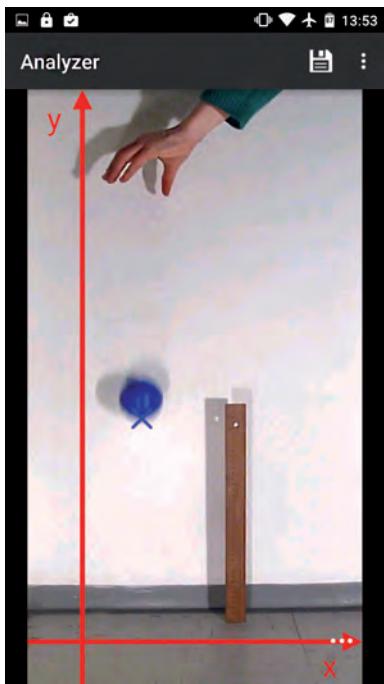


Abb. 2: Das bewegte Objekt wird in jedem Einzelbild markiert

Nun müssen Sie die Punkte, an denen sich das bewegte Objekt in jedem Einzelbild befindet, möglichst genau markieren (Abb. 2). Das kann etwas dauern, aber je genauer Sie es machen, umso mehr werden Sie sich über die Ergebnisse freuen! Diese werden nämlich nach dem Druck auf den Button "Analyse beenden" rechts oben angezeigt. Es wird eine Datentabelle ausgegeben: Aus ihr können die genauen Messwerte entnommen werden.

Falls Sie oder Ihre Schülerinnen und Schüler doch lieber gerne mit dem Computer arbeiten wollen, steht Ihnen eine Exportfunktion der Messdaten zur Verfügung. Sie können die Analyse sowohl als CSV für Excel oder als gnuplot-Datei speichern.

Sie denken vielleicht: "Und, was kostet der Spaß?" Dann habe ich eine gute Nachricht für Sie: Die App ist mit dem vollen Funktionsumfang gratis aus dem Google Play Store herunterladbar. Sie ist unter dem Namen „VidAnalysis free“ zu finden, beinhaltet allerdings Werbung. Es gibt noch eine zweite Version ohne Werbung. Sie heißt „VidAnalysis“ (ohne „free“). Falls Ihnen das Konzept der App gefällt und sie diese gerne im Unterricht einsetzen wollen, können Sie dies also jeder Zeit machen. Der Link zur App im Google Play Store lautet <http://play.google.com/store/apps/details?id=com.vid-analysis.free>. Es gibt auch eine Webseite zur App, auf der sich der sich auch ein Downloadlink befindet. Sie lautet <http://www.vidanalysis.com>.

## Einige nützliche Unterrichtstipps:

Ich habe mit meinem Physiklehrer Tests der App in Schulklassen ausgeführt und es hat sich herausgestellt, dass so eine Videoanalyse die klassischen Versuche mit Maßband und Stoppuhr nicht ersetzen kann. Videoanalyse kann allerdings vorteilhaft mit den jeweiligen Versuchen kombiniert werden. Was zum Beispiel gut geht, ist ein geneigter Schiene hinunterrollender Wagen, dessen Zeit-Weg-Diagramm zunächst mittels Stoppuhr bestimmt wird und dann durch Videoanalyse verfeinert wird. Weiters ist es wichtig, dass die Schülerinnen und Schüler schon genügend theoretisches Vorwissen haben, damit sie den gesamten Funktionsumfang der App ausnutzen können. Nicht zuletzt noch wichtig ist, dass die Schülerinnen und Schüler die App bedienen können: Eine Vorführung einer Analyse Schritt für Schritt ist hier sehr hilfreich.

## Über mich:

Ich studiere Informatik an der TU Graz, habe 2015 am BRG Kepler in Graz maturiert. Mag. Dr. Gerhard Rath war dort mein langjähriger Physiklehrer.

Naturwissenschaften und Technik haben mich über meine gesamte Schulzeit hinweg sehr interessiert. Im Zuge meiner vorwissenschaftlichen Arbeit entwickelte ich VidAnalysis, die ich im Dezember 2014 veröffentlichte. Im September 2015 wurde die Arbeit mit dem Schülerpreis für "exzellente vorwissenschaftliche Arbeiten" der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft ausgezeichnet.

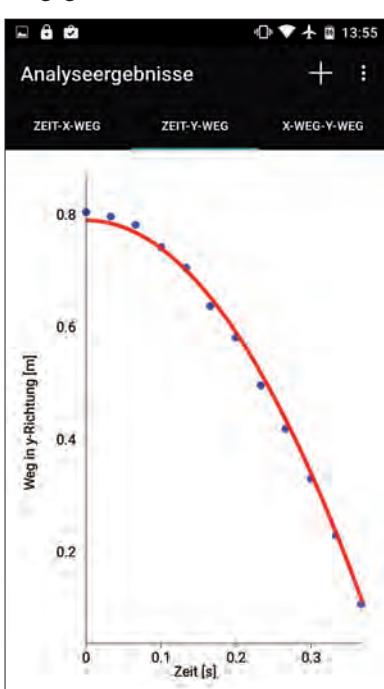


Abb. 3: Das generierte Zeit-y-Weg-Diagramm mit angenäherter Funktion

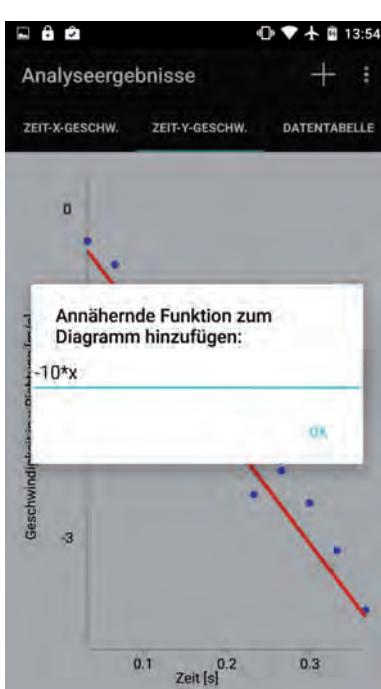


Abb. 4: Das Zeit-Geschwindigkeit-Diagramm mit angehärter Funktion

# Interdisziplinäre Physik

## Von der Diffusion in Festkörpern zu Invasionen im Zuge von Globalisierung und Klimawandel

Gero Vogl

### Diffusion und Ausbreitung

Die Natur macht es uns bei der Diffusion in kristallinen Festkörpern – und das sind die meisten – einfach: Weil das Gitter hochsymmetrisch und periodisch ist – die Atome sitzen in allen drei Dimensionen in Reih und Glied –, gibt es nur wenige voneinander verschiedene Diffusionsmöglichkeiten. Zwischen denen müssen Experiment und Theorie entscheiden. Auf diesem Gebiet haben wir jahrelang geforscht.

Anders sieht es für Ausbreitungsvorgänge von Lebewesen aus und noch viel komplexer für geistige Güter wie Informationen über Neues oder Sprachen. Hier wären einfache Rechenmodelle, wie sie für den hochsymmetrischen Festkörper ausreichen, völlig unzureichend. Zu verschiedenartig sind die Bedingungen, die das „diffundierende“ Lebewesen, die sich ausbreitende Idee nach jedem einzelnen Schritt neu erwarten. Um die beobachtete Ausbreitung zu beschreiben und Prognosen für die Zukunft zu machen, helfen nur Computer-Simulationen, in denen möglichst viele Details erfasst werden. Die moderne Entwicklung hat dafür nicht nur immer bessere Computer und vorher schon viele andere Erleichterungen für unser Leben hervorgebracht, sie bringt zugleich eine Flut von Problemen mit sich, unter anderem jene, die durch Globalisierung und menschengemachten Klimawandel entstehen. Für den Forscher sind diese Probleme hochinteressant, für die Menschheit möglicherweise bedrohlich. Daran zu forschen, war meine Idee, und ich freue mich, dass ich ein kleines interdisziplinäres Team in wechselnder Besetzung dafür begeistern konnte.

Im Folgenden bespreche ich Ausbreitungsvorgänge, die einerseits auf der zunehmenden Vernetzung der Welt, andererseits auf dem Klimawandel beruhen, und wie wir sie mit Computer-Simulationen zu beschreiben versuchen.

Im Zuge von Globalisierung und Klimawandel haben zahlreiche fremde Pflanzen- und Tierarten, sogenannte Neophyten und Neozoen, mit der Invasion begonnen und viele andere sind noch zu erwarten. In Zusammenarbeit mit den Biologen und Ökologen Stefan Dullinger und Franz Essl vom Department für Botanik und Biodiversitätsforschung, Fakultät für Lebenswissenschaften der Universität Wien bzw. vom Umweltbundesamt haben wir die Beschreibung em. o. Univ.-Prof. Dr. Gero Vogl: Fakultät für Physik der Universität Wien.  
E-Mail: gero.vogl@univie.ac.at

der bisherigen und der künftigen Ausbreitung einer ausgesprochen unerfreulichen Pflanzenart studiert. Es ist das aus den USA stammende Ragweed, das Globalisierung und Klimawandel „schamlos ausnutzt“, eine Pflanze, unter der bisher nur in den USA zahllose Menschen gelitten haben, die aber jetzt auch bei uns vielen Menschen bereits erheblich zu schaffen macht. Denn die Pollen des Ragweed lösen bei vielen Menschen starke Allergien im Spätsommer aus, wenn die Allergien von den heimischen Pflanzenpollen schon abgeklungen sind.

### Was ist Ragweed?

Das Ragweed, wissenschaftlich *Ambrosia artemisiifolia L.* genannt, mag dem Nichtbotaniker wie unser heimischer Gemeiner Beifuß, *Artemisia vulgaris*, erscheinen, eine früher häufig verwendete Gewürzpflanze, die gern an Straßenrändern wächst. Aber zum Unterschied vom Gemeinen Beifuß, der auch Allergien hervorruft, wenn auch weniger schlimme, entwickelt Ragweed erst im Spätsommer hohe kerzenförmige Blütenstände und verbreitet seine Pollen lange, nachdem der Pollenflug heimischer Arten vorbei ist. Ragweed ist ein Einwanderer aus den wärmeren Gegenden Nordamerikas und bewirkt, dass Allergiker am Ende des Sommers noch einmal empfindlich auf diese Pollen reagieren. Solche Einwanderer sind kein neues Phänomen. Die Robinie (falsche Akazie) ist ein Beispiel für Einwanderung und Ausbreitung seit Jahrhunderten. Sie verschönert die Hecken, wenn sie blüht und duftet, drängt aber andere Arten zurück, sodass zuweilen Eindämmungsmaßnahmen notwendig sind.

Die Invasion nicht-einheimischer Pflanzenarten nimmt in den letzten Jahren stark zu, die Gründe sind die Zunahme des Austausches von Gütern und damit auch Samen in der ganzen Welt und für wärmeliebende Arten, die bisher bei uns nicht gedeihen konnten, die weltweite Erwärmung. Eine Vorhersage über die weitere Entwicklung der Invasionen ist daher höchst erwünscht, besonders in Hinblick auf die bereits deutlich wahrnehmbare Klimaveränderung in Europa, menschengemacht oder eine natürliche Schwankung wie oft seit dem Beginn der Eiszeiten vor ca. 1 Million Jahren. Jedenfalls ist nicht mehr zu bezweifeln, dass wir einen Temperaturanstieg erleben, der zahlreichen invasiven Arten zunehmenden Spielraum lässt.



Abb. 1: Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.). Diese Pflanze fand ich im Spätsommer nach Rückkehr aus dem Urlaub in meinem Garten vor. Der prächtige Blütenstand, der kurze Zeit später zu kräftigem Allergien-auslösenden Pollenflug geführt hätte, ist deutlich erkennbar. Die Pflanze wurde gleich nach dieser Aufnahme vernichtet.

Das Ragweed ist eine Ruderalpflanze, das bedeutet, dass sein „Habitat“ von Menschen gestörtes Terrain wie Schuttflächen, Bahndämme und Straßenränder ist, es wächst aber auch als „Unkraut“ in Getreidefeldern und Gärten. Das Ragweed stammt aus wärmerem und trockenerem Klima, als es bisher in weiten Teilen Mitteleuropas herrschte. Es ist anzunehmen, dass der in den kommenden Jahren zu erwartende weitere Temperaturanstieg sein Habitat stark erweitern wird.

Ragweed ist einjährig und breitet sich aus, indem die Samen von Lebewesen oder Fahrzeugen transportiert werden. Seit 1960 ist ein starker Anstieg des Vorkommens zu verzeichnen, die Pflanze breitet sich offenbar bedingt durch die allgemeine Erwärmung rascher aus. Besonders ausführliche Registrierungen der Standorte von Ragweed wurden in den Jahren seit 1990 gemacht. Daraus lässt sich die jährliche Zunahme im Befall bestimmen. Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung des Ragweed in Österreich und Bayern bis zum Jahr 2005. Das Land ist in Zellen von  $3 \times 5$  geographischen Minuten (ca.  $35 \text{ km}^2$ ) eingeteilt. Schwarze Zellen bedeuten, dass mindestens ein sicherer Fund der Pflanze in dieser Zelle verzeichnet wurde. Es wird angenommen, dass sich die Pflanze dort, wo sie einmal aufgetreten ist, dauerhaft angesiedelt hat.

Da die Ausbreitung des Ragweed in der stark strukturierten Landschaft stattfindet, haben wir seine Ausbreitung für verschiedene prognostizierte Klimaszenarios und damit Habitateignungen unter Zugrundelegung von Computer-Simulationen beschrieben. Damit lassen sich, auch wenn nur wenige sichere Funde vorliegen, die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Pflanze angeben. Das Habitat des Ragweed wird durch eine Fülle von Einzelheiten beschrieben, wir haben zehn in Erwägung gezogen, schließlich erwies sich aber eine Beschränkung auf die im Folgenden genannten vier als sinnvoll.

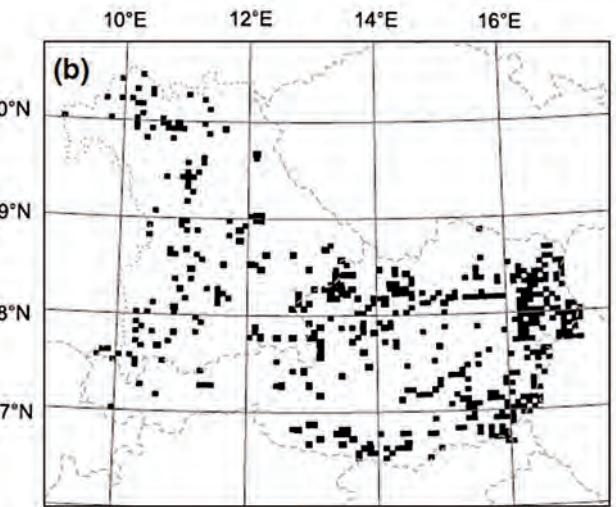


Abb. 2: Verbreitung des Ragweed in Österreich und Bayern bis 2005. Die schwarzen Zellen markieren befallene Zellen.

## Modellierung

Unsere Untersuchung beschränkte sich auf das Gebiet von Österreich und Bayern, weil dort ein besonders dichtes Netz an Beobachtungen des Ragweed-Vorkommens vorlag. Die Region ist in 4722 Zellen eingeteilt, jede Zelle kann in unserem Modell besetzt (also von Ragweed befallen) oder unbesetzt sein, eine weitere Charakterisierung gibt es nicht, das ist die Beschränkung unseres Modells. Der Zustand kann sich jährlich ändern.

Zuerst muss die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, dass eine unbefallene Zelle befallen wird. Dafür sind Habitateignung und Samenzufluss aus anderen Zellen nötig.

Wir fanden, dass vier Umweltgrößen („Habitatparameter“) die Ausbreitung des Ragweed hinreichend bestimmen, nämlich die mittlere Jahrestemperatur, der jährliche Niederschlag, die Länge aller Straßen in der Zelle und die Landnutzung, weil letztere ein Maß für den Anteil an Ruderalflächen und Ackerflächen ist. Die Eignung des Habitats  $H(x)$ , eine Wahrscheinlichkeit, lässt sich dann durch eine logistische Funktion beschreiben, also eine Funktion, die bei beim Wert 0 beginnt und beim Wert 1 in Sättigung ist:

$$H(x) = \frac{1}{1 + e^{-h(x)}}$$

mit  $h(x)$  einer gewichteten Summe der vier Habitatpara-

meter. Bei  $H(x) = 0$  wird ein Samen niemals aufgehen, bei  $H(x) = 1$  immer.

Außer der Habitateignung  $H(x)$  muss der Zufluss an Ragweed-Samen  $I(x, t)$  bekannt sein. Wir können ihn schreiben

$$I(x, t) = \sum_y S(|x - y|),$$

wobei  $\sigma(y, t) = 1$ , wenn die Zelle  $y$  zur Zeit  $t$  besetzt ist, und 0, wenn sie unbesetzt ist.

$S$  beschreibt den Fluss von Samen, die in Zelle  $y$  produziert werden und in Zelle  $x$  ankommen. Wir fanden beste Anpassung an die Funde von 1990 bis 2005, wenn wir nicht eine Gaußfunktion für die Ausbreitung annahmen, sondern eine Potenzfunktion

$$S(d) = \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-\gamma}$$

Dies ist eine leptokurtische, heute meist „fat tail“ genannte Funktion, da sie an den Rändern stärker ausgeprägt ist als die Gaußfunktion. Dies kommt daher, dass die Samen auch durch Fahrzeuge befördert werden, die längere Strecken zurücklegen als Tiere, die Samen transportieren.

Die Wahrscheinlichkeit  $P$ , dass eine bis zum Jahr  $t$  unbefallene Zelle im folgenden Jahr  $t+1$  befallen wird, hängt vom Produkt von Habitateignung und Samenzufluss ab:

$$P(\sigma(x, t+1) = 1 | \sigma(x, t) = 0) = 1 - \exp(-H(x) \cdot I(x, t))$$

Dabei bedeutet  $(\sigma(x, t+1) = 1 | \sigma(x, t) = 0)$ , dass die Zelle  $x$  im folgenden Jahr befallen wird ( $\sigma(x, t+1) = 1$ ), falls sie nicht schon im laufenden Jahr befallen ist ( $\sigma(x, t) = 0$ ). Die Form  $1 - \exp(-H(x) \cdot I(x, t))$  stellt sicher, dass die Wahrscheinlichkeit  $P$  auf das Intervall 0 bis 1 beschränkt ist.

Es gehen also zahlreiche Parameter in die Modellierung ein: für das Habitat  $H(x)$  die vorher genannten vier gewichteten Habitatparameter, außerdem die Parameter der Ausbreitung  $S(d)$ , also  $d_0$  und  $\gamma$ . Diese Parameter werden durch ein Optimierungsverfahren der Fundverteilung in den Jahren von 1990 bis 2005 (also der Angaben über die in diesen Jahren befallenen Zellen) auf der Basis von maximum likelihood (maximale Wahrscheinlichkeit) bestimmt.

## Simulation bis zum Jahr 2050

Mit den optimierten Parametern wurde die weitere Ausbreitung des Ragweed in Österreich und Bayern bis ins Jahr 2050 simuliert. Um vorherzusagen, welche Zellen in einem Folgejahr befallen würden, wurde die berechnete Befalls wahrscheinlichkeit noch unbefallener Zellen mit Zufallszahlen zwischen 0 und 1 verglichen und dann, wenn sie größer war als die Zufallszahl, festgesetzt, dass die Zelle  $x$  ihren Zustand von *unbefallen* auf *befallen* ändert, im gegen teiligen Fall aber *unbefallen* bleibt (Abb. 3). Diese Prozedur wurde für jedes Jahr bis zum Ende der Simulationsperiode wiederholt.

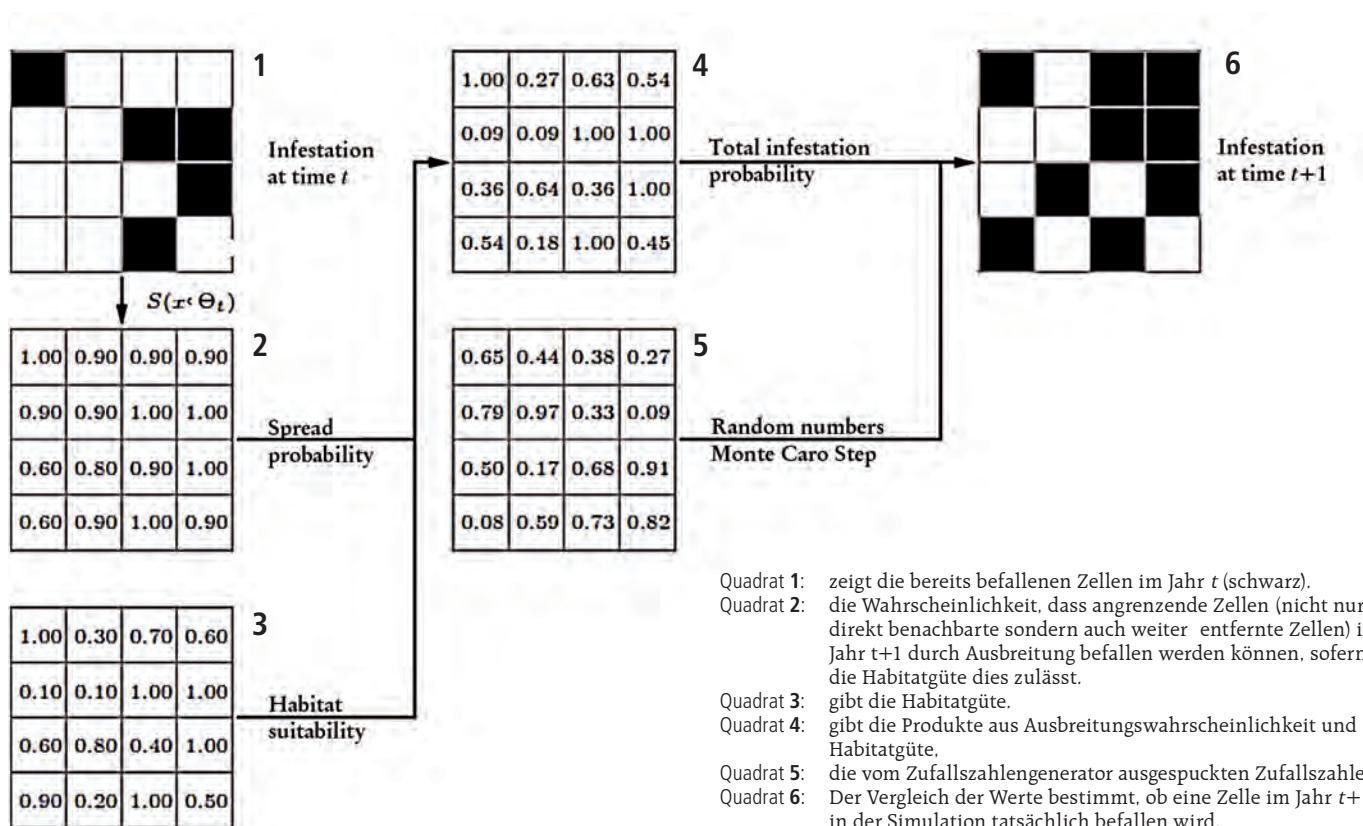


Abb. 3: Vereinfachte Darstellung des Simulationsverfahrens in die Zukunft.

Alle Klimaprognosen sagen für die nächsten Jahrzehnte einen deutlichen Temperaturanstieg voraus. In jedem der möglichen Temperatur-Szenarien muss man mit einer beschleunigten Ausbreitung von Neophyten rechnen, die wie das Ragweed aus wärmerem Umfeld stammen. Das gilt für Österreich und Süddeutschland besonders für die niedrig gelegenen wärmeren Gebiete und ganz allgemein entlang der Verkehrswege. Die folgende Abbildung zeigt die auf der Grundlage eines mäßigen bzw. eines recht drastischen aber leider nicht völlig unrealistischen künftigen Klimaszenariums (globale Erwärmung der Erde von 1990 bis 2050 um 1.5 bzw. 2.4 Grad Celsius) prognostizierte Verbreitung von Ragweed in den Jahren bis 2050 in Österreich und Bayern. Ragweed wird danach wesentlich größere Gebiete besiedeln als gegenwärtig. Die gesundheitlichen Folgen und die damit verbundenen Kosten werden erheblich sein.

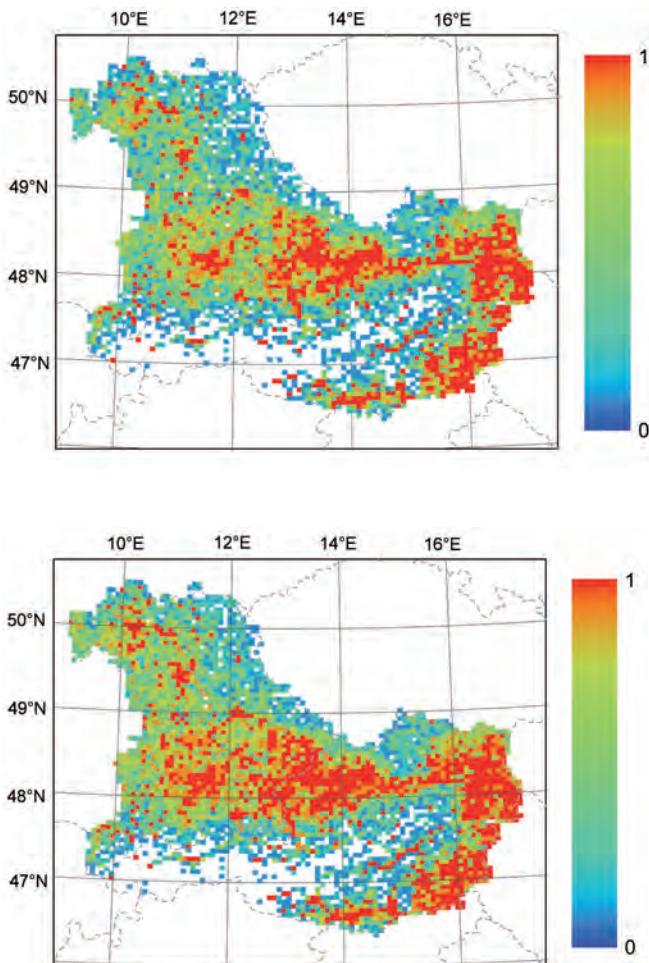


Abb. 4 und 5: Wahrscheinliche Verbreitung von Ragweed in Österreich und Bayern im Jahr 2050 bei einem Temperaturanstieg von 0.025 bzw. 0.04 Grad pro Jahr. Die Farben stehen für die Befalls wahrscheinlichkeit (rot hoch, blau gering).

Wie dramatisch die Ausbreitung des Ragweed und anderer wärmeliebender Neophyten tatsächlich ablaufen wird, wird einerseits von der tatsächlich eintretenden Erwärmung abhängen, andererseits davon, ob man sich – wie in den Zwanzigerjahren des vergangenen Jahrhunderts im Fall der aus Amerika eingeschleppten Bisamratten – entschließen wird, die angestammte Flora und Fauna vor den Invasoren zu schützen, ein Unterfangen, das mit Kosten für das Management verbunden ist.

## Management

Management hat zwei Aspekte: Erkundung und Vernichtung der Pflanzen, eventuell mit einer anschließenden regelmäßigen Bestandskontrolle. Wir nehmen an, dass nur Zellen, deren Habitatgüte einen Schwellwert übersteigt, sinnvollerweise zu managen sind, wenn das Verfahren kostenmäßig sein soll.

Wir haben zwei verschiedene Vorgangsweisen verglichen: statistische Erkundung und Erkundung in der Reihenfolge der Habitatgüte, von der für Ragweed höchsten bis hinunter zum Schwellwert. Die letztere Methode erwies sich als effektiver.

Für eine Kosten-Nutzen-Überlegung mussten wir Annahmen über den finanziellen Aufwand für Erkundung und Vernichtung treffen. Für solche Unternehmen gibt es kaum Zahlen, daher trafen wir folgende vorsichtige Annahmen, basierend auf den Erfahrungen mehrtägiger Erkundungsfahrten aller Straßen mit dem Fahrrad im südwestlichen Weinviertel. Wir nahmen an, dass eine Person als Fußgänger (4 km/h) einen Geländestreifen von 1 Meter Breite überblicken kann. Daher sind für die Erkundung von 1 km<sup>2</sup> 25 Stunden und für die einer Zelle (ca. 35 km<sup>2</sup>) 100 Arbeitstage zu 8 Stunden (Stundenkosten 25 EUR inklusive Nebenkosten) erforderlich. Für die Vernichtung des gesamten Ragweed-Bestandes in der Zelle nehmen wir die zehnfachen Kosten an und erhalten die Summe von 300.000 EUR für das Management einer Zelle.

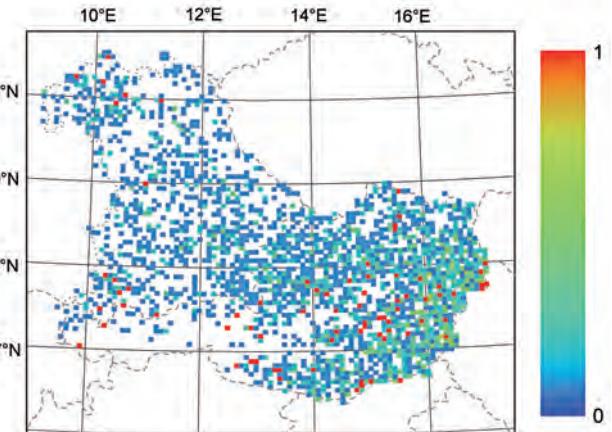


Abb. 6: Der Erfolg von Management-Maßnahmen ist in diesem Bild zu sehen. Ca. 15 Millionen EUR werden jährlich eingesetzt, um diejenigen Zellen zu reinigen, deren Habitatemgnung zu den oberen 57% gehört. Die Wahrscheinlichkeit der Verbreitung des Ragweed in Österreich und Bayern im Jahr 2050 unter Annahme einer mäßigen Klima-bedingten Temperaturerhöhung von 0.025 Grad pro Jahr ist auf wesentlich niedrigere Werte beschränkt als in Abb. 4. Das Management war also hoch erfolgreich. (Die roten Zellen sind solche, die nicht gereinigt wurden, weil ihre Habitatemgnung im unteren 43%-Bereich liegt).

## Allergien und deren Kosten

Ragweed-Pollen rufen Allergien hervor. Jäger hat 2006 die Kosten für Österreich abgeschätzt, und eine europäische Studie kommt 2012 auf ähnliche Werte für die Kosten in Europa. Wir extrapolieren von der damaligen Pollenbelastung auf die in Zukunft wegen der Ausbreitung des Ragweed zu erwartende Belastung. Zur Abschätzung der räumlichen Pollenbelastung zogen wir die Daten aus acht über Österreich verteilten Pollenfallen heran, diese Abschätzung muss jedoch als sehr vage angesehen werden, da es wenig Information über das Verhältnis von weitreichendem Pollentransport und dem einfacher abzuschätzendem im Nahbereich um die Pflanzen gibt.

Bis 2050 sind für Österreich und Bayern zusammen nach solch einer groben Schätzung mittlere jährliche Kosten (Medikamente, Arbeitsausfall) in der Höhe von fast 300 Millionen EUR zu erwarten, bei Klimawandel um 15 bis 25 Prozent mehr. Schon bei Management-Kosten in der Größenordnung von 15 Millionen EUR jährlich fallen die mittleren jährlichen Allergiekosten von 300 auf weniger als 100 Millionen EUR, bei dreifachem Einsatz sogar auf ca. 25 Millionen EUR. Höherer Einsatz erzielt keine wesentliche Verbesserung. Ohne Management würden die Allergiekosten im Jahr 2050 ohne Klimawandel 400 Millionen EUR, mit Klimawandel mehr als 500 Millionen EUR betragen.

## Was müsste geschehen?

Unser Schluss ist: Es ist preiswert, Ragweed auszurotten. So drückt man z.B. mit dem Einsatz von 15 Millionen EUR die mittleren jährlichen Allergiekosten um mehr als 200 Millionen EUR. Bisher haben wir unsere Ergebnisse offenbar

nicht nachdrücklich genug den Entscheidern der Politik beigebracht, außer im Van der Bellen-Report 2013 und einigen wenigen Zeitungsmeldungen ist nichts davon in den Medien erschienen. Wahrscheinlich wäre breite Information der Öffentlichkeit nun unsere Pflicht.

## Ausblick

Wir haben gesehen: Berechnungen der Ausbreitung („Diffusion“) erhalten ein neues Betätigungsfeld. Durch die Klimaveränderungen der Erde, die es immer gab, durch anthropogene Einflüsse aber heute vermutlich wesentlich schneller, erhalten sie eine besondere Bedeutung. Wir versuchen jetzt, unsere Modell- und Simulationserfahrungen auf die Ausbreitung geistiger Güter zu übertragen. Gegenwärtig modellieren wir den Rückgang von Minderheitssprachen.

Diese Arbeit erstreckte sich über mehr als fünf Jahre. Sie begann mit der Diplomarbeit von Manfred Smolik 2008/2009 und endete mit den Berechnungen von zukünftigen Allergiekosten und, was dagegen zu tun sei, in der Dissertation von Robert Richter in den Jahren 2011 bis 2013. Aus den Arbeiten ist eine Reihe von Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften hervorgegangen. Lorenz Mathias Stadler bahnte die Zusammenarbeit mit Stefan Dullinger vom Fakultätszentrum für Biodiversität der Universität Wien und Franz Essl vom Bundesumweltamt an und war anfangs aktiv dabei. Uwe E. Berger und Matthew Smith vom Department für Oto-Rhino-Laryngologie der Medizinuniversität Wien berieten uns bei der Frage der Pollenausbreitung, von Michael Leitner stammt ein Großteil der mathematischen Ideen und Programme. Ihnen allen sei herzlich für diese interdisziplinäre Zusammenarbeit gedankt.

# Das solare Neutrino-Rätsel

## Nobelpreis für Physik 2015

"for the discovery of neutrino oscillations,  
which shows that neutrinos have mass"

wird der Nobelpreis 2015 für Physik vergeben an:

**Prof. Takaaki Kajita (geb. 1959 in Japan)**

tätig an der Universität Tokyo, Kashiwa, Japan  
und

**Prof. Arthur B. McDonald (geb. 1943 in Kanada)**

tätig an der Queen's University, Kingston, Canada

## Poltergeister

Bis 1932 waren nur Proton und Elektron als Kernbausteine bekannt. Als man in den Jahren nach 1920 bei  $\beta$ -Zerfällen die Energien der emittierten Elektronen maß, stand man vor einem Rätsel: Beim Zerfall des Kerns in Tochterkern und Elektron sollten die Elektronen einen festen Bruchteil der frei werdenden Energie wegtragen. Die gemessene Elektronenenergie schwankte jedoch zufällig zwischen zwei extremen Werten. Niels Bohr zweifelte bereits am Energiesatz: Energie könnte eventuell nur im statistischen Mittel erhalten sein – so ausweglos erschien die Situation. Im Frühjahr 1930 löste Wolfgang Pauli das Problem, indem er für den  $\beta$ -Zerfall die gleichzeitige Emission eines weiteren, aber

nicht beobachtbaren Teilchens vorschlug, er nannte es Neutron – heute wird es Neutrino genannt. Zeitgenossen nannten es scherhaft Poltergeist, weil sein direkter Nachweis hoffnungslos erschien und es nur zur Rettung des Energiesatzes diente. 1932 entdeckte James Chadwick das Neutron als schwereres neutrales Gegenstück zum Proton. Damit erschien es plausibel, dass Elektron und Neutrino erst beim Zerfall entstehen. Die Zerfallsenergie verteilt sich auf Tochterkern, Neutrino und Elektron, deren Energien von den relativen Rückstoßrichtungen abhängen. Heute kennt man 3 Arten von Neutrinos, die neutralen Partner von Elektron, Myon und Tauon:  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ .

## Rätselhafte Sonnenneutrinos

Neutrinos treten nur sehr schwach mit Materie in Wechselwirkung. Daher konnten sie erst 1956 nachgewiesen werden. 1967 begann Raymond Davis in einem Goldbergwerk in 1600 m Tiefe, die von der Sonne kommenden Neutrinos nachzuweisen. In der Sonne entstehen bei der Fusion von Wasserstoff zu Helium Neutrinos ( $\nu_e$ ). Aus der Strahlungsleistung der Sonne weiß man, wie viele Neutrinos auf der Erde ankommen sollten. Als Davis die Umwandlung von Chlor in Argon durch solare  $\nu_e$  untersuchte, fand er nur ein Drittel der vorhergesagten Neutrinos. War das Experiment fehlerhaft, hatte man falsche Vorstellungen von den Prozessen im Sonneninneren, von der Natur der Neutrinos?

Neue Rätsel stellten sich beim Versuch, Myon-Neutrinos ( $\nu_\mu$ ) nachzuweisen, die in der Atmosphäre durch die kosmische Strahlung erzeugt werden: Gibt es einen Unterschied, wenn sie von oben durch 1 km Gestein oder von unten durch 12000 km zum Detektor gelangen? Das japanische Experiment Super-Kamiokande zeigte, dass von unten nur halb so viele  $\nu_\mu$  wie von oben kommen, während es für  $\nu_e$  keinen Unterschied gibt.

## Wie löst sich das Rätsel?

Ein raffiniertes Experiment am Sudbury Neutrino Observatory in Kanada (Abb. 1) brachte die Lösung: Der Detektor enthält 1000 m<sup>3</sup> schweres Wasser (D<sub>2</sub>O), Wasser mit dem Isotop Deuterium, dessen Kern neben dem Proton ein Neutron enthält.

Solare  $\nu_e$  können zweierlei Reaktionen auslösen: Beim Stoß mit einem Proton können sie ebenso wie  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  elastisch gestreut werden, zusätzlich können sie beim Stoß mit einem Neutron dieses in ein Proton und sich in ein Elektron verwandeln. Nachgewiesen werden die geladenen Teilchen durch die Cherenkov-Strahlung (Licht), die entsteht, wenn geladene Teilchen sich schneller als mit der Lichtgeschwindigkeit im Medium bewegen.

Man fand: Die Erzeugung von Elektronen durch  $\nu_e$  erfolgt mit einem Drittel der erwarteten Rate. Hingegen erfolgt die elastische Streuung so häufig, wie entsprechend der Kernfusion in der Sonne zu erwarten war.

Dieses Ergebnis erlaubt die Deutung: Zwei Drittel der in der Sonne entstandenen Neutrinos vom Typ  $\nu_e$  haben sich am Weg zur Erde in  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  verwandelt und können daher keine Elektronen erzeugen. Ähnlich wird das japanische Experiment gedeutet:  $\nu_\mu$  wandeln sich am Weg durch die Erde in  $\nu_\tau$  um.

## Neutrino-Oszillationen

Die Ursache dieser Umwandlungen (Oszillationen) zwischen den Neutrinoarten ist noch unbekannt. Sie zeigen, dass das „Standardmodell“ der Teilchenphysik erweitert werden muss. Sie haben als weitere Konsequenz, dass Neutrinos vermutlich sehr kleine, aber unterschiedliche Massen besitzen müssen – Jahrzehntelang war die Mehrheit der Physiker von der Masselosigkeit der Neutrinos überzeugt! Da Neutrinos fast so zahlreich wie Photonen durch das Universum fliegen, tragen sie zur dunklen Materie bei mit noch näher zu erforschenden Konsequenzen für die Strukturbildung von Galaxien.

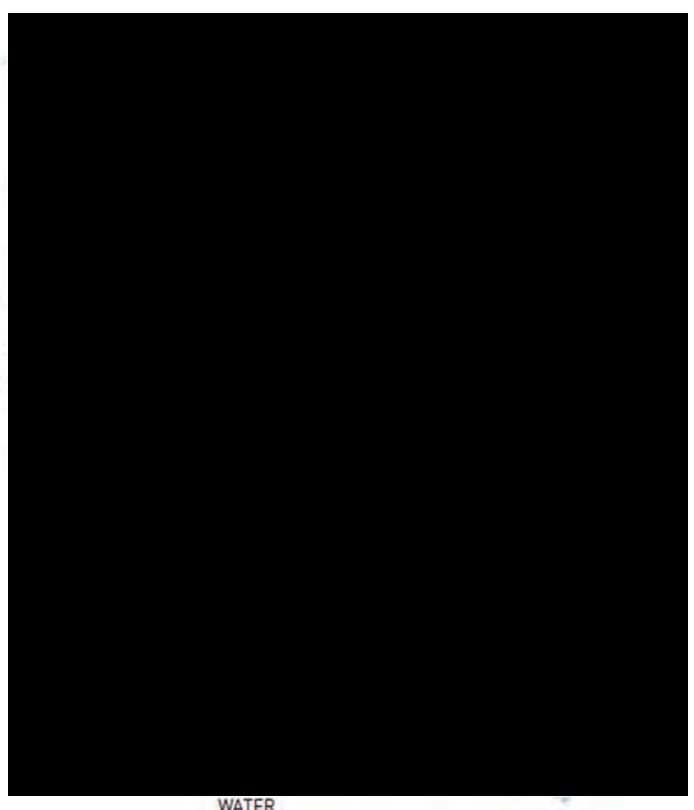


Abb. 1: Das Sudbury Neutrino Observatorium weist in der Sonne produzierte Elektron-Neutrinos nach. Die Reaktionen im Schwerwassertank ermöglichen es, sowohl die Elektron-Neutrinos allein als auch alle 3 Neutrinoarten gemeinsam zu erfassen.  
(Quelle: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2015/popular-physicsprize2015.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/popular-physicsprize2015.pdf))

# Roman Ulrich Sexl-Preis 2015



Der ÖPG-Präsident Prof. Dr. Widmann überreicht den Preis an Dr. Rath (Foto: K. Riedling)

Der Roman-Ulrich Sexl-Preis wird für besondere Leistungen in Unterricht und Lehre an

## Mag. Dr. Gerhard Rath

vergeben.

Dr. Gerhard Rath ist seit vielen Jahren am Keplergymnasium Graz als Physiklehrer sowie an der Universität Graz als Ausbildner angehender Physiklehrkräfte tätig und hat als Fachdidaktiker Schüler und Lehrkräfte nachhaltig geprägt.

Dr. Rath unterrichtet seit 35 Jahren Physik und Informatik. 1992 hat er über „Astronomie und Physikunterricht“ promoviert. Seit 2006 ist er der Universität Graz teilweise zugeordnet. 15 Jahre war er Fachkoordinator und Kustos für Physik. Im Physikunterricht pflegt er besonders Fächerübergreifenden Unterricht (Physik – Mathematik – Informatik), Naturwissenschaftliches Labor, Begabtenförderung (Physik Olympiade, Austrian Young Physicists Tournament) und den Einsatz moderner Medien (Smart-Phones, Tablets).

Er machte sich um den physikalischen Unterricht auch durch zahlreiche nationale und internationale ausgezeichnete Projekte verdient wie:

- Landesenergiepreis 1987 für die Unterrichtseinheit „Energiebewusstsein beim Wohnen und Verkehr“
- ESA-XMM Wettbewerbs (für Österreich) 1999 „What's up,

Mr. Galileo?“ mit der 5.a-Klasse des BRG Kepler Graz, Einladung in das Ariane-Weltraumzentrum Kourou.

- Einrichtung eines Kepler-Museums (<http://www.kepler-raum.at/>) 1994
- Organisation der jährlichen Teilnahme des BRG Kepler an der „Langen Nacht der Museen“
- Gewinn des Projektwettbewerbs „Technische Innovation“ 1996 mit dem Projekt „Photovoltaikanlage für Partnerschule in Äthiopien“ mit der 6.c-Klasse des BRG Keplerstraße Graz
- Initiative und Organisation der Errichtung einer Schulsternwarte am BRG Kepler (2000, <http://www.keplersternwarte.at/>)
- Projekt „Kippt das Klima – Lesetagebücher“ gemeinsam mit RFDZ Geographie (Dr. E. Zunegg)
- Faszination Technik Challenge 2011, 1. Preis

Dr. Rath hat sich immer mit aktuellen Entwicklungen und Trends im Physikunterricht auseinandergesetzt und bezieht seit jeher neueste Technologien in seinen Unterricht lernwirksam ein.

Dies zeigt sich z.B. in folgenden Projekten:

- Teilnahme am Pilotprojekt eLSA: e-learning im Schulalltag
- Mitarbeit im Projekt MOSEM (Minds-on in Superconductivity and Electromagnetism, 2007-2010)
- Unterrichten mit Handy-Videos (ab 2010) (s. Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 7/60 (2011); mobile@classrom. Handyclips im Physikunterricht).
- Teilnahme am FFG Projekt „Herz-Biomarker erkennen lernen“ 2013/14
- Teilnahme an iStage2 (Science on Stage, 2015), Mitarbeit an der Publikation mit Anregungen für den Unterrichtseinsatz von Handys

Weiters fördert Dr. Rath den physikalischen Nachwuchs, indem er Fachbereichsarbeiten initiiert und betreut, die bereits mehrfach von der ÖPG ausgezeichnet wurden. Aktuell hat sein Schüler Richard Sadek, inspiriert durch Raths technologieintegrierten Unterricht, die Videoanalyse-App VidAnalysis für Android entwickelt. Sie wurde im Rahmen des Physikunterrichts getestet und in einer VWA dokumentiert.

Sein schulisches Engagement ist eng mit dem zweiten Berufsfeld, der Fachdidaktik und Lehrerausbildung, verknüpft. Dabei schlägt Dr. Rath eine Brücke zwischen Schulpraxis, fachdidaktischer und physikalischer Forschung. Indem er an der Universität Graz u.a. für die Organisation und Durchführung der Schulpraxis verantwortlich ist, wie auch als Betreuungslehrer von Schul- und Unterrichtspraktikanten verbindet Gerhard Rath fachdidaktische Forschung mit der Ausbildung angehender Lehrkräfte.

Zusätzlich ist Gerhard Rath aktiv bei der Vernetzung und Unterstützung von Physiklehrern auf verschiedenen Ebenen: Fachdidaktikzentrum Physik der Universität Graz, regionales Zentrum für Fachdidaktik Physik (pdg), Mitglied der Koordinatoren Fachdidaktik Uni Graz, Science on Stage, Gründungsmitglied von A4E (Astronomy for Education), früher auch Vertreter des EAAE (European Association for Astronomy Education), sowie im Vorstand des IAAC (Internationalen Alpen Adria College), das über 20 Jahre jährlich internationale Projektwochen für Schüler organisiert hat.

Claudia Haagen-Schützenhöfer

# Intern. Physik-Olympiade 2015, Mumbai, Indien



von links nach rechts: Prof. Mayr, Matthias Diez, Jakob Bachler, Michael Pfeifer, Lukas Wimmer, Julius Piso, Prof. Stütz

In der Endrunde der Österreichischen Physikolympiade qualifizierten sich zur Teilnahme an der Internationalen Physikolympiade:

Jakob Bachler, HTL Eisenstadt

Matthias Diez, Bischöfliches Gymnasium Graz

Michael Pfeifer, BG/BRG Klagenfurt Mössingerstraße

Julius Piso, BGRG Wien Wiedner Gürtel

Lukas Wimmer, BG/BRG Zell am See

Matthias Diez und Lukas Wimmer errangen punktgleich Bronze-Medaillen,

Michael Pfeifer erreichte einen ehrenvollen 4. Rang (Honourable Mention).

**Gratulation!**

Prof. Helmut Mayr und Prof. Engelbert Stütz betreuten die Olympiadeteilnehmer in bewährter Weise. Die Österreichische Physikalische Gesellschaft lud die Olympiadeteilnehmer zu ihrer Jahrestagung an der TU Wien ein.  
Aufgaben und weitere Materialien sind unter <http://www.physikolympiade.at> zu finden.

# IYPT 2015

Das International Young Physicists Tournament wird oft als Jung-Physiker-Weltmeisterschaft bezeichnet und ist ein Teamwettbewerb. Im Jahr 2015 fand es in Thailand statt. Die Vorauswahl der Teilnehmer erfolgte anlässlich des österreichischen Turniers im Mai 2015 in Leoben. Bei 31 teilnehmenden Teams landete das österreichische im Mittelfeld. Der Sieg ging – wie schon oft – an Singapur vor Polen und China. (Die Aufgaben findet man auf den Webseiten <http://www.iypt.org> und <http://www.aypt.at>.)



Das Team in Thailand (v.l.n.r.): Christian FELLINGER (Teamleader, ehemaliger IYPT-Teilnehmer, nun Chemie-Student, Wien), Markus NIESE (7. Kl. Akademisches Gymnasium Salzburg), Iris SEITZ (8. Kl. Sport-Realgymnasium Salzburg), LUISA Schrempp (6. Kl. AHS Theodor Kramerstraße Wien), Rebecca FRANK (7. Kl. AHS Theodor Kramerstraße Wien), Amir DELLALI (5. Kl. BRG Akademiestraße Salzburg), Mag. Julian RONACHER (Teamleader, ehemaliger IYPT-Teilnehmer, LA Physik und Mathematik, Lernsoftware für Schulen, Salzburg)

## Vorwissenschaftliche Arbeiten Physik 2015



Die VWA-Preisträger Lena Schwarz, Richard Sadek, Christoph Scherounig und Matthias Diez – flankiert von ÖPG-Präsident Eberhard Widmann und den Vorsitzenden des FA Physik und Schule Mag. Roman Binder und Dr. Alexander Strahl (Foto: K. Riedling)

Mit der Prämierung hervorragender Vorwissenschaftlicher Arbeiten zeigt die Österreichische Physikalische Gesellschaft ihre Wertschätzung für begabte und physikalisch interessierte Maturantinnen und Maturanten. 23 Arbeiten wurden eingereicht, eine Jury zeichnete davon vier Arbeiten als die besten aus, die im Rahmen der ÖPG-Jahrestagung vorgetragen wurden:

Richard SADEK: Entwicklung einer App zur physikalischen Analyse von Bewegungen in Videos  
BRG Keplerstraße Graz, betreut von Mag. Dr. Gerhard Rath

Matthias DIEZ: 2D-Gravitationssystem  
Bischöfliches Gymn. Graz, betreut von Mag. Dieter Winkler

Christoph SCHEROUNIGG: Zur experimentellen Untersuchung des Meißner-Ochsenfeld-Effekts an Hochtemperatursupraleitern  
Bischöfliches Gymn. Graz, betreut von Mag. Elisabeth Decker

Lena SCHWARZ: Vorstellungen von LehrerInnen und SchülerInnen von 3. und 7. Klassen des BRG 1 zu nicht-sichtbarer Strahlung  
Lise Meitner RG Wien, betreut von DI Gerlinde Glück

# Lernpaket Conrad Basic Elektronik im Unterricht

Joachim Rottensteiner

Ich suchte für meine Oberstufenschüler nach einer kostengünstigen Lösung, um mit ihnen Schaltungsbeispiele zum Thema Halbleiterbauteile zu stecken. Die Firma Conrad bietet das „Lernpaket Conrad Basic Elektronik“ um 10,99 EUR an, das ich kurz vorstellen möchte. Es enthält neben einer Steckplatine 22 Bauteile (ein Stück Draht, diverse Widerstände und Kondensatoren, Transistoren, farbige LEDs). Extra wird eine 9 V-Batterie gebraucht.

Ich entschied mich für diesen Experimentiersatz, weil Standardbauteile verwendet werden, die jederzeit günstig nachgekauft werden können. Außerdem lag mir sehr daran, dass die Schülerinnen und Schüler „echte“ Kondensatoren, Transistoren etc. zu Gesicht bekommen, die nicht bis zur Unkenntlichkeit in gelben Steckkastenbausteinen versteckt sind. Sie sollten dabei auch sehen, wie man die diversen Anschlüsse bei Dioden oder Transistoren erkennt und die Bauteile dann auch richtig einbaut.

Die im Bausatz verwendete Steckplatine ist ein so genanntes „Breadboard“. Leitende Verbindungen werden durch Stecken der Bauteile hergestellt. Im Bausatz selbst befindet sich ein Heftchen mit Schaltplänen und Abbildungen zu 20 Experimenten (auch als Download verfügbar). Das ergänzende Lehrerheft um 11,99 EUR enthält wenig Zusatzinformationen.

Beim Aufbau der Schaltungen durch die Klasse ist mir zuerst aufgefallen, dass das Herstellen von einfachen Leiterbrücken relativ lang dauert. Das Abisolieren der Drähte lässt man die Schülerinnen und Schüler besser vorab zu Hause erledigen. Leider passen die Fotos der Schaltungen im Begleitheft nicht zu den Schaltplänen: Die Reihenfolge von Widerständen und Dioden ist fast durchwegs vertauscht, was zu Verwirrung führte. Die Anleitung durch Fotografien war für einige Schülerinnen und Schüler aber nötig, da sie sonst nicht die Schaltpläne in entsprechende Breadboard-Schaltungen umsetzen konnten. Ich habe daher die Schaltungen zu Hause aufgebaut, fotografiert und als farbigen A4 Ausdruck zur Unterstützung auf den Lehrertisch gelegt. Fast alle von den Schülerinnen und Schülern in Zweiergruppen aufgebauten Schaltungen funktionierten zufriedenstellend. Leider sind die Bauteile nicht für oftmaligen Einsatz geeignet. Die Drähte an den Widerständen sind so weich, dass die Bauteile nach wenigen Aufbauten wohl ersetzt werden müssen. Die Schaltungsbeispiele im Bausatz sind sehr interessant ausgewählt. Vor allem die Schaltungen „LED als Lichtsensor“ und „Bewegungsdetektor“ haben mir sehr gut gefallen.

Mag. Joachim Rottensteiner, BG 5 Rainergasse Wien



Conrad Best. Nr. 19 22 96

Abbildung: LED als Lichtsensor: Der Sperrstrom der linken LED schaltet die rechte LED

In der Schaltung „LED als Lichtsensor“ wirkt der Sperrstrom einer LED bei Beleuchtung über eine Darlington-Schaltung als Schalter für eine weitere LED. Das Beispiel „Bewegungsdetektor“ demonstriert, wie durch Bewegung in der Nähe eines Drahtes Ladungen im Draht verschoben werden und über eine Darlington-Schaltung eine Diode gesteuert werden kann. Mit diesem Schaltungsbeispiel lässt sich näherungsweise die Funktionsweise eines kapazitiven Touchscreens erklären.

## Zusammenfassung:

Der Experimentierkasten „Lernpaket Conrad Basic Elektronik“ ist ein preisgünstiger, an der Elektronik-Realität angelehnter Bausatz. Die Schülerinnen/Schüler erhalten damit Einblick in Probleme beim praktischen Aufbau von Schaltungen. Wie z.B. baut man einen Transistor korrekt in eine Schaltung ein? Es ergibt sich dadurch natürlich ein Zeitverlust in der Umsetzung der Schaltpläne. Manche Schülerinnen und Schüler brauchen mehr Anleitung als andere. Die Schaltungsbeispiele sind sehr interessant.

Alles in allem ist der Bausatz seinen Preis wert. Bei einem Ankauf der Bausätze für die Schule muss man damit rechnen, die Bauteile oft erneuern zu müssen. Auch ist aufgefallen, dass die Qualität der LEDs schwankt – es ist günstig, Ersatz-LEDs zur Verfügung zu haben, um den Erfolg der Arbeit an den Schaltungen sicher zu stellen.

# Prof. Dr. Karl Lintner

1917 – 2015

Am 11. Februar 2015 verstarb Dr. Karl Lintner, emeritierter o. Univ.-Professor der Universität Wien, wirkliches Mitglied der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, langjähriger Obmann des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und dessen Ehrenmitglied.

Das Studium der Physik und Mathematik an der Universität Wien begann Karl Lintner 1936 in einer Zeit politischen Unfriedens und gleichzeitig stürmischer Entwicklung der Physik. Im Dezember 1938 entdeckten Hahn und Straßmann die Spaltung von Uran durch Beschuss mit Neutronen. Und bereits 1939 reichte Lintner seine Dissertation über die „Bestimmung der Reichweiten schwerer Kernbruchstücke aus Uran“ ein. Dank seiner wissenschaftlichen Leistungen sowie seiner Begabung für die Lehre wurde er kurze Zeit später Assistent am II. Physikalischen Institut. Als Mitarbeiter von Prof. Georg Stetter, der sehr früh Elektronik für kernphysikalische Messungen entwickelte und nutzte, war er an Untersuchungen zur Kernspaltung im Rahmen des deutschen Kernenergieprojekts URANVEREIN beteiligt. Diese Arbeiten unterlagen nicht nur während des 2. Weltkriegs, sondern auch nach ihrer Beschlagnahme durch die Alliierten strengster Geheimhaltung. Karl Lintner lebte in einer – aus heutiger Sicht sehr ambivalent zu sehenden – Pionierzeit der Kernphysik: wissenschaftlich faszinierend, politisch katastrophal.

Im Jahr 1949 konnte sich Karl Lintner habilitieren. Sein Interesse galt weiterhin der Streuung schneller Neutronen an schweren Kernen und dem Einfluss von Strahlung auf Materie. Als 1950 Prof. Erich Schmid die Leitung des II. Physikalischen Instituts übernahm, begann eine äußerst fruchtbare Zusammenarbeit zwischen dem Materialforscher Schmid und dem Kernphysiker Lintner, die zu einem gemeinsam verfassten Fachbuch über „Werkstoffe des Reaktorbaues“ (1962) führte.

1964 wurde Karl Lintner außerordentlicher Professor, 1968 ordentlicher Professor für Physik sowie Vorstand des II. Physikalischen Instituts. Unter seiner Leitung wuchs das II. Physikalische Institut durch die Einrichtung von drei ordentlichen Professuren für Halbleiterphysik, Theoretische Festkörperphysik und Tieftemperaturphysik, sowie Arbeitsgruppen für Ultraschallforschung und Didaktik der Physik. Damit wurde aus dem II. Physikalischen Institut ein „Institut für Festkörperphysik“. Zweimal war Karl Lintner Dekan und anschließend Mitglied des Senats der Universität Wien.

1972 wurde Karl Lintner wirkliches Mitglied der österreichischen Akademie der Wissenschaften und bald darauf deren Generalsekretär. Im Rahmen dieser Tätigkeit bemühte er



Karl Lintner (Foto: ZB Physik Wien)

sich erfolgreich um die Zusammenarbeit mit dem Schweizer Paul Scherrer-Institut für Nuklearforschung, dabei wurde aus dem Radiuminstitut das Akademieinstitut für Mittelenergiephysik (heute Stefan-Meyer-Institut für Subatomare Physik) abgespalten.

Als Sohn eines Lehrers widmete Karl Lintner der Lehre und Ausbildung große Aufmerksamkeit. Daher führte er von 1968 bis 1987 als Obmann den Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und war bis zu seinem Tod dessen Ehrenmitglied. Als Organisator der seit 1947 alljährlich stattfindenden Fortbildungswoche für Lehrkräfte der Sekundarschulen achtete er auf eine gute Mischung von aktuellen Forschungsergebnissen und schulpraktischen Beiträgen. Gedanken zur Fachdidaktik setzte er mit Vorträgen von Prof. Hecht (Kiel) „Gedanken zu naturwissenschaftlich-technischer Unterrichtung für die uninteressierten Schüler der Oberstufe“ und Prof. Jung (Frankfurt) „Neuere Ansätze in der Didaktik der Physik“ zu einer Zeit ins Programm, als an der Universität „Fachdidaktik“ noch ein Fremdwort war. Seine Tätigkeit zur Förderung des naturwissenschaftlichen Unterrichts hat an den Physikinstituten der Universität Wien zu einer für die Lehreraus- und -fortbildung positiven Einstellung geführt.

In seinen Erinnerungen zur hundertjährigen Vereinsgeschichte in PLUS LUCIS 1996/2 schrieb er in der ihm eigenen bescheidenen Art: „...das Erreichen des 70. Lebensjahres ist ein Grund, Aufgaben in die Hände Jüngerer zu übergeben...“. Als sein Nachfolger lernte ich Karl Lintner als hilfsbereiten und bis ins hohe Alter dem Verein verbundenen Menschen kennen. Wer ihn kannte, wird ihn als lebensfrohen und verständnisvollen Menschen in dankbarer Erinnerung behalten.

Helmut Kühnelt

# Bücher



## Weltraum-Land Österreich

Pioniere der Raumfahrt erzählen

**Peter Habison**

1. Aufl., 232 S., Abb., Seifert Verlag, Wien 2014. ISBN 978-3-902924-19-3.  
€ 29,90

Der Astronom und Wissenschaftsjournalist Dr. Peter Habison, bis 2011 Leiter der Wiener Volkssternwarten, beschreibt in 17 Skizzen die Beiträge von Persönlichkeiten, die für Österreich in Weltraumfragen wichtige Rollen spiel(t)en. Der bisher einzige Österreicher im All, Franz Viehböck, kreiste vor 24 Jahren um die Erde. Sein Name ist der Öffentlichkeit bekannt. Vermutlich weniger bekannt außerhalb der Weltraumgemeinde sind der „österreichische Weltraumpapst“ Willibald Rindler oder Siegfried Bauer, der vor seiner Berufung an die Uni Graz stellvertretender wissenschaftlicher Direktor bei der NASA war. Wer denkt an die Rolle, die der Diplomat Jankowitsch und die Juristin Marboe im UNO-Weltraumkomitee bzw. bei der Weltraumgesetzgebung spielen? Die Hürden am Weg zu den 2013 gestarteten österreichischen Nano-Satelliten für Sternbeobachtungen zeigen, wie mühsam, aber letztlich erfolgreich Österreichs Weg in den Weltraum war.

Das Buch ist auf der Basis von Interviews mit den Weltraumpionieren entstanden. Dadurch könnte es auch für Jugendliche anregend sein, wie Wissenschaftler ihren Weg gefunden haben, ebenso für jene Optimisten, die das österreichische Laster der Kleingeisterei nicht teilen. Mit der Konzentration auf die „Pioniere“ gerät allerdings aus dem Blick, dass das Institut für Weltraumforschung der ÖAW kontinuierlich seit 1970 an Weltraumprojekten beteiligt ist – derzeit beispielsweise an der Kometensonde Rosetta.

Helmut Kühnelt

## Physik des Sports

**Leopold Mathelitsch,  
Sigrid Thaller**

1. Auflage, 2015. 198 S.,  
100 s/w-Abb. Hardcover,  
Wiley-VCH Weinheim.  
ISBN 978-3-527-41304-1. € 24,90

Dass Würfe den von Galilei gefundenen – und durch spätere Erkenntnisse wie Luftwiderstand und Magnuseffekt erweiterten – Wurfgesetzen folgen, leuchtet als selbstverständlich ein. Doch wenn es um tiefere Fragen geht, wie Biomechanik und „reine“ Physik zusammenspielen, braucht

man schon Hilfe bei Experten. Hätten Sie gedacht, dass eine Athletin mittels eines einarmigen Radschlags die Kugel besser beschleunigt als mit der konventionellen Technik? Doch als zu gefährlich ist dies nicht mehr erlaubt. Welche Leistungen sind prinzipiell möglich?

Aufbauend auf knapp zwanzig Artikeln in „Physik in unserer Zeit“ haben Mathelitsch, Teilchenphysiker und Physikdidaktiker, und Thaller, Biomechanikerin, beide an der Universität Graz tätig, ein Lesebuch für interessierte Nichtspezialisten geschrieben, das ein weites Spektrum an Sportarten (meist) eher knapp anreißt. Dabei geht es auch durchaus quantitativ zu. Um den Lesefluss nicht zu stören, sind Ableitungen in eigenen Blöcken zusammengefasst, die für sie notwendige Mathematik sollte etwa in der 6. Klasse erworben worden sein.

Die Themen spannen einen weiten Bogen von Ballsportarten, über die Belastungen beim Geräteturnen und die Kunst, Rotationen ohne Drehimpuls auszuführen, zu Schwimmen und Tauchen, Wintersport, Karate und Reiten. Daneben werden alte Mythen hinterfragt, etwa was Eisläufen ermöglicht. Wer sich in einzelne Themen vertiefen will, findet aktuelle Literaturhinweise. Für Lehrkräfte, die Aspekte des Sports im Unterricht behandeln wollen, liegt mit „Physik des Sports“ ein nützliches Buch vor.

Helmut Kühnelt

## Das Dunkle Universum

Der Wettstreit Dunkler Materie und Dunkler Energie: Ist das Universum zum Sterben geboren?

**Adalbert W. A. Pauledrach**

2015, 546 S., 130 Abb. in Farbe  
Hardcover € 29,99 (D) | € 30,83 (A)  
ISBN 978-3-642-55372-1

Dunkle Energie - sie umgibt uns überall und durchdringt den Kosmos. Aber was bewirkt sie und woraus besteht sie, und wie können wir sie überhaupt erkennen? Dunkle Materie - unsichtbar und doch mit großem Einfluss auf mächtige Materieansammlungen und riesige Galaxienhaufen. Was können wir über sie erfahren? Besteht sie aus uns bislang unbekannten Teilchen? Dunkle Materie und Dunkle Energie haben ganz offensichtlich einen gemeinsamen Ursprung, und dieser zwingt sie zu einem Wettstreit, dessen Ausgang für die Zukunft des Universums von entscheidender Bedeutung ist. Adalbert Pauledrach führt die Leser in seinem Springer Spektrum-Sachbuch Das Dunkle Universum auf eine spannende Reise durch die dunklen Komponenten des Kosmos und bis an die Grenzen unseres Wissens.

In klarer und verständlicher Sprache erläutert der Experte Pauledrach, was die heutige Physik über Dunkle Energie und Dunkle Materie sagen kann. Dabei diskutiert der Autor modernste Erkenntnisse, kritisiert Theorien und zeichnet

ein Bild unseres aktuellen Wissensstandes. Am Ende des Buches wird er die Leser mit einem verblüffenden Erklärungsversuch sogar über die Grenzen heutiger Erkenntnis hinaus blicken lassen. Ein spannendes Buch für Leser aller Altersstufen und Fachrichtungen und für alle, die mehr über unser Universum und dessen Zukunft wissen wollen.  
Adalbert W.A. Paudrach, Professor für Astrophysik, forscht und lehrt an der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Helmut Kühnelt

## Die Machiavellis der Wissenschaft

Das Netzwerk des Leugnens

**Naomi Oreskes,  
Erik M. Conway**

Übersetzt von H. und A.-M. Leipner  
2014, xx + 280 Seiten, Hardcover,  
Verlag Wiley-VCH, € 24,90  
ISBN 978-3-52-741211-2.

In sieben Episoden (Unser Produkt ist der Zweifel (Kampf der Tabakindustrie für die Gefahrlosigkeit des Rauchens), der saure Regen, der Kampf um das Ozonloch, der Kampf um das Passivrauchen, die Leugnung der Klimaerwärmung, Attacke auf Rachel Carson) schildern und belegen die Wissenschaftshistoriker Naomi Oreskes (University of California, San Diego) und Erik M. Conway (CalTech), wie mächtige Lobby-Gruppen die US-Politik beeinflussen. Das Mittel zur Erreichung des von den entsprechenden Industrien angepeilten Ziels war das Säen von Zweifel an wissenschaftlichen Belegen z.B. zum anthropogenen Anteil am Klimawandel. Dazu boten sich ältere Wissenschaftler mit hohem Bekanntheitsgrad und Status an. Ein prominentes Beispiel war Frederick Seitz. Der hochbegabte Seitz erwarb bereits mit 23 Jahren ein Doktorat bei Eugen Wigner, in den 1940er Jahren schrieb er zwei Standardlehrbücher zur Festkörper- und Metallphysik. Nach erfolgreicher Forschungstätigkeit wurde er Präsident der Universität von Rochester, Präsident der National Academy, usw. Allerdings geriet er als Befürworter des Vietnamkriegs in Physikerkreisen in die Isolation. Auf Grund seiner Stellung beriet er die Regierung zu Themen auch außerhalb seines Fachgebietes. Er wurde Berater der Fa. Reynolds Tobacco Company. Es ist auch seinem Einfluss zuzuschreiben, dass die USA das Kyoto-Protokoll nicht unterzeichneten. Geprägt durch die Erfahrungen mit dem Geheimnisverrat der Atombombe war er ein überzeugter Antikommunist und vermutete in jeder Kritik an den Praktiken der Industrie ein Untergraben des US-Systems. Seitz und seine Kollegen haben dabei immer wieder betont, dass die wissenschaftliche Gemeinschaft noch nicht völlig einig sei und daher weitere Forschungen zum Thema notwendig seien.

Leider scheinen die einzelnen Kapitel voneinander isoliert verfasst worden zu sein. Dadurch ergeben sich - da die Böswichte immer dieselben sind - beträchtliche Redundanzen. Dass die beschriebenen Praktiken des Zweifelsäns nicht

auf die USA beschränkt sind, darf wohl angenommen werden – auch wenn die Zweifler oft weniger prominent sind. Das Buch lässt verstehen, wie Wissenschaftler in Lobbyingkampagnen eingebunden werden. Fördergelder spielen dabei mit, indem sie die Spender als Wohltäter darstellen.

Das Buch ist insbesondere zum Thema Rauchen mit vielen Dokumenten gestützt. Jedes Kapitel für sich genommen bietet einen – angesichts der TTIP-Verhandlungen – einen Blick in die Praktiken von Konzernen.

Helmut Kühnelt

## Im Dunkeln hört man besser?

Alltag in 78 Fragen und Antworten

**Jo Hermans**

1. Aufl., 222 S., Abb., WILEY-VCH,  
Weinheim 2014. ISBN 978-3-527-  
33701-9. € 24,90

Physikalische Alltagsphänomene allgemeinverständlich zu beschreiben ist „in“. Kaum eine Qualitätszeitung, die sich nicht in einer Rubrik diesem Thema widmet. Es ist nicht nur „in“, sondern auch durchaus notwendig, ist doch für viele Menschen Physik mit vielen Rätseln behaftet.

So ist es zunächst Jo Hermans, Physiker der Universität Leiden in den Niederlanden, zu danken, dass er versucht, den physikalischen Alltag verständlich zu erklären. Leider ist es nur beim Versuch geblieben, wie man, je weiter man die Lektüre des Buches vorantreibt, betrübt feststellen muss. Naturwissenschaft allgemeinverständlich darzustellen ist sicher nicht leicht, darf doch die Vereinfachung niemals so oberflächlich erfolgen, dass etwas falsch ausgelegt werden kann. Leider unterlaufen dem Autor eine Reihe doch sehr störender Unkorrektheiten bei der Beantwortung mancher Fragen. So schreibt Hermans auf Seite 65 „von einem Modell mit einem Gewicht von 1000 kg“, obwohl doch das Kilogramm die Einheit der Masse ist. Leider kommt diese Ver-tauschung von Masse und Gewicht dann nochmals auf Seite 71 vor, wenn eine brennende Kerze einen Gewichtsverlust von 8 Gramm pro Stunde erleidet. Auch mit dem Begriff „Zentri-fugalkraft“ geht der Autor höchst seltsam um und lässt hier diese Scheinkraft in Konkurrenz mit der tatsächlich wirkenden Erdanziehungskraft treten (Seite 58).

Es haben sich auch viele Unkorrektheiten eingeschlichen, die wohl ein besseres Lektorat hätte vermeiden können. So etwa, wenn nach einer sehr ausführlichen Darlegung auf die Frage „Werde ich weniger nass, wenn ich schnell Rad fahre?“, der Schlussatz lautet: „Also dann heißt es, feste in die Pedale treten und trocken zu Hause ankommen.“ Warum schwarze Gardinen (Seite 96) besser als weiße sein sollen, wird wohl keinem Leser klar. Auch manche orthographischen Fehler hätte das Lektorat ausmerzen müssen, denn oberhalb des Regenbogens ist es nicht „dunklerer“, sondern dunkler und es gibt keine Grammatik, die das Wort „kein“ zu „keinster“ steigert (Seite 37).

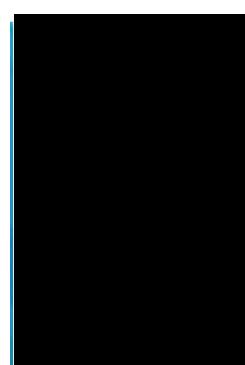
Was die Bemerkung soll, dass sich „Joule“ auf „Stuhl“ reimt,

ist dem Rezensenten ebenso unklar wie der Hinweis, dass man Kilowattstunden in der „schönen“ Einheit Joule angeben kann (Seite 35). Dass Hermans von Naturkundegesetzen und nicht von Naturgesetzen schreibt, ist vielleicht dadurch erklärbar, dass dies vielleicht im Niederländischen so ist, wie aber „angebranntes Wasser“ (Seite 40) aussieht, bleibt unklar. Manches bleibt trotz ausführlicher Erklärung für den Laien nicht einsichtig: Etwa wie die Zeitmessung bei der GPS-Ortung vor sich geht oder die Erklärung, warum Radrennfahrer einen nassen Rücken bekommen.

Nach so viel Kritik nun zum Positiven: Hermans zeigt einige sehr interessante „Hands-on-Experimente“, die jeder zu Hause nachmachen kann. Jedoch hätte man sich bei einigen treffendere Fotos gewünscht, wie auf Seite 31 unten.

Fazit: Das Buch „Im Dunkeln hört man besser?“ greift interessante, alle interessierende Fragen auf. Das Buch kann allerdings in der vorliegenden Form nur sehr bedingt empfohlen werden. Eventuell könnte es als Diskussionsanstoß im Physikunterricht dienen, um Unkorrektheiten aufzuspüren und treffendere Formulierungen zu finden. Ein Hinweis: Auf der Homepage des Verlags findet man die ersten 33 Seiten als Leseprobe.

Leo Ludick



**Physik  
50 Experimente**  
5. – 8. Schulstufe  
**Susanne Neumann**  
1. Aufl., 120 S., farb. Abb., brosch.,  
IKON Verlag Brunn am Gebirge,  
2014. ISBN 978-3-99023-098-5.  
19,90 €

Qualitative Experimente mit einfachen Mitteln beeindrucken oft durch die Einsicht „So einfach sieht man den Effekt“. Sie regen zum Nachdenken an, geben Anlass zu Diskussionen – kurz, sie wecken Interesse und prägen sich ins Gedächtnis.

50 solche Experimente aus 8 Themenbereichen hat Susanne Neumann in einem mit sorgfältig aufgenommenen Fotos ausgestatteten handlichen Buch zusammengestellt. Dabei dürfte ihr das Vorbild Werner Rentzsch über die Schulter geblickt haben. Jedes Experiment ist auf einer Doppelseite dargestellt. Links eine Fragestellung, eine Liste der Materialien, eine Arbeitsanleitung, eine Liste der möglichen Beobachtungsergebnisse und eine abschließende Erklärung des beobachteten Effekts. Rechts ist das Experiment in mehreren Schritten bildlich dargestellt. Der für die reine Durchführung von der Autorin erwartet Zeitaufwand und eine Klassifikation in L(eicht)/S(chwer) vervollständigt die Doppelseite. Inhaltlich liegt ein Schwerpunkt auf Licht und unsichtbarer elektromagnetischer Strahlung. Warm vs. Kalt, Druck und Elektrizität sind weitere Aufgabenblöcke.

Beim Einsatz im Unterricht wird man wohl die Teile „Das kann man beobachten“ und „Erklärung“ verstecken, um ein reines Abarbeiten von Experimentieranleitungen hintan-

zuhalten. Die meisten Experimente können auch zu Hause und ohne Aufsicht durchgeführt werden.

Kürzlich erschien die Fortsetzung „9. – 12. Schulstufe“.

Helmut Kühnelt

## Allein gegen die Schwerkraft

Einstein 1914-1918

**Thomas de Padova**

1. Aufl. 2015, 312 S., 17 s/w-Abb., Hanser Verlag München, Fester Einband, ISBN 978-3-446-44481-2, € 22,60 (ePUB-Format ISBN 978-3-446-44482-9, € 16,99)

Hundert Jahre Allgemeine Relativitätstheorie – wenn das kein Grund zum Rückblick sein sollte! Der ausgebildete Physiker und Wissenschaftsautor Thomas de Padova konzentriert sich auf die Zeitspanne vom 13. Juli 1913, als Planck und Nernst nach Zürich kamen, um Einstein für einen Traumjob in Berlin zu gewinnen, bis zum Ende des Deutschen Kaiserreichs und zur Ausrufung der Republik im November 1918, um Einsteins Leben und Wirken im Wechselspiel mit seiner Umgebung darzustellen. Er zeichnet dabei ein lebendiges Bild des privaten und öffentlichen Einstein. Kaum ist er in Berlin angekommen, zerbricht seine Ehe mit Mileva endgültig. Die Rückkehr seiner Söhne in die Schweiz trifft ihn hart – der später für die Perfektionierung des Gaskrieges bekannte Chemiker Fritz Haber tröstet ihn. Der chauvinistische Aufruf der wissenschaftlichen Kollegen „An die Kulturwelt“ nach dem Beginn des 1. Weltkriegs erschüttert ihn. Einstein schreibt: „Unser ganzer geprägter Fortschritt der Technik, überhaupt die Civilisation, ist der Axt in der Hand des pathologischen Verbrechers vergleichbar.“

Und doch vollendet Einstein in diesem ersten Kriegsjahr seine Allgemeine Relativitätstheorie. Dabei erwächst ihm im Mathematiker David Hilbert ein Konkurrent – wer im Zieleinlauf der Publikation der endgültigen Gleichungen vorne lag, ist auch heute noch in Diskussion.

Selbstverständlich werden im vorliegenden Buch die Grundlagen der ART allgemein verständlich (und formelfrei) dargestellt. Darüber hinaus trägt der Autor aber zu unserem Verständnis bei, in welchem Umfeld sich Einstein zum Pazifisten entwickeln musste. Die ambivalente Beziehung zu Fritz Haber spielt dabei eine wichtige Rolle.

Das Buch ist ein Lesegenuss – sprachlich und informativ. Es ist tiefshürfend recherchiert mit 588 Hinweisen zu ca. 250 Quellen. Es macht nachdenklich.

Der Autor Thomas de Padova hat zuvor lesenswerte und mit Preisen ausgezeichnete Bücher über Kepler und Galilei bzw. Leibnitz und Newton vorgelegt.

Helmut Kühnelt