

Physik im Kontext –
Ein Programm zur Förderung
der naturwissenschaftlichen Grundbildung
durch Physikunterricht



Gefördert durch das

**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

und die Länder

Physik

in interessanten Kontexten

Rainer Müller

Handreichung für die Unterrichtsentwicklung

Der Autor dieser Handreichung ist Prof. Dr. Rainer Müller,
TU Braunschweig, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften,
Pockelsstraße 11, 38106 Braunschweig.

Physik im Kontext wird gefördert durch das BMBF (Bundesministerium für
Bildung und Forschung) und die Länder.

Das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) in Kiel
koordiniert das Programm *Physik im Kontext* und kooperiert mit der
Humboldt-Universität Berlin, der Universität Paderborn, der Universität
Kassel und der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg.

Projektleiter: Prof. Dr. Manfred Euler
Kontakt: Dr. Thorsten Bell, bell@ipn.uni-kiel.de
Sekretariat: Marianne Müller, pikosek@ipn.uni-kiel.de, Tel. 0431 880 4539
Internet: www.physik-im-kontext.de

Postadresse:
Physik im Kontext
Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften
(IPN) an der Universität Kiel
Olshausenstraße 62
24098 Kiel

1 INTERESSE AM PHYSIKUNTERRICHT	5
1.1 Befragungen zur Fächerbeliebtheit	5
1.2 Interesse an Physik und am Physikunterricht.....	5
a) Sachinteresse und Fachinteresse.....	6
b) Faktoren, die das Sachinteresse bestimmen.....	6
c) Faktoren, die das Fachinteresse bestimmen.....	7
1.3 Interessentypen.....	8
2 ALLTAGSBEZUG IM PHYSIKUNTERRICHT	11
2.1 Aspektcharakter der Physik und die „synthetische Wirklichkeit“ im Physikunterricht.....	12
2.2 Alltagskontexte: Argumente aus der Lernpsychologie.....	15
2.3 Fachsystematik vs. Kontexte.....	16
a) „Vorgebliche“ Kontexte	16
b) Episodenhafte Lernsituationen	17
c) „Fahrradphysik“ als Beispiel für episodenhafte Lernsituationen.....	18
d) Schwierigkeiten des fachsystematisch orientierten Unterrichts.....	19
2.4 Verknüpfung von Fachsystematik und Kontexten.....	19
2.5 Ein Beispiel: „Physik in Alltag und Technik“	22
3 WIE FUNKTIONIERT DAS – TECHNIK IM PHYSIKUNTERRICHT	23
3.1 Rauchmelder.....	23
3.2 Laserdrucker und Fotokopierer.....	25
a) Physikalische Fragen.....	25
b) Grundlegende Funktionsweise	26
c) Aufladen der Trommel durch Koronaentladung.....	27
d) Die geladene Druckerwalze: Influenz	30
e) Der Laser kommt ins Spiel: Ladungsbild auf der Walze	31
f) Ladungsbild und Toner.....	32
g) Der letzte Schritt: Das Bild wird aufs Papier gebracht	34
3.3 GPS-Geräte	35
4 NATURPHÄNOMENE	39
4.1 Der Ausbruch eines Geysirs	39
a) Physikalischer Hintergrund	40
b) Geologische Voraussetzungen für einen Geysir.....	41
c) Ausbruch eines Geysirs	41
d) Demonstrationsexperiment: Künstlicher Geysir.....	43
4.2 Freihandexperimente zu Naturphänomenen.....	45
a) Lichtnetzwerke im Wasser	45
b) Sonnentaler im Klassenzimmer.....	47
c) „Schwert der Sonne“	49
d) Experimente zur Oberflächenspannung von Wasser	50
5 PHYSIK UND SPORT	52
5.1 Themen aus Physik und Sport.....	52
5.2 Umgang mit Diagrammen: Analyse eines Bungee-Sprungs.....	53
a) t - s -Diagramm eines Bungee-Sprungs	53
b) Geschwindigkeit und Beschleunigung	54
5.3 Modellbildung am Beispiel des Weitsprungs.....	57
a) Die Disziplin Weitsprung	58
b) Schräger Wurf	59
c) Geschwindigkeit als Vektorgröße.....	60
d) Modellierung des Weitsprungs als schräger Wurf.....	60
e) Physikalisches Modell des Weitsprungs.....	61
f) Der endgültige Weltrekord?.....	64

6 PHYSIK UND MEDIZIN.....	66
6.1 Themen aus Physik und Medizin.....	66
6.2 Computertomografie und Ultraschalldiagnostik.....	67
6.3 Skiaskopie: Augenärztliche Diagnostik mit geometrischer Optik.....	68
a) Beleuchtung der Netzhaut	69
c) Statische optische Erscheinungen in der Pupille	70
d) „Statische Skiaskopie“ beim normalsichtigen Auge	70
e) Fehlsichtiges Auge	71
f) Wichtigkeit des Beobachterauges	72
g) „Bewegte“ Skiaskopie.....	73
h) Weitsichtiges Auge	74
i) Kurzsichtiges Auge	75
j) Normalsichtiges Auge.....	76
k) Praktische Durchführung der Skiaskopie	76
6.4 SPECT – Single Photon Emission Computed Tomography.....	76
a) Medizinische Anwendung von SPECT	77
b) Eigenschaften der Radionuklide in der Nuklearmedizin	78
c) Der Szintillationsdetektor	79
d) Die Einzelphotonentomographie (SPECT)	80
e) Weiterverarbeitung der Rohdaten: die Rückprojektion	81
f) Vorschlag einer Unterrichtsstunde zum Thema Szintigraphie: Der strahlende Patient	82
7 LITERATUR.....	85

1 Interesse am Physikunterricht

1.1 Befragungen zur Fächerbeliebtheit

Umfragen unter Schülerinnen und Schülern bestätigen immer wieder den aus dem Schulalltag bekannten Eindruck: Physik gehört nicht zu den Lieblingsfächern der Schülerinnen und Schüler. Die Grafik unten zeigt das Ergebnis einer Befragung von 751 Realschülerinnen und –schülern nach ihren beliebtesten und unbeliebtesten Fächern (Muckenfuß 1995).

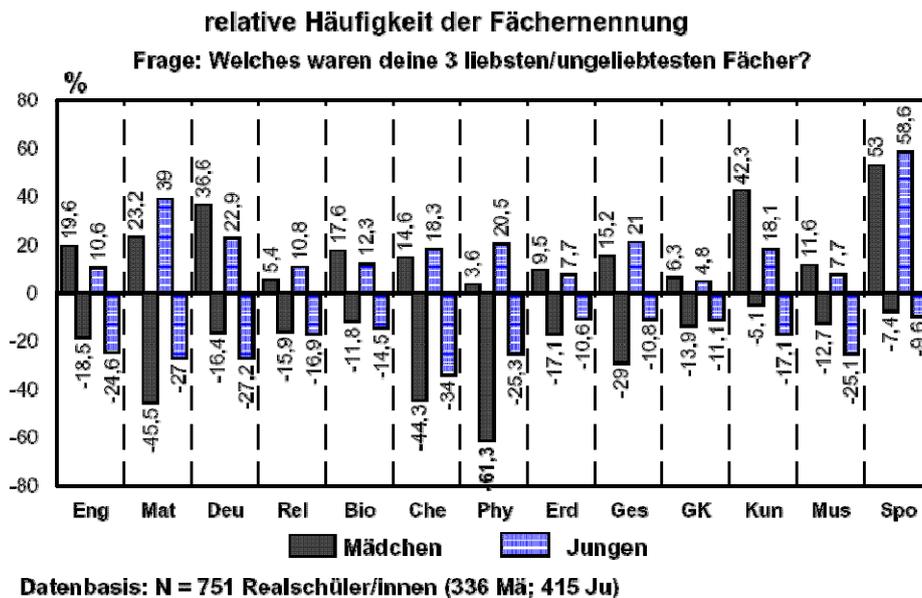


Abbildung 1: Schülerbefragung zur Fächerbeliebtheit (aus Muckenfuß 1995, S. 77)

Die befragten Schülerinnen und Schüler sollten jeweils ihre drei liebtesten und unbeliebtesten Fächer angeben. Während bei einem Viertel der Jungen die Physik zu den unbeliebtesten Fächern gehörte, gaben immerhin 20% die Physik als beliebtes Fach an. Viel besorgniserregender sah das Ergebnis bei den Mädchen aus: Nur 3,6% bezeichneten die Physik als eines ihrer liebsten Fächer, im Vergleich zu 61%, die sie als unbeliebtes Fach sahen. Muckenfuß führt diesen Befund noch weiter aus: „Es zeigt sich das erwartete Bild, dass Physik für Mädchen mit Abstand das unbeliebteste Fach ist. In den Originalfragebögen war „Physik“ oft noch unterstrichen, mit Ausrufezeichen oder ähnlichen Hervorhebungen versehen, um den Abstand dieses Faches zu den beiden weiteren als unbeliebt aufgeführten zu dokumentieren. Es ist deshalb keine Übertreibung wenn [...] darauf hingewiesen wurde, dass sich das Fach Physik für viele Mädchen zum schulischen Horror entwickelt.“ (Muckenfuß 1995, S. 77).

1.2 Interesse an Physik und am Physikunterricht

Es ist eine naheliegende Vermutung, dass der Physikunterricht deshalb als so unbeliebt eingestuft wird, weil der Überlapp zwischen seinen Inhalten und den Interessen der Schülerinnen und Schüler gering ist. Zur Erforschung der Schülerinteressen in Physik wurde eine Reihe von Studien durchgeführt. Das Ziel war, diejenigen Bereiche der Physik zu identifizieren, die Schülerinnen und Schüler am interessantesten finden. Auf die Interessen der Schülerinnen

und Schüler abgestimmter Unterricht, so die Hoffnung, sollte dazu führen, dass der Physikunterricht als „weniger abschreckend“ empfunden wird.

a) Sachinteresse und Fachinteresse

Zur begrifflichen Klarheit wird zwischen *Fach*interesse und *Sach*interesse unterschieden (für das Folgende s. z. B. Häußler et al. 1998). Fachinteresse bezeichnet das Interesse am Schulfach Physik und seinen Inhalten. Dass das Fachinteresse an Physik im Vergleich zu anderen Fächern recht gering ist, wurde oben schon ausgeführt. Ein detaillierteres Bild, das geschlechtspezifische Unterschiede und den Interessenverlauf über die Schuljahre wiedergibt, zeichnet die Untersuchung von Hoffmann et al. (Hoffmann und Lehrke 1986, Häußler und Hoffmann 1995). Die Grafik unten zeigt den Prozentsatz der Schülerinnen und Schüler, die in einer Umfrage „großes Interesse“ am Fach Physik bekundeten.

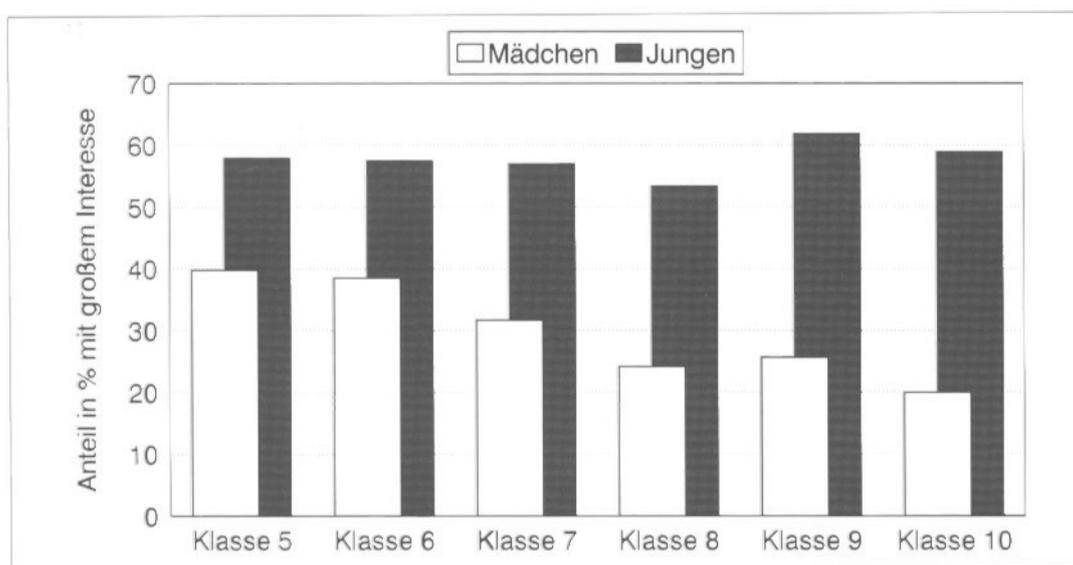


Abbildung 2: Anteil der Schülerinnen und Schüler mit großem Interesse am Fach Physik (aus Häußler et al. 1998), S. 125.

Man erkennt, dass bei den Jungen das Interesse am Fach Physik im Verlauf der Sekundarstufe I relativ konstant bleibt, während es bei den Mädchen im Verlauf der Schuljahre beständig absinkt, bis zu dem bekannten Bild der Physik als „Horrorfach“ für die Mädchen.

b) Faktoren, die das Sachinteresse bestimmen

In der genannten Untersuchung wurden in einer Schülerbefragung die Faktoren identifiziert, die das Sach- bzw. Fachinteresse an Physik hauptsächlich bestimmen. Dabei ergaben sich aufschlussreiche Ergebnisse. Ob eine Schülerin oder ein Schüler ein hohes oder niedriges *Sach*interesse an Physik hat, wird von den folgenden vier Faktoren am besten vorhergesagt:

- (1) Das Fasziniertsein von technischen bzw.
- (2) natürlichen Phänomenen,
- (3) das Selbstvertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit,
- (4) die empfundene persönliche Bedeutung.



Abbildung 3: Das Fasziniertsein von technischen und natürlichen Phänomene ist wichtig für das Sachinteresse (Quellen: <http://ots.fh-brandenburg.de/>, <http://www.vulcan-stromboli.de/index2.html>)

Das bedeutet: Wenn eine Schülerin oder ein Schüler zu den Fragen, die diese Faktoren charakterisieren, Zustimmung äußert, dann ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass er oder sie sich auch für physikalische Sachthemen interessiert. Das Geschlecht taucht bemerkenswerterweise nicht eigens unter den Faktoren auf, die das physikalische Sachinteresse beschreiben. Die vorhandenen geschlechtsspezifischen Unterschiede werden offenbar schon von den vier genannten Faktoren hinreichend beschrieben.



Abbildung 4: Das Fachinteresse wird hauptsächlich vom Selbstvertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit bestimmt

c) Faktoren, die das Fachinteresse bestimmen

Für das *Fach*interesse sieht die Sachlage ganz anders aus. Das Interesse am Schulfach Physik wird ganz dominant von einem Faktor beschrieben, der mit Physik gar nichts zu tun hat: Das Selbstvertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit. Um das Fachinteresse eines Schülers vorherzusagen, muss man nicht wissen, ob er von natürlichen oder technischen Phänomenen fasziniert ist, sondern nur die Selbsteinschätzung seiner Leistungsfähigkeit im Fach Physik kennen. Häußler et al. (1998, S. 126) formulieren: „Selbst wenn sich Schülerinnen oder Schüler für Physik [...] interessieren, selbst wenn sie sich für Technik und Naturphänomene begeistern können, bedeutet das noch lange nicht, dass sie an dem ihnen gebotenen [Physikunter-

richt] interessiert sind. Das kann nur so gedeutet werden, dass der Unterricht, so wie er heute üblicherweise betrieben wird, in der Regel die Interessen der Schülerinnen und Schüler kaum berücksichtigt. [...] Da bei Mädchen das Selbstvertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit in aller Regel wesentlich schwächer als bei den Jungen ausgeprägt ist, und die Differenz im Laufe der Schulzeit zunimmt, lassen sich die Interessenunterschiede zwischen Mädchen und Jungen fast vollständig auf dieses Merkmal zurückführen.“

1.3 Interessentypen

Einen anderen Blickwinkel auf das Schülerinteresse an Physik liefert die Studie von Häußler (1987; auch diese Untersuchung wird in Häußler et al. 1998 referiert). Hier wurde untersucht, inwieweit man die Schülerinnen und Schüler hinsichtlich ihrer Physikinteressen in Gruppen einteilen kann, die sich für unterschiedliche Anwendungsbereiche oder Tätigkeiten in ähnlicher Weise interessieren. Es ließen sich drei *Interessentypen* identifizieren, die sich in ihrem Interesse für drei *Interessenbereiche* unterschieden, die folgendermaßen charakterisiert werden (Häußler 1998, S. 129):

- (1) Interessenbereich **Physik und Technik**. Fragen aus diesem Bereich beziehen sich auf das Interesse an der „reinen Physik“ und auf das Interesse an Technik. Typische Charakterisierungen sind etwa: „Versuche planen zu der Frage, wovon es abhängt, wie schnell ein Gegenstand abkühlt“ oder „Mehr darüber erfahren, welche Aufgaben elektronische Bauteile in Haushaltsgeräten haben“.

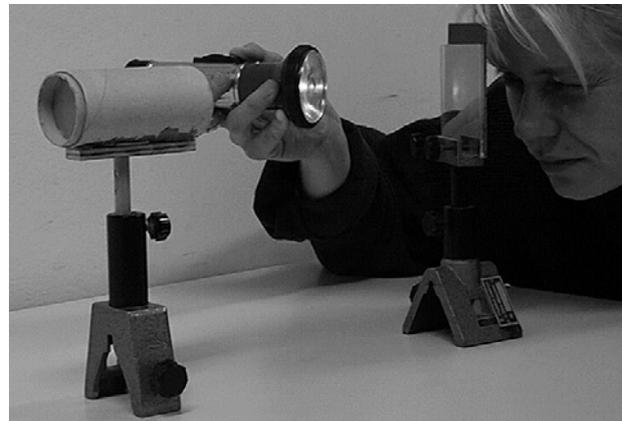


Abbildung 5: Interessenbereiche Physik und Technik, Mensch und Natur und Gesellschaft
(Quelle: http://www.buw-nb-ev.de/e_techn_college.htm,
<http://www.de.framatome-anp.com/anp/d/foa/anp/products/kkw/img/kki.jpg>)

- (2) Interessenbereich **Mensch und Natur**. Fragen aus diesem Bereich beziehen sich auf das Interesse an Anwendungen der Physik auf die Erklärung von Naturphänomenen („Mehr darüber erfahren, wie die Farben am Himmel zustande kommen“) und auf den menschlichen Körper („Mehr Einblick erhalten, wie Mikroskope oder verschiedene Spiegel in der Arztpraxis Verwendung finden“).
- (3) Interessenbereich **Gesellschaft**. Fragen aus diesem Bereich beziehen sich auf das Interesse an einer Erörterung der gesellschaftlichen Bedeutung von Physik („Über militärische und friedliche Anwendung von Lasern diskutieren“).

Die Interessentypen unterscheiden sich nun in ihrem relativen Interesse für die drei Interessenbereiche. Die untersuchten Schülerinnen und Schüler ließen sich in drei verschiedene Interessentypen einteilen (Häußler et al. 1996):

- Typ A: Er interessiert sich für alle Interessenbereiche etwa gleich stark. Typ A ist weit häufiger ein Junge als ein Mädchen und eher jünger als älter. Er hat relativ gute Noten in Physik und ist davon überzeugt, dass seine Leistungen in Physik auch zukünftig gut sein werden. Bezüglich der Inhalte des Physikunterrichts hat Typ A keine besondere Präferenzen, vielmehr ist er an allem interessiert, was ihm im Physikunterricht geboten wird: Sein Wissen über physikalische Zusammenhänge zu vermehren, Experimente zu planen und durchzuführen und hinterher sogar quantitativ auszuwerten, etwas über technische Geräte zu erfahren, Geräte zu konstruieren, Erklärungen für Naturphänomene zu erhalten und etwas über technische Berufe zu erfahren und darüber, wie Physik z.B. in der Medizin eingesetzt werden kann. Er ist nicht minder an der gesellschaftlichen Bedeutung der Physik interessiert und daran, mit anderen darüber zu diskutieren. Er ist neben Physik auch an Mathematik, Chemie und Technischem Werken mehr interessiert als die beiden anderen Typen. Sein Interesse an Deutsch, Kunst und Sprachen ist dagegen etwas geringer. Etwa 20% der Schülerinnen und Schüler lassen sich dem Typ A zuordnen (hauptsächlich Jungen).
- Typ B: Er interessiert sich hauptsächlich für den Bereich Mensch und Natur, während das Interesse für die anderen beiden Bereiche geringer ist. Beim Typ B gibt es etwa gleich viel Jungen und Mädchen und seine Physiknote liegt überwiegend im mittleren Bereich. Typ B ist sich seines Vermögens, in Physik etwas leisten zu können, nicht so ganz sicher. Er interessiert sich in erster Linie für die eher praktische Seite der Physik. Er baut z.B. gern Geräte und ist daran interessiert, wie Physik zum Nutzen des Menschen, z.B. in der Medizin, eingesetzt werden kann. Auch Naturerscheinungen und wie man sie erklären kann, finden Typ B interessant. Physik um der Physik willen zu lernen und kontroverse physikalische Technologien zu diskutieren steht nicht im Zentrum seines Interesses. Es gibt kein Schulfach, an dem er mehr als die anderen Typen interessiert wäre. Zum Interessentyp B gehören etwa 55% der Schülerinnen und Schüler (Jungen und Mädchen etwa gleich häufig).
- Typ C: Er interessiert sich für den Bereich Gesellschaft, eingeschränkt auch für den Bereich Mensch und Natur, ist aber am Interessenbereich Physik und Technik ziemlich uninteressiert. Typ C ist eher ein Mädchen als ein Junge insbesondere in den höheren Klassenstufen. Die Physiknote liegt eher im schlechteren Bereich und das Vertrauen,

dass sich das bessern könnte, ist gering. Typ C ist an Physik nur interessiert, wenn es ihm persönlich etwas bedeutet. Er ist z.B. daran interessiert, wie man Naturerscheinungen erklären kann und wie man mit Hilfe von Physik anderen Menschen helfen kann, z.B. mit Apparaten in der Medizin. Sein Hauptinteresse liegt darin, etwas über die sozialen Folgen von Physik und physikalischen Technologien zu erfahren und darüber zu diskutieren. Interesse daran, Geräte zu bauen oder etwas über deren Funktionsweise oder über technische Berufe zu erfahren, ist dagegen deutlich gedämpft. Physik um der Physik willen zu betreiben, stößt auf ein ausgesprochen geringes Interesse. Im Vergleich zu den beiden anderen Typen ist Typ C mehr an den Fächern Deutsch, Kunst und Fremdsprachen interessiert. Etwa 25% der Schülerinnen und Schüler lassen sich dem Interessentyp C zuordnen (vorwiegend Mädchen).



Abbildung 6: Physikalische Inhalte aus Medizin, Biologie und Sport kommen Schülerinteressen besonders entgegen (Quelle: <http://www.hildegardisschule.de>)

Die hier aufgeführten Befunde sind deshalb so interessant, weil man daraus Strategien entwickeln kann, die Inhalte des Physikunterrichts möglichst gut an die Interessen der Schülerinnen und Schüler anzupassen. Wählt man nämlich die Themen aus dem Interessenbereich „Mensch und Natur“ kann man damit rechnen, dass der Unterrichtsinhalt für die Interessentypen A und B interessant ist. Das bedeutete, dass man den Interessen von etwa drei Vierteln der Schülerinnen und Schüler entgegengekommen wäre. Dies ist ein starkes Argument dafür, im Physikunterricht vermehrt auf Inhalte aus dem Alltag einzugehen, die aus dem Bereich der Naturphänomene und des menschlichen Körpers (Medizin, Biologie und Sport) entstammen.

2 Alltagsbezug im Physikunterricht¹

Die Forderung nach mehr Alltagsbezug im Physikunterricht wird schon seit langer Zeit erhoben. In der Schulpraxis herrscht auch Einigkeit über das Ziel, den Alltagsbezug im Unterricht zu fördern. Die Realisierung dieses Ziels scheint bisher aber noch nicht in ausreichendem Maß gelungen zu sein. Es ist daher lohnend, sich näher anzuschauen, auf welche Weise Alltagskontexte in den Physikunterricht eingebunden werden können.

Man kann zwei Ausprägungsstufen der Alltagsorientierung im Unterricht unterscheiden (die natürlich fließend ineinander übergehen):

1. *Fachlich orientiertes Lernen mit eingebetteten Alltagsbezügen*

Der Unterricht geht in dieser Variante gemäß der physikalischen Fachsystematik vor, die sich in den traditionellen Lehrplaninhalten widerspiegelt. Die Alltagsbezüge äußern sich darin, dass die Unterrichtsinhalte in mannigfaltiger Weise immer wieder auf Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler bezogen werden. Experimente werden oft mit Alltagsgegenständen bzw. als Freihandexperimente durchgeführt.

2. *Lernen anhand authentischer Kontexte*

Hier geht der Unterricht von einer konkreten, möglichst authentischen Problemsituation aus (die natürlich so ausgewählt worden ist, dass man an ihr etwas Physikalisches lernen kann). Im Mittelpunkt steht das Problem. Die Physik ist dabei zunächst nur soweit von Interesse wie sie zur Lösung des Problems benötigt wird. Das Lernen orientiert sich nicht primär an der physikalischen Fachsystematik. Daher müssen zurückliegende Unterrichtsinhalte (oder sogar noch gar nicht behandelte Sachverhalte) in den Unterricht eingebunden werden. Viele authentische Probleme halten sich nicht an Fächergrenzen, so dass sich in diesen Fällen fachübergreifender Unterricht zwangsläufig einstellt. Oft ist man stärker an qualitativen Argumenten interessiert, um das Problem zu durchdringen und zu gliedern.

Die beiden Ausprägungsstufen beziehen sich allein auf die inhaltlichen Aspekte des Unterrichts, nicht auf die methodischen. Insbesondere ist die zweite Variante nicht mit Projektunterricht oder Ähnlichem zu verwechseln. In beiden Varianten sind offene Unterrichtsformen ebenso möglich wie ein hohes Maß an Lehrersteuerung. In der Regel müssen in der zweiten Variante aufgrund der höheren Komplexität der Probleme sogar mehr Impulse von der Lehrerin oder dem Lehrer ausgehen.

Während das Einbinden von Alltagsbezügen in den traditionellen Unterricht schon seit langem angestrebt wird – und moderne Schulbücher dies berücksichtigen – wird die zweite Variante erst seit Labuddes „Erlebniswelt Physik“ (1993) und Muckenfuß' Konzeption des „Lernens in sinnstiftenden Kontexten“ (1995) in stärkerem Maß wahrgenommen. Der Ansatz des IPN-Curriculums 9/10 verfolgte in den 70er Jahren mit Themen wie „Energieversorgung durch Kernkraftwerke“, „Steuerung und Automation“ oder „Elektronik“ eine Form von Kontextorientierung. In den USA hat Bloomfield mit „How things work“ einen sehr qualitativ

¹ Die folgenden Abschnitte enthalten eine erweiterte und modifizierte Fassung des Beitrags „Kontextorientierung“ von R. Müller aus dem Buch H. F. Mikelskis, Physik-Didaktik – eine praxisorientierte Einführung, Cornelsen-Verlag Berlin (2005).

orientierten Ansatz entwickelt, in dem Physik dadurch gelernt wird, dass man die Funktionsweise von Objekten aus dem Alltag untersucht (Bloomfield 2001).

2.1 Aspektcharakter der Physik und die „synthetische Wirklichkeit“ im Physikunterricht

Bevor man sich mit der erfolgreichen Einbettung von Alltagskontexten in den Physikunterricht befasst, ist es sinnvoll, zuerst einmal auf die Probleme des „normalen“ Physikunterrichts einzugehen. Wieso existiert das Problem mangelnder Alltagsbezüge eigentlich? Was macht es so schwierig, Alltagsthemen in (für die Schülerinnen und Schüler) überzeugender Weise in den Unterricht einzubinden?

Eine der Wurzeln des Problems scheint wohl in dem zu liegen, was Wagenschein als den *Aspektcharakter* der Physik bezeichnet hat. Die Physik betrachtet die Vorgänge in der Natur unter einem ganz bestimmten, eingeschränkten Blickwinkel. Vieles, was in der lebensweltlichen Sichtweise interessant und wichtig, muss in der physikalischen Perspektive aktiv ausgeblendet werden: „Es bleibt der Physik von der Natur vielleicht so viel oder so wenig übrig wie von einem Blütenbaum bleibt, wenn wir seinen Schatten auf der Mauer ansehen: keine Farbe, kein Rauschen des Windes, kein Duft, kein Bienensummen, nur der Schatten: und doch sagt er Richtiges: Geometrisches. Die Projektion ist genau, aber arm“ (Wagenschein 1995).

Dass dieses Absehen von lebensweltlich Relevantem durchaus fruchtbar und bereichernd sein kann, erschließt sich nicht von selbst, sondern muss erarbeitet, vermittelt und erfahren werden. Im normalen Unterricht findet dieses „Geleiten zur physikalischen Perspektive“ kaum statt. Schlichting (1992) schreibt:

Diesen "Umweg" meidet der Physikunterricht in der Regel: Die Schüler werden dort direkt und auf systematische Weise mit meist künstlichen, fiktiven Objekten und gereinigten Phänomenen in Verbindung gebracht, deren einziger Zweck darin besteht, einige isolierte physikalische Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten zu offenbaren. Der Versuch, die Welt durch Integration solcher Zusammenhänge und Gesetze zu rekonstruieren ist – wenn er denn überhaupt unternommen wird - zum Scheitern verurteilt. Denn ihm liegt ein unangemessenes Verständnis des Verhältnisses von physikalischem und lebensweltlichem Denken zugrunde. Die Lebenswelt ist eben kein kompliziertes physikalisches System. Sie besitzt allenfalls einen physikalischen Aspekt neben anderen. Ein Lehrer, der Ernst machen will mit der Forderung, den Schülern Hilfen zu geben, ihre wissenschaftlich technische und natürliche Welt physikalisch zu verstehen, muß sich und den Schülern erst einmal klarmachen, dass die Welt physikalisch zu erfassen, beinhaltet, sie „so zu beschreiben, wie wir sie nicht erfahren“.

Dass die Hinführung der Schülerinnen und Schüler von der Lebenswelt zur physikalischen Perspektive kaum jemals ernsthaft versucht wird, erkennt man leicht, wenn man „typischen“ Physikunterricht mit unbefangenen Augen betrachtet. Was man im Normalfall im Physikunterricht sieht, kann man mit dem Stichwort „synthetische Wirklichkeit“ bezeichnen. Synthetische Wirklichkeit bedeutet: Der Unterricht schafft sich seine eigene Realität, die von der Lebenswelt weitgehend abgekoppelt ist. Man kann die synthetische Wirklichkeit im Physikunterricht an folgenden Symptomen erkennen:

1. *Im Physikunterricht sieht man Dinge, die man sonst nirgendwo sieht.* Kraftmesser, Massestücke, Netzwürfel, Demonstrationsspulen, Verstärker, Stativmaterial. Die Liste könnte man noch sehr lange fortsetzen. Blättert man die Kataloge der Lehrmittelfirmen durch, findet man praktisch kein Gerät, das an irgendeinen Gegenstand außerhalb des Physikunterrichts erinnert. In Schüleraugen sehen die vielen „Kästen“ alle gleich aus und die „Spezialteile“ für einzelne Versuche merkwürdig bis befremdlich.



Abbildung 7: Im Physikunterricht sieht man Dinge, die man sonst nirgendwo sieht...

2. *Im Physikunterricht verwendet man Wörter, die man sonst nirgendwo benötigt.* Beispiele für Wörter, denen ein Mensch in einem durchschnittlichen Leben ausschließlich im Physikunterricht begegnet, sind Reuterlampe, Wellrad, Hangabtriebskraft, Normalkraft, Konduktorkugel. Auch diese Liste könnte man noch weiter fortsetzen. Dazu kommen Wörter, die man zwar kennt, die aber in der Physik eine andere oder im Vergleich zum Alltag sehr spezielle Bedeutung haben: Kraft, Energie, Leistung, Arbeit, Wärme, Ladung, Trägheit.
3. *Im Physikunterricht tut man Dinge, die man sonst nirgendwo tut.* Man schaut auf eine Kugel, die an einem Faden hängt und zählt, wie oft sie hin und her schwingt. Oder man notiert Zeigerausschläge in Tabellen. Daneben lernt man Gesetze (z. B. Trägheitsgesetz), die dem gesunden Menschenverstand und den eigenen Vorstellungen eklatant zu widersprechen scheinen.

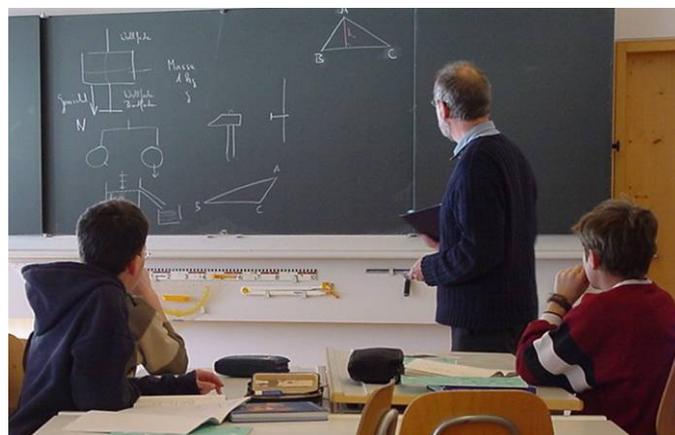


Abbildung 8: Im Physikunterricht tut man Dinge, die man sonst nirgendwo tut

Die synthetische Wirklichkeit im Physikunterricht führt dazu, dass die Begriffe und Inhalte des Physikunterrichtes in einem reinen Schulkontext erlebt werden. Inhaltlich hat die Schulkontextwirklichkeit mit „der Welt draußen“ kaum etwas zu tun. Für Schülerinnen und Schüler ist es schwer, Verbindungen mit bekannten Begriffen, Erfahrungen und Vorstellungen herzustellen, „Anschauung“ zu gewinnen.

Das Geschehen lässt sich gut mit dem von Wittgenstein stammenden Begriff des *Sprachspiels* erfassen. Ein Sprachspiel ist ein „in sich geschlossenes System der Verständigung“, dessen Regeln die Beteiligten durch den Gebrauch erlernen. Aussagen besitzen nur innerhalb des Sprachspiels Bedeutung, sie sind nicht nach außen übertragbar: „Die Grenzen meiner Sprache sind die Grenzen meiner Welt“.

Die Vermutung, dass im Physikunterricht ein Sprachspiel in einer sehr engen Welt stattfindet, wird durch etliche Befunde gestützt: Man weiß, dass Schülerinnen und Schüler ihren Vorstellungen widersprechende Aussagen der Physik oft zwar für den Unterricht akzeptieren (sie halten sich an die Regeln des Sprachspiels), aber sie glauben nicht an ihre Gültigkeit im wirklichen Leben. Außerhalb des Klassenraums wird das Sprachspiel nicht mehr gespielt.

Dem hermetischen (d. h. in sich abgeschlossenen, sich selbst genügenden) Charakter einer Physikstunde entspricht auch ihr weitgehend ritualisierter Ablauf. Leisen (1999) hat ein typisches „Unterrichtsdrehbuch“ einer Physikstunde wie folgt beschrieben:

1. Die Stunde beginnt mit der Demonstration eines physikalischen Phänomens oder mit einer themenbezogenen Problemfrage.
2. Es folgt eine Erörterung von Hypothesen oder Lösungsansätzen im fragend-entwickelnden Unterrichtsgespräch, das auf einen vorbereiteten Versuchsaufbau hinausläuft.
3. Im Demonstrationsexperiment unter Schülermitwirkung wird die Hypothese bestätigt oder die Problemlösung experimentell belegt.
4. Die Ergebnisse werden unter Einbindung von Schülerbeiträgen an der Tafel dokumentiert und von den Schülern in das Heft übernommen.
5. Die Stunde schließt mit weiterführenden Fragen, weiteren Anwendungsbeispielen, Ergänzungen oder experimentellen Demonstrationen.

Ähnliche Muster zeigen sich auch in Videostudien, die zum Ziel haben typische Muster unterrichtlichen Handelns („Skripte“) zu identifizieren (Seidel et al. 2002).

Wenn man nach dem Ursprung der Monokultur dieses Unterrichtsdrehbuchs fragt, stößt man nicht auf sachlogische oder lernpsychologische Erwägungen. Historisch ist es aus dem Versuch hervorgegangen, den Prozess der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung in der Schule nachzubilden, in der Hoffnung, die Schülerinnen und Schüler damit an die wissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen heranzuführen. Oft genug gelingt dies nicht in der angestrebten Weise; nicht zuletzt, weil es aus einem verkürzten Verständnis des komplexen Prozesses „wissenschaftliche Erkenntnis“ heraus geschieht. Es ist daher erlaubt, über alternative Unterrichtsmodelle nachzudenken.

Man kann das Problem der synthetischen Wirklichkeit noch einmal aus einem anderen Winkel beleuchten, indem man einen Schritt zurücktritt und versucht, das traditionelle Selbstverständnis des Physikunterrichts zu beschreiben: Im Physikunterricht wird angestrebt, einen möglichst großen Vorrat an Wissen und Können bereitzustellen, damit ihn die Schülerinnen und Schüler später einmal anwenden können. Aber dieses „später einmal“ findet nicht in der Schule statt, und für die meisten Schülerinnen und Schüler kommt es nie.

2.2 Alltagskontexte: Argumente aus der Lernpsychologie

Für das Lernen in Kontexten, die mit Alltagssituationen verknüpft sind, gibt es gewichtige Argumente aus der Lernpsychologie. Nach der traditionellen Auffassung vom Lernen, die auch heute noch in vielen Köpfen herumgeistert, werden Wissensstrukturen durch Instruktion vom Lehrenden zum Lernenden übertragen. Der Lehrer erklärt, und die Schüler nehmen auf. Wenn sie das vom Lehrer Gesagte nur richtig erfassen, sind sie am Ende im mentalen Besitz einer mehr oder weniger exakten Kopie der zu vermittelnden Wissensstruktur. Diese Auffassung des Lernprozesses entspricht in etwa dem Modell des „Nürnberger Trichters“ (Abbildung 9). Weil in diesem Modell Wissensstrukturen exakt übertragen werden, sollte die Abfolge der Lerninhalte linear und systematisch strukturiert stattfinden.



Abbildung 9: Traditionelle Sichtweise des Lernprozesses

Sehr oft tritt dabei allerdings das Phänomen auf, das in der Lernpsychologie als „träges Wissen“ bezeichnet wird. Weil sie keinen Wirklichkeitsbezug erkennen können, sind die Schülerinnen und Schüler nicht in der Lage, das Gelernte auf authentische Probleme zu übertragen. Das in systematischer Form erworbene Wissen „passt“ nicht „einfach so“ auf konkrete Anwendungen. Weinert (1998) schreibt:

Systematisch erworbenes Wissen [...] ist anders strukturiert, anders organisiert und anders abrufbar als es die meisten praktischen Anwendungssituationen erfordern. Prinzipiell verfügbares Wissen bleibt deshalb oft tot, träge und ungenutzt, obwohl man es eigentlich zur Lösung bestimmter Probleme braucht.

Heute allgemein akzeptiert ist die sogenannte *konstruktivistische* Auffassung vom Lernprozess. Die Grundidee lässt sich einfach formulieren: Das Lernen wird als ein *aktiver Konstruktionsprozess* auf Seiten der Lernenden angesehen. Wenn Lernende mit neuen Lerninhalten

konfrontiert werden, werden diese nicht einfach wie auf ein leeres Blatt in ihr Gehirn geschrieben. Immer schon ist im Kopf des Lernenden eine Wissensstruktur bereits vorhanden, an die der Lernprozess anknüpfen kann und muss. Beim Lernen setzen sich die Lernenden selbstgesteuert mit den Lernangeboten auseinander, wobei ihre vorhandene Wissensstruktur ergänzt und modifiziert wird. „Lehren“ bedeutet dann, den Lernenden Lernumgebungen anzubieten, in denen der Aufbau der erwünschten Wissensstrukturen möglichst gut unterstützt wird.

Oft wird in den konstruktivistischen Lerntheorien der Begriff des „situierten Lernens“ hervorgehoben. Er wird in einer weiten Bedeutungsvielfalt gebraucht, doch in unserem Zusammenhang soll er nur so viel aussagen, dass das Lernen eng an die Lernsituation gebunden ist und nicht ohne weiteres davon abgelöst werden kann. Wissen, das in einem reinen Schulkontext erworben wird, bleibt auch an diesen Schulkontext gebunden und kann in einer Anwendungssituation oft nicht abgerufen werden. Jeder Physiklehrer macht beim Versuch, auf Inhalte des Mathematikunterrichts zurückzugreifen, die Erfahrung, dass der Transfer oft noch nicht einmal zwischen verschiedenen Unterrichtsfächern gelingt.

Im Hinblick auf die Situietheit des Lernens argumentieren Reinmann-Rothmeier und Mandl (2001):

„Ausgangspunkt von Lernprozessen sollten authentische Probleme sein, die aufgrund ihres Realitätsgehalts und ihrer Relevanz dazu motivieren, neues Wissen oder neue Fertigkeiten zu erwerben. Die Lernumgebung ist so zu gestalten, dass sie den Umgang mit realistischen Problemen und authentischen Situationen ermöglicht und anregt. Der Vorteil: Situietheit und Authentizität sichern einen hohen Anwendungsbezug beim Lernen.“

2.3 Fachsystematik vs. Kontexte

Auch wenn das Interesse der Schülerinnen und Schüler sowie die Argumente aus der Lernpsychologie das Ausgehen von Alltagsproblemen und das Unterrichten in authentischen Kontexten sehr plausibel machen: Wenn das Rezept so einfach wäre, wie es sich anhört, würde es im Unterricht sicher schon mit weitaus größerer Selbstverständlichkeit praktiziert, als es derzeit der Fall ist. Die Kontextorientierung ist in zweifacher Hinsicht problematisch:

a) „Vorgebliche“ Kontexte

Authentische Kontexte werden vorgegaukelt, wo in Wirklichkeit keine sind. Ausgehend vom fachsystematisch durchgeplanten Lernstoff wird ein Kontext als „Feigenblatt“ gesucht, um die Lernsituation für die Lernenden vermeintlich interessanter zu gestalten. Ganz regelmäßig tauchen diese Feigenblätter in der „Motivationsphase“ zu Beginn einer Unterrichtseinheit auf. Charakteristischerweise wird der vorgebliche Kontext, zu deren Lösung der physikalische Inhalt angeblich eingeführt wurde, im weiteren Verlauf der Stunde mit keinem weiteren Wort erwähnt.

Auch Übungsaufgaben sind beliebte Tummelplätze für vorgebliche Kontexte. Ein Beispiel ist die folgende Aufgabe: „Ein Weitspringer hat eine Absprunggeschwindigkeit von 9,5 m/s und springt unter einem Winkel von 28° ab. Berechne die Sprungweite.“ Obwohl Sport sicher ein

motivierendes Thema ist, handelt es sich hier um eine Fragestellung, die so in der Realität niemals auftauchen würde. Bei Sportveranstaltungen werden sicherlich nicht die Absprunggeschwindigkeit und der Absprungwinkel gemessen, um die Sprungweite zu bestimmen. Auch sonst fällt es schwer, sich eine Situation vorzustellen, in der diese Frage gestellt würde. Die primäre Absicht bei dieser Frage ist auch nicht, etwas über Weitsprung zu lernen. Die Formel für die Weite beim schrägen Wurf soll geübt werden, und der Weitsprung dient hier eben als Feigenblatt.

b) Episodenhafte Lernsituationen

Ein zweiter problematischer Aspekt beim Lernen in Kontexten ist der möglicherweise episodenhafte Charakter der Lernsituationen. Damit eine tragfähige Wissensbasis entsteht, muss das Gelernte mit bereits vorhandenem Wissen vernetzt werden. Die gelernten Inhalte müssen sich in einen größeren Zusammenhang einbetten lassen. Wenn die Lernsituationen den Lernenden eine solche Vernetzung nicht anbieten, kann das Wissen nur punktuell bleiben. Beim Lernen in Kontexten findet das Lernen – erwünschtermaßen – situiert statt. Das Abstrahieren des Gelernten vom Kontext und das Herstellen von Querverbindungen sind bei dieser Zugangsweise natürlich erschwert.



Abbildung 10: Episodenhafte Lernsituationen erschweren den Transfer des Gelernten in andere Anwendungskontexte

Die lernpsychologische Empfehlung zum Umgang mit diesem Problem ist das mehrfache Behandeln der gleichen Inhalte in multiplen Kontexten. Aus praktischen Gründen, insbesondere auch wegen der knappen Zeit, dürfte dies in den meisten Fällen jedoch kaum praktikabel sein.

In der Physik kommt – wie in vielen anderen in sich vernetzten Disziplinen – hinzu, dass das Lernen nicht einfach irgendwo beginnen kann, wie die Kontexte es gerade erfordern. Es gibt elementare Grundlagen und darauf aufbauendes Wissen. Historisch hat sich zur Organisation des physikalischen Wissens die Fachsystematik der Physik herausgebildet, die den Stoff in eine Reihe von Themenfeldern (wie Optik, Mechanik) gliedert und innerhalb dieser Themenfelder vom Einfachen zum Komplizierten voranschreitet.

Für Schülerinnen und Schüler wird das Lernen von Physik nicht einfacher, wenn man versucht, die fachsystematische Struktur der Physik durch die Orientierung des Unterrichts an Kontexten aufzubrechen. Die Geschichte der Physik illustriert das deutlich. In allen Teilgebieten der Physik lag die besondere Schwierigkeit darin, aus der Fülle der Alltagserfahrungen diejenigen zu identifizieren, die für die Begriffsbildung fruchtbar sind. Nicht umsonst hat es Jahrhunderte gedauert, bis es gelang, aus den für jedermann in vielerlei Kontexten des Alltags erkennbaren mechanischen Phänomenen den Aspekt der Trägheit zu identifizieren, von dem aus das weitere Forschen nach Gesetzmäßigkeiten erst fruchtbar wird. Es sind nicht viele Wege, die zu den Gesetzen der Physik führen, und sie sind so steinig, dass wir unsere Schülerinnen und Schüler auf die gangbarsten führen sollten.

c) „Fahrradphysik“ als Beispiel für episodenhafte Lernsituationen

Die Notwendigkeit einer fachsystematischen Gliederung des Physikunterrichts macht es schwierig, im kontextorientierten Unterricht „mitten aus dem Leben“ zu schöpfen und Physik an Alltagsgegenständen und Alltagssituationen zu lernen. Ein Beispiel, das in Empfehlungen und Lehrplänen immer wieder auftaucht, ist die „Physik am Fahrrad“. Hier werden die angesprochenen Schwierigkeiten besonders deutlich. Physikalische Entdeckungen lassen sich am Fahrrad in Hülle und Fülle machen (Abbildung 11). Aber damit das gelingt, muss man die entsprechende Physik schon *vorher* kennen und können. Andernfalls lassen sich die im Fahrrad-Kontext gemachten Erfahrungen nicht in das Wissensnetzwerk der Schülerinnen und Schüler einordnen, fallen somit auf unfruchtbaren Boden und verdorren. Wenn den Schülerinnen und Schülern schon bewusst ist, dass es auf den Angriffspunkt einer Kraft ankommt, kann man die Physik der Gangschaltung fruchtbar diskutieren. Wenn nicht, dann bleiben die gewonnenen Erkenntnisse sehr an der Oberfläche. Und das *Erarbeiten* der entsprechenden physikalischen Gesetze am Kontext wird aus Zeitgründen nicht möglich sein, wenn man gleichzeitig noch auf die Physik der Lichtanlage (Stromkreis, Dynamo, Induktion, Kondensatoren), der Bremsanlage (Hebelgesetz) und das Fahrverhalten (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Stabilität) und noch viel mehr eingehen möchte. Alles auf einmal geht nicht.

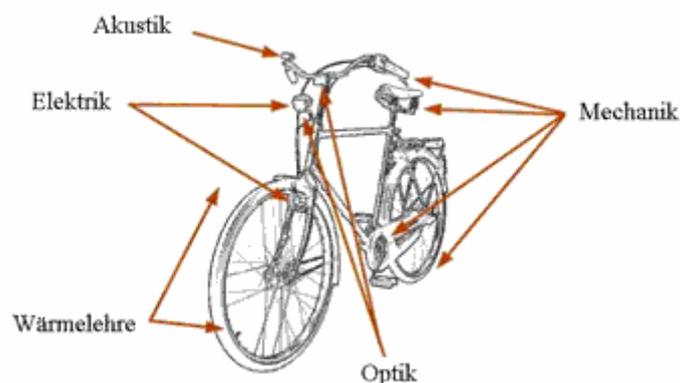


Abbildung 11: Fahrradphysik

(Quelle: http://www.pro-physik.de/Phy/Images/News/Leipzig_Fahrrad350.gif)

Auf das Beispiel „Fahrradphysik“ wurde nicht deshalb eingegangen, weil es als physikalischer Kontext im Physikunterricht so ungeeignet wäre. Ganz im Gegenteil: Es gibt Unterrichtsvorschläge, die fruchtbare Fahrradphysik betreiben, weil sie sich auf einen Aspekt (die

Kinematik) konzentrieren (Braune et al. 2000) und die physikalischen Inhalte dieses Teilaspekts gründlich herausarbeiten.

Die Schwierigkeiten beim Versuch, das „wirkliche Leben“ ins Klassenzimmer zu holen, bestehen unter anderem darin, dass die Zuordnung „ein Kontext – viele physikalische Inhalte“ im Physikunterricht nicht funktioniert. Das Lernen von Physik kann nicht voraussetzungslos an beliebiger Stelle beginnen. Man kann die Fachsystematik nicht einfach ignorieren. Diese Tatsache erschwert das Physiklernen in Alltagskontexten ungemein.

d) Schwierigkeiten des fachsystematisch orientierten Unterrichts

Ist deshalb das Unterrichten innerhalb der Fachsystematik nun der Königsweg zum erfolgreichen Physikunterricht? Sind Alltagskontexte zwar eine nette Idee, aber Physik lernen kann man mit ihnen nicht? Allzu glorreich steht der fachsystematisch orientierte Physikunterricht – der ja durchaus das herrschende Paradigma darstellt – auch nicht da. Das zeigen die zur Genüge bekannten internationalen Vergleichsstudien, und die oben beschriebenen Befunde zum Interesse am Physikunterricht sprechen auch eine deutliche Sprache.

Dass der fachsystematisch strukturierte Physikunterricht nicht so erfolgreich ist, wie er es sein könnte, mag daran liegen, dass die physikalische Fachsystematik zwar ein höchst effizientes Wissensnetzwerk ist – aber nur im Kopf eines Experten. Man kann nicht erwarten, dass es dem Lernenden gelingt, aus den Eindrücken, die im Unterricht auf ihn einströmen, ein solides und strukturiertes Wissensnetzwerk zu konstruieren. Die Fachsystematik ist aus den Problemen der realen Welt durch einen langen Abstraktions- und Destillationsprozess hervorgegangen. Dass Schülerinnen und Schüler in einem rein fachsystematisch orientierten Unterricht wenige Ansatzpunkte zur Vernetzung mit ihrem bereits vorhandenen Vorwissen und auch zur Auseinandersetzung mit ihren möglicherweise abweichenden Alltagserfahrungen finden, muss nicht überraschen.

2.4 Verknüpfung von Fachsystematik und Kontexten

Es gilt also, einen Ausweg aus dem folgenden Dilemma zu finden: Auf der einen Seite die Fachsystematik ohne Kontexte – das bedeutet trockenen Fachunterricht, der das Interesse der Schülerinnen und Schüler kaum zu wecken vermag. Auf der anderen Seite kontextorientierter Unterricht ohne Fachsystematik, in der die Anlage eines strukturierten Wissensnetzwerks in den Köpfen der Schüler schon durch die Beschaffenheit des Unterrichts erschwert wird.



Abbildung 12: Fachsystematik und Kontexte

Dieser Ausweg kann nur in einer sinnvollen Verknüpfung zwischen Fachsystematik und Kontexten liegen (Abbildung 12). Die Sachstruktur des Unterrichts muss sich an der physikali-

schen Fachsystematik orientieren, die den Aufbau einer systematisch organisierten Wissensstruktur erleichtert. Zur Anknüpfung an bereits gemachte Vorerfahrungen, zum Verleihen von Authentizität und zur Steigerung des Interesses dienen geeignet ausgewählte Kontexte. Dass diese Vorgehensweise auch aus lernpsychologischer Sicht erstrebenswert ist, führt Weinert (1998) an der bereits zitierten Stelle aus:

„Inzwischen lässt sich die wissenschaftlich fundierte Schlussfolgerung ziehen, dass Lernen sowohl sachsystematisch als auch situiert erfolgen muss. Mit anderen Worten: Neben einem wohlorganisierten disziplinären Wissenserwerb bedarf es von Anfang an einer Nutzung des erworbenen Wissens in lebensnahen, transdisziplinären, sozialen und problemorientierten Kontexten. Die Förderung sowohl des situierten als auch des systematischen Lernens ist eine wesentliche Bedingung für den Erwerb intelligenten, flexibel nutzbaren Wissens. [...] Nur wer neben der sachlogischen Systematik des Wissens auch die situativen Kontexte seiner möglichen Anwendung mitgelernt hat, erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass es in lebenspraktischen, variablen Kontexten kreativ angewandt wird.“

Ähnlich argumentieren Häußler et al. (1998):

„In manchen fachdidaktischen Diskussionen kommt die Fachsystematik nicht besonders gut weg. Sie gilt vielen als eine Art Bollwerk, hinter dem sich unbelehrbare Lehrkräfte verschanzen, um sich gegen eine Modernisierung des Unterrichts zu wehren. Wir sind dagegen der Auffassung, dass sich eine Erneuerung des naturwissenschaftlichen Unterrichts, die ausschließlich innerhalb der fachsystematischen Grenzen erfolgt, ebenso erschwert ist wie bei einem Verzicht auf die Fachsystematik. Würde sich der Unterricht nämlich nur an der Fachsystematik orientieren, so wäre der Zugang für den überwiegenden Teil der Schülerschaft versperrt [...]. Würde die Fachsystematik dagegen zugunsten einer Orientierung an der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler gänzlich verbannt werden, so käme ein Unterricht heraus, der wegen seines episodenhaften Charakters ebenfalls nicht besonders effektiv wäre. Es geht vielmehr darum, Unterricht so zu gestalten, dass sowohl eine systematische Entwicklung der Begrifflichkeit als auch eine Anbindung an die Lebens- und Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler möglich ist.“

Bezogen auf das Lernen von Physik bedeutet das: Es muss gelingen, die gegliederte Struktur des Wissensnetzes von der physikalischen Fachsystematik zu übernehmen, gleichzeitig aber die interessefördernde Wirkung der Kontexte zu nutzen und mit ihnen authentische Lerninhalte bereitzustellen (Müller 2006).

Dabei bedeutet: „Die Struktur der Fachsystematik übernehmen“ nicht das unreflektierte Festhalten an einer tradierten Abfolge von Inhalten, sondern die Orientierung am logischen Aufbau des physikalischen Gedankengebäudes. Entscheidend ist der „rote Faden“, der das Lernen strukturiert und das Einbetten des Gelernten in das vorhandene Wissensnetz erleichtert.

Das bedeutet: Die zu behandelnden Kontexte müssen so ausgewählt und elementarisiert werden, dass die Verzahnung Fachsystematik/Kontexte auch wirklich gelingt. Es sollen sich Fragestellungen und Problemsituationen ergeben, die glaubwürdig und authentisch sind. Gleichzeitig soll ein relativ eng umgrenztes physikalisches Thema anhand der Fragestellung gelernt

werden, d. h. der physikalische Inhalt soll im jeweiligen Kontext möglichst „in Reinform“ erschlossen werden.

Um das Problem der „vorgeblichen Kontexte“ zu vermeiden und die Kontexte glaubwürdig gestalten zu können, ist ein wesentlich größerer Anteil an erzählenden Elementen wünschenswert als im Physikunterricht bisher üblich. Im Idealfall sollten die Schülerinnen und Schüler zusammen mit den physikalischen Inhalten auch etwas Neues über den jeweiligen Kontext gelernt haben.



Abbildung 13: Beim Crashtest wird das Trägheitsgesetz anschaulich

Eine Schwierigkeit ist unvermeidlich: Das Lernen in authentischen Lernsituationen ist nicht einfacher, sondern schwieriger als das Lernen der schon „destillierten“ Lerninhalte des traditionellen Wegs. Die Gegenstände des wirklichen Lebens sind eben oft „sperrig“ und fügen sich nicht zwanglos in die Struktur der physikalischen Begrifflichkeiten ein. Hierzu sind drei Leitlinien zu beachten:

1. Besondere Sorgfalt bei der Auswahl der Kontexte ist geboten. Sie sollen so beschaffen sein, dass ein einzelner physikalischer Inhalt sich in dem zu Grunde gelegten Kontext besonders erschließt (z. B. schräger Wurf beim Weitsprung, Trägheitsgesetz beim Thema Auffahrunfall/Sicherheitsgurt (Abbildung 13)).

2. Ein vielfach betontes Anliegen des Physikunterrichts ist das Erlernen der Fähigkeit zur Modellbildung und des reflektierten Umgangs mit Modellen. Beim Lernen in Kontexten ergibt sich die Notwendigkeit dazu auf natürliche Weise. Ohne Modellbildung sind die Probleme (wegen ihres sperrigen Charakters) einer physikalischen Analyse kaum zugänglich. Dieses „Zähmen der Probleme“ durch Modellbildung ist aber auch ganz charakteristisch für die Vorgehensweise von Physikern im „echten Leben“.

3. Das Einarbeiten in die Kontexte, die dazu erforderlichen narrativen Elemente, die Modellbildung und die inhärente Komplexität authentischer Probleme machen das hier beschriebene Vorgehen natürlich sehr zeitintensiv. Das bedeutet: Es muss eine Auswahl sorgfältig zu behandelnder Lerninhalte getroffen werden, anderes wird dafür vernachlässigt. Die Forderung nach exemplarischem Lernen wird seit sehr langer Zeit erhoben; selten wird sie befolgt. Lernen in Kontexten macht das exemplarische Lernen zu einer Notwendigkeit.

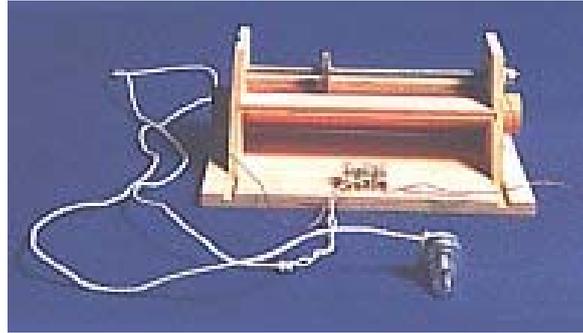


Abbildung 14: Um die Funktionsweise dieses Radio-Bausatzes zu verstehen, benötigt man nur elementare Physik
 (Quelle: <http://www.hitzel.com/geschenkidee/detektorradio.html>)

2.5 Ein Beispiel: „Physik in Alltag und Technik“

Wie die oben beschriebene Verknüpfung von Fachsystematik und Alltagskontexten konkret aussehen könnte, lässt sich am besten an einem Beispiel verdeutlichen. An der TU Braunschweig ist die physikalische Grundausbildung für Studierende des Lehramts Haupt- und Realschule in der beschriebenen Weise restrukturiert worden. Im viersemestrigen Kurs „Physik in Alltag und Technik“ werden die Inhalte der klassischen Gebiete Mechanik, Optik, Wärme- und Elektrizitätslehre in Alltagskontexten vermittelt. Eine Auswahl der Themen (für den Bereich Elektrizitätslehre) ist in Abbildung 15 zu sehen. Bis auf den Bereich „Spannung“, der rein innerphysikalisch behandelt wird, werden die Themen der Elektrizitätslehre in Kontexten wie „Magnetschwebbahn“, „Radio“ (Abbildung 14) oder „Laserdrucker“ behandelt. Die Abfolge der Themen ist dabei fachsystematisch orientiert: Elektrostatik – Magnetismus – Stromkreise – Induktion – elektromagnetische Wellen.

Die Kapitel „Laserdrucker/Fotokopierer“ und „Ausbruch eines Geysirs“ sind in dieser Handreichung in Abschnitt 3.2 und 4.1 abgedruckt, um einen Eindruck von der Art der Darstellung zu vermitteln. Ausgearbeitete Fassungen der einzelnen Kapitel (derzeit nur Mechanik) findet man unter: <http://www.tu-braunschweig.de/ifdn/physik/alltagsphysik>

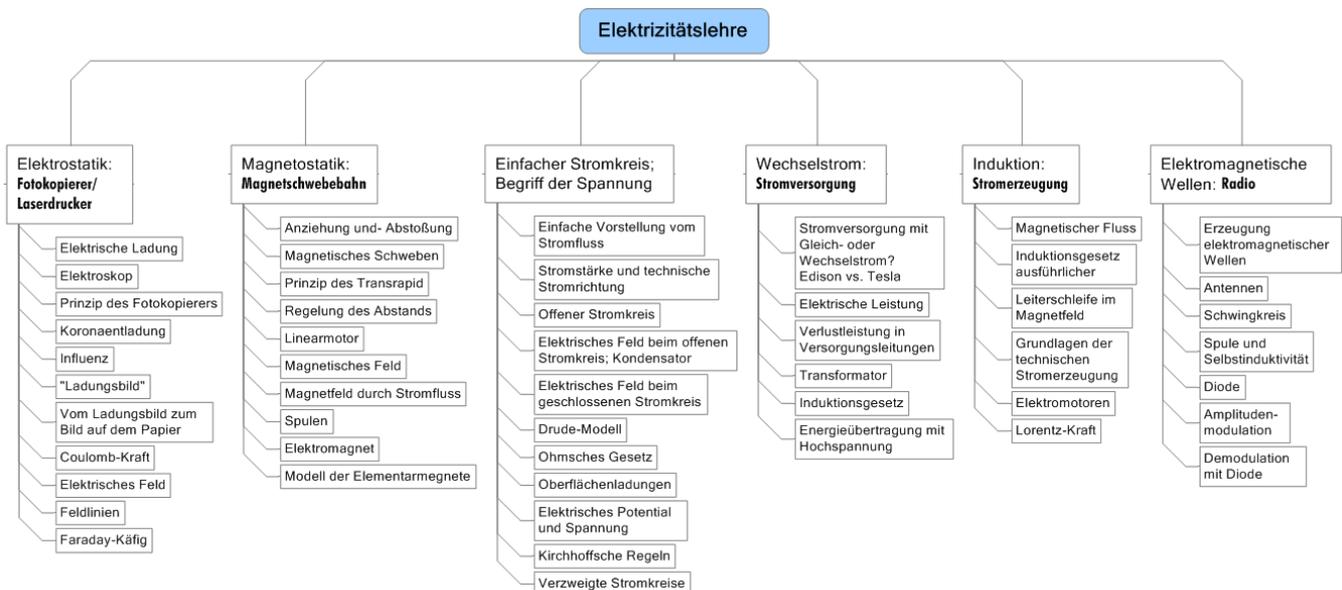


Abbildung 15: Gliederung eines Kurses "Elektrizitätslehre"

3 Wie funktioniert das – Technik im Physikunterricht

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die „theoretischen Hintergründe“ des Alltagsbezugs im Physikunterricht diskutiert wurden, sollen im Rest der Handreichung konkrete Beispiele für mögliche Alltagsthemen vorgestellt werden. Es gibt eine Fülle von Möglichkeiten, im Physikunterricht an Alltagsthemen anzuknüpfen und dabei die Interessen der Schülerinnen und Schüler aufzugreifen – über technische Geräte oder Naturphänomene, über Sport, Medizin oder Musik. Auch wenn es nicht möglich ist, eine vollständige Übersicht zu geben, sollen aus jedem der genannten Bereiche einige Beispiele vorgestellt werden.

Die Verknüpfung von Physik und Technik ist sehr eng, und so bietet es sich an, im Physikunterricht auf technische Geräte einzugehen. Verschiedene Gesichtspunkte sollten dabei beachtet werden. So sollte der betrachtete technische Gegenstand nicht so komplex sein, dass die Schwierigkeiten beim Verstehen der Funktionsweise den Blick auf die physikalischen Grundlagen verstellen. Ein Beispiel hierfür ist das Handy. Ganz sicher würde die Behandlung des Handys im Unterricht den Schülerinteressen entgegenkommen. Geht man allerdings über die elementarsten physikalischen Grundlagen hinaus (Kommunikation mit elektromagnetischen Wellen), sind die Details der Funktionsweise so kompliziert, dass sich ihre Behandlung von selbst verbietet. Hinzu kommt – und auch das zeigt das Beispiel des Handys exemplarisch sehr gut – dass „physikalisch unwichtige“ Oberflächenmerkmale (Klingeltöne, Farbdisplay) für die Schülerinnen und Schüler eine viel größere subjektive Wichtigkeit besitzen können als die physikalisch substantiellen Inhalte, auf die es der Physik-Lehrkraft ankommt.

Die bereits vorgestellten Untersuchungen zum Physikinteresse zeigen für den Bereich Technik darüber hinaus, dass insbesondere Mädchen oft eher an anderen Bereichen interessiert sind. Das sollte Auswirkungen auf die Auswahl der Unterrichtsinhalte haben: „Zu meiden sind dagegen Beispiele, die auf Vorerfahrungen zurückgreifen, die Mädchen in aller Regel kaum gemacht haben (z. B. Technikbaukästen, Werkzeuggebrauch, elektronische Schaltungen)“ (Häußler et al. 1998, S. 122). Diese Einschränkung lässt aber immer noch genügend Inhalte aus der Technik übrig, die man sinnvoll im Physikunterricht behandeln kann.

3.1 Rauchmelder

Ein technisches Gerät, das auf einem einfachen physikalischen Grundprinzip beruht und vielen der Schülerinnen und Schüler bekannt ist (oder bekannt sein sollte), ist der Rauchmelder (Abbildung 16).



Abbildung 16: Bauformen von Rauchmeldern
(Quelle: <http://www.rauchmelder-lebensretter.de>)

Ein Rauchmelder ist ein potentiell lebensrettendes technisches Gerät. Im Brandfall kann das Einatmen von Rauch tödlich sein, denn Rauch von brennendem Kunststoff kann eine Vielzahl giftiger Gase enthalten. Insbesondere die Verbrennungsprodukte von auf Chlorbasis hergestelltem Kunststoff ähneln zum Teil chemischen Kampfstoffen. Im Gegensatz zu anderen Ländern ist in Deutschland der Einsatz von Rauchmeldern noch nicht sehr weit verbreitet. Bei uns sind jährlich 600 Brandtote zu beklagen; der flächendeckende Einsatz von Rauchmeldern könnte diese Zahl um 40% senken.

Das erste Patent für einen Rauchmelder wurde 1896 angemeldet (Kilian 2004). Seine Funktionsweise beruhte auf einer Kombination biologischer und physikalischer Prinzipien: Zwei Vögel in einem Käfig sollten im Brandfall mit Rauchvergiftung von ihrer Stange fallen und am Boden einen elektrischen Kontakt schließen, wodurch ein Alarm ausgelöst wird.

Bei den heutigen Rauchmeldern gibt es zwei Geräteklassen, deren Funktionsweise auf unterschiedlichen Prinzipien beruht:

Bei den *Ionisationsrauchmeldern* erzeugt ein radioaktives Präparat ionisierte Luftmoleküle. Legt man in einer Kammer eine elektrische Spannung an zwei Kondensatorplatten, fließt ständig ein kleiner Ionisationsstrom. Rauch, der in die Kammer eindringt, führt zu einer Verringerung der Stromstärke und wird auf diese Weise nachgewiesen.

Verbreiteter als die Ionisationsrauchmelder sind die optischen Rauchmelder, die auf der Streuung von Licht an Rauchpartikeln basieren. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 17 dargestellt. Das Licht einer Leuchtdiode wird im Brandfall von den eintretenden Rauchteilchen gestreut und trifft zum Teil auf eine Fozelle. Dadurch wird ein akustischer Alarm ausgelöst, der die Hausbewohner weckt und auf den Brand aufmerksam macht.

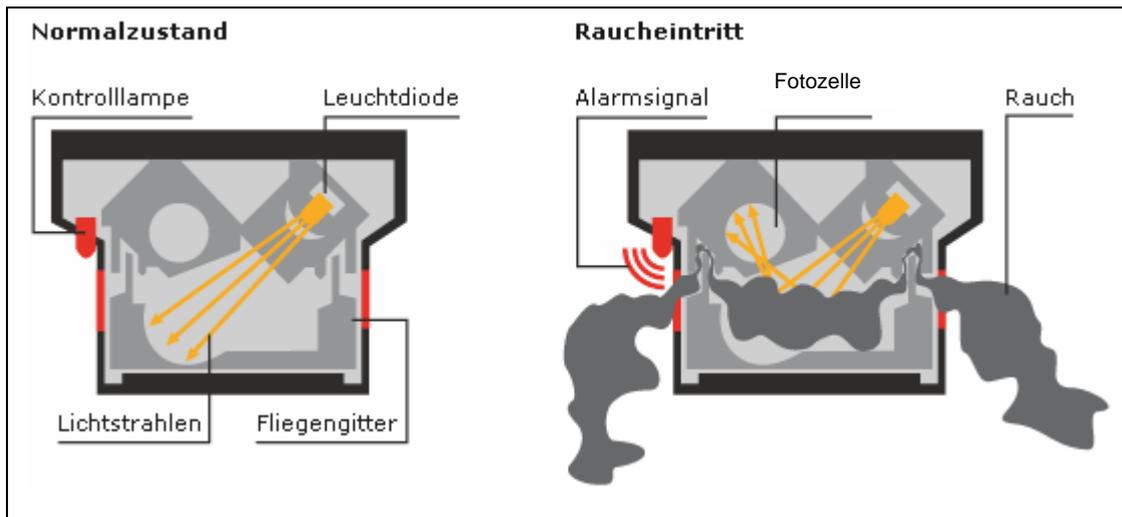


Abbildung 17: Funktionsprinzip eines optischen Rauchmelders
 (Quelle: <http://www.rauchmelder-lebensretter.de>)

Der Bau eines Funktionsmodells für einen optischen Rauchmelder wird in der piko-Handreichung „Physik im Alltag: High Tech-Anwendungen, Low Cost-Freihandversuche“ dargestellt (Stetzenbach et al. o. J.). Der Nachweis des gestreuten Lichts erfolgt hier über einen lichtempfindlichen Widerstand (LDR), der Alarm kommt von einem Summer, der über eine einfache Transistorschaltung gesteuert wird.

3.2 Laserdrucker und Fotokopierer

a) Physikalische Fragen

Laserdrucker und Fotokopierer (die beide in ähnlicher Weise funktionieren) sind exzellente Beispiele dafür, wie man mit einer technischen Anwendung ein ganzes physikalisches Teilgebiet (die Elektrostatik) diskutieren kann. Eine schöne Darstellung der zugrunde liegenden Physik, die direkt am Beispiel des Fotokopierers erläutert wird, gibt Bloomfield (2001). Harris (o. J.) gibt eine etwas knappere Darstellung der Funktionsweise des Laserdruckers.

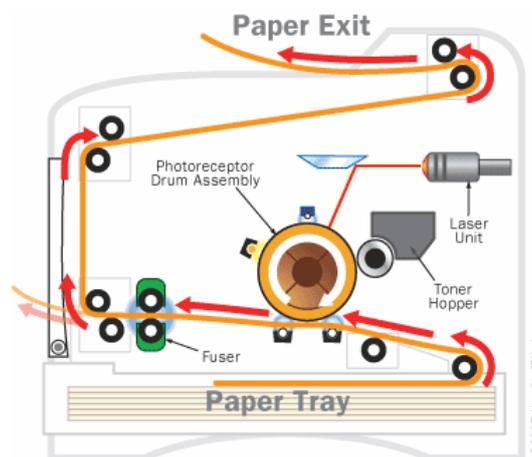


Abbildung 18: Querschnitt durch einen Laserdrucker
 (Quelle: <http://computer.howstuffworks.com/laser-printer.htm>)

Der Druckvorgang beim Laserdrucker lässt sich ganz schematisch folgendermaßen gliedern:

1. Der Computer sendet an den Drucker Signale, aus denen hervorgeht, welche Stellen des Papiers bedruckt werden sollen.
2. Im Innern des Laserdruckers laufen geheimnisvolle Vorgänge ab. Von einer Walze (Abbildung 19) werden Tonerpartikel an die richtigen Stellen auf dem Papier befördert und dort zum Haften gebracht.
3. Das bedruckte Papier verlässt, von weiteren Walzen befördert, den Drucker.



Abbildung 19: Walze in einem Laserdrucker
(Quelle: <http://computer.howstuffworks.com/laser-printer2.htm>)

Physikalisch interessant ist Schritt 2, und zwar deshalb weil es nicht einfach um die Funktion eines beliebigen technischen Geräts geht, sondern weil die Funktionsweise des Laserdruckers in einfacher Weise auf den elementaren Gesetzen der Elektrostatik beruht, die auf diese Weise in der Anwendung gelernt und geübt werden können.

Wenn wir das „geheimnisvolle Wirken“ in Schritt 2 noch etwas untergliedern, stellen sich einige Fragen, die physikalisch beantwortet werden können:

- Was macht der Laser im Laserdrucker?
- Der Toner muss an der Walze haften. Welche physikalische Kraft ist dafür verantwortlich?
- Woher weiß der Toner, an welchen Stellen auf der Walze er haften muss?
- Wie kommt es, dass der Toner später am Papier und nicht mehr an der Walze haftet?

b) Grundlegende Funktionsweise

Der grundlegende Prozess beruht auf elektrostatischer Anziehung und Abstoßung und läuft folgendermaßen ab:

1. Auf der Walze wird mit Hilfe des Lasers ein Invers-Abbild der zu druckenden Seite aus *elektrischen Ladungen* erzeugt (Ladungsbild).
2. Geladene Tonerteilchen setzen sich an die ungeladenen Stellen der Walze.
3. Die Tonerteilchen werden von der Walze auf das Papier übertragen und dort thermisch fixiert.

Einen Analogversuch kann man mit einer Hochspannungsquelle leicht durchführen (Wittmann 1986; Berthold et al. 2004). An einen Holzgriff wird ein Nagel befestigt, der an den Pluspol einer Hochspannungsquelle angeschlossen wird (Sicherheit beachten). Der geerdete Pol der Hochspannungsquelle wird an eine lackierte Blechplatte angeschlossen (man kann auch eine Overheadfolie ohne Anschluss benutzen).

Mit dem Nagel wird ein Buchstabe geschrieben oder ein Bild gemalt. Noch ist nichts zu erkennen. Erst wenn man das Blech mit Korkmehl bestäubt und vorsichtig abschüttelt, sieht man, dass an den Stellen, über die der Nagel gefahren ist, das Korkmehl haftet. Der geladene Nagel hat auf die Unterlage ein „Ladungsbild“ geschrieben. An diesen Ladungen haftet das Korkmehl wie der Toner an der Walze.

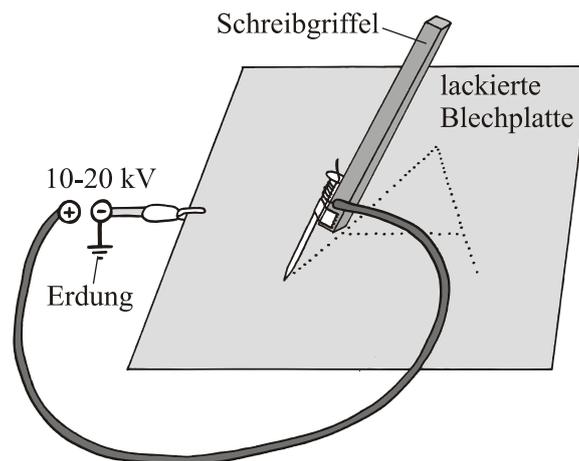


Abbildung 20: Analogversuch zur Xerografie. Quelle: Berthold et al. (2004): CD-Version 1999

Es existieren zwei Verfahren des Laserdrucks: das sogenannte „write-white“-Verfahren und das „write-black“-Verfahren, die sich darin unterscheiden, wie das Ladungsbild auf der Walze beschaffen ist. Der oben beschriebene Analogversuch entspricht dem „write-white“-Verfahren, bei dem die Stellen der Trommel aufgeladen werden, die später auf dem Papier bedruckt werden sollen. Beim „write-black“-Verfahren dagegen wird ein inverses Ladungsbild auf der Trommel erzeugt, und die nicht aufgeladenen Stellen entsprechen dem zu druckenden Bild. Im Folgenden wird das verbreitetere „write-black“-Verfahren beschrieben (Bloomfield (2001) erläutert das „write-white“-Verfahren).

c) Aufladen der Trommel durch Koronaentladung

Gehen wir den Druckprozess Schritt für Schritt durch. Als erstes wird die Walze negativ aufgeladen. Wie kann das geschehen? Es gibt drei Möglichkeiten, einen Gegenstand elektrosta-

tisch aufzuladen: (1) Das Berühren mit einem geladenen Gegenstand, (2) das Aufladen durch Kontaktelektrizität, (3) das Aufladen durch Ladungen, die von einer Spitze „weggesprüht“ werden (Spitzenentladung, Koronaentladung).

Im Laserdrucker wird die dritte Methode (Koronaentladung) genutzt. Die Walze bewegt sich unter einem dünnen Draht entlang, der ihr gegenüber eine negative Hochspannung aufweist und Elektronen gleichmäßig auf die Walze „aufsprüht“ (Abbildung 21).



Abbildung 21: Draht für die Koronaentladung (Quelle: <http://www.physics.hku.hk/~phys0607/lectures/chap06.html>)

Bei einer Koronaentladung entweichen Elektronen aus einer Metallspitze, wenn an dieser eine negative hohe Spannung anliegt. Das Elmsfeuer, das früher die Seeleute auf Schiffen ängstigte ist ein Beispiel für eine Koronaentladung. Eine Koronaentladung ist jedoch nichts Geheimnisvolles; ihr Grundprinzip kann mit den einfachsten Gesetzen der Elektrostatik erklärt werden (wie immer sind die Details des Prozesses viel komplizierter; eine Zusammenfassung findet man in der englischsprachigen Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge). Das Grundprinzip kann man mit den beiden folgenden Gesetzen verstehen:

1. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab.
2. In einem Metall sind die Elektronen frei beweglich.

In Abbildung 22 sind die elektrostatischen Kräfte auf ein Elektron in einer negativ geladenen Metalloberfläche dargestellt. Die „überschüssigen“ Elektronen sammeln sich an der Metalloberfläche. Beispielhaft sind in der Abbildung fünf Elektronen gezeigt und die Kräfte der äußeren Elektronen auf das mittlere eingezeichnet. Die elektrostatische Kraft zwischen zwei Ladungen zeigt entlang ihrer Verbindungslinie. Bei der links gezeigten schwach gekrümmten Fläche heben sich die Kräfte daher nahezu paarweise auf. Die Gesamtkraft auf Elektron 3 ist vergleichsweise gering.

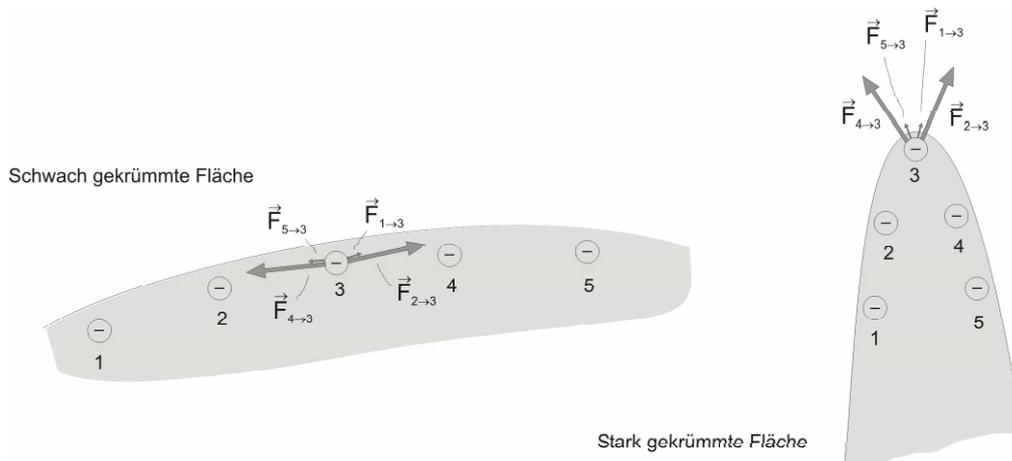


Abbildung 22: Kräfte auf ein Elektron in einer geladenen Metalloberfläche
 (a) schwach gekrümmte Fläche, (b) stark gekrümmte Fläche

Anders bei der rechts gezeigten stark gekrümmten Fläche. Die Kräfte der Elektronen 2 und 4 auf das Elektron 3 sind nun nicht mehr nahezu entgegengesetzt gerichtet, sondern schon fast parallel. Ihre Wirkungen addieren sich; es entsteht eine sehr große, nach außen gerichtete Gesamtkraft auf Elektron 3. Bei genügend großer negativer Ladung des Metalls werden die Elektronen aus der Metalloberfläche „gesprüht“: Es tritt eine Koronaentladung auf.

Hinzu kommt, dass die Elektronen in der Spitze nicht (wie in der Abbildung eingezeichnet) in gleichen Abständen sitzen. Sie konzentrieren sich im stark gekrümmten Teil, denn in der gezeigten Situation wirkt ja gerade eine Kraft auf die Elektronen, die sie in die Spitze hineintreibt, so lange bis durch die gegenseitige Abstoßung ein Kräftegleichgewicht hergestellt ist. Dadurch wird in der Spitze die Elektronendichte erhöht und der Effekt noch verstärkt.

Dass an geladenen scharfen Spitzen hohe Feldstärken auftreten, kann mit einem Demonstrationsexperiment gezeigt werden, das unter dem Titel „elektrischer Wind“ bekannt ist (Abbildung 23). An eine Nadelspitze wird eine Hochspannung angelegt. Wird eine Kerze in die Nähe der Spitze gebracht, neigt sich die Flamme von der Spitze weg, sie kann sogar „ausgeblasen“ werden.

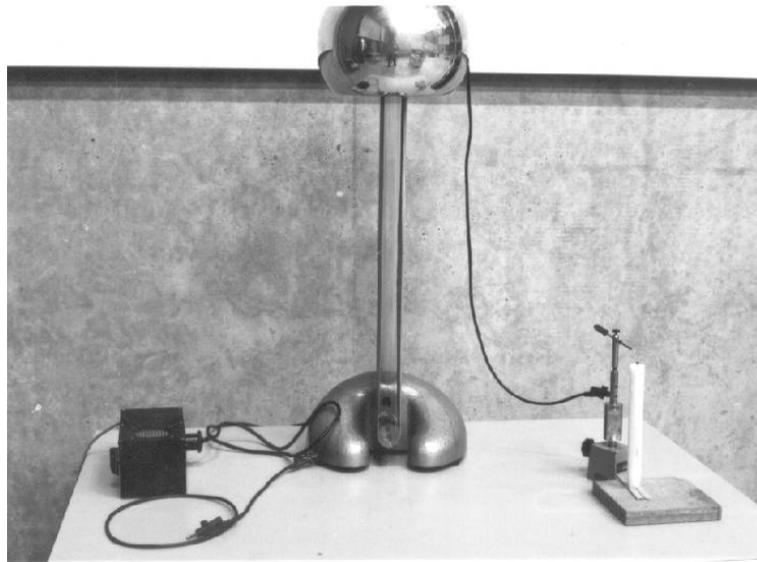


Abbildung 23: Demonstrationsversuch "elektrischer Wind".

Quelle: http://www.physik.uni-regensburg.de/infra/vorlvorb/VorIVorb/Versuche/VK_21_4_4_D.htm

d) Die geladene Druckerwalze: Influenz

Kehren wir wieder zum Aufladen der Druckerwalze zurück. Die Druckerwalze besteht aus Metall, das mit einer dünnen Schicht eines fotoleitenden Halbleitermaterials beschichtet ist. Die Beschichtung ist normalerweise elektrisch nicht leitend. Diese Halbleiterschicht auf der Oberfläche der Walze wird nun also durch die beschriebene Koronaentladung aufgeladen. Im Laserdrucker werden die Ladungen von einem Draht statt von einer Spitze aufgesprüht (Abbildung 21), so dass die sich drehende Walze flächig aufgeladen wird.

Nachdem wir den Prozess des Aufladens mit den einfachsten Gesetzen der Elektrostatik erklären konnten, kommt an dieser Stelle ein weiteres Phänomen der Elektrostatik ins Spiel: die Influenz. Abbildung 24 zeigt die negativ aufgeladene Walze. Unterhalb der dünnen Halbleiterschicht ist eine weitere Schicht aus positiven Ladungen eingezeichnet. Die Frage, wo diese Ladungen herkommen, liefert die Gelegenheit, auf das Phänomen der Influenz einzugehen.

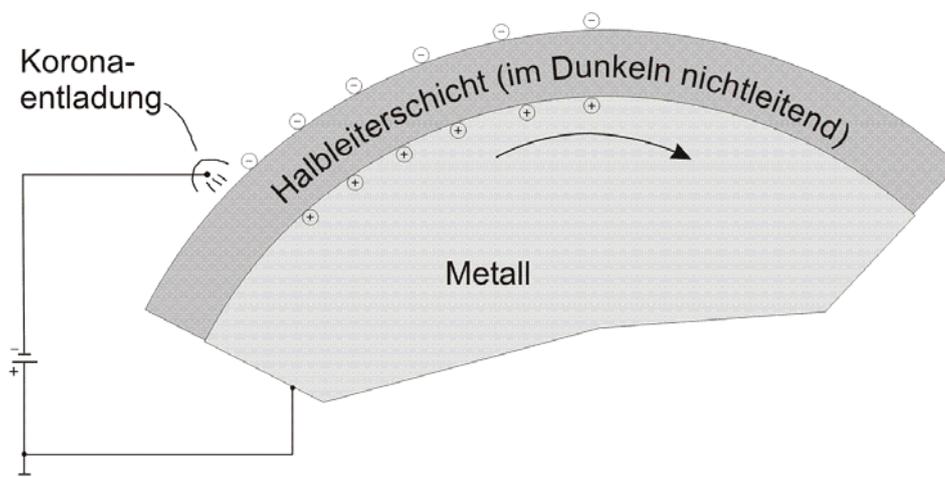


Abbildung 24: Unterhalb der dünnen Halbleiterschicht werden positive Ladungen induziert

Die Halbleiterschicht ist im Dunkeln nichtleitend, und so können die aufgetragenen Elektroden nicht über die geerdete Metallwalze abfließen. Durch elektrostatische Abstoßung fließen aber dafür im Metall Elektronen zur Erde, und es bleibt eine positiv geladene Schicht. Diesen Prozeß bezeichnet man als Influenz.

e) Der Laser kommt ins Spiel: Ladungsbild auf der Walze

Bei unserem Versuch, den Druckvorgang in einem Laserdrucker zu verstehen, sind wir bisher bei einer gleichmäßig mit negativen Ladungen besetzten Walze angelangt. Bisher ist noch kein Bild in Sicht, das man zum Drucken ja irgendwie auf der Walze abbilden muss. Der nächste Schritt im Druckprozess besteht in der Erzeugung eines (inversen) Ladungsbildes auf der Trommel.

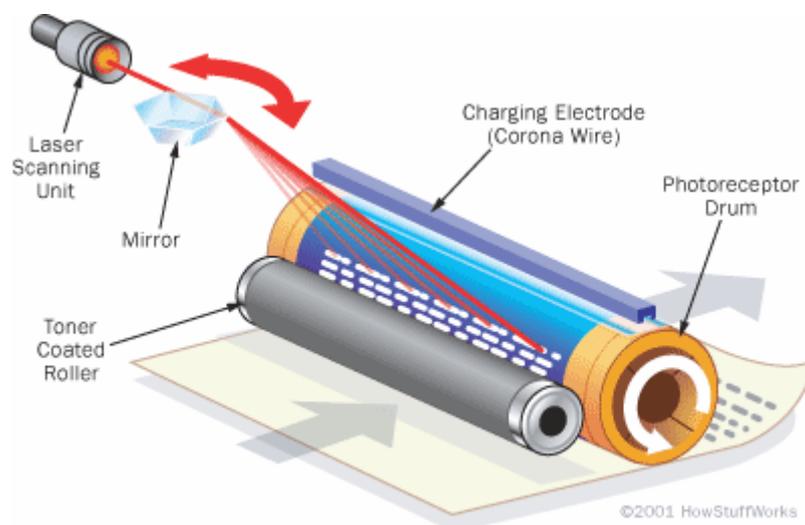


Abbildung 25: Der Laser belichtet die Walze zeilenweise
(Quelle: <http://computer.howstuffworks.com/laser-printer7.htm>)

Hier kommt der Laser ins Spiel. Über einen rotierenden Polygonspiegel rastert er die Walze zeilenweise ab. Er wird dazu sehr schnell an- und ausgeschaltet, so dass nur diejenigen Stellen dem Licht ausgesetzt sind, auf die sich später der Toner setzen soll. An diesen Stellen entlädt sich die Walze. Nach dem Rastern ist das zu druckende Bild als inverses Ladungsbild auf der Walze vorhanden ist.

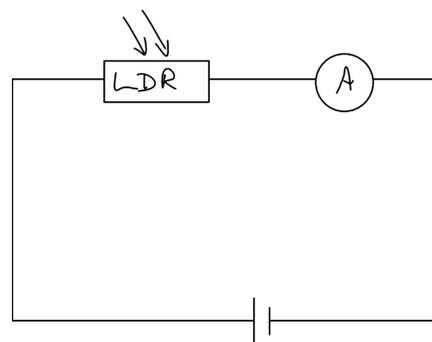


Abbildung 26: Je stärker der lichtempfindliche Widerstand (LDR) bestrahlt wird, um so größer ist die Stromstärke

Warum entladen sich die Stellen auf der Walze, die vom Laserlicht getroffen werden? Es wurde schon erwähnt, dass die dünne Halbleiterschicht auf der Walze fotoleitend ist. (Analogversuch mit LDR s. Abbildung 26) Nur im Dunkeln ist sie nichtleitend und hält die positiven und negativen Ladungen auf ihren beiden Seiten getrennt (vgl. Abbildung 24). Wird die Schicht beleuchtet, dann nimmt ihr Widerstand ab. Die negativen Ladungen auf der Oberseite der Schicht können dann zur Unterseite fließen und die dort befindliche positive Ladung neutralisieren (Abbildung 27). Nach der Belichtung durch den Laser befindet sich auf der Walze also ein (inverses) „Bild aus Elektronen“. Dieses Bild ist nicht sichtbar. Das Sichtbarmachen übernimmt nun der Toner.

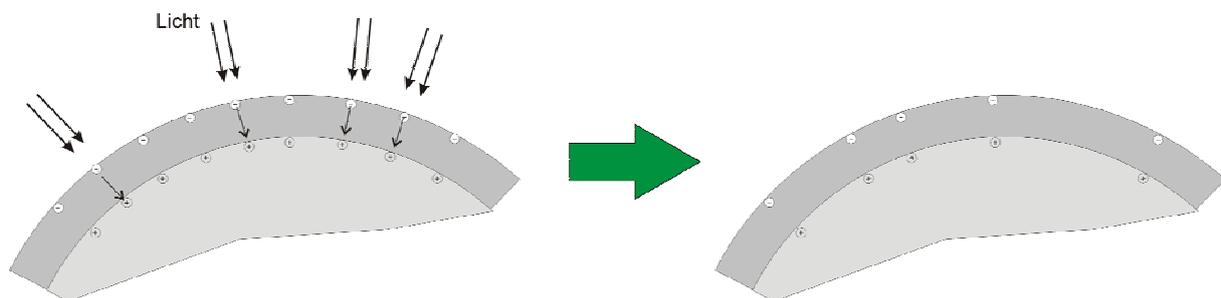


Abbildung 27: Bei Bestrahlung mit Licht wird die fotoleitende Schicht leitend, und die Elektronen wandern zur positiven Ladung

f) Ladungsbild und Toner

Um das Ladungsbild auf dem Papier sichtbar werden zu lassen, braucht man Toner. Jeder weiß, dass es sich um ein feines schwarzes Pulver handelt, über dessen Mangel sich Kopierer gerne beklagen. Kaum jemand weiß jedoch, dass es sich bei gutem Toner um ein echtes High-Tech-Produkt mit maßgeschneiderten elektrostatischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften handelt. Feines schwarzes Pulver zu erzeugen ist einfach. Wenn Sie schon einmal einen Kuchenteig gerührt haben, wissen Sie aber, dass feine Pulver wie Mehl es lieben, sich überall gleichmäßig zu verteilen und eine Riesenschweinerei anzurichten. Das soll mit dem Toner im Laserdrucker lieber nicht passieren.

Die technologische Herausforderung besteht darin, den Toner dazu zu bringen, genau an den richtigen Stellen zu haften und nirgendwo sonst. Um die Schwierigkeit dieses Unterfangens zu würdigen, muss man nur die Stichworte Temperatur und Luftfeuchtigkeit erwähnen und an die Erfahrungen, die man mit Schulversuchen der Elektrostatik hat. Die elektrostatischen Vorgänge in einem Laserdrucker oder Kopierer sollen aber zuverlässig in einer ungeheizten Hütte in Finnland ebenso ablaufen wie im schwülwarmen Klima eines indonesischen Hinterzimmers.

Damit im Laserdrucker ein Bild auf dem Papier erzeugt wird, muss man, kurz gesagt, den Toner dazu bringen, sich auf diejenigen Stellen der Walze zu setzen, die ladungsfrei geblieben sind. Dann muss man das Papier in Kontakt mit der Walze bringen und dafür sorgen, dass der Toner nun nicht mehr an der Walze, sondern am Papier haftet. Die Elektrostatik erklärt auch bei diesen Vorgängen die wesentlichen Abläufe.

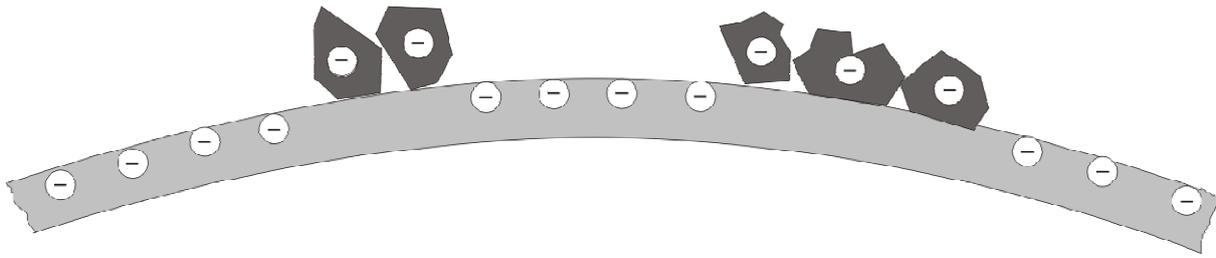


Abbildung 28: Wegen der elektrostatischen Abstoßung setzen sich die negativ geladenen Tonerteilchen nicht an die ebenfalls negativ geladenen Stellen der Walze

Die einzelnen Tonerteilchen laden sich nämlich negativ auf, bevor sie auf die Walze aufgebracht werden. Zwischen den negativ geladenen Tonerteilchen und den negativ geladenen Stellen auf der Walze wirken abstoßende elektrostatische Kräfte, so dass sich die Tonerteilchen nur auf die ladungsfreien (d. h. vom Laser vorher belichteten) Stellen der Walze setzen (Abbildung 28). An den Stellen auf der Trommel, wo keine Ladungen sind, sitzt nun der Toner; die geladenen Stellen bleiben tonerfrei. Das heißt: Der Toner befindet sich nun genau dort, wo wir ihn haben wollen, nämlich an den Stellen, die später im Druck dunkel werden sollen. Aus dem inversen Ladungsbild ist auf der Walze ein Tonerbild entstanden, das jetzt noch aufs Papier gebracht werden muss.

Im oben erwähnten „write-white“-Verfahren ist das Endergebnis das gleiche, aber der Ablauf ein anderer. Auch hier wird die Walze ganz negativ aufgeladen. Der Laser belichtet aber diejenigen Stellen, die später weiß bleiben sollen. Das Ladungsbild auf der Walze entspricht bei diesem Verfahren also den später schwarzen Stellen. Anders als beim beschriebenen „write-black“-Verfahren wird nun positiv geladener Toner auf die Walze gebracht, der aufgrund der elektrostatischen Anziehung an den negativ geladenen Stellen der Walze haften bleibt. Also auch bei diesem Verfahren gilt: Aus dem Ladungsbild auf der Walze entsteht ein Tonerbild, das aufs Papier übertragen wird. Im Druckbild erzeugt das „write-white“-Verfahren dunklere schwarze Bereiche, während „write-black“-Drucker genauere Details drucken.

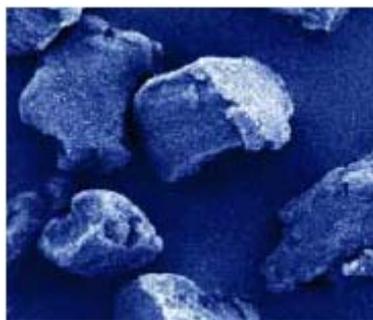


Abbildung 29: Tonerpartikel (Quelle: http://www.schwarz-auf-weiss.de/PDF/EA_Toner.pdf)

Bevor wir zum abschließenden Schritt kommen, soll zuerst noch geklärt werden, wie der Toner eigentlich aufgeladen wird. Mit dieser Frage können wir einen weiteren Bereich der Elektrostatik ansprechen, nämlich die *Kontaktelektrizität*. Wenn man zwei unterschiedliche Materialien in Berührung bringt, kann eine Ladungstrennung stattfinden, so dass die Materialien sich unterschiedlich aufladen (vgl. Katzenfell-Versuch). Dem Toner widerfährt das gleiche wie dem Katzenfell: Er lädt sich durch Kontakt auf.

Toner besteht aus mikrometergroßen Polymerstückchen, die mit Farbpigmenten und chemischen Zusätzen versehen sind. Das Polymer und die Zusätze werden so ausgewählt, dass sich die Tonerteilchen in der gewünschten Weise durch Kontaktelektrizität aufladen. Je nach System kann die Aufladung durch Kontakt mit einer Walze oder anderen Oberflächen erfolgen. Der sogenannte Zweikomponenten-Toner ist eine Mischung aus Toner- und magnetischen „Carrier“-Teilchen. Diese dienen zur Aufladung des Toners (ebenfalls durch Kontaktelektrizität) und werden dank ihres Eisenkerns später magnetisch vom Toner getrennt.

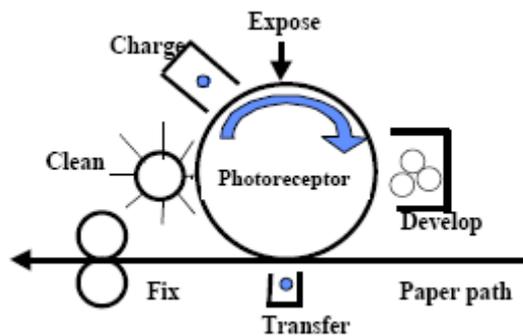


Abbildung 30: Der xerografische Prozess in der Übersicht
(Quelle: <http://www.arnoldmagnetics.com/mtc/pdf/mag2000-mtc.pdf>)

g) Der letzte Schritt: Das Bild wir aufs Papier gebracht

Nun muss der Toner nur noch auf das Papier gebracht werden. Bevor wir diesen Prozess erläutern, fassen wir die bisherigen Schritte noch einmal anhand von Abbildung 30 zusammen. Das Ganze beginnt mit dem Aufladen der gesamten Walzenoberfläche durch Koronaentladung („Charge“ links oben in der Abbildung). Teile der Walze werden durch Bestrahlung mit Laserlicht entladen, so dass sich ein Bild aus Ladungen formt („Expose“). Der geladene Toner setzt sich nun auf die ungeladenen Stelle der Walze („Develop“). In den verbleibenden Schritten muss der Toner noch aufs Papier gebracht werden („Transfer“) und dort fixiert werden („Fix“). Abschließend wird die Walze gereinigt („Clean“), damit der Vorgang wieder von vorn beginnen kann.

Das Übertragen des Toners auf das Papier erfolgt nach bewährtem elektrostatischen Muster. Das gesamte Papier wird durch Koronaentladung negativ aufgeladen und an der Walze vorbeigeführt. Die immer noch positiv geladenen Tonerteilchen, die auf den ungeladenen Stellen der Walze sitzen, lösen sich von der Walze und haften nun am Papier. Um sie endgültig an ihrem Platz zu fixieren, wird das Papier mit dem Toner zwischen zwei Gummiwalzen erhitzt. Die Polymerbestandteile des Toners schmelzen dabei, und der Toner wird in das Papier „eingebraunt“. Meist ist das Papier noch fühlbar warm, wenn es im Ausgabeschacht landet.

Fast alles beim Vorgang des Laserdruckens beruht auf Elektrostatik und ist leicht verständlich, wenn man ihre einfachsten Gesetze kennt. Das ermöglicht es, die Elektrostatik nicht in einem reinen Schulkontext zu diskutieren, sondern im Kontext einer Anwendung aus dem täglichen Leben.

Nach dem gleichen Prinzip wie der Laserdrucker funktioniert der Fotokopierer. In älteren Modellen wird das Bild des Originals optisch über Spiegel und Linsen auf die Walze übertra-

gen. Alle neueren Modelle arbeiten digital, als Kombination aus Scanner und Laserdrucker. Das Original wird eingescannt, die Information wird zwischengespeichert und mit dem oben beschriebenen Druckprozess wieder ausgedruckt.



Abbildung 31: Ortsbestimmung mit einem GPS-Empfänger
(Quelle: http://www.joachim-kranz.net/?page_id=54)

3.3 GPS-Geräte

Die Navigation mit dem Global Position System (GPS) wird immer mehr zum Teil des Alltags, seit die entsprechenden Empfangsgeräte zum Teil schon von Lebensmittel-Discountern betrieben werden (Abbildung 31). Von der Möglichkeit mittels GPS seinen Standort auf wenige Meter genau bestimmen zu können geht gerade im Freizeit-Bereich eine große Faszination auf technikbegeisterte Wanderer, Motorrad- und Radfahrer aus. Mit entsprechender Software und kalibrierten digitalen Karten bieten sich früher ungeahnte Möglichkeiten der Tourenplanung.

Die Funktionsweise des GPS beruht auf physikalischen Prinzipien. Trotz des immensen technischen Aufwands, der zur Realisierung des GPS nötig war, ist seine Funktion in ihren Grundlagen relativ leicht zu verstehen. Es beruht wesentlich auf der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit (s. auch Müller 2000). Das GPS war ursprünglich nur für militärische Aufgaben konzipiert. Es handelt sich dabei um ein System von 24 Satelliten, die in 20 000 km Höhe die Erde einmal in 12 Stunden umkreisen (Abbildung 32). Jeder Satellit hat vier Atomuhren an Bord und sendet Radiosignale, aus denen man seine Position bestimmen kann.

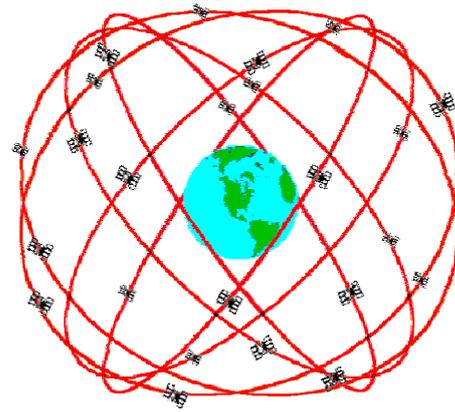


Abbildung 32: GPS-Satelliten

Um das GPS zu nutzen, benötigt man einen Empfänger für die Satellitensignale. In ihm befindet sich eine Uhr, die sehr genau mit den Satellitenuhren synchronisiert sein muss. Die Positionsbestimmung verläuft dann folgendermaßen: Jeder Satellit sendet ein Signal, aus dem seine aktuelle Position hervorgeht sowie die genaue Uhrzeit, zu der es gesendet wurde.



Abbildung 33: GPS-Empfänger (Quelle: <http://www.skyfly.cz>)

Das Signal eines bestimmten Satelliten, das sich mit Lichtgeschwindigkeit c ausbreitet, gelangt nach einer Laufzeit t_1 zum Empfänger. Dieser kann aus der Laufzeit die Entfernung $s_1 = c t_1$ zum Satelliten bestimmen. Dies schränkt die mögliche Position des Empfängers auf eine Kugel ein. Diese besteht aus allen Punkten, die den Abstand s zum Satelliten besitzen (Abb. 1).

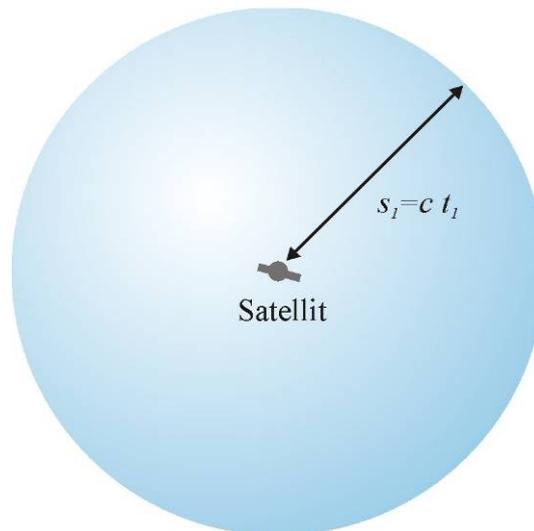


Abbildung 34: Die möglichen Empfängerpositionen nach der Laufzeitmessung liegen auf der Oberfläche einer Kugel mit Radius $s_1 = c t_1$ um den Satelliten.

Wie funktioniert die Laufzeitbestimmung in der Praxis? Wir nehmen vorläufig an, dass Satellitenuhr und Empfängeruhr perfekt synchronisiert sind. Der Satellit sendet zu jeder Uhrzeit (z. B. um 12:00) einen eindeutigen „Pseudo Random Code“ (PRC; Abbildung 35). Der Empfänger generiert zur gleichen Uhrzeit den gleichen Code.

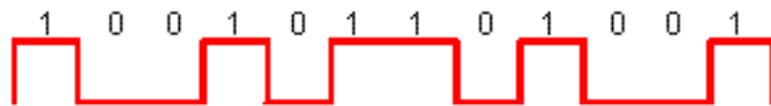


Abbildung 35: Pseudo Random Code

Wegen der endlichen Laufzeit der elektromagnetischen Welle kommt das Satellitensignal beim Empfänger mit einer gewissen **Zeitverzögerung** an. Die beiden Signale werden vom Empfänger so lange gegeneinander verschoben, bis sie übereinander passen (Abbildung 36). Die Zeitdauer, um die das empfangene Signal verschoben werden muss, entspricht der Laufzeit vom Satelliten zum Empfänger.

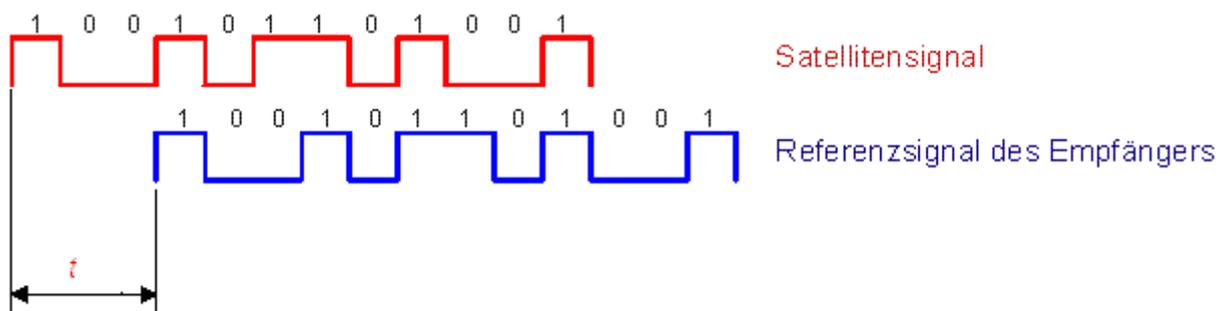


Abbildung 36: Bestimmen der Laufzeit des Signals vom Satelliten

Der Ort des Empfängers kann weiter eingegrenzt werden, wenn man nach dem gleichen Verfahren den Abstand zu einem zweiten Satelliten bestimmt, was eine zweite Kugel mit Radius $s_2 = c t_2$ ergibt. Jetzt kann sich der Empfänger nur auf dem Schnittpunkt der beiden Kugeln befinden. Wiederholt man das Verfahren mit einem dritten Satelliten, kann man seine Position schließlich exakt bestimmen: Es ist der Punkt, in dem sich alle drei Kugeln schneiden (Abbildung 37).

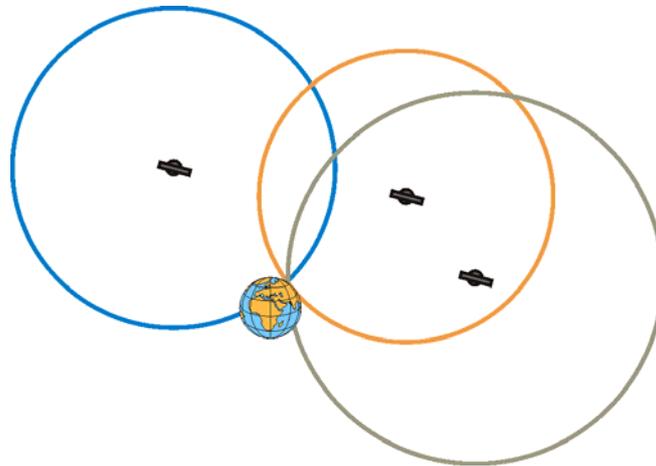


Abbildung 37: Der Empfänger befindet sich am Schnittpunkt der drei durch Laufzeitmessungen bestimmten Kugeln. Der Übersichtlichkeit halber beschränken wir uns in dieser und den nachfolgenden Abbildungen auf zwei Dimensionen.

Damit die Laufzeit zwischen Satellit und Empfänger exakt bestimmt werden kann, müssen beide Uhren sehr genau synchronisiert sein. Ein Gangunterschied von nur $1 \mu\text{s}$ kann einen Fehler von bis zu 300 m in der Ortsbestimmung bedeuten. Die Quarzuhr im Empfänger lässt sich aber nicht dauerhaft so genau mit den Atomuhren in den Satelliten synchronisieren. Daher muss man zu einem Trick greifen: Man führt die Positionsbestimmung zunächst mit der ungenauen Zeit des Empfängers durch. Wegen der falsch bestimmten Entfernungen schneiden sich dann nicht alle drei Kreise in einem Punkt (Abbildung 38 a). Nun wird die Uhr des Empfängers so lange verstellt, bis dies der Fall ist (Abbildung 38 b). Nun hat man neben der Ortsbestimmung auch noch die genaue Zeit ermittelt und die Empfängeruhr ist (wie oben angenommen) mit der Satellitenuhr synchronisiert.

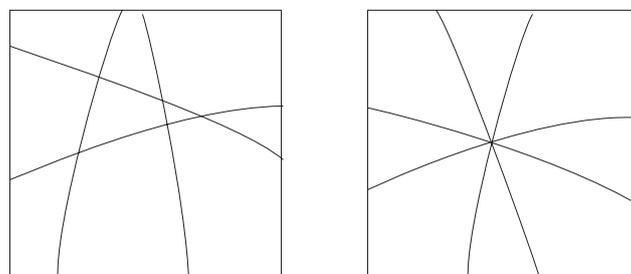


Abbildung 38: Ortsbestimmung mit (a) ungenauer Uhrensynchronisation, (b) exakter Uhrensynchronisation

4 Naturphänomene

Naturphänomene stellen den Gegenpol zu den technischen Anwendungen der Physik dar. Ohne menschlichen Eingriff laufen sie ab und erschließen sich dem aufmerksamen Beobachter – manchmal auffällig wie der Regenbogen oder der Ausbruch eines Geysirs; manchmal ist aber auch genaues Hinsehen erforderlich, um überhaupt zu entdecken, dass man gerade etwas Bemerkenswertes sieht: wie zum Beispiel bei den Sonnentälern, an denen der unaufmerksame Beobachter achtlos vorübergeht. Die meisten in der Literatur besprochenen Naturphänomene sind optischer Natur – die Beispiele reichen von Minnaerts Klassiker „Light and color in the Outdoors“ (1954) bis zum kürzlich erschienenen Themenheft „Naturphänomene“ der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften/Physik in der Schule“ (2006). Naturphänomene aus der Elektrizitätslehre sind relativ selten beschrieben worden (außer dem Polarlicht fällt einem natürlich das Gewitter ein, das aber ausgesprochen schwierig zu verstehen ist). Mechanik und Wärmelehre sind in der Literatur etwas häufiger vertreten (z. B. die interessanten Versuche zur Oberflächenspannung von Schlichting (2006)). Im Folgenden soll deshalb exemplarisch ein Beispiel aus der Wärmelehre besprochen werden: die Vorgänge beim Ausbruch eines Geysirs.

4.1 Der Ausbruch eines Geysirs

Dort, wo aus natürlichen Gründen heißes Wasser nahe der Erdoberfläche existiert, können Geysire entstehen. Mehr oder weniger regelmäßig kommt es zu einer Eruption, bei der das heiße Wasser schwallartig oder in einer Fontäne ausgestoßen wird. Geysire treten an einigen Orten der Welt in sogenannten Geysirfeldern gehäuft auf (Yellowstone-Nationalpark, Island). Der Ausbruch eines Geysirs ist ein spektakuläres Ereignis (Abbildung 39). Jährlich werden Tausende von Touristen davon angezogen.



Abbildung 39: Ausbruch eines Geysirs (Foto: M. Pieper)

a) Physikalischer Hintergrund

Die Physik eines Geysirausbruchs ist relativ einfach. Sie beruht im Wesentlichen auf einer einzigen physikalischen Gesetzmäßigkeit aus der Wärmelehre: Der Zunahme der Siedetemperatur des Wassers mit zunehmendem Druck. Das ist normalerweise ein recht trockenes Thema, für das Schülerinnen und Schüler kaum von selbst Interesse aufbringen. Der mathematische Zusammenhang wird durch die relativ komplexe Clausius-Clapeyron-Gleichung beschrieben (R = Gaskonstante, ΔH = Verdampfungsenthalpie); grafisch im T - p -Diagramm aufgetragen ergibt sich die Dampfdruckkurve von Wasser.

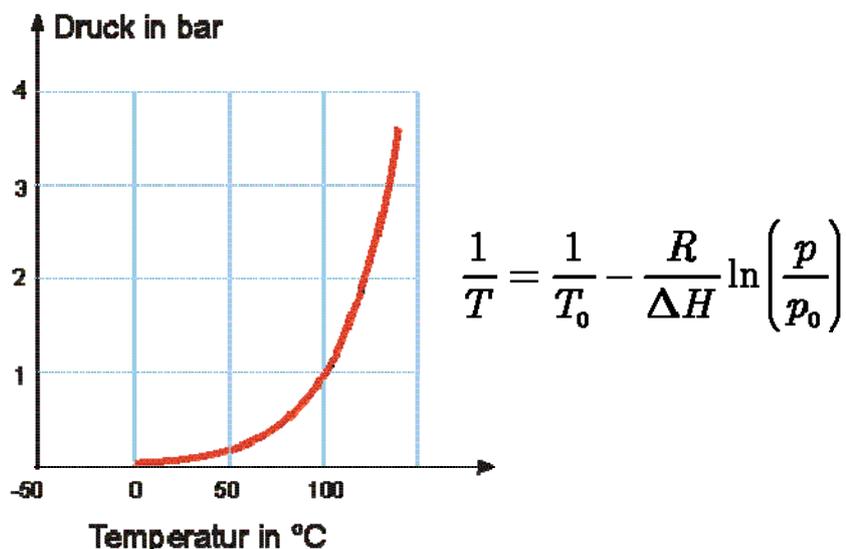


Abbildung 40: Der Verlauf der Dampfdruckkurve von Wasser wird mathematisch von der Clausius-Clapeyron-Gleichung beschrieben

Was ist die physikalische Bedeutung der Dampfdruckkurve? Dass Wasser bei 100 °C siedet, weiß jedes Kind. Dass das nicht immer stimmt, weiß kaum jemand. Die Siedetemperatur des Wassers hängt nämlich vom Umgebungsdruck ab. Je niedriger der Druck, um so niedriger die Siedetemperatur und umgekehrt. Unter einer Vakuumblocke kann man Wasser schon bei Zimmertemperatur zu Sieden bringen, und auf hohen Bergen siedet das Wasser ebenfalls bei Temperaturen unter 100 °C (ein weiteres Naturphänomen). Den Zusammenhang zwischen Siedetemperatur und Umgebungsdruck kann man an der Dampfdruckkurve ablesen. Man erkennt: Bei 1 bar (d. h. Atmosphärendruck) siedet das Wasser bei 100 °C, bei 2 bar sind es schon 120 °C. Wie die Clausius-Clapeyron-Gleichung zeigt, ist der Zusammenhang exponentiell.

Im Schnellkochtopf wird dieser Sachverhalt ausgenutzt. Beim normalen Kochen (mit Wasser unter Normaldruck) liegt die maximale Gartemperatur bei 100 °C. Auf höhere Temperaturen lässt sich flüssiges Wasser nicht erhitzen. Im Schnellkochtopf wird der erhöhte Siedepunkt des Wassers ausgenutzt, um das Wasser bei 2 bar bis auf 120 °C zu erhitzen. Der ebenso heiße Wasserdampf, der mit dem siedenden Wasser im Gleichgewicht steht, gart die Speisen. Der Vorteil: das Garen bei höheren Temperaturen geht schneller und ist für die Speisen schonender.

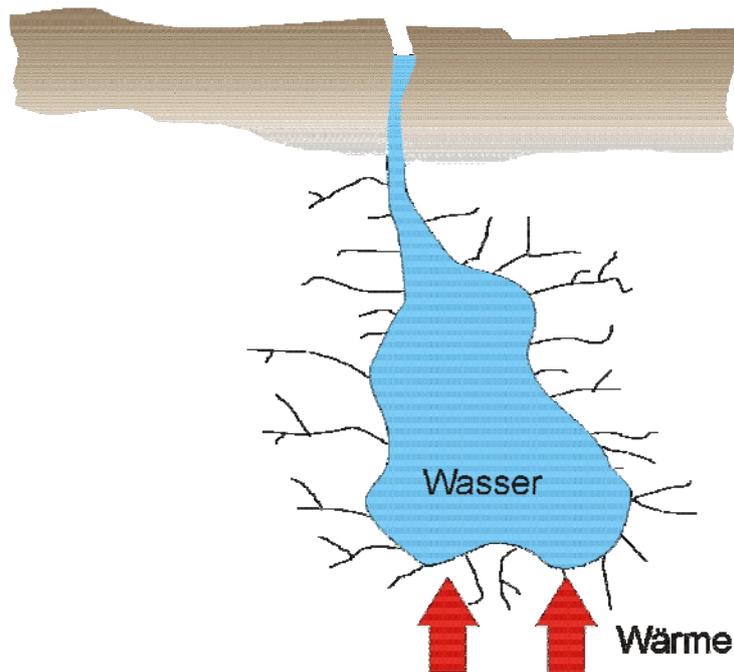


Abbildung 41: Voraussetzungen für einen Geysir

b) Geologische Voraussetzungen für einen Geysir

Geysirfelder existieren nur an wenigen Stellen der Erde. Weltweit existieren nur etwa 50 Geysirfelder. Damit ein Geysir entsteht, müssen verschiedene Voraussetzungen zusammenkommen (Abbildung 41):

- Im Erdboden muss es einen „Schlund“ für den Geysir, einen tiefen Hohlraum, geben (Tiefe 10 m oder mehr). Untersuchungen an einem der berühmtesten Geysire, Old Faithful im Yellowstone-Nationalpark, haben 1992 gezeigt, dass der Schlund dieses Geysirs mindestens 15 m tief ist und eine komplexe Geometrie besitzt.
- Es muss einen Wasserzufluss geben, durch den sich der Hohlraum nach den Ausbrüchen des Geysirs wieder mit Wasser füllen kann. Oft erfolgt dies über Risse im Gestein.
- Der Geysir muss „geheizt“ werden. Das Wasser im Hohlraum muss auf Temperaturen von 120 °C und mehr erhitzt werden, damit der Geysir ausbricht. Eine „natürliche Wärmezufuhr“ gibt es vor allem in vulkanischen Gebieten. Deshalb existieren Geysirfelder hauptsächlich in geologisch aktiven Gegenden.

c) Ausbruch eines Geysirs

Die Vorgänge beim Ausbruch eines Geysirs werden von einem Beobachter folgendermaßen beschrieben (<http://www.vulkane.net/vulkanismus/postvulk.html>):

„Steht man am Rande eines Geysirs, kann man folgendes beobachten. Zunächst steht die Wassersäule ruhig im Geysirschacht. Dann nur Sekunden vor dem Ausbruch sieht man aus der Tiefe ein helles Blasenknäuel aufsteigen. Je näher es der Oberfläche

kommt desto größer werden die einzelnen Blasen und spätestens jetzt sollt jeder seine Nase blitzschnell in Sicherheit bringen. Mit den Blasen steigt die Wassersäule im Geysirschacht an, kurzzeitig kann sich sogar eine Wasserglocke bilden. Schließlich läuft das Wasser über, die Blasen durchschlagen die Wasserglocke. Kurz darauf folgt eine explosive Eruption von Wasser und Dampf, die binnen Sekunden oder Minuten zum Höhepunkt führt. Danach fällt die Eruptionssäule schnell zusammen. Das Wasser läuft teilweise zurück in den Geysirschacht, der erneut von unten mit Grundwasser aufgefüllt wird.“

Man kann diese Geschehnisse physikalisch interpretieren, wenn man die Vorgänge beim Ausbruch eines Geysirs der Reihe nach durchgeht.

- Beim letzten Ausbruch ist ein Teil des Wassers im Hohlraum verloren gegangen, weil es durch den Schlund nach außen gespritzt worden ist. Das fehlende Wasser sickert aus den umliegenden Gesteinsschichten langsam nach, bis der Hohlraum wieder gefüllt ist.
- Am Grund des Hohlraums herrscht ein Wasserdruck, der den Atmosphärendruck an der Oberfläche deutlich übersteigt. Der Schweredruck am Grund lässt sich nach der Formel:

$$p(h) = p_0 + \rho g h$$

berechnen (ρ = Dichte des Wassers, p_0 = Atmosphärendruck). Als Faustformel kann man sich merken: Mit der Tiefe nimmt der Druck alle 10 m um eine Atmosphäre (oder 1 bar) zu. Wenn wir für den Geysir eine Tiefe von 10 m annehmen, herrscht am Grund ein Druck von 2 bar (1 bar Atmosphärendruck + 1 bar Schweredruck). Das Wasser am Grund siedet also erst bei 120 °C (s. o.).

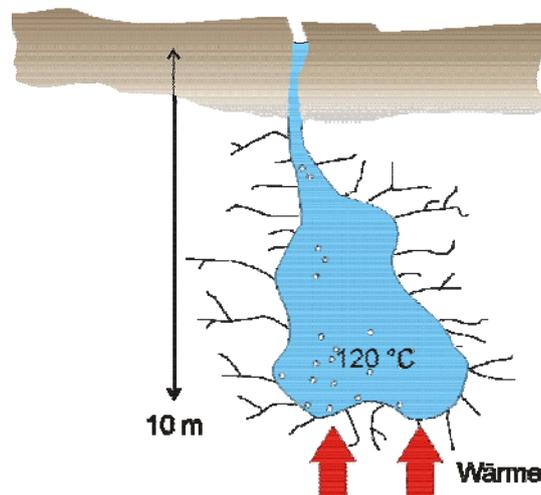


Abbildung 42: Wasser in 10 m Tiefe kann bis auf 120 Grad erhitzt werden, bevor es siedet

- Durch die permanente Wärmezufuhr erhitzt sich das neu zugeflossene Wasser im Hohlraum. Wenn wir wieder von einem 10 m tiefen Hohlraum ausgehen, kann das Wasser am Grund im flüssigen Zustand über 100 °C heiß werden. Erst bei 120 °C bilden sich Dampfblasen, die nach oben steigen.

- Bis hierher ist noch nichts Außergewöhnliches passiert. Das Wasser im Hohlraum siedet wie in einem großen Kochtopf. Das Entscheidende passiert nun: Beim heftigen Sieden wird von den aufsteigenden Dampfblasen immer einmal wieder eine geringe Menge Wasser ausgestoßen (wie im Bericht oben beschrieben kann das Wasser auch überlaufen). Die Höhe der Wassersäule h über dem Grund des Hohlraums vermindert sich dadurch ganz geringfügig. Dadurch sinkt auch der Druck am Grund ein klein wenig. Er liegt jetzt (in unserem Beispiel) ein wenig unterhalb von 2 bar. Der Siedepunkt des Wassers am Grund sinkt wegen des verminderten Drucks ebenfalls unter 120 °C.
- Die Temperatur des Wassers am Grund, die sich ja durch diesen Vorgang nicht ändert und bei 120 °C bleibt, liegt jetzt ein wenig über dem Siedepunkt. Das Wasser ist überhitzt und fängt heftiger an zu siedeln. Oben, am Schlund des Geysirs wird wegen der zunehmenden Heftigkeit des Siedens mehr Wasser ausgestoßen. Damit sinkt aber der Druck am Grund noch weiter ab, und der ganze Prozess schaukelt sich in kurzer Zeit explosionsartig auf: Der Geysir bricht aus (Abbildung 43).

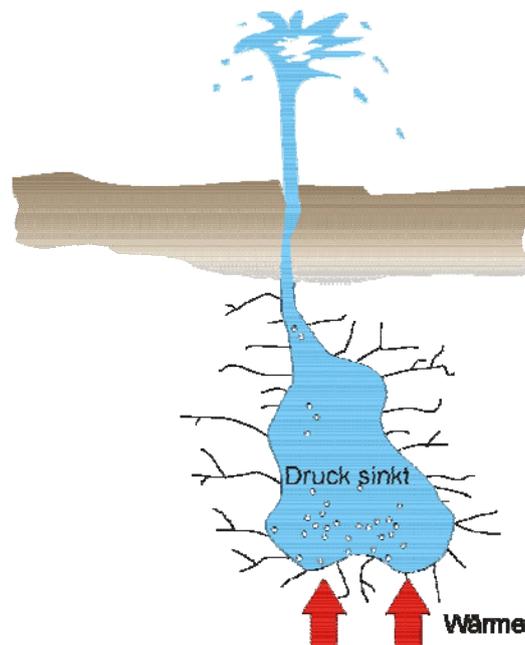


Abbildung 43: Wird Wasser ausgestoßen, dann sinkt der Druck am Grund

d) Demonstrationsexperiment: Künstlicher Geysir

Sehr beeindruckend ist ein Demonstrationsexperiment, mit dem man die beschriebenen Abläufe beim Ausbruch eines Geysirs nachvollziehen kann. Im großen Maßstab ist dieses Experiment in einigen Science-Centern realisiert, aber es lässt sich auch im kleinen Maßstab nachbauen (Abbildung 44).



Abbildung 44: Künstlicher Geysir in einem Science Center
(Quelle: http://losangeles.about.com/od/phototours/ss/discoverctr_2.htm)

Man benötigt dazu ein langes dünnes Glasrohr, das mit einem durchbohrten Stopfen in einen wassergefüllten Erlenmeyer-Kolben gesteckt wird (Abbildung 45). Das Ganze wird mit Wasser gefüllt. Hierdurch wird der wassergefüllte Hohlraum des Geysirs simuliert. Je länger das Glasrohr, um so stärker ist der „Ausbruch“ des Geysirs, denn der Schweredruck der Wassersäule spielt ja eine entscheidende Rolle.

Der Erlenmeyerkolben wird nun von einem Campingbrenner geheizt. Die Vorgänge, die zur Überhitzung des Wassers am Grund führen, laufen wie oben beschrieben ab. Der Geysir „spuckt“ in einem Ausbruch eine mehr oder weniger große Wassermenge aus. Die in Abbildung 45 sichtbare Auffangschale dient nicht nur zum Auffangen des Wassers. Nachdem der Ausbruch des Geysirs beendet ist, soll sie das ausgespiene Wasser wieder in die Glasröhre zurück leiten, so dass sich der ganze Zyklus bis zum nächsten Ausbruch wiederholen kann. Um hierfür die richtige Wassermenge in der Auffangschale zu finden ist etwas Ausprobieren notwendig. Eine Videoaufnahme dieses Experiments findet man unter <http://www.kopfball.de/arcexp.phtml?selExperiment=295>.



Abbildung 45: Selbstgebautes Geysir-Modell (Quelle: http://www.physik.uni-regensburg.de/infra/vorlvorb/VorlVorb/Versuche/AufbPic/VK_17_5_F1.jpg)

4.2 Freihandexperimente zu Naturphänomenen

Ein Einwand gegen die Behandlung von Naturphänomenen im Unterricht liegt darin, dass sie oft nicht „auf Abruf“ verfügbar sind. So kann man zwar das oben abgebildete Geysir-Modell im Klassenzimmer aufbauen, aber für das imposante und beeindruckende Erlebnis des originalen Naturschauspiel des Originals ist dies natürlich kein annähernder Ersatz. Auch andere Naturphänomene wie Halos oder Nebensonne sind nur manchmal zu erleben, und es ist eher unwahrscheinlich, dass die Schülerinnen und Schüler schon einmal bewusst z. B. Nebensonnen wahrgenommen haben.

Schlichting (1999) hat in einem Artikel Naturphänomene zusammengestellt, die sich in Freihandexperimenten demonstrieren lassen und dazu noch physikalisch einfach zu erklären sind. Im folgenden wird eine Auswahl wiedergegeben.

a) Lichtnetzwerke im Wasser

Am Grund von Gewässer kann man bei Sonnenschein oft Netzwerke aus hellen Streifen sehen, die sich in einem fort verändern. Die Lage und Anordnung der hellen Linien ist ständig „im Fluss“ begriffen. Mit einer wellenförmig strukturierten Glasscheibe (Abbildung 46), wie sie für Badezimmer-Fenster typisch ist, kann man dem Phänomen „auf den Grund“ gehen. Legt man die Glasscheibe auf einen Overhead-Projektor und fokussiert, dann kann man eine statische Version der hellen Streifenmuster erzeugen.



Bild 1: Wellenförmig strukturiertes Glas (wie es z. B. für Badezimmerfenster verwendet wird), zeigt in Durchsicht ähnliche Reflexmuster wie die wellenförmige Oberfläche eines flachen Gewässers auf dem hellen Grund (Bild 1).

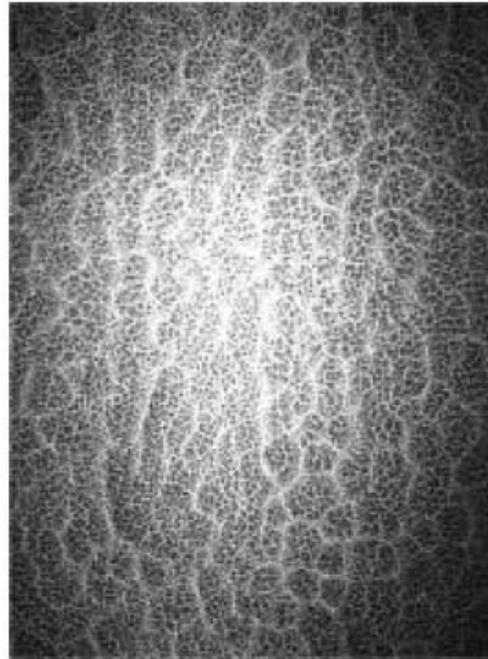


Bild 2: Reflexe des Strukturglases, wie sie von einem Overheadprojektor entworfen werden.

Abbildung 46: Freihandversuch zur Entstehung von hellen Streifenmustern auf dem Grund von Gewässern (aus Schlichting 1999).

Die Ursache für die hellen Streifen und die dunklen Gebiete dazwischen ist einfach zu verstehen. Das Glas ist an verschiedenen Stellen unterschiedlich dick und besitzt daher eine gekrümmte Oberfläche. Die konvexen Bereiche der Oberfläche wirken ähnlich wie eine Sammellinse und bündeln das einfallende Licht. Die entsprechenden Stellen auf der Wand oder Leinwand erscheinen daher heller als die Umgebung. Umgekehrt wirken die konkaven Stellen der Glasoberfläche ähnlich wie eine Sammellinse und zerstreuen das einfallende Licht. Dahinter entsteht ein dunkler Bereich.

Im Unterricht wird der beschriebene Effekt schon seit jeher benutzt, ohne dass man ihn normalerweise thematisiert: Die von unten durchleuchtete Wellenwanne liefert nur deshalb ein hell-dunkles Bild des Wellenmusters an Decke oder Wand, weil Wellenberge bzw. -täler in gleicher Weise fokussierend bzw. zerstreuernd wirken.



Abbildung 47: Sonnentaler im Freien (Quelle: <http://leifi.physik.uni-muenchen.de/>)

b) Sonnentaler im Klassenzimmer

Sonnentaler kann man im Freien oft unter Bäumen beobachten, wenn die Sonne durch Lücken im Blattwerk fällt. Das Erstaunliche daran: Obwohl die Lücken im Blattwerk ja völlig unregelmäßig Formen haben, besitzen die Lichtflecke auf dem Boden ausnahmslos eine runde bzw. elliptische Gestalt. Die Erklärung des Phänomens ist wieder einfach: Es handelt sich um Lochkamera-Bilder der Sonne.

Zur experimentellen Demonstration des Effekts im Klassenzimmer schlägt Schlichting vor, in schwarze Pappe eine Öffnung eines Dreiecks, einer Sichel, eines Y o.ä. zu schneiden. Mit Diarähmchen baut man sich ein selbstgemachtes „Dia“ und schiebt dies ein einen Diaprojektor, dessen Objektiv man vorher entfernt hat. Auf diese Weise verschafft man sich eine geeignete ausgedehnte Lichtquelle, die die Rolle der Sonne übernimmt.

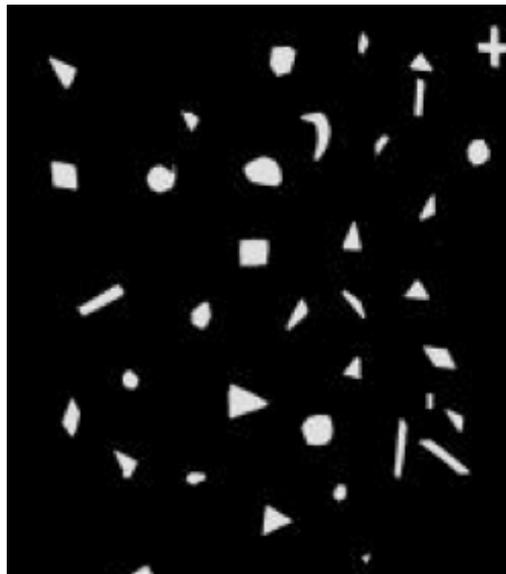


Abbildung 48: Die „Löcher im Blattwerk“ werden aus Pappe geschnitten (Quelle: Schlichting 1999)

Ebenfalls aus schwarzer Pappe schneidet man verschieden geformte „Löcher im Blattwerk“ (Abbildung 48). Bringt man die so hergestellte Blende in den Strahlengang des Diaprojektors, erscheinen auf einer weit entfernten Wand „Sonnentaler“: Lichtflecke nicht in der Form der

Löcher, sondern der Lichtquelle (Abbildung 49). Ein besonders schöner Effekt entsteht, wenn man die Pappe mit den Öffnungen langsam dreht.

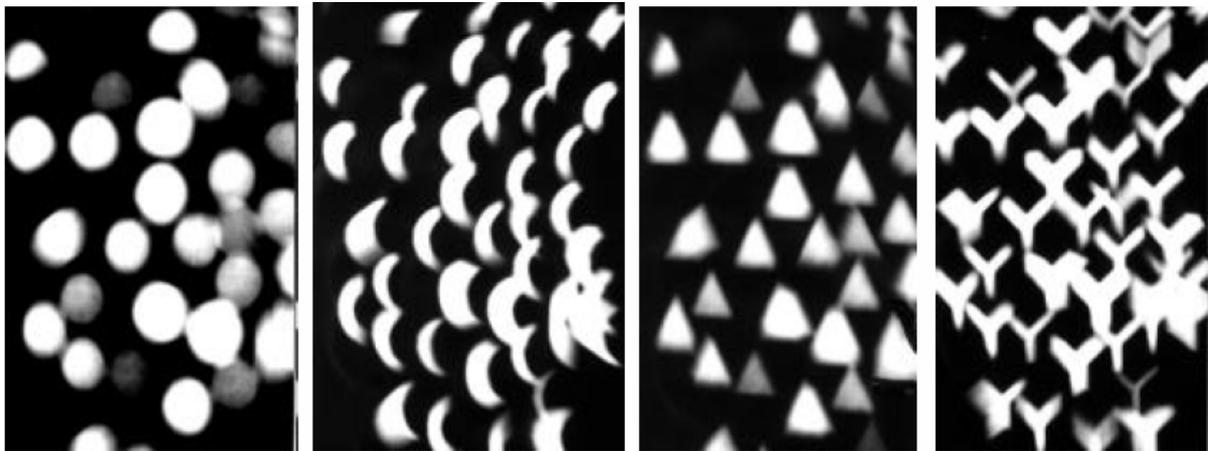


Abbildung 49: Die „Sonnetaler“ haben nicht die Form der Öffnungen, sondern die der Lichtquelle (aus: Schlichting 1999)

Nicht nur Blattwerk zeigt den „Sonnetaler-Effekt“, sondern auch andere Gegenstände mit Löchern – etwa ein Freizeithemd mit rechteckigen Löchern (Abbildung 50 oben) oder ein Haushaltssieb (Abbildung 50 unten). Am Haushaltssieb lässt sich nach Schlichting (1999) auch das Phänomen der „Schattentaler“ beobachten – die Tatsache, dass auch der Schatten eines kleinen Gegenstands in großer Entfernung die Form der Lichtquelle annimmt.

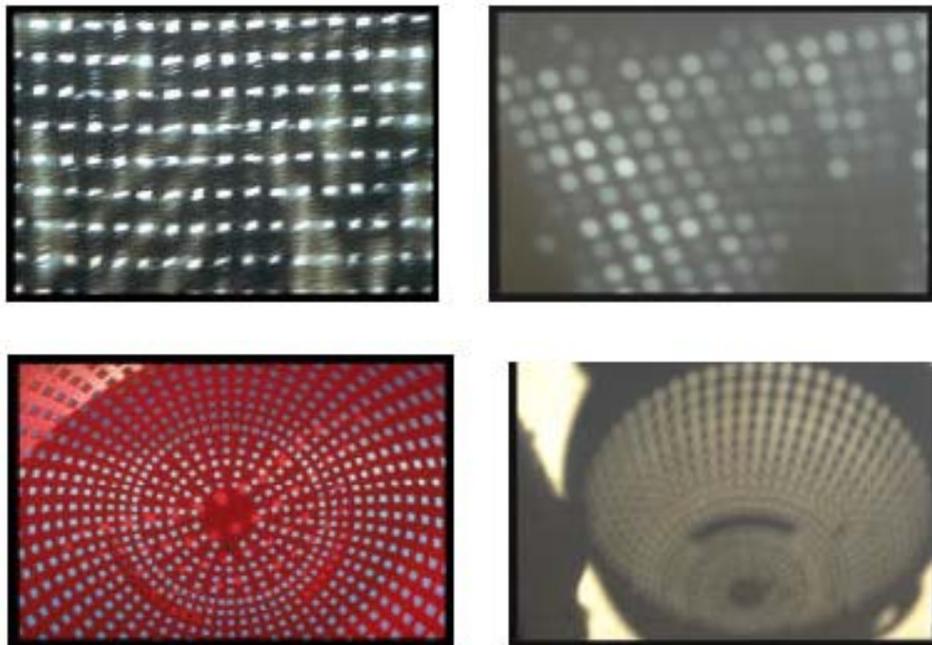


Abbildung 50: Sonnetaler bei einem Hemd mit Löchern (oben) und einem Haushaltssieb (unten; beide aus Schlichting 1999)

c) „Schwert der Sonne“

Fast jedem ist die Erscheinung bekannt, dass sich die Sonne auf welligem Wasser nicht in runder Gestalt spiegelt, sondern als langgezogenes „Band“ aus Lichtreflexen (Abbildung 51). Grund dazu ist die gewellte Oberfläche des Wassers. Auf der Verbindungslinie Sonne-Beobachter finden sich immer Punkte, an denen die Wasseroberfläche momentan gerade so geneigt ist, dass das nach dem Reflexionsgesetz gespiegelte Sonnenlicht ins Beobachterauge fällt.



Abbildung 51: Einzelne Reflexe formen ein „Sonnenschwert“ (aus Schlichting 1999)

Im Freihandexperiment ist die Erscheinung am einfachsten mit einer Taschenlampe und einer wellenartig strukturierten Oberfläche (man kann z. B. auch die oben erwähnten gewellten Glasscheiben verwenden). Man erhält dann ein statisches Analogon der Spiegelungen auf dem Gewässer. Weil die Wasseroberfläche (im Gegensatz zur festen Oberfläche) ständig ihre Orientierung ändert, ergibt sich das ständig wechselnde, reizvolle Muster des Sonnenschwerts im Wasser.

Analoge Erscheinungen findet man im Alltag auf vielen strukturierten Oberflächen, auf denen die Reflexe punktförmiger Lichtquellen als Band erscheinen. In Abbildung 52 sieht man beispielhaft bandförmige Reflexionen auf verschiedenen Metalloberflächen.



Abbildung 52: Bandförmige Reflexionen auf Metalloberflächen (aus: Schlichting 1999)

d) Experimente zur Oberflächenspannung von Wasser

Wenn kleine Gegenstände wie Tannennadeln im Wasser schwimmen, bilden sie oft ganze „Flöße“ (Abbildung 52). Gerät eine einzelne Tannennadel in die Nähe eines solchen Floßes, wird sie von dem Floß „angezogen“ und schließt sich ihm an. Auch an Blasen im Wasser kann man dieses Phänomen beobachten.



Abbildung 53: Tannennadelfloß (aus Schlichting 2006)

Wie Schlichting (2006) in instruktiven Freihandexperimenten zeigt, ist die Ursache für diese Erscheinung die Oberflächenspannung des Wassers.

Schwimmt ein leichter Gegenstand auf der Wasseroberfläche bildet sich aufgrund der Oberflächenspannung ein konvexer oder konkaver Meniskus aus. Auch am Rand des Gefäßes entsteht ein solcher konkaver Meniskus. Im Wasser schwimmende Gegenstände mit einer kleineren Dichte als die des Wassers (z. B. Kork oder Styropor) bilden einen konkaven Meniskus, solche mit einer größeren Dichte als der des Wassers bilden einen konvexen Meniskus (Abbildung 54).

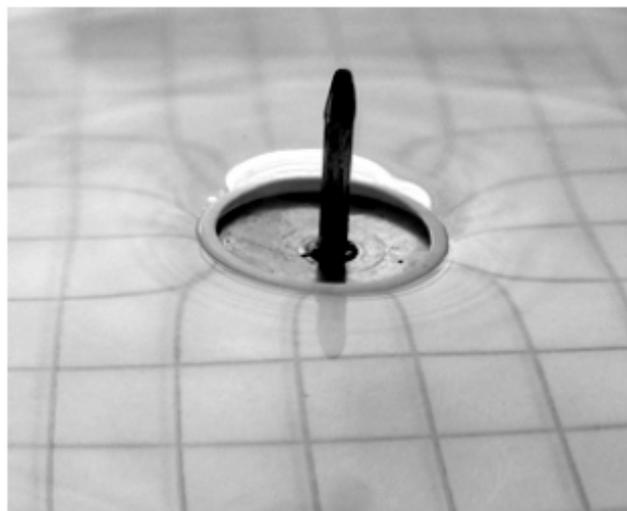
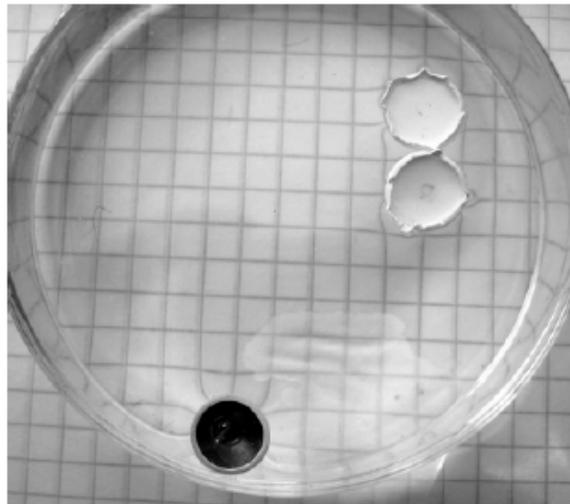


Abbildung 54: Konvexer Meniskus um eine schwimmende Heftzwecke (Dichte größer als die des Wassers) (aus Schlichting 2006)

Vereinigen sich zwei gleichartige Menisken, wird die Gesamtoberfläche des Wassers kleiner. Weil das Wasser seine Gesamtoberfläche minimieren „will“ (reduzieren der gesamten Oberflächenspannung bzw. -energie), entsteht dadurch eine effektive Anziehung.

Umgekehrt wird die Wasseroberfläche vergrößert, wenn sich zwei ungleichartige Menisken vereinigen. Auf diese Weise kommt es zu einer effektiven Abstoßung. Abbildung 55 zeigt beide Fälle.



**Abbildung 55: Gleichartige Menisken ziehen sich an, ungleichartige stoßen sich ab.
Im Bild gezeigt sind Heftzweckenkappen (hell) und Heftzwecke (dunkel)
(aus Schlichting 2006)**

Man kann mit einer Pinzette vorsichtig eine Heftzwecke etwas anheben und dadurch aus einem konvexen einen konkaven Meniskus erzeugen (Abbildung 56). Aus Abstoßung wird nun Anziehung. Lässt man die Heftzwecke wieder los, kehren sich die Verhältnisse wieder um und die Kappen werden heftig abgestoßen.

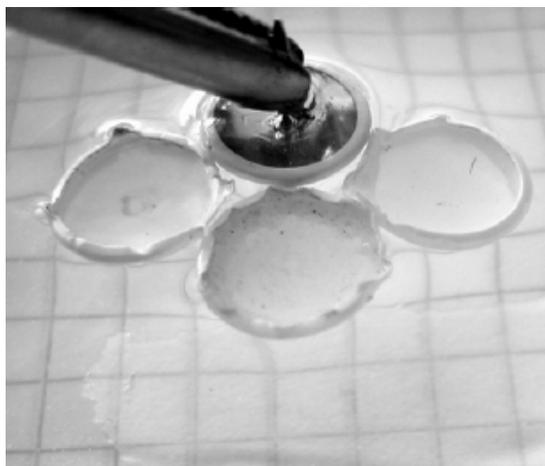


Abbildung 56: Wenn man die Heftzwecke loslässt, werden die Kappen heftig abgestoßen (aus Schlichting 2006)

5 Physik und Sport

5.1 Themen aus Physik und Sport

Viele Schülerinnen und Schüler empfinden den Kontext „Sport“ im Physikunterricht als interessant und lassen sich durch entsprechende Themen motivieren (vgl. die Ergebnisse zum Physikinteresse in Kapitel 2). Es gibt eine ganze Reihe von Unterrichtsvorschlägen aus dem Themengebiet. Eine Übersicht über die Literatur gibt May (2003).

Eine ganze Sammlung von Themen mit Unterrichtshinweisen enthält das Buch „Sport und Physik“ von Mathelitsch (1991). Die Themengebiete, die in diesem Buch behandelt werden, vermitteln einen Überblick über die Vielfalt der möglichen Bezüge, die zwischen den beiden Fächern Physik und Sport hergestellt werden können.

- *Gehen, Laufen und Springen*
Warum ist das Gehen anstrengend, obwohl scheinbar keine Arbeit geleistet wird? Wie viel leistet man beim Gehen? Was unterscheidet das Gehen vom Laufen? Was passiert beim Start? Wie groß kann die maximale Laufgeschwindigkeit sein? Kraft und Technik beim Hochsprung; Kraft und Geschwindigkeit beim Weitsprung; Geschwindigkeit und Technik beim Stabhochsprung.
- *Hände härter als Stein – Karate*
Welche Kraft ist nötig, um einen Ziegelstein zu zerbrechen? Elastische vs. Inelastische Energieübertragung; Warum bricht nicht die Hand?
- *Saltos und Schrauben*
Drehmoment und Drehimpuls bei Pirouetten, Kräfte und Drehmomente beim Salto, Drehmomentfreie Drehung; Schrauben
- *Bälle zum Werfen, Stoßen, Schlagen*
Elastizität von Bällen, Wurftechnik, Wurfgenauigkeit, Kräfte auf einen getretenen Ball, Drall von Bällen
- *Auf Schnee geht alles leichter*
Reibungskräfte und Zentripetalkräfte beim Skilaufen, Abfahrtslauf, Sind schwerere Läufer bessere Abfahrer? Slalom, Skilanglauf, Skispringen
- *Physik auf zwei Rädern – das Fahrrad*
Stabilität eines Fahrrads, Fahrwiderstand, Luftwiderstand, Steigungswiderstand

Mathelitsch versteht es, durch viele Versuche und Fragen die Fächer Sport und Physik sinnvoll zu verknüpfen. Er versucht Fragen zu beantworten wie:

- Warum ist die Weltrekordmarke im Stabhochsprung zirka sechs Meter?
- Warum verletzt ein Karatekämpfer seine Hand nicht, obwohl er damit einen Stein zerschlägt?
- Warum gleiten Skier auf Schnee so gut?

Immer wieder werden physikalische oder sportliche Arbeitsaufträge gegeben, die eine Verknüpfung zwischen physikalischen Einsichten und körperlicher Erfahrung ermöglichen (z. B. Ermitteln der eigenen Beinkraft oder der optimalen Hocktiefe, aus der man am höchsten springen kann; Variieren des Abwurfwinkels beim Basketball).

5.2 Umgang mit Diagrammen: Analyse eines Bungee-Sprungs

In der Diskussion der letzten Jahre um die Kompetenzorientierung des Unterrichts ist der Umgang mit Diagrammen als eine wichtige, bisher eher vernachlässigte Fähigkeit erkannt worden. In der Mechanik sind es vor allem t - s - und t - v -Diagramme, die in zunehmendem Maße im Unterricht behandelt werden sollen. Mit den immer weiter verbreiteten kostenlosen Video-Messwerterfassungssystemen hat man die Chance, realistische Bewegungen (z. B. aus dem Sport) in den Unterricht zu integrieren. Das folgende Beispiel (Müller 2004, 2006) demonstriert dies für eine besondere Bewegungsform, den Bungee-Sprung.

a) t - s -Diagramm eines Bungee-Sprungs

Die Bilderfolge in Abbildung 57 zeigt den Verlauf eines Sprungs aus 56 m Höhe. Die Bilder wurden aus einer frei erhältlichen Videoaufnahme eines Bungeesprungs entnommen (<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/DAVID/video.htm>). Sie sind im Abstand von etwa 1,2 s aufgenommen. Der Sprung verläuft grob wie folgt: Zunächst fällt der Springer ungebremst. Wenn er so weit gefallen ist, dass das Seil gestrafft ist, wird er gebremst, bis er unmittelbar über der Wasseroberfläche für einen kurzen Moment zur Ruhe kommt. Anschließend wird er vom gespannten Seil wieder nach oben geschleudert (hier nicht sichtbar).

Für eine präzise physikalische Beschreibung des Sprungs ist es hilfreich, die Höhe y des Springers nicht nur für die ausgewählten Momente in Abbildung 57 zu kennen, sondern für jeden beliebigen Zeitpunkt. Diese Information ist im Zeit-Weg-Diagramm in Abbildung 58 enthalten. Um es zu erstellen, wurde mit einem Messwerterfassungssystem die Position des Springers in jedem Teilbild des Videos (also im Abstand von 1/25 Sekunde) registriert.

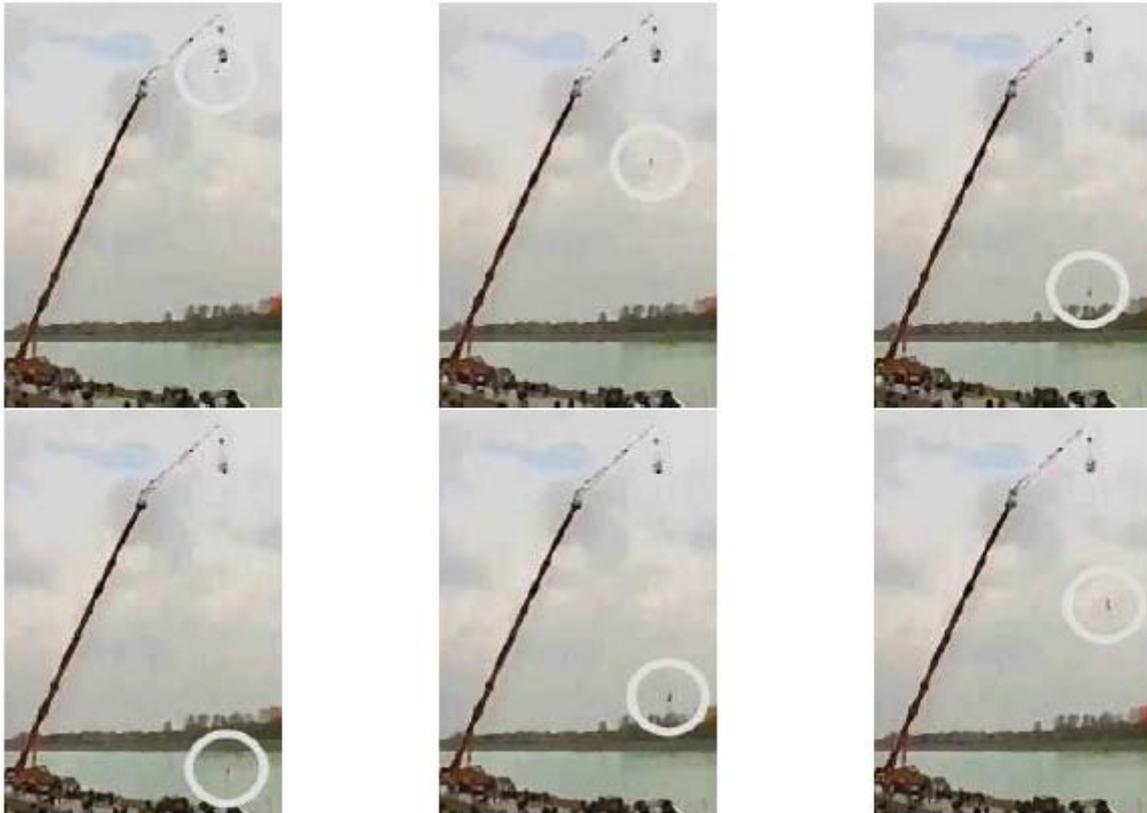


Abbildung 57: Verlauf eines Bungeesprungs (aus Müller 2006)

In den ersten 1,2 Sekunden (im Bereich positiver y -Werte) erkennt man den für den freien Fall charakteristischen parabelförmigen Verlauf der $y(t)$ -Kurve. Wir werden später noch darauf zurückkommen. Nach 1,2 Sekunden ist der Springer 12 m frei gefallen und das Seil ist gestrafft. Das Seil beginnt nun, den Fall abzubremsen. Der tiefste Punkt ist nach 4 Sekunden Fallzeit erreicht. Nach 53 durchstürzten Metern ist der Springer zur Ruhe gekommen und bleibt eine ganze Weile in der Nähe der tiefsten Position. Vom gespannten Seil wird er anschließend noch einmal gut 30 Meter nach oben gezogen.

b) Geschwindigkeit und Beschleunigung

Für das Verständnis der Bewegung sehr hilfreich ist das *Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm* in Abbildung 58 (b). Die vertikale Geschwindigkeit v kann man nicht direkt aus den Fotos ablesen, sondern muss sie aus Orts- und Zeitdifferenzen berechnen:

$$v = \frac{\Delta y}{\Delta t}.$$

Eine negative Geschwindigkeit, wie sie das Diagramm in den ersten 4 Sekunden zeigt, bedeutet, dass die Geschwindigkeit nach unten gerichtet ist. Die Geschwindigkeit wird null, wenn der Springer bei $t \approx 4$ s seinen tiefsten Punkt erreicht hat. Danach setzt die Aufwärtsbewegung ein und v nimmt positive Werte an.

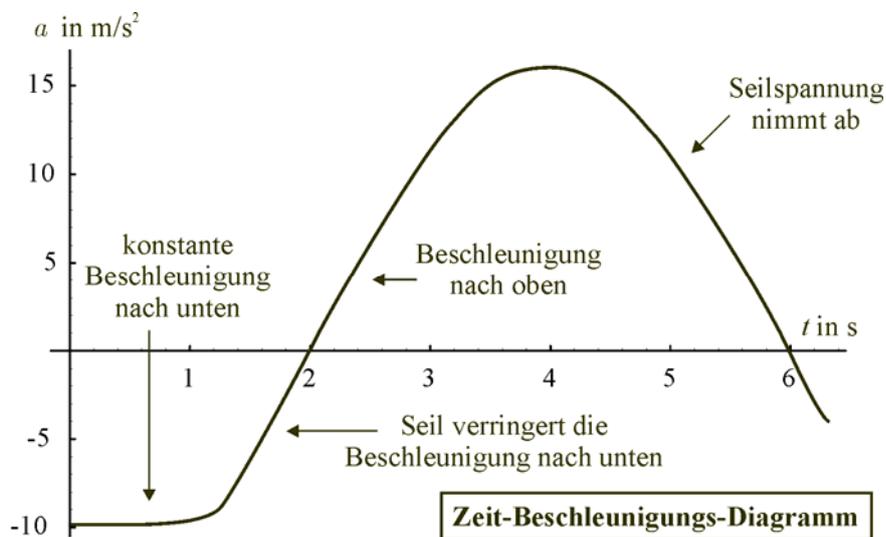
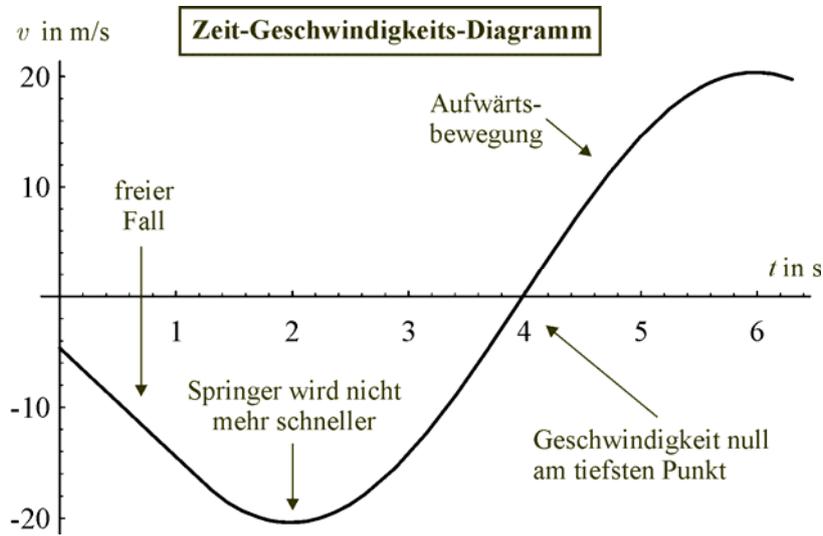
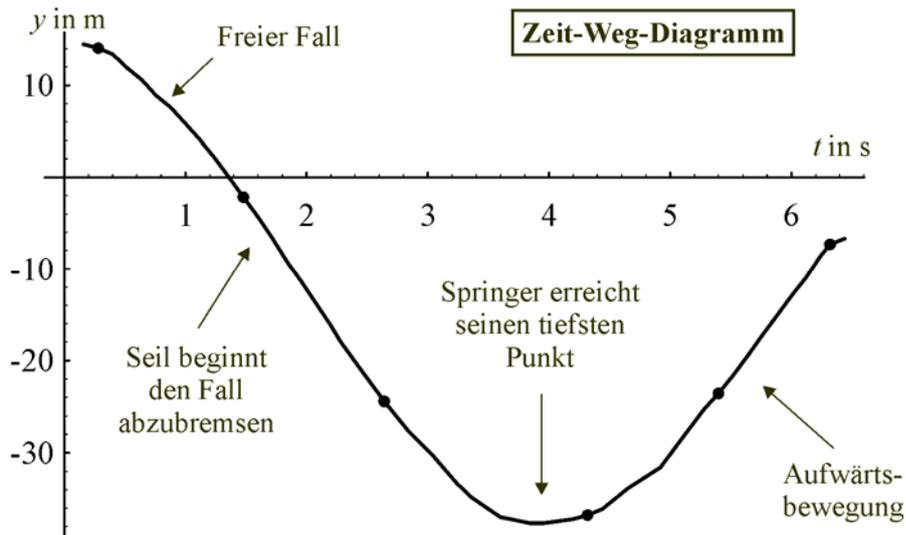


Abbildung 58: Verlauf des Bungee-Sprungs: (a) Höhe, (b) Geschwindigkeit, (c) Beschleunigung (aus Müller 2006)

Wenn der Springer sich, bevor das Seil gespannt ist, im freien Fall befindet (d. h. für $t < 1,4$ s), zeigt das t - v -Diagramm eine Gerade. Dies ist wieder typisch für den freien Fall: Der Betrag der Geschwindigkeit nimmt linear zu.

Nach 2 Sekunden hat die Bremswirkung des Seils soweit eingesetzt, dass die Fallbewegung nicht mehr schneller wird. Die Geschwindigkeitskurve hat an diesem Punkt ein Extremum. Man kann ablesen, dass der Springer eine Maximalgeschwindigkeit von etwa 20 m/s erreicht. Wenn er also zu diesem Zeitpunkt, in 25 m Höhe, nach unten schaut, sieht er den Boden mit 72 km/h auf sich zu rasen. Zu seinem Glück verringert sich die Geschwindigkeit anschließend wieder bis zu $v = 0$ am Umkehrpunkt.

Welche Beschleunigungen muss der menschliche Körper beim Bungee-Sprung aushalten? Diese Frage können wir mit dem *Zeit-Beschleunigungs-Diagramm* in Abbildung 58 (c) beantworten. Die *Beschleunigung* a beschreibt die zeitliche Änderung der Geschwindigkeit:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Zu Beginn, in der Phase des freien Falls, wirkt natürlich die konstante Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ nach unten. Danach bremst das Seil ab, und $|a|$ wird geringer.

Nach 2 Sekunden ist das Seil so weit gedehnt, dass der Springer nach oben beschleunigt wird ($a > 0$). Beschleunigung nach oben bedeutet aber noch nicht, dass nun auch die Geschwindigkeit nach oben gerichtet ist. Nur die Geschwindigkeitsänderung Δv in der Zeit Δt ist nach oben gerichtet. Für den Bungee-Springer äußert sich das darin, dass er nun langsamer wird. Das ist im t - v -Diagramm zu erkennen und wird in Abbildung 59 noch einmal verdeutlicht.

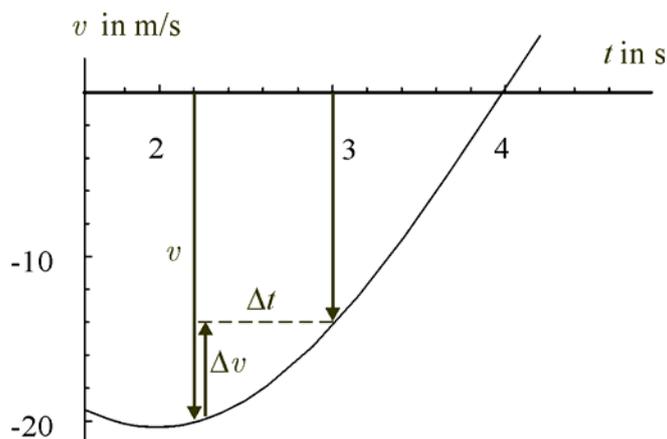


Abbildung 59: Geschwindigkeit v und Geschwindigkeitsänderung Δv

Der größte Wert der Beschleunigung ist bei $t = 4$ s erreicht, zu dem Zeitpunkt also, zu dem der Springer am tiefsten Punkt momentan zur Ruhe kommt (auch hier muss man aufpassen: Die Geschwindigkeit ist in diesem Moment null, die Geschwindigkeitsänderung aber maximal). Das Seil ist jetzt am straffsten gespannt und zieht den Springer nach oben. Die maximale Beschleunigung, die der Springer ertragen muss, liegt bei 16 m/s^2 , also etwa $1,9 g$. Diese

moderate Beschleunigung stellt zwar medizinisch noch kein Problem dar, aber ein wenig unangenehm wird die Lage für den Springer trotzdem: Er hängt mit dem Kopf nach unten am Seil, und nach dem Trägheitsgesetz fließt sein Blut bei der Aufwärtsbewegung in Richtung Kopf.



Abbildung 60: Weitsprung (Quelle: www.sportingheroes.net)

5.3 Modellbildung am Beispiel des Weitsprungs

Ein Aspekt, der bei der Betrachtung von Alltagsphänomenen im Physikunterricht oft etwas zu kurz kommt, ist die modellmäßige Durchdringung der untersuchten Phänomene. Oft hat dies seine Ursache darin, dass die interessanten Alltagsphänomene physikalisch oft zu komplex sind, um sie auf theoretischer Ebene erfassen zu können. Das folgende Beispiel (Müller 2004, 2006) zeigt am Beispiel des Weitsprungs, dass dies auch bei „echten“ Bewegungen aus dem Sport durchaus gelingen kann. Wie weit kann ein Mensch überhaupt springen? Wie weit sind wir vom „endgültigen“ Weltrekord im Weitsprung noch entfernt? Um diese Fragestellung, durch eine physikalische Analyse zu beantworten, genügt die Kenntnis der Gesetze des schrägen Wurfs. Die Kenntnis der kinematischen Gesetze allein reicht aber nicht aus, man muss sie auch anwenden können. Hier tritt der Modellbildungsaspekt des kontextorientierten Lernens zutage. Um das Problem lösen zu können, müssen wir uns ein (einfacheres oder komplizierteres) Modell eines Weitsprungs konstruieren, und an diesem Modell die gestellte Frage bearbeiten. Am Beispiel aus dem Sport wird deutlich, was es bedeutet, „die Lernumgebung [...] so

zu gestalten, dass sie den Umgang mit realistischen Problemen und authentischen Situationen ermöglicht und anregt.“ (Reinmann-Rothmeier und Mandl 2001).

a) Die Disziplin Weitsprung

Das Ziel der Disziplin ist leicht formuliert: anlaufen, kurz vor dem Absprungbalken abspringen und in möglichst großer Entfernung dahinter in der Sandgrube wieder zu landen. Das hört sich einfach an, aber zu einem guten Weitsprung gehört viel Technik, Koordination und Schnelligkeit.

Aus Erfahrung wissen Weitspringer, dass ein möglichst schneller Anlauf wichtig ist. Nur sehr gute Sprinter haben Chancen auf große Weiten. Weltklassespringer erreichen kurz vor dem Absprung Geschwindigkeiten von etwa 10 m/s – damit hätten sie auch beim 100 m-Lauf gute Chancen.

Die Kunst beim Weitsprung besteht darin, die große Anlaufgeschwindigkeit beim Absprung möglichst beizubehalten und noch dazu eine große Sprunghöhe zu erzielen. Flache Sprünge sind keine weiten Sprünge. Es ist aber nicht einfach, einen großen Absprungwinkel zu erreichen, denn mit einem einzigen Schritt muss der Körper sehr stark nach oben beschleunigt werden. Die Sportler haben dafür eine besondere Anlauftechnik entwickelt (die letzten drei Schritte im Rhythmus kurz-lang-kurz), wobei sie für einen möglichst hohen Sprung sogar eine Verringerung der Horizontalgeschwindigkeit in Kauf nehmen.

Nachdem der Weitspringer einmal abgesprungen ist, steht die Flugbahn des Körperschwerpunkts unwiderruflich fest (Abbildung 61). Der Sportler kann nichts tun, um sie zu verändern (nach dem 2. Newtonschen Gesetz müssten dazu externe Kräfte auf seinen Körper wirken – in der Flugphase wirkt aber nur die Schwerkraft).

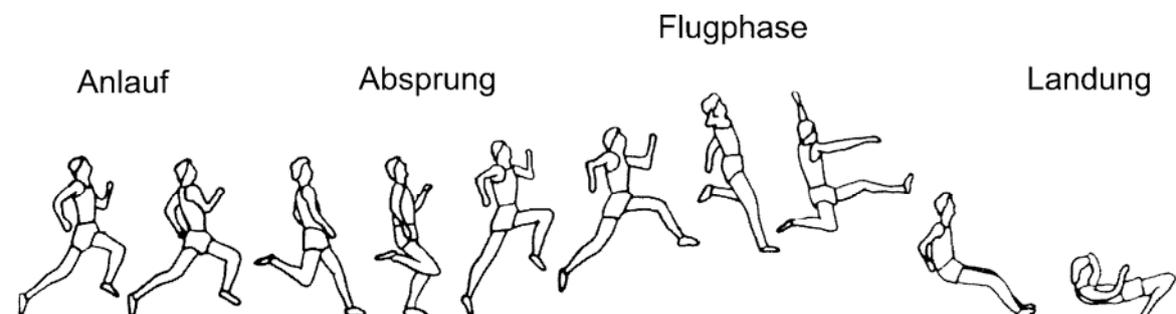


Abbildung 61: Phasen des Weitsprungs (Quelle: Stefan Bichsel, Skript Universität Bern: <http://www.issw.unibe.ch/Sportstudien/Sportbereiche/LA/Springen/Weitsprung.pdf>)

An welcher Stelle der Körperschwerpunkt in der Sandgrube aufkommt, ist durch die Flugbahn eindeutig bestimmt. Trotzdem ist die Landung ein wichtiger Bestandteil des Sprungs. Denn für die Wertung zählt nicht der Körperschwerpunkt, sondern derjenige Körperteil, der im Sand den entscheidenden Abdruck hinterlässt. Der Weitspringer muss also im Flug seine Gliedmaßen so ordnen, dass sie möglichst weit vorn aufkommen.

Die Bewegungen, die ein Weitspringer während des Sprungs ausführt (und die Namen wie Hangsprung- oder Laufsprungtechnik bekommen haben), beeinflussen also gar nicht den

Sprung selbst, sondern dienen zur Vorbereitung der Landung. Sie sorgen dafür, dass der Springer so landet, dass die bei der Landung „verschenkte“ Weite möglichst gering bleibt.

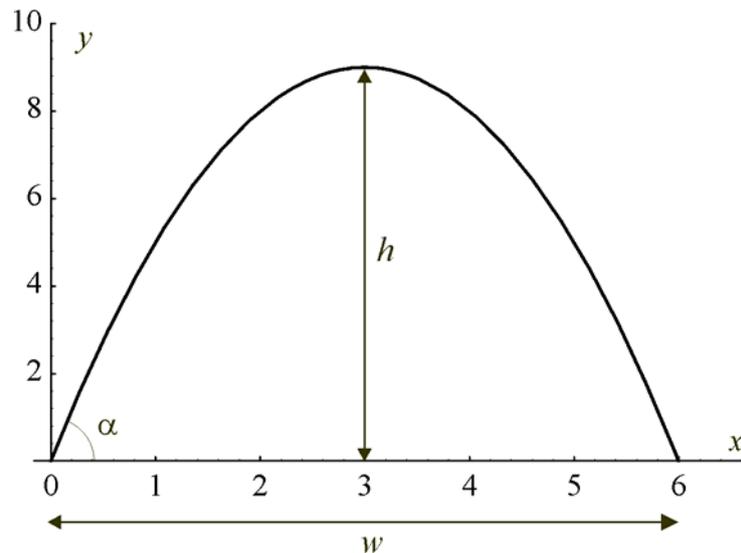


Abbildung 62: Schräger Wurf

b) Schräger Wurf

Um den Weitsprung physikalisch beschreiben zu können, modellieren wir ihn als schrägen Wurf. Die Bahnkurve hat beim schrägen Wurf die Gestalt einer Parabel: Der geworfene Körper steigt an, erreicht in der Höhe h seinen höchsten Punkt und trifft nach der Wurfweite w wieder auf dem Erdboden auf.

Für die mathematische Beschreibung des schrägen Wurfs wird ausgenutzt, dass die Bewegung in x -Richtung völlig unabhängig von der Bewegung in y -Richtung verläuft und umgekehrt. In x -Richtung folgt der Körper einfach dem Trägheitsgesetz: Es wirken keine Kräfte in dieser Richtung, also ändert sich seine Geschwindigkeit nicht. Er behält seine Anfangsgeschwindigkeit v_{x0} bei, ungestört vom Auf- und Absteigen in y -Richtung.

In y -Richtung bewegt sich der Körper unter dem Einfluss der Schwerkraft. Die resultierende Aufwärts- und wieder Abwärtsbewegung ist nichts anderes als der freie Fall, die gleichmäßig beschleunigte Bewegung mit der Beschleunigung $-g$.

Die zweidimensionale Bewegung beim schrägen Wurf setzt sich demnach aus zwei einfachen eindimensionalen Bewegungsformen zusammen: gleichförmige Bewegung in x -Richtung und gleichmäßig beschleunigte Bewegung in y -Richtung. Das Zeit-Weg-Gesetz lautet entsprechend.

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + v_{0x}t, \\ y(t) &= y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2. \end{aligned} \tag{1}$$

c) Geschwindigkeit als Vektorgröße

In Gleichung (1) müssen die Komponenten der Anfangsgeschwindigkeit des geworfenen Körpers eingesetzt werden. Dazu muss der Zusammenhang zwischen Betrag $|\vec{v}_0|$, Abwurfwinkel α und den beiden Komponenten v_{0x} und v_{0y} hergestellt werden. Er lässt sich mit etwas Trigonometrie aus Abbildung 63 ablesen:

$$\begin{aligned}v_{0x} &= |\vec{v}_0| \cos \alpha, \\v_{0y} &= |\vec{v}_0| \sin \alpha.\end{aligned}\tag{2}$$

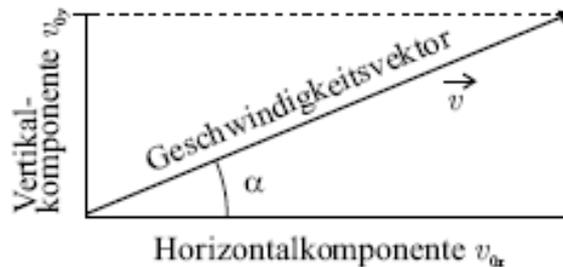


Abbildung 63: Geschwindigkeitsvektor und Geschwindigkeitskomponenten

Was uns am schrägen Wurf interessiert, ist seine Weite w und Höhe h (beide sind in Abbildung 62 eingezeichnet). Mit der Mathematik von Parabeln findet man:

$$w = \frac{2v_{0x}v_{0y}}{g} = \frac{|\vec{v}_0|^2 \sin 2\alpha}{g},\tag{3}$$

$$h = \frac{v_{0y}^2}{2g} = \frac{|\vec{v}_0|^2 \sin^2 \alpha}{2g}.\tag{4}$$

d) Modellierung des Weitsprungs als schräger Wurf

Kehren wir nun zu unserem eigentlichen Ziel zurück: der physikalischen Analyse des Weitsprungs. Wir fragen: Was zeichnet einen guten Sprung aus? Wie sieht der „ideale“ Sprung aus, auf den man im Training hinarbeiten sollte? Wie weit kann ein Mensch überhaupt springen? Jahrzehntlang konnte der „Jahrhundertsprung“ von Bob Beamon (8,90 m, 1968) nicht überboten werden. Im Jahr 1991 gelang Mike Powell ein noch weiterer Sprung, und seitdem liegt der Weltrekord bei 8,95 m. Um wie viel kann diese Weite noch gesteigert werden? Mit physikalischen Mitteln können wir dieser Frage (jedenfalls in Teilaspekten) nachgehen.

Ähnlich wie beim schrägen Wurf folgt der Körperschwerpunkt des Springers einer Wurfparabel. Für die Form der Bahn ist unmaßgeblich, dass der Springer im Gegensatz zu einem geworfenen Ball aktiv abspringt. Was zählt, sind die Kräfte, die während der Flugphase auf ihn wirken, und beim Ball wie beim Springer wirkt ausschließlich die Schwerkraft (wenn man vom Luftwiderstand absieht). Die Bewegungen des Springers während der Flugphase beeinflussen die Bahn des Körperschwerpunkts nicht.

Um die ersten qualitativen Erkenntnisse zu gewinnen, betrachten wir Gleichung (3) für die Weite beim schrägen Wurf. Sie hängt von den beiden Parametern Abwurfgeschwindigkeit

$|\vec{v}_0|$ und Abwurfwinkel α ab. Wir sehen schon hier, dass für den Weitsprung ein schneller Anlauf besonders wichtig ist, denn die Weite hängt quadratisch von der Abwurfgeschwindigkeit ab. Die Weite vervierfacht sich, wenn die Geschwindigkeit verdoppelt wird.

Nach Gleichung (3) läge der optimale Absprungwinkel bei 45° , denn für diesen Wert hat die Weite als Funktion von α ihr Maximum. Tatsache ist allerdings, dass kein Springer einen so steilen Absprungwinkel erreicht. Selbst die besten Weitspringer, die ihre Sprungtechnik über Jahre hinweg optimiert haben, erreichen nur Absprungwinkel zwischen 20° und 30° .

Grund dafür ist, dass bei einem Absprungwinkel von 45° die Vertikal- und die Horizontal- komponente der Absprunggeschwindigkeit gleich sein müssten (vgl. Abbildung 63 und Gl.(2)). Die Horizontalkomponente kann aber durch einen langen Anlauf aufgebaut werden (genau genommen ist das der einzige Zweck des Anlaufs), während die Vertikalkomponente durch einen einzigen Schritt beim Absprung erzielt werden muss. Obwohl die Weitspringer – wie oben erwähnt – für einen steileren Absprungwinkel sogar etwas von ihrer Horizontalgeschwindigkeit opfern, wird der optimale Absprungwinkel bei weitem nicht erreicht. Wir werden das bei unseren Überlegungen zur maximalen Sprungweite berücksichtigen müssen.

e) Physikalisches Modell des Weitsprungs

Versuchen wir nun, ein mathematisch handhabbares und doch möglichst realitätsnahes Modell eines Weitsprungs zu entwerfen. Die erste Modellannahme haben wir bereits vorgenommen: Statt des ganzen Springers betrachten wir nur seinen Körperschwerpunkt (der beim Menschen etwas über Hüfthöhe liegt). Beim Absprung und während des Flugs bereitet diese Annahme keine Probleme. Die Landung jedoch ist ein komplizierter Vorgang, dessen Details wir nicht modellieren können. In unserer mathematischen Beschreibung können wir nur den Landepunkt des Körperschwerpunkts berechnen. Unsere Abschätzung der Sprungweite sollte unter dieser Vereinfachung aber nicht allzu sehr leiden, denn bei einem guten Sprung muss der Springer darauf hinwirken, dass das letzte Körperteil so wenig wie möglich hinter dem Schwerpunkt landet. Alles andere ist „verschenkte Weite“.

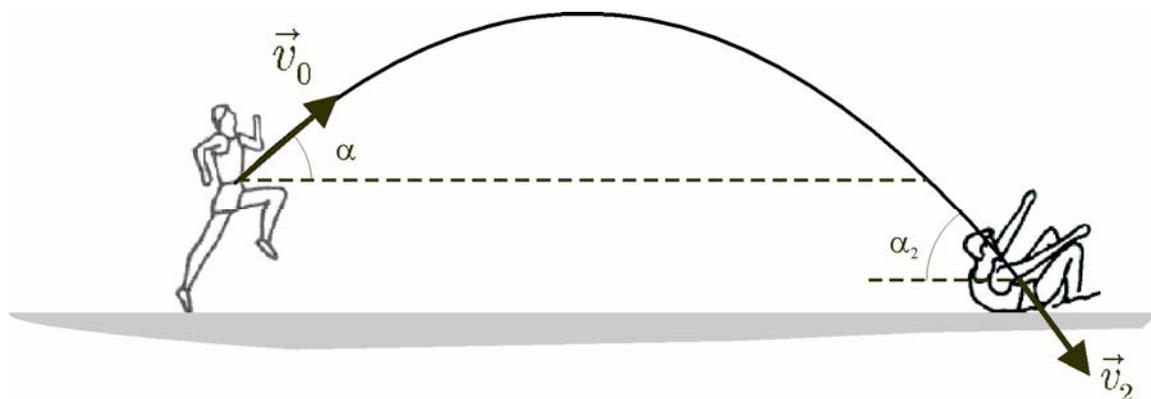


Abbildung 64: Bahnkurve beim Weitsprung

Um die Flugphase zu modellieren, ist es auf den ersten Blick naheliegend, den Weitsprung einfach als schrägen Wurf des Körperschwerpunkts zu betrachten. Das wird aber nicht ausreichen, denn wie man in Abbildung 64 erkennen kann, ist die Bahnkurve des Springers nicht symmetrisch. Er springt aufrecht ab und landet im Sitzen oder Liegen. Wir können daher den Weitsprung nicht einfach als einen symmetrischen schrägen Wurf beschreiben, sondern müssen uns einen verfeinerten Ansatz einfallen lassen.

Eine elegante Lösung besteht darin, den unsymmetrischen schrägen Wurf gedanklich in zwei Hälften zu zerlegen und ihn sich aus zwei zusammengesetzten halben Wurfparabeln vorzustellen (Abbildung 65). Wir können dann zur Beschreibung der beiden unterschiedlichen halben Parabeln jeweils die Gleichungen für den schrägen Wurf verwenden, und die Gesamtweite des Sprungs ist die Summe der beiden Teilweiten w_1 und w_2 .

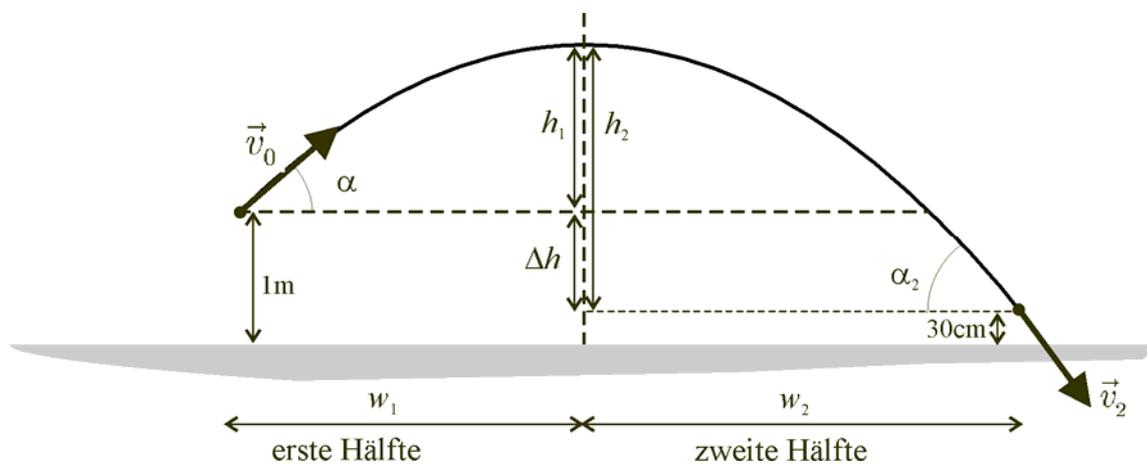


Abbildung 65: Modellieren des Weitsprungs mit zwei halben Wurfparabeln

Die erste Hälfte des Sprungs ist einfach zu beschreiben. Wir setzen den Absprungwinkel α und die Absprunggeschwindigkeit $|\vec{v}_0|$ in die Formel (3) für die Wurfweite ein. Wir wählen $\alpha = 25^\circ$ und $|\vec{v}_0| = 10 \text{ m/s}$. Mit diesen Werten erhalten wir:

$$w_1 = \frac{1}{2} \frac{|\vec{v}_0|^2 \sin 2\alpha}{g} = 3,90 \text{ m.} \quad (5)$$

Mit dem Faktor $\frac{1}{2}$ berücksichtigen wir, dass wir nur die Hälfte der Wurfparabel betrachten. Bei der zweiten Hälfte des Sprungs wird es schwieriger. Der „Landewinkel“ α_2 ist ein anderer als α , und auch die Landegeschwindigkeit $|\vec{v}_2|$ hat einen anderen Wert als die Absprunggeschwindigkeit. Wir müssen zwei Gleichungen für die beiden unbekanntenen Größen $|\vec{v}_2|$ und α_2 suchen, damit wir sie aus bekannten Größen berechnen und in Formel (3) einsetzen können.

Dazu stellen wir zuerst fest, dass die Horizontalkomponente der Geschwindigkeit $|\vec{v}| \cos \alpha$ während des gesamten Sprungs konstant bleibt (wir erinnern uns, dass der Springer sich nach dem Trägheitsgesetz in horizontaler Richtung mit konstanter Geschwindigkeit bewegt). Insbesondere gilt dies auch für die Horizontalkomponente von Absprunggeschwindigkeit \vec{v}_0 und

Landegeschwindigkeit \vec{v}_2 . Wir erhalten so die erste der beiden gesuchten Gleichungen (vgl. (2)):

$$|\vec{v}_0| \cos \alpha = |\vec{v}_2| \cos \alpha_2. \quad (6)$$

Die zweite Gleichung ergibt sich aus der Geometrie des Sprungs. Der Körperschwerpunkt befindet sich beim Absprung in einer Höhe von ungefähr einem Meter; im Moment des Aufkommens liegt er niedriger. Die Höhendifferenz Δh beträgt etwa 70 cm (Abbildung 8). Die Höhen der beiden halben Wurfparabeln sind daher folgendermaßen verknüpft:

$$h_2 = h_1 + \Delta h$$

Einsetzen der Wurfhöhen aus Gleichung (4) ergibt:

$$\frac{|\vec{v}_2|^2 \sin^2 \alpha_2}{2g} = \frac{|\vec{v}_0|^2 \sin^2 \alpha}{2g} + \Delta h. \quad (7)$$

Durch Multiplizieren der Gleichung auf beiden Seiten mit $2g$ erhalten wir:

$$|\vec{v}_2|^2 \sin^2 \alpha_2 = |\vec{v}_0|^2 \sin^2 \alpha + 2g \Delta h. \quad (8)$$

Nun addieren wir auf beiden Seiten $|\vec{v}_0|^2 \cos^2 \alpha$ und benutzen die Relation (6):

$$|\vec{v}_2|^2 (\sin^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_2) = |\vec{v}_0|^2 (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) + 2g \Delta h. \quad (9)$$

Der Ausdruck in Klammern ist aber auf beiden Seiten gleich 1, so dass sich ergibt:

$$|\vec{v}_2|^2 = |\vec{v}_0|^2 + 2g \Delta h. \quad (10)$$

Durch Wurzelziehen erhalten wir die Bestimmungsgleichung für $|\vec{v}_2|$:

$$|\vec{v}_2| = \sqrt{|\vec{v}_0|^2 + 2g \Delta h}. \quad (11)$$

Mit den Gleichungen (6) und (11) liegen nun die beiden Relationen vor, mit denen wir die unbekanntenen Größen $|\vec{v}_2|$ und α_2 berechnen können (Relation (11) kann man übrigens auch auf einfachere Weise durch Anwenden des Energiesatzes statt wie hier geometrisch gewinnen).

Der Rest ist einfach: Zunächst ermitteln wir die Parameter für die zweite Sprunghälfte aus den als bekannt vorausgesetzten Werten $\alpha = 25^\circ$ und $|\vec{v}_0| = 10 \text{ m/s}$:

$$\alpha_2 = 31,8^\circ \quad \text{und} \quad |\vec{v}_2| = 10,66 \text{ m/s.}$$

Durch Einsetzen dieser Werte in (3) erhalten wir die Weite der zweiten Sprunghälfte (wobei wir den Faktor $\frac{1}{2}$ für die halbe Parabel nicht vergessen):

$$w_2 = \frac{1}{2} \frac{|\vec{v}_2|^2 \sin 2\alpha_2}{g} = 5,18 \text{ m.} \quad (12)$$

Mit diesem Ergebnis können wir zum eigentlichen Zweck unserer Betrachtung zurückkommen: Der Berechnung der Gesamtweite w des Sprungs aus den beiden Teilweiten w_1 und w_2 :

$$w = w_1 + w_2 = 3,90 \text{ m} + 5,18 \text{ m} = 9,08 \text{ m}.$$

Dieses Ergebnis liegt bemerkenswert nahe am gegenwärtigen Weltrekord von 8,95 m. Unser Modell und die Annahmen für die beiden Parameter α und $|\vec{v}_0|$ scheinen also der Realität durchaus recht nahe zu kommen. Man sieht aber auch, dass die Spitzensportler ihre Technik so weit entwickelt haben, dass sie mit ihren besten Sprüngen das unter den gegebenen Bedingungen physikalisch Mögliche fast optimal ausschöpfen.

f) Der endgültige Weltrekord?

Wie weit lässt sich der Weitsprungweltrekord noch steigern? Größere Weiten lassen sich durch eine höhere Absprunggeschwindigkeit und einen größeren Absprungwinkel erzielen. In Abbildung 66 ist die Sprungweite für verschiedene Absprunggeschwindigkeiten und Absprungwinkel gezeigt (erstellt aus Gl. (5) und (12)). Der optimale Absprungwinkel liegt in der Nähe von 45° , bei etwa 42° (dass es nicht genau 45° sind liegt am unsymmetrischen Verlauf des Sprungs). Das bedeutet: Die üblichen flachen Absprungwinkel sind alles andere als optimal. Wie aber schon weiter oben diskutiert wurde, sind steilere Winkel aus physiologischen Gründen wohl kaum zu erreichen. Der eher flache Verlauf der Kurven in Abbildung 66 zeigt aber auch, dass die Abhängigkeit der Weite vom Winkel nicht allzu stark ist: Eine Verbesserung beim Absprungwinkel führt nur zu relativ geringfügigen Verbesserungen in der Weite.

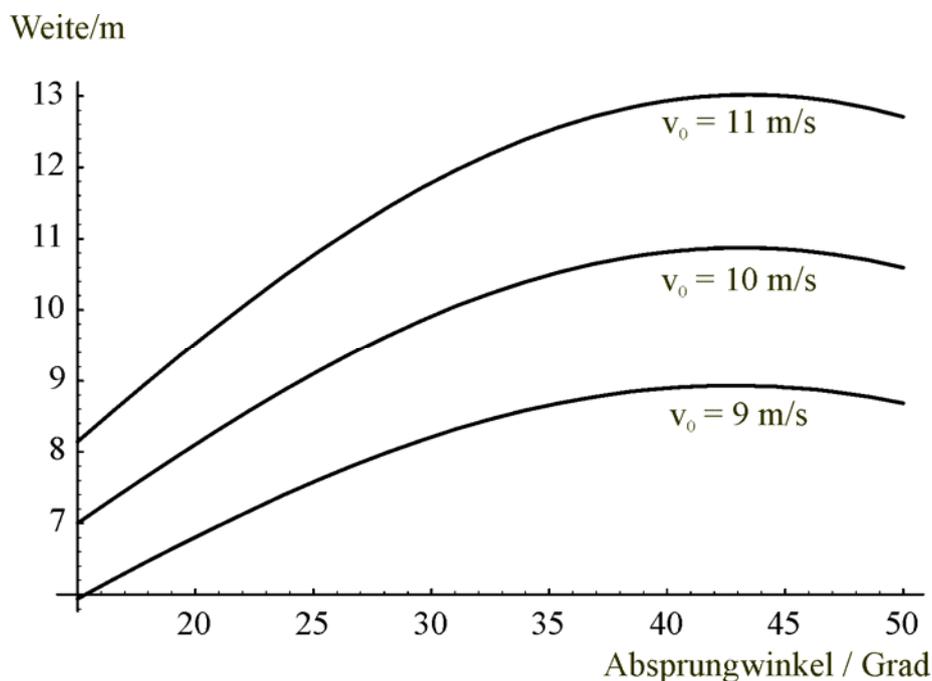


Abbildung 66: Maximale Weite beim Weitsprung als Funktion der Geschwindigkeit und des Absprungwinkels

Anders sieht es bei der Absprunggeschwindigkeit aus: Wie wir aus der quadratischen Abhängigkeit der Wurfweite von der Geschwindigkeit schon vermutet hatten, führt eine Erhöhung der Geschwindigkeit zu einer deutlichen Verbesserung bei der Weite. Man sieht aber auch,

dass man mit etwa 10 m/s schon Weltklasse-Geschwindigkeiten braucht, um auf wirklich gute Weiten zu kommen. Nur erstklassige Sprinter können den Weitsprung-Weltrekord gefährden.

Um mit aller Vorsicht eine Prognose für den „endgültigen Weitsprung-Weltrekord“ zu wagen, gehen wir von unveränderten Absprungwinkeln aus, setzen aber die höchsten bisher gemessenen Momentangeschwindigkeiten beim Sprint an, die bei etwa 11 m/s liegen. Wenn es durch Verbesserungen der Technik gelänge, eine solche Geschwindigkeit beim Absprung beizubehalten, könnten die Springer Weiten von bis zu zehn Metern erzielen.

6 Physik und Medizin

6.1 Themen aus Physik und Medizin

Physik im Kontext von Biologie und Medizin gehört nach den in Kapitel 1 zitierten Befragungen zum Schülerinteresse zu den Themen, die bei den Schülerinnen und Schüler am ehesten auf Interesse stoßen. In der Fachdidaktik wurden aus diesem Grund eine ganze Reihe von Unterrichtsvorschlägen zu diesem Themenkomplex entwickelt. Auch für piko wurde eine Handreichung zu diesem Thema erstellt (<http://www.uni-bonn.de/~umm70012/piko/index-mp.htm>).

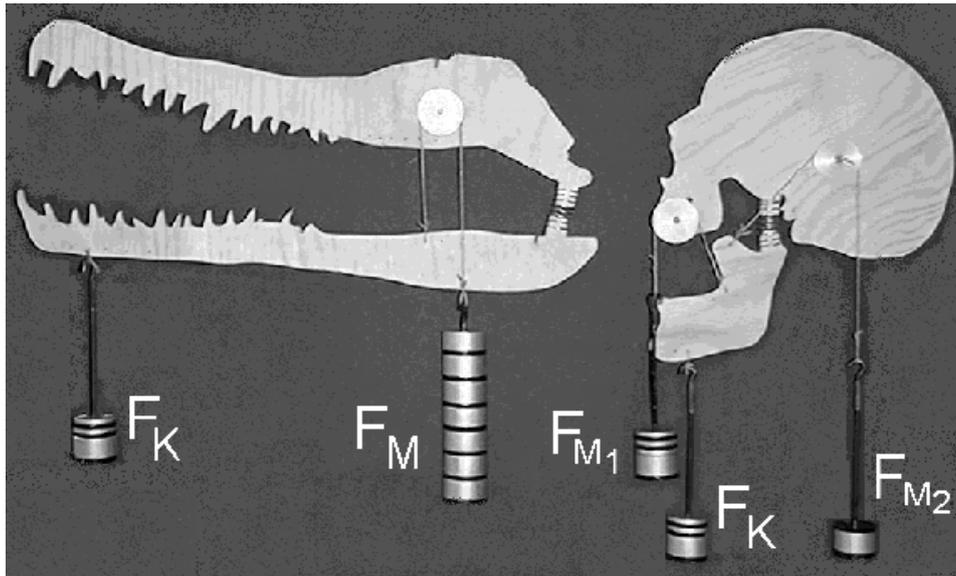


Abbildung 67: Vergleich der zum Kauen benötigten Kräfte bei Krokodil und Mensch (Quelle: http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Sammlung_Unterrichtsmaterialien/ph_med/phmed.html)

Unter den Veröffentlichungen zum Thema „Physik und Medizin“ sei besonders auf die Veröffentlichungen von Colicchia und Wiesner (1999-2005) sowie von W. Müller (1998-2004) hingewiesen. Zu den Themen, die für den Unterricht erschlossen wurden, gehören u. a.:

- Schweredruck des Blutes,
- Infusionen und Transfusionen,
- das Stethoskop,
- Statik des Kauapparats von Reptilien und Säugetieren (Abbildung 67),
- der Augenspiegel,
- die Physik von Stenose und Aneurysma,
- Augenmodelle im Selbstbau,
- Blutdruck und seine Messung,
- Endoskopie,



Abbildung 68: Beobachtung eines selbstgebauten Augenmodells (Quelle: http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Sammlung_Unterrichtsmaterialien/ph_med/phmed.html)

- Sinnesorgane im Test,
- das Infrarot-Ohrthermometer,
- das Leben in der Kälte (Vogt 2004).

6.2 Computertomografie und Ultraschall Diagnostik

Eine der wenigen sorgfältig erprobten und methodisch sauber evaluierten Ausarbeitungen zur Alltagsphysik stammt von Berger (1999-2003). Er untersuchte in der Sekundarstufe II den Zugang zu den Themen „Wellen“ und „Röntgenstrahlung“ in den Kontexten „Ultraschall Diagnostik“ und „Röntgen-Computertomographie“ (Abbildung 69). Die technischen Prinzipien dieser bildgebenden Verfahren wurden in Funktionsmodellen im Unterricht demonstriert.



Abbildung 69: Computertomografie (Quelle: <http://pluslucis.univie.ac.at/PlusLucis/013/Medizin.pdf>)

In der Evaluation stellte sich heraus, dass der kontextorientierte Unterricht zu den genannten Themen ohne Abstriche am fachlichen Anspruch deutlich interessanter ist als im traditionellen Unterricht. Die Leistungen im Wissenstest waren in den Klassen, die im Kontext unterrichtet wurden, nicht größer, aber auch nicht geringer als in den traditionell unterrichteten Klassen.

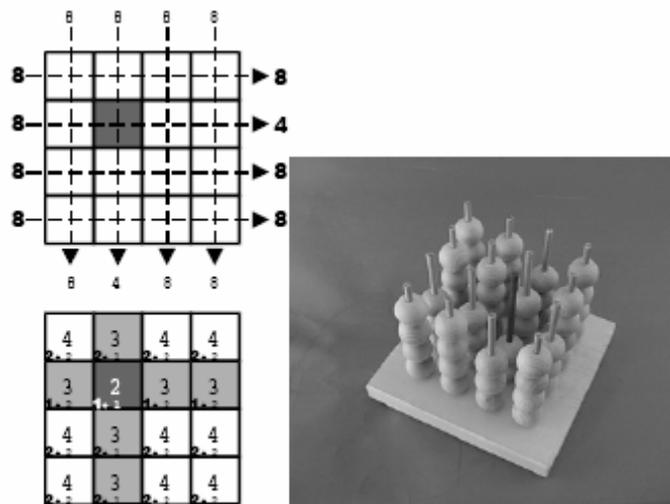


Abbildung 70: Analogmodell zur Rückprojektion bei der Computertomografie (Quelle: <http://pluslucis.univie.ac.at/PlusLucis/013/Medizin.pdf>)

Während das allgemeine Interesse an Physik sich in den unterrichteten Klassen nicht messbar verbesserte, war die Interessantheit des Unterrichts im medizinischen Kontext (bei gleichen fachlichen Inhalten) wesentlich größer als im traditionellen Zugang. Es zeigte sich, dass von der Maßnahme insbesondere Schülerinnen profitieren, deren individuelles Interesse unterdurchschnittlich war.

Neben den hier vorgestellten Themen hat Berger auf ähnliche Art und Weise Unterrichtsvorschläge zu den Kontexten „Mikrowellenofen“ und „Rasterelektronenmikroskop“ veröffentlicht (Berger 2003), für die u. a. Materialien für Gruppenpuzzles ausgearbeitet worden sind.

6.3 Skiaskopie: Augenärztliche Diagnostik mit geometrischer Optik

Bei der Skiaskopie handelt es sich um ein Verfahren zur *objektiven Refraktionsbestimmung*. Das bedeutet, dass die Sehschärfe des Patienten ermittelt wird, ohne auf seinen subjektiven Schärfeeindruck beim Betrachten eines Testbildes zurückgreifen zu müssen. Dies ist vor allem hilfreich bei Kindern oder Personen, mit denen sich der Arzt nicht verständigen kann. Zwar wird das Verfahren heutzutage nicht mehr häufig angewandt; als eine nichttriviale Anwendung der geometrischen Optik in einem medizinischen Kontext ist es jedoch für den Unterricht interessant (Colicchia, Wiesner und Müller 2004).

Bei der Skiaskopie wird über einen Augenspiegel Licht in das untersuchte Auge geworfen (Abbildung 71). Dieses Licht wird an der Netzhaut reflektiert. Aus der Gestalt der Reflexe kann der Arzt oder die Ärztin die Sehschärfe des Auges beurteilen. Man sieht nämlich beim Schwenken des Augenspiegels bestimmte Leuchterscheinungen. Entweder leuchtet die ganze

Pupille rot auf oder ein Lichtfleck läuft durch die Pupille. Dies kann gleich- oder gegensinnig zur Spiegelbewegung erfolgen. Aus der Beurteilung dieser Erscheinungen kann man sagen, ob Kurz-, Weit- oder Normalsichtigkeit vorliegt. In diesem Artikel soll gezeigt werden, wie diese Erscheinungen zustandekommen, wie sie mit der Sehschärfe des Patienten zusammenhängen und wie man mit einfachen Experimenten die Skiaskopie im Unterricht nachvollziehen kann.

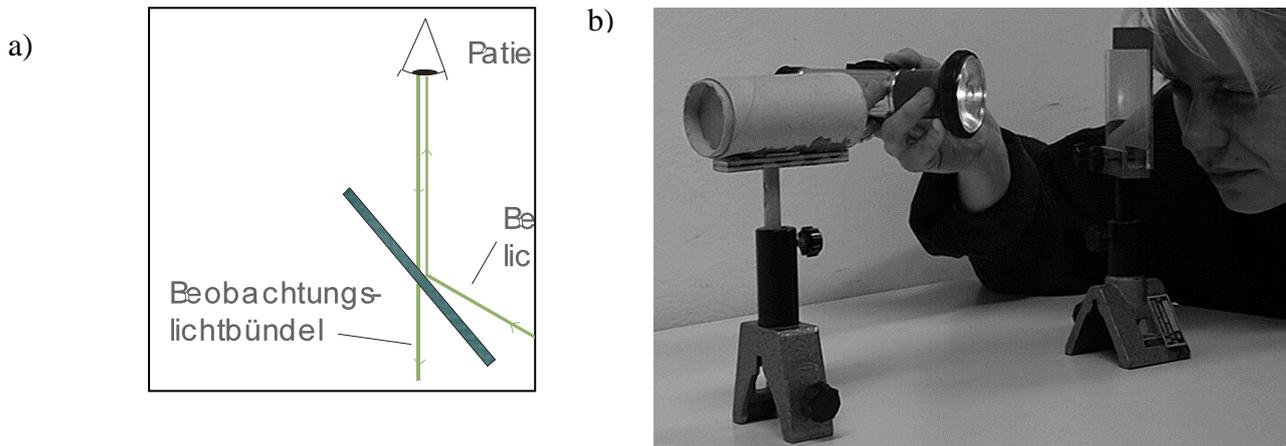


Abbildung 71: Bei der Skiaskopie wird über einen Augenspiegel Licht ins Patientenaugenauge geworfen. Dabei wird der Augenspiegel geschwenkt.

Gemessen an anderen in der Schule üblicherweise behandelten Inhalten aus der geometrischen Optik ist die Skiaskopie relativ kompliziert. Wir schlagen daher eine Vorgehensweise in mehreren Teilschritten vor, die das Verständnis erleichtern soll:

1. *Beleuchtung der Netzhaut.* Die Beleuchtung der Netzhaut über den Augenspiegel dient nur dazu, um das Licht ins Auge zu bringen. Für das Prinzip der Skiaskopie ist diese Stufe von sekundärer Bedeutung.
2. *Statische Beurteilung der optischen Erscheinungen in der Pupille.* Hier liegt der in optischer und diagnostischer Hinsicht eigentlich interessante Punkt der Skiaskopie. Indem der Arzt auf die Pupille des Patienten schaut und überprüft, ob die Pupille als Ganzes rot aufleuchtet oder nicht, kann er schon beurteilen, ob Normal- oder Fehlsichtigkeit vorliegt.
3. *Schwenken des Augenspiegels.* Schwenkt der Arzt den Augenspiegel, kann er zusätzlich noch ermitteln, ob Kurz- oder Weitsichtigkeit vorliegt und durch Vorsetzen von zusätzlichen Korrektionslinsen die zur Korrektur des Sehfehlers nötige Dioptrienzahl feststellen.

In den folgenden Abschnitten sollen diese Punkte ausführlicher erläutert und mit entsprechenden Demonstrationsexperimenten für den Einsatz im Unterricht aufbereitet werden.

a) Beleuchtung der Netzhaut

Im Beleuchtungsstrahlengang wird nach Abbildung 71 a) ein Strich auf die Netzhaut des Patientenauges eingespiegelt. Die Glühwendel der Lampe wird über eine Kondensatorlinse und die Linse des Patientenauges mehr oder weniger scharf auf die Netzhaut abgebildet. Zur Demonstration im Unterricht kann ein Experiment nach Abbildung 71 b) aufgebaut werden. Statt eines Augenspiegels kann man einen teildurchlässigen Spiegel verwenden, den man sich

leicht selbst herstellen kann, indem man ca. 5 Glasplatten (z. B. Mikrokopier-Objektträger) übereinander legt.

Der beleuchtete Netzhautbereich reflektiert diffus und wirkt nun als *sekundäre Lichtquelle*. Das von ihm durch die Pupille zurückgeworfene Licht dient zur Durchführung der Skiaskopie. Es ist vorteilhaft, für die weiteren Überlegungen ganz vom Beleuchtungsstrahlengang abzusehen und diesen einfach durch einen gedachten Leuchtfleck in der Netzhaut zu ersetzen. Dies soll in den folgenden Abschnitten zur Vereinfachung angenommen werden.

Um den Zusammenhang zwischen der Bewegung des Augenspiegels und des Leuchtflecks auf der Netzhaut herzustellen, kann man mit dem nach Abbildung 71 b) aufgebauten Experiment zunächst zeigen, dass sich der Augenspiegel und der beleuchtete Fleck auf der Netzhaut stets gleichsinnig bewegen (unabhängig davon, ob das Patientenaug normal-, kurz- oder weitsichtig ist). Im vereinfachten Schülerexperiment simuliert man demnach eine Rechtsdrehung des Spiegels indem man einen Leuchtfleck nach rechts „über die Netzhaut wandern lässt“, d. h. sie nach rechts verschiebt.

c) Statische optische Erscheinungen in der Pupille

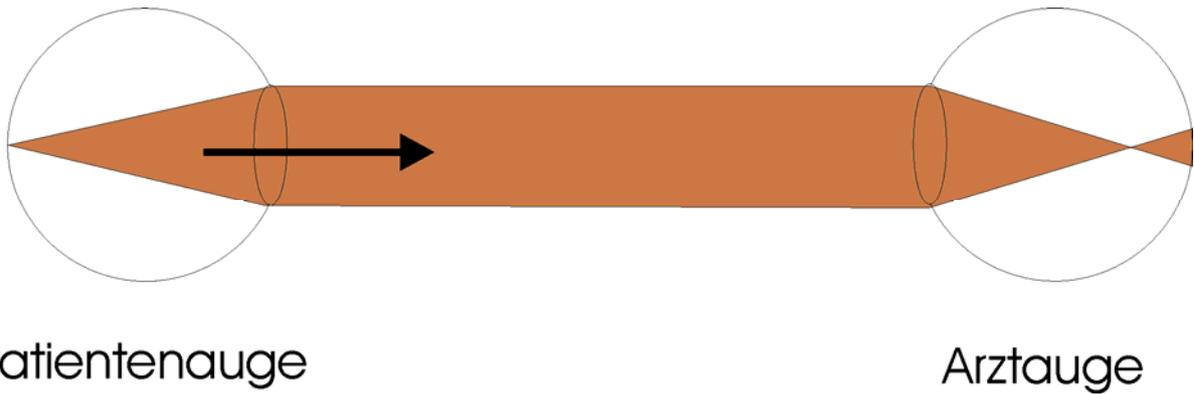
Wir können nun die optischen Erscheinungen im beleuchteten Auge besprechen, die es dem Arzt erlauben, über Normal- oder Fehlsichtigkeit des Patienten zu entscheiden. Wir stellen dazu zunächst noch einmal die wichtigsten Tatsachen über das menschliche Auge und seine Sehfehler zusammen. Das auf das Auge einfallende Licht wird von Hornhaut und Augenlinse auf die Netzhaut fokussiert. Um Gegenstände in verschiedenen Entfernungen scharf auf die Netzhaut abbilden zu können, kann der Ziliarmuskel die Krümmung der Linse etwas verändern. Der Muskel ist entspannt, wenn ein weit entfernter Gegenstand betrachtet wird.

Nehmen wir an, auf ein Auge mit entspanntem Ziliarmuskel falle aus einer bestimmten Richtung ein Lichtbündel aus parallelen Strahlen ein (d. h. Gegenstandsweite unendlich). Beim *normalsichtigen* Auge wird das Lichtbündel genau auf einen Punkt auf der Netzhaut fokussiert. Der sehr weit entfernte Gegenstand, von dem das Licht ausgeht, wird also scharf gesehen. Beim normalsichtigen Auge mit entspannter Linse liegt die Netzhaut demnach im Brennpunkt des abbildenden Systems; der Abstand zwischen Pupille und Netzhaut ist gleich der Brennweite.

Ein *weitsichtiges* Auge ist zu kurz, d. h. kleiner als die Brennweite. Der Fokus würde hinter der Netzhaut liegen. Auf der Netzhaut ergibt das Licht einen unscharfen Fleck. Umgekehrt ist ein *kurzsichtiges* Auge zu lang, d. h. der Fokus liegt schon vor der Netzhaut. Dahinter divergiert das Lichtbündel wieder, was ebenfalls zu einem verschwommenen Fleck auf der Netzhaut führt.

d) „Statische Skiaskopie“ beim normalsichtigen Auge

Betrachten wir zunächst eine statische Situation, in der die sekundäre Lichtquelle (der beleuchtete Fleck auf der Netzhaut) nicht bewegt wird. Es liegt also die in Abb. 5 gezeigte einfache Anordnung vor: Das von der sekundären Lichtquelle auf der Patientennetzhaut ausgehende Lichtbündel wird von der Linse des Patientenauges gebrochen. Das Arztauge betrachtet das von der Patientenpupille ausgehende Licht. Das Patientenaug soll entspannt sein (was bei der Untersuchung nicht einfach zu erreichen ist) und das Arztauge soll sich in großer Entfernung vom Patientenaug befinden.



Patientenauge

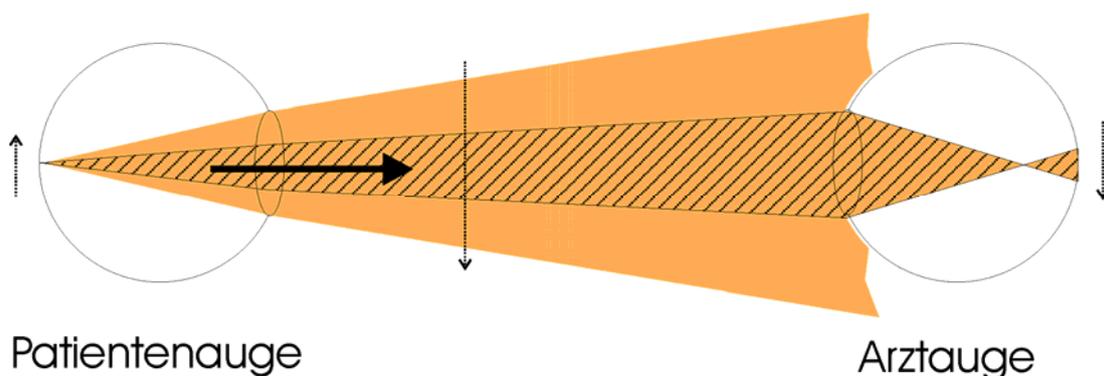
Arztauge

Abbildung 72: Bei einem normalsichtigen Auge sieht der Arzt die Patientepupille als Ganzes hell aufleuchten ("Flackern")

Die interessante Frage ist nun: Was sieht das Arztauge? Diese Frage lässt sich mit einem einfachen Experiment beantworten, in dem das Modell des Patientenauges aufs Äußerste reduziert ist. Es besteht nur aus einer Linse und einer Lichtquelle, die den beleuchteten Fleck auf der Netzhaut darstellt. (Als besonders geeignet hat sich eine rote Leuchtdiode erwiesen, mit der man einen der Realität entsprechenden Farbeindruck erzielen kann. Auch eine Taschenlampe mit einer aufgeklebten Lochmaske aus Pappe ist geeignet. Der Versuchsaufbau ist so einfach, dass man das Experiment leicht als Schülerexperiment durchführen kann.)

Die Lichtquelle wird zunächst in die (deutlich sichtbar markierte) Brennebene der Linse gesetzt. Aus großem Abstand betrachtet man die Linse. Man sieht sie als Ganzes hell aufleuchten. In die Situation des Arztes zurück übertragen heißt das, dass der Arzt die Patientepupille als Ganzes erleuchtet sieht.

Man kann diese Beobachtung einfach erklären. Sehen wir uns den Verlauf des Lichtbündels in Abbildung 72 an. Da die Lichtquelle sich in der Brennebene der Linse befindet, verlässt das von der Lichtquelle ausgehende Licht die Linse als paralleles Bündel. Das Arztauge sieht Licht von jedem Punkt der Patientepupille (der Linse) ausgehen: sie erscheint hell.



Patientenauge

Arztauge

Abbildung 73: Beim weitsichtigen Auge sieht der Arzt nur den zentralen Teil der Pupille aufleuchten

e) Fehlsichtiges Auge

Als nächstes simulieren wir ein weitsichtiges Auge. Die Netzhaut liegt in diesem Fall vor der Brennebene der Linse. Wir rücken also im Experiment die Lichtquelle ein Stück in Richtung

Linse. Das sich ergebende Lichtbündel ist in Abbildung 73 gezeigt. Nach Verlassen der Patientenlinse ist es divergent. Nicht alles davon fällt ins Arztauge. Nur das Licht aus dem schattierten Bereich gelangt ins Arztauge. Das bedeutet, dass der Arzt nicht alle Teile der Pupille aufleuchten sieht. Nur der zentrale (schattierte) Bereich der Pupille ist hell (Abbildung 73). Daran kann der Arzt erkennen, dass es sich um ein fehlsichtiges Auge handelt.

Ganz Analoges geschieht beim kurzsichtigen Auge. Um es zu simulieren, müssen wir die Lichtquelle in die andere Richtung verschieben. Das Lichtbündel konvergiert nun an einem bestimmten Punkt vor dem Arztauge und divergiert anschließend wieder (Abbildung 74). Auch hier fällt nur das Licht aus dem schattierten Bereich ins Arztauge. Der Arzt sieht wieder nur einen Teil der Pupille aufleuchten.

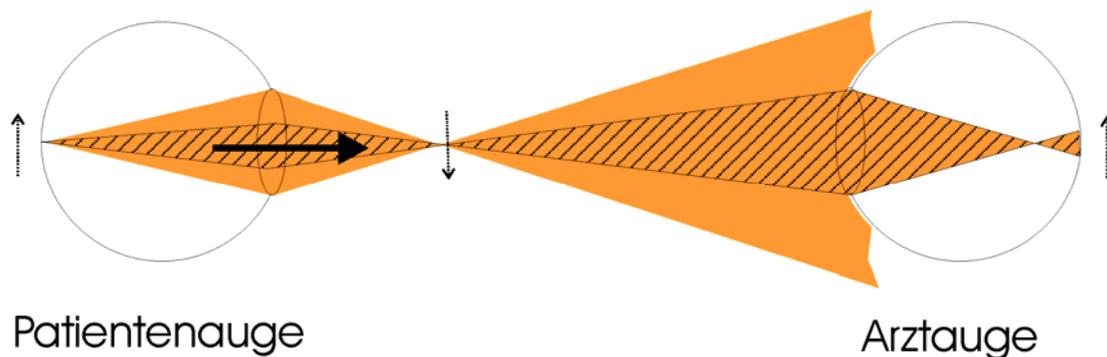


Abbildung 74: Auch beim kurzsichtigen Auge sieht der Arzt nur einen Teil der Pupille aufleuchten

Mit diesem einfachen Verfahren kann der Arzt bereits beurteilen, ob der Patient normal- oder fehlsichtig ist. Indem man Brillengläser verschiedener Stärke vor das Patientenaugenschema setzt, kann man versuchen, das für den Patienten „passende“ Glas zu finden. Wenn der Patient das passende Glas vor dem Auge hat, leuchtet die ganze Pupille wie beim normalsichtigen Auge. Patientenaugenschema und Brillenglas zusammen sind dann normalsichtig.

Einen Nachteil hat dieses Verfahren allerdings: Man weiß nicht, ob der Patient kurz- oder weitsichtig ist und kann nur raten, welches Brillenglas man ihm vors Auge setzen soll. In dieser Form wird das Verfahren in der Praxis deshalb nicht angewendet. Abhilfe schafft das Bewegen des Lichtreflexes auf der Netzhaut. Dann ist man bei der Skiaskopie angelangt. Bevor diese diskutiert wird, möchten wir noch auf einen wichtigen Sachverhalt hinweisen.

f) Wichtigkeit des Beobachterauges

Ein nach unserer Ansicht wichtiges Lernziel aus der Optik wird bei dem hier geschilderten Verfahren besonders deutlich: die Wichtigkeit des Beobchterauges bei allen optischen Überlegungen. Schon beim einfachsten optischen Gerät, der Lupe, ist die Bildentstehung nicht verständlich, wenn die Augenlinse nicht berücksichtigt wird. Ohne Beobchterauge gibt es kein Bild.

Der vorliegende Fall ist in gewisser Hinsicht sogar noch elementarer. Hier ist nicht nur die Brechung am Beobchterauge wichtig, sondern man muss erst einmal fragen, welches Licht überhaupt ins Beobchterauge gelangt. In Abbildung 74 ist es ja keineswegs so, dass außerhalb der schattierten Flächen kein Licht durch die Patientenpupille geht. Es geht sogar Licht durch jeden Punkt der Pupille. Nur gelangt es eben nicht bis ins Beobchterauge.

In diesem Sinn wird die optische Erscheinung, die der Arzt auf der Patientenpupille sieht, ebenso von seinem eigenen Auge verursacht wie vom Patientenauge.

g) „Bewegte“ Skiaskopie

Wie bereits erwähnt, hätte der Arzt gerne einen Anhaltspunkt, ob es sich bei der Fehlsichtigkeit des Patienten um Kurz- oder Weitsichtigkeit handelt und wie stark diese ist. Dazu wird der Spiegel geschwenkt. Der Arzt beobachtet, auf welche Weise die Lichterscheinungen dabei durch die Pupille wandern. Dieses Verfahren meint man normalerweise, wenn man von Skiaskopie spricht.

Man simuliert ein Auge durch ein einfaches Modell. Es besteht aus zwei zusammengefügteten Teilen einer Styroporhohlkugel von 15 cm Durchmesser, in die ein Loch von ca. 2 cm Durchmesser geschnitten wird. In diesem Loch wird eine Linse befestigt, die die gemeinsame Wirkung der Hornhaut und der Augenlinse darstellt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird ein Teil der Kugel abgeschnitten und mit semitransparentem Papier verschlossen, das die Netzhaut darstellt. Das Innere der Kugel sollte mit schwarzer Farbe angestrichen werden, um Streulicht zu eliminieren und den Kontrast zu verbessern (Abbildung 75).

Zur Simulation der Diagnose durch den Augenarzt wird von hinten mit einer Lichtquelle (Laserpointer, Glühlämpchen, helle rote LED) ein Leuchtfleck auf der Netzhaut erzeugt. Dieser wird von links nach rechts verschoben und von vorne durch die Schüler aus einer Entfernung von einigen Metern beobachtet.

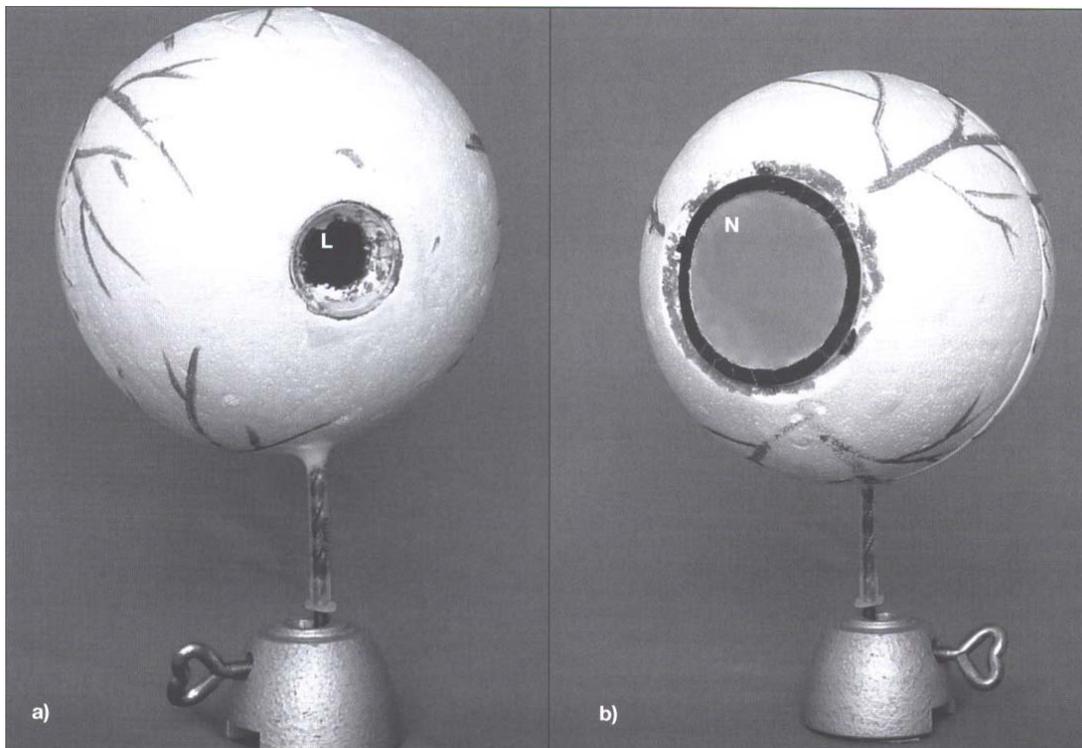


Abbildung 75: Augenmodell aus Styropor, (a) Vorderseite mit Linse, (b) Rückseite mit „Netzhaut“ (aus Collichia, Wiesner und Müller 2004)

h) Weitsichtiges Auge

Wenden wir uns nun den Phänomenen zu, die man bei der Skiaskopie beobachtet. Zur Simulation eines weitsichtigen Auges wird das Augenmodell mit einer Linse versehen, deren Brennweite größer ist als der Abstand Linse-Netzhaut, z. B. 15 cm.

Was wird dabei festgestellt? Der Leuchtfleck wandert auf der „Netzhaut“ nach rechts. Der Beobachter sieht die Leuchterscheinung auf der Pupille ebenfalls nach rechts wandern (Abbildung 76). Die Bewegungsrichtung von Netzhautreflex (und damit Spiegeldrehung) und Pupillenhelligkeit ist gleichgerichtet. Man nennt dies *Mitläufigkeit*. Halten wir fest:

Der Arzt kann Weitsichtigkeit am Auftreten von Mitläufigkeit erkennen.



Abbildung 76: Gleichsinnige Bewegung von Lichtquelle und Leuchterscheinung nach rechts (aus Collichia, Wiesner und Müller 2004)

Das Auftreten der Mitläufigkeit scheint einfach zu verstehen. Schließlich liegt bei unserem Versuchsaufbau nichts anderes als eine Lupe vor, hinter der sich die Lichtquelle bewegt. Es scheint klar, dass dann die Bewegung von Netzhautreflex und Pupillenhelligkeit in der gleichen Richtung erfolgen muss.

Doch auch hier spielt das oben erläuterte Prinzip von der Wichtigkeit des Beobachterauges eine entscheidende Rolle. In Abbildung 77 ist das Experiment noch einmal skizziert. Der Netzhautreflex bewegt sich in den Teilbildern von rechts nach links. Der ins Arztauge fallende Anteil des Lichts ist hell gezeichnet. Der vom Arztauge hell gesehene Teilbereich der Pupille bewegt sich ebenfalls von rechts nach links. Das bedeutet Mitläufigkeit.

Bemerkenswert ist aber, dass das gesamte Lichtbündel, das die Patientenpupille verlässt, sich in die *entgegengesetzte* Richtung bewegt. Das lässt sich auch leicht im Experiment demonstrieren, indem man das Lichtbündel auf einem weißen Blatt Papier auffängt. Das Phänomen der Mitläufigkeit tritt also nur deshalb auf, weil das Arztauge zu jedem Zeitpunkt einen anderen Teil aus dem Lichtbündel ausschneidet. Die Mitläufigkeit ist keine Eigenschaft des austretenden Lichtbündels, sondern das „Beschneiden“ des Lichtbündels durch das Arztauge ist auch hier der entscheidende Effekt.

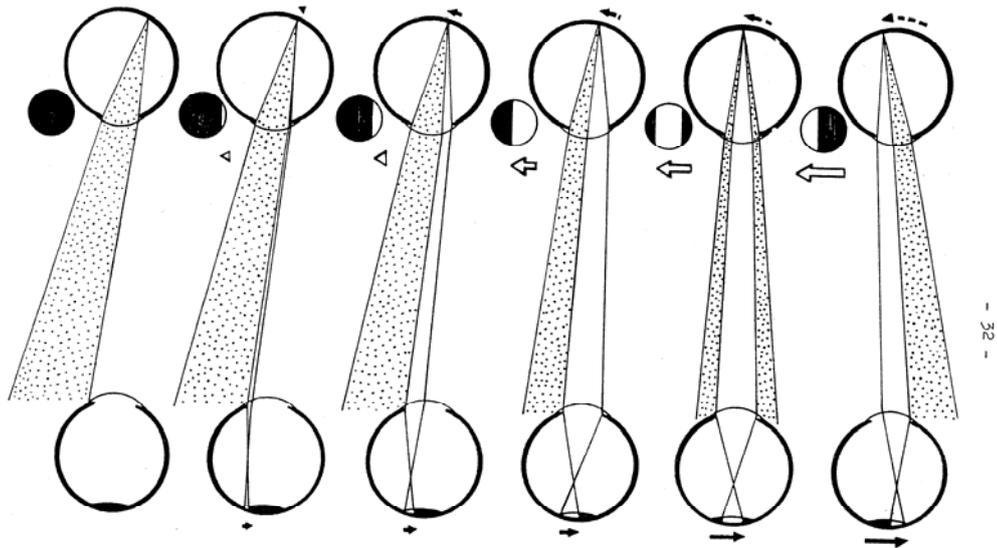


Abbildung 77: Erklärung der Mitläufigkeit bei weitsichtigem Auge

i) Kurzsichtiges Auge

Führen wir den gleichen Versuch für ein kurzsichtiges Auge durch. Das Augenmodell wird mit einer Linse mit Brennweite kleiner als der Abstand Linse-Netzhaut versehen, z. B. $f = 10 \text{ cm}$). Der Leuchtfleck wird „auf der Netzhaut“ wieder von links nach rechts verschoben. Jetzt wandert die Leuchterscheinung in der Pupille in die andere Richtung, nämlich von rechts nach links. Dies nennt man *Gegenläufigkeit*. In der Skiaskopie ist die Gegenläufigkeit das Anzeichen der Kurzsichtigkeit.

Kurzsichtigkeit äußert sich in Gegenläufigkeit.

Das Auftreten der Gegenläufigkeit kann man sich leicht durch Betrachtung des Lichtbündels klar machen (Abbildung 78). Der Unterschied zum Fall der Weitsichtigkeit liegt darin, dass das Lichtbündel vor dem Arztauge konvergiert, d. h. die Lichtstrahlen überschneiden sich. In der Abbildung stellt der helle Teil des Lichtbündels wieder denjenigen Anteil des Lichts dar, der ins Arztauge gelangt.

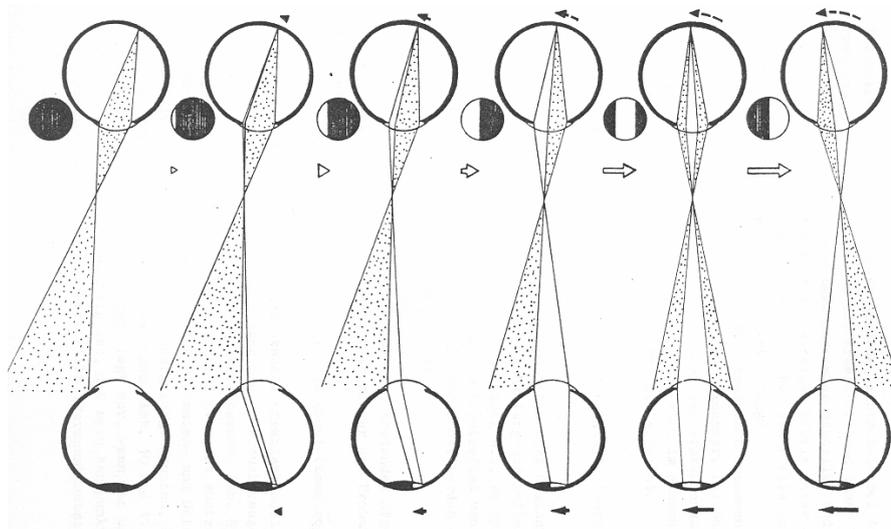


Abbildung 78: Erklärung der Gegenläufigkeit bei kurzsichtigem Auge

j) Normalsichtiges Auge

Der Fall eines normalsichtigen Auges bereitet nun auch keine großen Probleme mehr. Im Experiment wird die Lichtquelle jetzt in die Brennebene der Linse gebracht. Beim Verschieben nimmt man keine „Bewegung“ der Pupillenhelligkeit mehr wahr. Die Linse „flackert“ stattdessen: Sie leuchtet kurz als Ganzes auf und wird dann wieder dunkel.

Normalsichtigkeit erkennt man am „Flackern“ der Patientenpupille.

Kennzeichen der Normalsichtigkeit ist, dass bei entspanntem Patientenauge das von einem Punkt auf der Netzhaut ausgehende Licht die Pupille als paralleles Bündel verlässt. Bei der Durchführung des Experiments ist zu beachten, dass hier ein großer Abstand zwischen Patienten- und Arztauge entscheidend ist. Nur dann überstreicht das vom Patientenauge ausgehende Lichtbündel das Arztauge nur während eines kurzen Moments.

k) Praktische Durchführung der Skiaskopie

Mit den vorangegangenen Überlegungen haben wir die Grundzüge der Skiaskopie verstanden. Einige Details zur praktischen Durchführung der Skiaskopie mögen noch von Interesse sein. Ziel der Skiaskopie ist das Auffinden des „Flackerpunkts“, der die Normalsichtigkeit anzeigt. Dazu werden vor das fehlsichtige Auge Korrektionslinsen gesetzt, die so lange variiert werden, bis der Flackerpunkt gefunden ist. Auf diese Weise ermittelt man die zur Korrektur des Sehfehlers nötige „Stärke“ des Brillenglases.

Es wurde schon erwähnt, dass zum Erkennen des Flackerns ein sehr großer Abstand zwischen Arzt und Patient erforderlich ist. In der Praxis ist dies sehr unpraktisch. Man kann aber durch eine einfache Maßnahme einen kleineren Skiaskopierabstand erreichen. Vor das Patientenauge wird eine zusätzliche Linse von +2 Dioptrien gesetzt. Das bedeutet, dass das Lichtbündel beim normalsichtigen Auge nicht mehr parallel ist, sondern auf einen Punkt in 50 cm Entfernung vom Patientenauge fokussiert wird. Skiaskopiert der Arzt nun genau aus dieser Entfernung, wird er das für Normalsichtigkeit charakteristische Flackern wahrnehmen. Durch das Vorsetzen der zusätzlichen Linse hat man den Skiaskopierabstand also aus dem Unendlichen in eine bestimmte Entfernung (meist wählt man 50 cm) herangeholt.

Bei der sogenannten Strichskiaskopie ist die Lichtquelle strichförmig statt punktförmig ausgebildet. Das erleichtert einerseits die Beurteilung der auftretenden Bewegung. Zudem kann der Arzt auf diese Weise einen eventuell vorhandenen Astigmatismus feststellen, der (bei senkrechter oder waagerechter Strichorientierung) zu schräg durch die Pupille verlaufenden Reflexen führt.

6.4 SPECT – Single Photon Emission Computed Tomography

In der Nuklearmedizin werden Eigenschaften des Atomkerns für die medizinische Diagnostik für Diagnose und Therapie genutzt. Die Anwendung der Kernphysik in der medizinischen Diagnostik und Therapie wurden – neben den oben erwähnten Arbeiten von Berger – von Felde (2006) für den Unterricht elementarisiert (das Folgende ist an diese Arbeit angelehnt). Eines der interessantesten Verfahren dabei ist die sogenannte Single Photon Emission Com-

puted Tomography (SPECT) oder Emissionstomographie. Hierbei wird die Radioaktivität von Kernen zur Diagnostik genutzt. Bei der Magnetresonanztomographie (MRT oder NMR) wird dagegen der Spin des Kerns bzw. die daraus folgenden magnetischen Eigenschaften verwendet.

Zu den Verfahren, die die Radioaktivität von Kernen anwenden, gehören die Szintigraphie, SPECT und PET (Positronenemissionstomographie). Ihnen allen ist gemeinsam, dass dem Patienten ein schwach radioaktives Präparat, das sogenannte Radiopharmakon, verabreicht wird. Dieses reichert sich nach einer gewissen Zeit in den Stellen im Körper, die untersucht werden sollen, an.

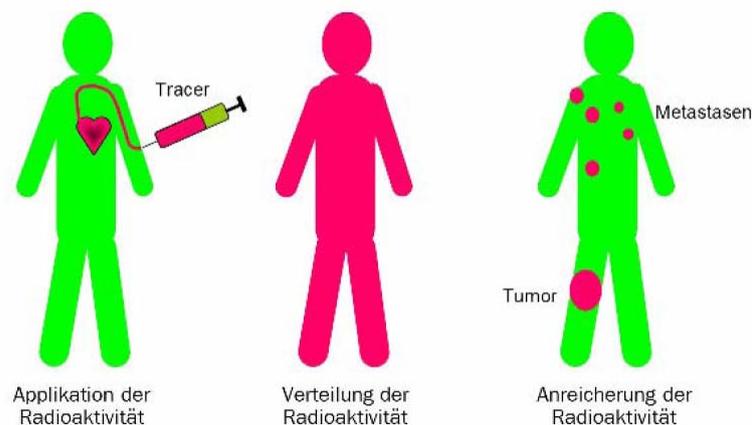


Abbildung 79: Prinzip der Verteilung und Anreicherung von Radionukliden im Körper
 (Quelle: http://www.klinikum.uni-erlangen.de/e467/e583/e872/e1386/index_ger.html)

Die ausgehende Strahlung wird von sogenannten Szintillationsdetektoren registriert und diese Information gegebenenfalls in einen Computer zur Weiterverarbeitung eingespeist. Die dadurch entstehenden Bilder werden Szintigramme genannt.

Der Unterschied der Verfahren SPECT und PET liegt in der vom Nuklid ausgesendeten Strahlung: im ersten Fall werden γ -Photonen emittiert und auch detektiert. Bei PET wird pro Zerfall ein Positron emittiert, das sich einige wenige Zentimeter im Körper bewegt und dann unter Aussendung eines Photonenpaares von je 0.511 MeV im Winkel von 180° vernichtet wird (daher auch die Bezeichnung Positronvernichtungsstrahlung). Das ausgesandte Positron wird dann indirekt, nämlich erst durch das Photonenpaar, am Detektor registriert.

SPECT und PET wie auch CT und MRT ermöglichen durch spezielle Rechenalgorithmen die Herstellung von Tomogrammen (d.h. Schichtaufnahmen; gr. tomos – Schicht) oder auch dreidimensionalen Bildern des Körpers.

a) Medizinische Anwendung von SPECT

SPECT spielt in der medizinischen Diagnostik eine wichtige Rolle: Leber, Herz, Gehirn und vor allem Knochen können u.a. mit dieser Methode untersucht werden.

Bei Alzheimer-Verdacht wird SPECT zum Beispiel eingesetzt, um den Blutfluss durch das Gehirn darzustellen. So können Regionen gefunden werden, die nicht oder kaum durchblutet werden. In Knochen können z. B. Tumore aufgefunden werden, da sich radioaktiv markierter Traubenzucker in ihnen anlagert.

Der Vorteil szintigraphischer Methoden gegenüber der Röntgencomputertomographie liegt in dem größeren Kontrast der Aufnahmen im Gewebe und der geringeren Strahlenbelastung.

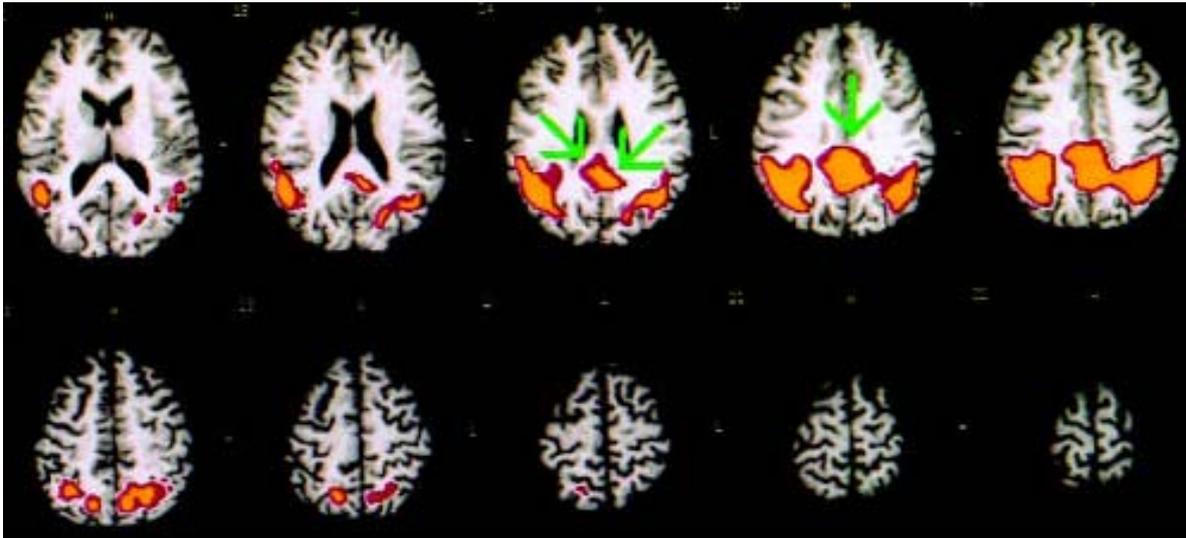


Abbildung 80: Gehirn-SPECT (Quelle: <http://www.epileptologie-bonn.de/upload/homepage/lehnertz/NukMed3.pdf>)

Die physikalischen Methoden in der Medizin sind sehr vielfältig und eignen sich oft gut, um den im Physikcurriculum geforderten Stoff zu vermitteln. Speziell die Verfahren der Nuklearmedizin wie SPECT lassen sich in den Bereich der Kernphysik einordnen. Die Schüler lernen so einen wichtigen Einsatz der Radioaktivität in der Medizin kennen. Außerdem kann so fächerübergreifend unterrichtet werden.

b) Eigenschaften der Radionuklide in der Nuklearmedizin

Um bei möglichst geringer Strahlenbelastung ein aussagekräftiges Bild zu erhalten, sollte eine in der Nuklearmedizin verwendete ideale Quelle mehrere Kriterien erfüllen.

Das im Radiopharmakon enthaltene Nuklid sollte

1. organspezifisch sein, d.h. sich möglichst nur im Zielorgan anreichern; die Anreicherung sollte Auskunft geben über die Funktion des Organs und diese nicht beeinträchtigen,
2. ein reiner Gammastrahler sein, da andere Strahlenarten aufgrund ihrer geringen Reichweite nichts zur Bildentstehung beitragen können; die Dosis im Organ und im umliegenden Gewebe würde sich jedoch vergrößern,
3. eine Gammaenergie zwischen 100 und 200 keV haben, damit sie ausreicht um aus dem Körper auszutreten und nicht zu groß ist, um vom Detektor mit guter Ausbeute eingefangen werden zu können,
4. eine Halbwertszeit haben, die möglichst klein ist, um die Strahlenbelastung des Patienten möglichst gering zu halten. Gleichzeitig muss sie ausreichend groß sein, damit das Radiopharmakon Transport, Zubereitung, Injektion, Verteilung im Patienten und die Untersuchung überdauert,
5. in der Herstellung einfach sein.

Die Halbwertszeit einiger Nuklide ist so kurz, dass sie direkt vor Ort von sogenannten Nuklidgeneratoren (vgl. Abbildung 81) hergestellt werden müssen. Ein Beispiel für ein kurzlebige Nuklid ist das oft verwendete Technetium ^{99m}Tc mit einer Halbwertszeit von sechs Stunden. Es entsteht durch den Zerfall der Muttersubstanz ^{99}Mo (Molybdän) mit einer Halbwertszeit von 67 Stunden, die in einer Lösung in einem bleiverschlossenen Behälter gelagert wird.

Das Tochterelement ^{99m}Tc löst sich gut in Kochsalz, daher wird es bei Bedarf mit einer Kochsalzlösung eluiert, d.h. herausgespült. Man spricht bei diesem Vorgang vom „Melken“.

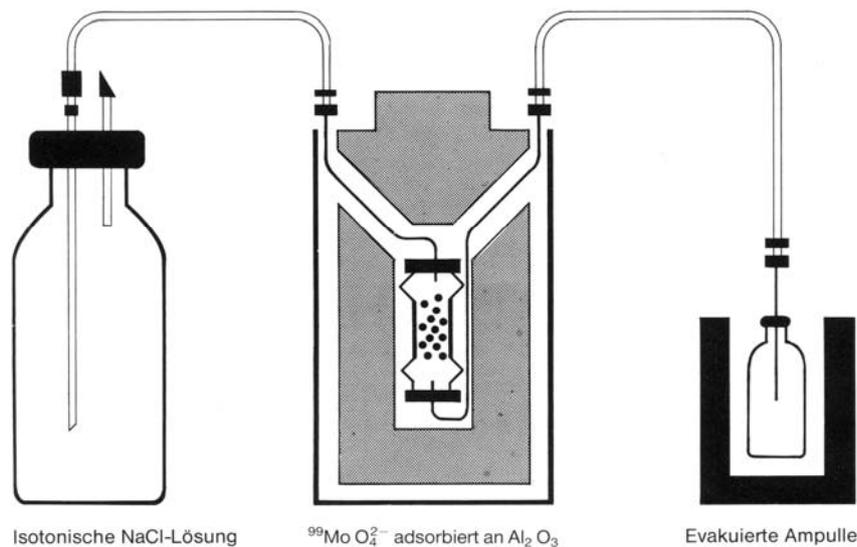


Abbildung 81: Aufbau eines Technetiumgenerators (Quelle: Büll: Klinische Nuklearmedizin, 1990)

Die Nuklide bzw. ihre Muttersubstanzen, die in der Nuklearmedizin verwendet werden, werden entweder in einem Kernreaktor isoliert oder in einem Zyklotron (PET) hergestellt. Im zweiten Fall sind die Kosten aufgrund der hohen Bau- und Energiekosten beim Betrieb erheblich höher. Außerdem ist ein Zyklotron nicht in jedem Krankenhaus vorhanden.

c) Der Szintillationsdetektor

Der am häufigsten verwendete Detektor in der Nuklearmedizin ist der Szintillationsdetektor (Abbildung 82). Er besteht aus einem Kristall, dem Szintillator, einem Sekundärelektronenvervielfacher (SEV oder Photomultiplier PMT) und der angeschlossenen elektronischen Messapparatur. Der Kristall ist wegen seiner hohen Nachweiswahrscheinlichkeit häufig ein mit 0.1% Thallium dotierter Natriumiodid-Kristall ($\text{NaI}(\text{Tl})$ -Kristall). Er nimmt die durch einen der drei Wechselwirkungsprozesse Photoeffekt, Comptoneffekt oder Paarbildung an den Kristall übertragene Energie der γ -Quanten auf und verwandelt diese in einen Lichtblitz (scintilla = Funke), d.h. in Photonen, deren Wellenlänge im sichtbaren Bereich liegt. Die Intensität des Lichtblitzes ist proportional zur Energie des aufgenommenen γ -Quants. Die Photonen treffen nun auf eine Photokathode des SEV, die nun Elektronen emittiert, deren Energie und Intensität so gering ist, dass sie nicht detektiert werden können, daher werden sie vom SEV um einen Faktor von 10^5 bis 10^6 verstärkt. Am Ende werden die auftreffenden Elektronen als Strom gemessen. Die Stromstärke ist dabei proportional zur Energie des im Kristall absorbierten γ -Quants.

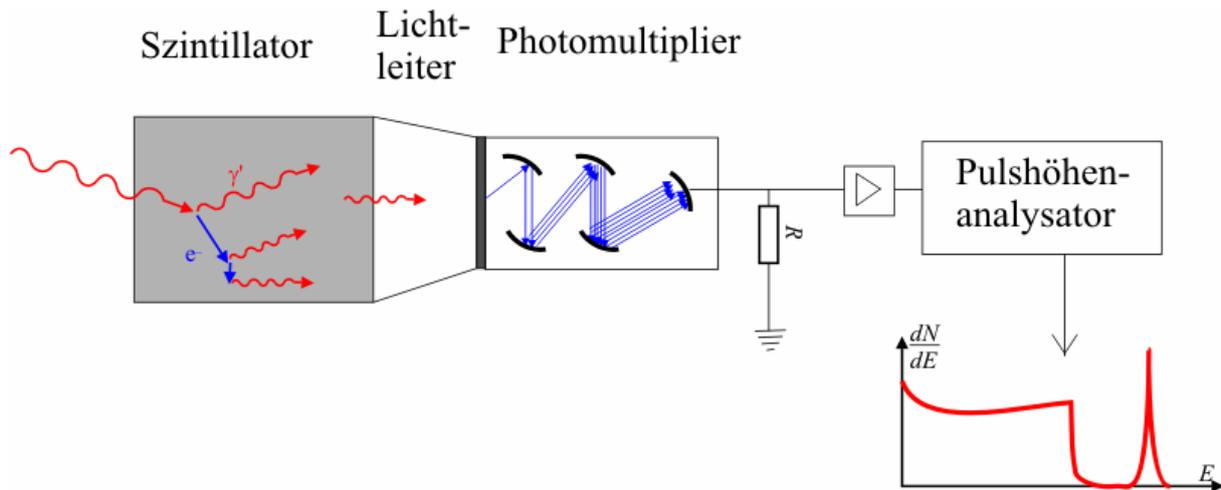


Abbildung 82: Prinzipieller Aufbau eines Szintillationsdetektors (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Szintillationsz%C3%A4hler>)

Vor solch einem Detektor ist oft ein Kollimator angebracht. Dies ist eine Bleiabschirmung mit einem oder mehreren Bohrlöchern, die nur Strahlung aus einer gewissen Richtung durchlassen.

d) Die Einzelphotonentomographie (SPECT)

Die Szintillationskamera (oft auch Gammakamera genannt), wie sie u. a. für SPECT-Aufnahmen benötigt wird, ist eine leichte Abwandlung des Szintillationsdetektors und besteht aus einem großflächigen NaI(Tl)-Detektor (Durchmesser 26-60cm) mit einem vorgesetzten Kollimator (meist einem Parallellochkollimator). Das radioaktive Nuklid des Radiopharmakons zerfällt im Innern des Körpers und sendet dabei Photonen aus. Treffen die aus dem Körper austretenden Photonen auf einen Detektor und werden vom Kollimator nicht herausgefiltert, so werden sowohl ihre Energie als auch ihre Position im Kristall registriert. Andernfalls sind sie für die Bilderstellung verloren. Das Signal kann entweder gleich auf dem Bildschirm eines Oszilloskops dargestellt, oder in einen Computer eingespeist und weiterverarbeitet werden.

Im Computer wird die Information ortsgerecht wie in einem digitalen Foto in Form von Pixels einer Matrix (64x64, 128x128, 256x256) in sogenannten Frames gespeichert. Ein Pixel entspricht dabei einer Volumeneinheit, dem dreidimensionalen Voxel, im Körper: die Anzahl der registrierten Signale in einem Pixel ist proportional zu der Anzahl der aus dem Voxel austretenden γ -Photonen und wird im Szintigramm mit unterschiedlichen Graustufen oder farbig dargestellt. Die gemessene Verteilung ist allerdings „nur“ qualitativer Natur, da die Intensität der Strahlen beim Durchgang durch den Körper durch Absorption und Streuung abnimmt. Trotzdem ist die Qualität für die meisten Anwendungen in der Medizin ausreichend.

Ein SPECT-Detektor besteht aus einer bis drei Szintillationskameras und einem Computer. Die Kameras bewegen sich ähnlich wie in der Computertomographie relativ zum Patienten und registrieren dabei die ausgehende Strahlung. Die mit den Szintillationskameras gewonnenen zweidimensionalen Projektionen der im Körperinnern verteilten Aktivität, ermöglichen mithilfe der Methode der Rückprojektion auf die lokale Anreicherung im Körperinnern zu schließen.

SPECT-Aufnahmen liefern keine Informationen darüber, wo sich das strahlende Objekt im Verhältnis zu anderen, nicht strahlenden Teilen des Körpers, befindet. Dazu ist oft das Heranziehen anderer Aufnahmen wie z.B. CT oder NMR notwendig. In einigen Fällen kann eine nuklearmedizinische Aufnahme zeitgleich mit einer Computertomographie erstellt werden. Bei Bedarf können solche Bilder - wie in Abbildung 83 verdeutlicht - auch zusammengefügt werden.

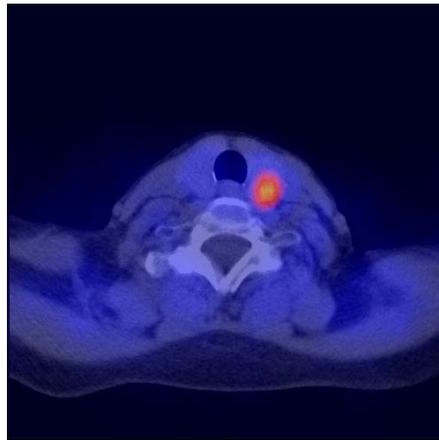


Abbildung 83: Überlagerung von SPECT und CT für einen Schilddrüsentumor
 (Quelle: www.klinikum.uni-erlangen.de/e467/e583/e872/e1386/index_ger.html)

e) Weiterverarbeitung der Rohdaten: die Rückprojektion

Die Verarbeitung der Daten ist für alle Schnittbildtechniken ähnlich: Für das Erstellen eines Tomogramms jeder beliebigen Lage (vgl. Abbildung 84) benötigt man viele Projektionen aus verschiedenen Richtungen. Bei SPECT sind es 60 bis 120, die aus verschiedenen Richtungen rings um den Patienten aufgenommen werden. Dies dauert ca. 30 Minuten, ist jedoch im Einzelfall unterschiedlich.

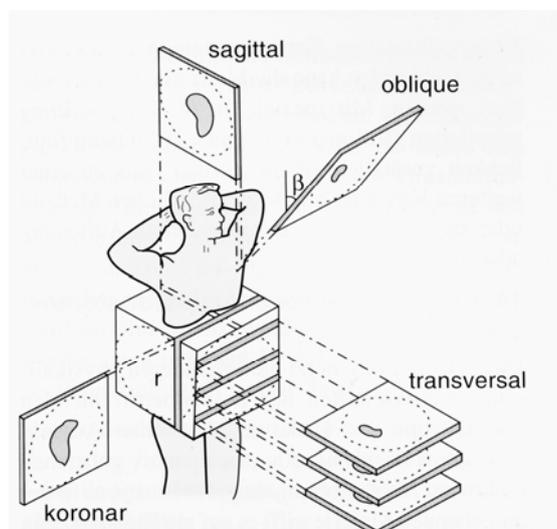


Abbildung 84: Mögliche Schichtaufnahmen aus Projektionen
 (Quelle: Pickuth: Klinische Radiologie systematisch, Band II, 1998)

Bei der Rückprojektion wird nun die am Detektor registrierte Intensität pro Zeiteinheit gleichmäßig auf den zurückgelegten Weg (der durch den verwendeten Kollimator bekannt ist) verteilt. Durch Überlagerung der Informationen aus verschiedenen Blickwinkeln entsteht dann das Tomogramm.

Dies wird mithilfe von Abbildung 85 verdeutlicht: Dargestellt ist das Modell einer Schicht der Dicke d , die gleichmäßig in 16 Voxel eingeteilt ist. Davon hat ein Voxel eine Aktivität von 4 willkürlich gewählten Einheiten, ein anderes hat eine Aktivität von 8 (vgl. Abbildung 85 a). Die Detektoren sind an der Seite, senkrecht zur Oberfläche der Schicht angebracht.

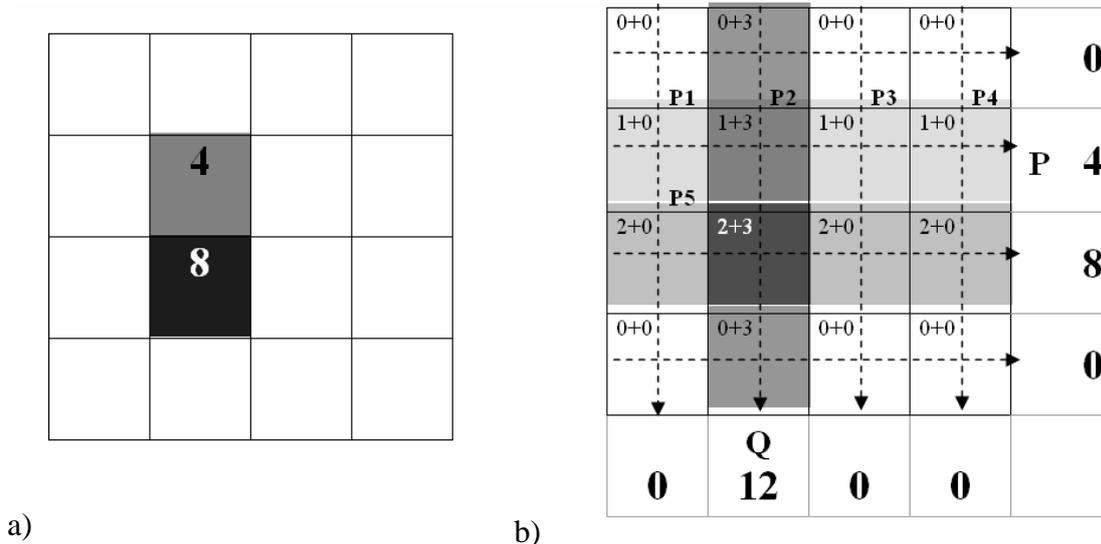


Abbildung 85: Prinzip der Rückprojektion a) Modell einer Schicht mit zwei strahlenden Voxels b) Rekonstruktion der Aktivitätsverteilung anhand der gemessenen Intensität mithilfe der Rückprojektion

f) Vorschlag einer Unterrichtsstunde zum Thema Szintigraphie: Der strahlende Patient

Die großen Zahlen am Rand der Matrix geben die gemessene Intensität an, die Pfeile zeigen die Eintreffrichtung der Photonen am Detektor und ihren möglichen Weg. Die gemessene Intensität entspricht genau genommen dem Integral der Aktivität entlang des Pfeils. Vereinfachend können wir sie allerdings auch als Summe der Einzelaktivitäten der Voxel auffassen. Eine im Punkt P registrierte Intensität von 4 Einheiten, wird bei der Rückprojektionsmethode gleichmäßig mit einer Einheit pro Pixel rückprojiziert. Die Intensität von 12 Einheiten in Q wird gleichmäßig mit 3 Einheiten auf die zurückgelegten Voxels verteilt usw. Die kleinen Zahlen links oben im Kästchen zeigen die „rückprojizierte Intensität“: der erste Summand ist aus horizontaler, der zweite aus vertikaler Richtung. Nachdem die Information aller Projektionen verarbeitet ist, werden die einzelnen Fragmente addiert und dem Pixel eine Graustufe oder Farbwert zugewiesen (Abbildung 85).

Man sieht sofort, dass dies zwar in etwa die tatsächliche Aktivitätsverteilung wiedergibt, dass aber auch Pixel dunkel sind, die in unserem Modell keinerlei Strahlung abgeben. Mehr Projektionen schaffen da Abhilfe.

Nicht berücksichtigt in diesem Modell sind jedoch die Intensitätsverluste, die durch Absorption und Streuung innerhalb des Körpers auftreten. Demnach würde z.B. im Punkt P eine ge-

ringere Intensität als 4 gemessen werden. Dieser Tatsache wird durch die sogenannte gefilterte Rückprojektion Rechnung getragen.

Um den Schülern den Zugang zu erleichtern, sollte man mit der planaren Szintigraphie beginnen, bei der zweidimensionale Projektionen von Aktivitätsverteilungen im Körper aufgenommen werden.

Einleitend oder zur Veranschaulichung kann man den Schülern anhand eines Bildes eines im Dunkeln leuchtenden Weihnachtsbaumes zeigen, dass unsichtbare Objekte dadurch sichtbar gemacht werden können, dass sie strahlen.

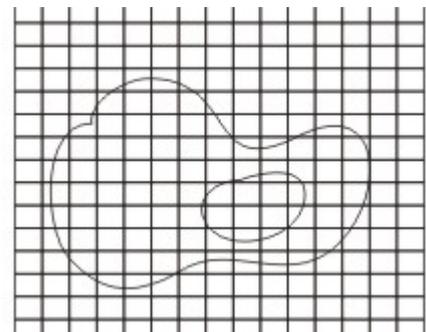
Zur Verdeutlichung der prinzipiellen Wirkungsweise der Nuklearmedizin kann Abbildung 79 verwendet werden. Weiterführende Fragen dienen als Vertiefung und Sicherung zugleich.

1. Welche Strahlungsart geht von der radioaktiven Quelle aus? Begründe.
2. Welche Informationen kann man mithilfe eines Szintigramms bekommen?
3. Welche Nebenwirkungen könnten während der Behandlung auftreten?
4. Wie kann man das Prinzip des Verabreichens radioaktiver Substanzen, die sich in bestimmten Organen anreichern, in der Therapie nutzen?

Anschließend kann man die Schüler selbst ein Szintigramm herstellen lassen: Ein kariertes Blatt, ein weicher Bleistift, ein Filzstift und Buntstifte genügen:

1. Zeichne mit dem Bleistift zuerst eine beliebige Figur auf das Blatt.
2. Gib das Blatt deinem Nachbarn.
3. Zeichne innerhalb der Figur auf dem Blatt, dass Du bekommen hast, eine kleinere Figur (siehe Beispielzeichnung).
4. Zeichne nun mit einem Filzstift innerhalb der großen Figur zufällig angeordnete Punkte und zwar so, dass du abwechselnd einen Punkt innerhalb und außerhalb der kleinen Figur setzt (Die Punkte sollten auf der anderen Seite des Blattes zu sehen sein).
5. Mache so lange weiter, bis zumindest die kleine Figur von kleinen Punkten übersät ist.
6. Drehe das Blatt um und gib es Deinem Nachbarn zurück.
7. Zähle nun die Anzahl der Punkte innerhalb eines Kästchens und schraffiere sie nach dem folgenden Prinzip:

- 0 Punkte → schwarz
- 1 Punkt → blau
- 2 Punkte → lila
- 3 Punkte → hellgrün
- 4 Punkte → orange
- 5 Punkte und mehr → rot.



Am Ende sollte man mit den Schülern besprechen, dass die große Kontur einem Teil des Körpers entspricht, die kleine Figur repräsentiert den Bereich (Organ, Tumor), in dem sich das Radiopharmakum anreichert. Das zufällige Einzeichnen der Punkte repräsentiert die zufällig auftretenden Zerfälle, wobei mehr Zerfälle dort stattfinden, wo sich mehr Radiopharmakum

angelagert hat. Das Auszählen der Punkte und die Zuweisung der Farben erfolgen in der Praxis dann mit einem Computer.

Zur Verfeinerung kann man innerhalb der kleinen Figur noch eine kleinere Figur zeichnen. Die Punkte kann man entweder nacheinander in je eine der Figuren zeichnen. Um sicherzugehen, dass die kleine Figur eine erheblich höhere Dichte an Punkten aufweist, kann man je einen Punkt in die große (und mittlere) Figur zeichnen und zwei in die kleine.

7 Literatur

- R. Berger, B. Kölbl, H. Wiesner, *Die Röntgencomputertomographie. Eine medizintechnische Anwendung für den Physikunterricht*, Praxis der Naturwissenschaften. Physik, 48/4, S. 44-47 (1999).
- Berger, R., *Moderne Bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik – ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*. Berlin, Logos-Verlag (2000).
- R. Berger, *Bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik*, Plus Lucis 3/2001: <http://pluslucis.univie.ac.at/PlusLucis/013/Medizin.pdf>
- R. Berger, *Einfluss kontextorientierten Physikunterrichts auf Interesse und Leistung in der Sekundarstufe II*, ZfDN 8, 2002, S. 133-150
- R. Berger, *Dopplersonographie. Ultraschalldiagnostik im Physikunterricht*. Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule, 51/2, S. 18-25 (2002).
- R. Berger *Der Mikrowellenofen - ein interessanter Küchenhelfer*, in: Zur Didaktik der Physik und Chemie, Tagung 2002, S. 277-279 (2003).
- R. Berger, *Physik und Technik des Rasterelektronenmikroskops*. Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule, 52/2, S. 36-45 (2003).
- C. Berthold et al., *Physikalische Freihandexperimente*, Aulis, Köln (2004).
- L. Bloomfield, *How things work – the physics of everyday life*, 2nd Ed., Wiley, New York (2001).
- U. Böll, G. Hör, *Klinische Nuklearmedizin*, Edition Medizin, 2. Auflage 1990
- G. Braune, M. Euler, S. Schaal, D. Zollman, *Untersuchung von Bewegungsvorgängen beim Fahrrad mit Hilfe der Soundkarte. Ein Unterrichtsprojekt für den Physikunterricht der Klasse 9*. Physik in der Schule, 38 (2000) 4, S. 263-268.
- Colicchia G.; Wiesner H. (1999): *Schweredruck des Blutes im menschlichen Körper*, Physik in der Schule 37 (1), S. 14-19
- Colicchia G.; Wiesner H. (1999): *Infusionen und Transfusionen*, Physik in der Schule 37 (2), S. 81-87
- Colicchia G.; Wiesner H. (1999): *Das Stethoskop in der ärztlichen Praxis und im Physikunterricht*, Physik in der Schule 37 (5), S. 296-302
- Colicchia G.; Wiesner H. (2000): *Zur Statik des menschlichen Körpers im Physikunterricht*, Physik in der Schule 38 (1), S. 11-17
- Colicchia G.; Wiesner H. (2000): *Statik des Kauapparats von Reptilien und Säugetieren*, MNU 53 (3), S. 158-163
- Colicchia G.; Wiesner H. (2000): *Der Augenspiegel*, PdN-Ph 7/49, S. 7-12
- Colicchia G.; Wodzinski R.; Wiesner H. (2000): *Die Physik von Stenose und Aneurysma*, PdN-Ph, 7/49, S. 2-6

- Colicchia G., Künzl A., Wiesner H. (2001): *Einfache Augenmodelle zur Demonstration der Abbildung im Auge*, PdN-Ph 8/50, S. 45-47
- Colicchia G.; Wiesner H. (2004): *Simulation von Fehlsichtigkeiten*, Unterricht Physik 15/82, S. 15-17
- Colicchia G.; Wiesner H.; Müller R.: (2004): *Die Skiaskopie- Anwendung der elementaren Optik im Schulunterricht*, PdN-Ph 8/53, S. 16-21
- Colicchia G.; Wiesner H.: (2005): *Hebel am Ellbogengelenk. Ein Unterrichtsvorschlag zur Einführung in die Hebelgesetze*, Unterricht Physik 16/85-86, S. 32-35
- Colicchia G.; Wiesner H.: (2005): *Die Belastung der Wirbelsäule. Eine Anwendung des zweiseitigen Hebels*, Unterricht Physik 16/85-86, S. 36-39.
- L. Felde, *Physikalische Methoden in der medizinischen Diagnostik und Therapie*, Examensarbeit TU Braunschweig (unveröffentlicht; 2006).
- T. Harris, *How Laser Printers work*, <http://computer.howstuffworks.com/laser-printer.htm> (o. J.)
- P. Häußler, *Measuring students' interest in physics – design and results of a cross-sectional study in the Federal Republic of Germany*, International Journal of Science Education **9**, 79 (1987).
- P. Häußler, L. Hoffmann, *Physikunterricht – an den Interessen von Mädchen und Jungen orientiert*, Unterrichtswissenschaften **23**, 107 (1995).
- P. Häußler et al., *Qualitative Unterschiede im Interesse an Physik und Konsequenzen für den Physikunterricht*, ZfDN **2**, 57 (1996).
- P. Häußler et al., *Perspektiven für die Unterrichtspraxis*, IPN, Kiel (1998).
- L. Hoffmann, M. Lehrke, *Eine Untersuchung über Schülerinteresse an Physik und Technik*, Zeitschrift für Pädagogik **32**, 189 (1986).
- U. Kilian, *Frühalarm im Brandfall*, Physik Journal **3** (2004), 66.
- W. Kuhn (Hrsg.), *Physik 2*, Westermann, Braunschweig (2007).
- P. Labudde, *Erlebniswelt Physik*, Dümmler, Bonn (1993).
- J. Leisen, *Lehrerbildung nach TIMSS*, Vortrag auf der MNU-Bundesfachleitertagung Kassel (1999); zitiert nach Schecker & Klieme (2001).
- L. Mathelitsch, *Sport und Physik*, Verlag Hoelder-Pichler-Tempsky, Wien (1991).
- L.-P. May, *Physik und Sport in der Literatur*, Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule, **52** (2003) 2, S. 13-14
- H. Muckenfuß, *Physik im sinnstiftenden Kontext*, Cornelsen, Berlin (1995).
- H. Muckenfuß, in: *Natur und Technik. Physik für Realschulen*, Kapitel Klima und Wetter, Cornelsen, Berlin (1996).
- H. Muckenfuß, *Themen und Kontexte als Strukturelemente des naturwissenschaftlichen Unterrichts*, PhyDid 2/3 (2004) S.57.

- M. G. J. Minnaert , *Light and Color in the Outdoors*, auch unter dem Titel *The Nature of Light and Colour in the Open Air*, versch. Ausgaben, z. B. Dover (1954).
- R. Müller, *Das Global Positioning System und der Ätherwind*, in: Didaktik der Physik, Beiträge zur 64. Physikertagung, Dresden (2000).
- R. Müller, *Mechanik in Alltagskontexten*, in: K. Höner, M. Looß, R. Müller (Hrsg.): Studienmaterial zu interdisziplinären Aspekten der Naturwissenschaften, Lit, Münster (2004), S. 49.
- R. Müller, *Kontextorientierung*, in H. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik – eine praxisorientierte Einführung*, Cornelsen-Verlag Berlin (2005).
- R. Müller, *Physik in Alltag und Technik, Kapitel 2*, <http://www.tu-braunschweig.de/ifdn/physik/alltagsphysik> (2006).
- W. Müller, *Physik und Medizin, ein Lehrbuch für den fachübergreifenden Physikunterricht in der Gymnasialen Oberstufe*, Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart 1998.
- W. Müller, *Der Blutdruck und seine Messung*. Praxis der Naturwissenschaften Physik 7/49 (2000).
- W. Müller, *Endoskopie – Blick in das Innere des Menschen*. Praxis der Naturwissenschaften Physik 7/49 (2000).
- W. Müller, *Sinnesorgane im Test*. Praxis der Naturwissenschaften Physik 7/49 (2000).
- W. Müller, *Tauchen. Physik unter Wasser*. Naturwissenschaften im Unterricht. Physik, 13/70, S. 18-23 (2002).
- W. Müller, N. v. Bien, *Die Physik des Infrarot-Ohrthermometers*. Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule, 53, S. 2-7 (2004).
- E. Pfeiffer, *Nuklearmedizin – Untersuchungen mit radioaktiv markierten Verbindungen*, in: Praxis der Naturwissenschaften – Biologie 5/51. (2002), S. 10-15
- D: Pickuth, *Klinische Radiologie systematisch – Diagnostische Radiologie, Nuklearmedizin, Strahlentherapie in 2 Bänden*, Uni-Med Verlag AG, (1998).
- G. Reinmann-Rothmeier, H. Mandl, *Unterrichten und Lernumgebungen gestalten*, in: A. Krapp, B. Weidenmann (Hrsg.): *Pädagogische Psychologie*. 4. Aufl., Beltz, Weinheim (2001).
- H. Schecker, E. Klieme, *Mehr Denken, weniger Rechnen*, Physikalische Blätter **57** (2001), S. 113.
- H.-J. Schlichting, *Die physikalische Dimension des Sports*, Naturwissenschaften im Unterricht – Physik 3/12, 4 (1992).
- H.-J. Schlichting, *Natur freihand - Optische Naturphänomene in Freihandexperimenten*, Praxis der Naturwissenschaften- Physik 48/7, 12- 17 (1999).
- H.-J. Schlichting, *Farbenspiel im Spinnennetz*, Physik in unserer Zeit 35/1, 28-29 (2004).

- H.-J. Schlichting, *Was haben Briefumschlagsfenster und Nebel gemeinsam? Ein experimenteller Zugang zu einem interessanten Streuphänomen.*, Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.): Didaktik der Physik. Berlin: Lehmanns 2005
- H.-J. Schlichting, *Oberflächliche Attraktionen. Naturphänomene, die sich der Minimierung der Oberfläche verdanken*, Praxis der Naturwissenschaften/Physik in der Schule 55/3, 2 (2006).
- H. Schicha, O. Schober, *Nuklearmedizin – Basiswissen und klinische Anwendung*, Schattauer Verlag, 5. Auflage (2003).
- O. Schwarz, W. Müller, *Radionuklide in der Diagnostik*. Ein auf Schülervorträgen basierendes Unterrichtskonzept. Naturwissenschaften im Unterricht. Physik, 15, S. 28-31 (2004).
- T. Seidel et al.: „Jetzt bitte alle nach vorn schauen“ – *Lehr-Lernskripts im Physikunterricht und damit verbundene Bedingungen für individuelle Lernprozesse*, Unterrichtswissenschaft **30** (2002), S. 52.
- W. Stetzenbach et al., *„Physik im Alltag: High Tech-Anwendungen, Low Cost-Freihandversuche*, http://www.uni-kiel.de/piko/downloads/Physik_Im_Alltag_051124.pdf (o. J.)
- A. Vogt, *Das Leben in der Kälte*, http://www.ifdn.tu-bs.de/physikdidaktik/mitarbeiter/examensarbeiten/webseiten_anja/start.html (2004).
- M. Wagenschein, *Die pädagogische Dimension der Physik*, Hahner, Aachen (1995).
- F. Weinert, *Lehrerkompetenz als Schlüssel der inneren Schulreform*, Schulreport 2/98, S. 24 (1998).
- Wiesner H.; Colicchia G. (2002): *Motivierender Physikunterricht durch fächerübergreifende Beispiele aus Medizin und Biologie*, Plus Lucis (Wien) Physik/Chemie, S. 10-15
- J. Wittmann, *Trickkiste 1, Experimente wie sie nicht im Physikbuch stehen*, Bayerischer Schulbuch Verlag, München 1986.