

Auseinandergelebt?

Physik und Mathematik

Probleme und Lösungsansätze zur Koordination

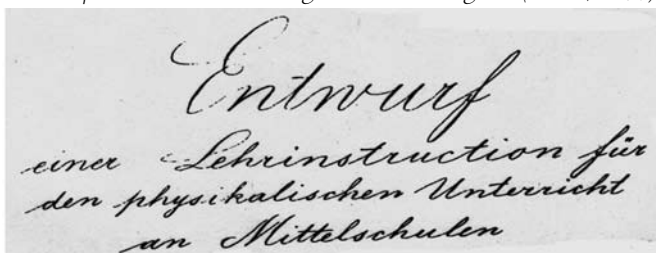
Gerhard Rath

Die beiden begannen als enges Paar, ja sie waren kaum zu unterscheiden. Mechanik oder Astronomie wurden als Teile der Mathematik an den Universitäten gelehrt, auch in den Schulen war die Physik zuerst eine durch und durch mathematische. Doch trotz vieler Gemeinsamkeiten trennten sich die Wege. Für heutige Schüler/innen überwiegen vielleicht schon die Unterschiede: Die Physik macht sich ihre eigene Mathematik, die Mathematik nimmt sich aus der Physik, was sie gerade braucht (eine Diplomarbeit von S. Kirchlechner (Graz, 1994) beleuchtet diese Problematik).

Im Folgenden werde ich darstellen, wie es zu dieser Trennung kam und worin wesentliche Unterschiede bestehen. Es werden aber auch Ansätze gezeigt, die im Rahmen der Aktion IMST² bzw. IMST³ des bm.bwk versuchten und versuchen, die Koordination der beiden Fächer zu verbessern.

Ein kurzer Blick zurück

„Der Zweck des physikalischen Studiums ist die Erkenntnis des Zusammenhanges der Erscheinungen. Der Schüler soll angeleitet werden zur Beobachtung und zur Ableitung von Regeln aus den Beobachtungen. Dazu ist die Mathematik nur ein Mittel. Es bleibt in der Physik noch sehr viel zu verstehen übrig, auch wenn man alle Mathematik bei Seite lässt. Wo aber Mathematik angewandt wird, muss man sich die Bedeutung dieser Anwendung gegenwärtig halten und gelegentlich auch dem Schüler klar machen. Jede Formel, die ein Naturgesetz ausdrückt, ist bloß ein zusammenfassender Ausdruck einer Reihe von Thatsachen. Die Formel ist die kürzeste, einfachste, zusammenfassendste Beschreibung der Erscheinungen.“ (Mach, 1879)



Die Physik ist als Schulfach im 18. Jahrhundert aus der Mathematik entstanden und wurde vorerst nach mathematischen Methoden unterrichtet. In der zweiten Hälfte des

19. Jhdts wurde die Kritik an dieser Zielrichtung immer stärker, wie auch das vorangestellte Zitat aus dem Jahr 1879 zeigt. Es stammt von niemand Geringerem als Ernst Mach und ist bereits Teil der damaligen Lehrpläne für Mittelschulen der k. u. k. Monarchie. Prägnant formulierte dies die Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte 1905 in den berühmten Meraner Reformvorschlägen: *„Die Physik ist im Unterricht nicht als mathematische Wissenschaft, sondern als Naturwissenschaft zu behandeln.“ (nach: Liebers 1978, S. 414)*

Damit richtete sich das Augenmerk der Didaktik stärker auf Aspekte wie Beobachten oder Experimentieren, wodurch Ziele und Umsetzung des Einsatzes von Mathematik im Physikunterricht immer weniger beachtet wurden. Verstärkt wurde die Trennung im 20. Jhd durch die Orientierung des Mathematikunterrichts an den Prinzipien seiner Wissenschaft: weg von bloßen Rechenmethoden, hin zu Mengenlehre, Logik und Axiomatik (Jung 1978).

Betrachtet man die aktuellen fachdidaktischen Diskussionen und Schwerpunkte, so wird deutlich, dass die Fragestellungen dieses Artikels nicht „in Mode“ sind. Die zahllosen Aktivitäten bezüglich eines fächerübergreifenden Unterrichts beziehen sich zu allermeist auf die Zusammenarbeit von Physik mit Chemie und/oder Biologie. Dies zeigt sich z.B. auch in den Themen bzw. Häufigkeiten von IMST-Projekten (siehe Punkt 3).

Wechselseitige Probleme

Systematik und Lehrplan

Jede der beiden Wissenschaften hat ihre eigene, spezifische Struktur und Systematik. Von Lehrplänen, die sich daran orientieren, können natürlich kaum sinnvolle wechselseitige Bezüge erwartet werden. Am deutlichsten zeigt sich dies an den Universitäten, wo physikalische und technische Studien die benötigte Mathematik im Rahmen ihrer Lehrgänge selbst (meist in den Anfangssemestern) lehren.

Da Entsprechendes in der Schule kaum möglich sein wird, fehlen dem Physikunterricht der höheren Schulen mathematische Grundlagen etwa bereits zur Beschreibung einfacher Bewegungen (Differential und Integral). Manchmal

Dr. Gerhard Rath, BRG Kepler Graz und Institut für Physik/Fachdidaktik, Karl Franzens Universität Graz

machen sich Physiklehrer/innen ihre eigene Mathematik in verkürzter Darstellung, mit der Gefahr, das andere Fach eher zu stören als ihm zu nützen. (Knecht 1967, S. 23 ff)

Allerdings geben die aktuellen Lehrpläne für die Oberstufe der AHS (bm:bwk 2004) gerade für mögliche Kooperationen größere Freiheiten, da die Inhalte der Physik in nur mehr 2 Teile gegliedert sind: 5./6. Klasse und 7./8. Klasse. Die entsprechenden Oberstufenlehrbücher sind jedoch im Wesentlichen bei der bisherigen Abfolge geblieben. Wird in Physik und in Mathematik nach Lehrbuch (egal welches) unterrichtet, so wären etwaige Parallelitäten rein zufällig, obwohl gegenseitige Bezüge öfters auftauchen. Die tatsächliche Koordination bleibt völlig in der Verantwortung des/der Lehrer/in.

Zahlen und Rechnen

In den Jahren um 1960 gab es intensive Diskussionen, die auf eine mathematisch stringente Fundierung der Größen- und Einheitensysteme der Physik abzielten (z.B. Fleischmann 1961). Die Auswirkung auf die Unterrichtsrealität war nicht allzu groß, mittlerweile traten andere didaktische Fragen in den Vordergrund. Faktum bleibt, dass im Physikunterricht ständig mit „benannten Zahlen“ (Größen) gearbeitet wird, ohne dass die mathematischen Hintergründe besonders beachtet werden. Dies mag für „Experten“ kein Problem darstellen – sehr wohl kann es „Laien“ verwirren.

Welche Arten von Zahlen verwendet die Physik?

Eine physikalische Zahl entsteht durch Quantifizierung von Objekten, Eigenschaften oder Prozessen der Realität. Daher hängt sie insbesondere von einer Reihe von Festsetzungen und Entscheidungen ab (Oy 1977, Ehlers 1960).

Nach E. Röhl (1984) sind Messwerte im Prinzip *natürliche Zahlen* - sie haben ja (nach der Messgenauigkeit) immer eine begrenzte Stellenzahl und können durch Wahl der Einheit „natürlich“ werden (z.B. $0,03 \text{ m} = 3 \text{ cm}$). Mittelwerte von Messwerten können als rationale Zahlen angesehen werden, zu ihnen müssten Fehlergrenzen angegeben werden. Ohne weitere Angabe bedeutet z.B. „ $\ell = 1 \text{ m}$ “ eigentlich $\ell = 1 \text{ m} \pm 0,5 \text{ m}$, wogegen „ $\ell = 1,0 \text{ m}$ “ meint, dass der Wert im Rahmen der verwendeten Möglichkeiten und mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zwischen $0,95 \text{ m}$ und $1,05 \text{ m}$ liegt. „Maßzahlen“ können als „Modellvorstellung“ verstanden werden, sie sind rein gedankliche Konstrukte, reelle Zahlen mit beliebiger Genauigkeit.

Neben Zahlen werden in der Physik abhängig vom jeweiligen Zweck Symbole und Zeichen wie „ $=$ “ oder „ Δ “ in unterschiedlicher Weise verwendet (Eisner 1991).

Wie wird in der Physik gerechnet?

Mit Maßzahlen kann „normal“ gerechnet werden. In diesem Kalkül kommt es auf die verwendeten Einheiten an, da ein Wechsel auch die Zahlen ändert. Wenn man etwa 4 Meter durch 2 Sekunden dividiert, ergibt sich $v = 2 \text{ [m/s]}$. Darin bedeutet v nicht die Geschwindigkeit selbst, sondern nur die Anzahl der m/s.

Davon zu unterscheiden ist das Rechnen mit Größen. Hier arbeitet man mit Funktionen und Funktionszusammenhängen (z. B. $U = R \cdot I$), was eine Beschreibung physikalischer Vorgänge ergibt, die in allen Maßsystemen gleich aussieht. Obwohl es so scheint (Symbole $+$, $-$, \cdot , \dots), handelt es sich dabei nicht um „normales“ Rechnen, sondern um besondere Operationen, die so definiert sind, dass aus bestimmten Verknüpfungen von Größen neue entstehen - z. B.: $s/t = v$. Hier wird Weg durch Zeit nicht „normal“ dividiert! Algebraisch handelt es sich um Operationen in einer Abelschen Gruppe, wobei jede Größenklasse einen (eindimensionalen) Vektorraum bildet (Rang, S. 27ff). Die Bedeutung der Einheiten ist in diesem Kalkül eher gering, die Form der Gleichungen hängt von ihnen nicht ab.

Aufgaben - Problemlösen

In der Mathematik werden Aufgaben meist zur Festigung und Übung erarbeiteter Formalismen eingesetzt. Häufig sind sie bereits in mathematischer Sprache gegeben.

In der Physik wird man kaum folgendes Problem finden: $s = 3 \text{ m}$, $t = 2 \text{ s}$; $v = ?$ Meist werden Aufgaben in Texte und Alltagszusammenhänge eingebunden und damit für Schüler/innen schwieriger. Dies führt zu einem Dilemma: Bloße Einsetzaufgaben sind - auch aus konstruktivistischer Sicht - unerwünscht (Dittmann u. a.: „Die zerrechnete Physik“), aber die Einbettung in Kontexte erhöht den Problemgehalt von Aufgaben für Schüler/innen.

Bei Textaufgaben ist zumeist klar (oder sollte sein), was gegeben und was gefragt ist. Die Schwierigkeiten liegen dann dazwischen: Welche Lösungsstrategien sind anwendbar (welche Gesetze, Formeln...)? Was ist wichtig, was kann weggelassen bzw. vereinfacht werden?

Der deutsche Didaktiker Heinz Muckenfuß erzählte einmal über seine Tochter, dass sie sich weigerte, ein Lehrbuchbeispiel in Physik zu rechnen. Dabei ging es um den Abwurf eines Hilfspaketes aus einem Flugzeug. Unter der Angabe von Höhe und Fluggeschwindigkeit sollte (unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes) ein Auftreffpunkt berechnet werden. Nach Insistieren des Vaters begründete die Tochter endlich die Unsinnigkeit dieser Aufgabe: Bei fehlendem Luftwiderstand kann das Flugzeug ja gar nicht fliegen!

Worauf sich das spezifische Augenmerk richtet, mag für Physiker/innen klar sein – für Schüler/innen kann es eine zusätzliche Abstraktionsleistung erfordern. Die Abhängigkeit von Bezugssystemen und temporären Setzungen ist ein integrativer Bestandteil, Physik findet immer im Kontext statt.

Ein schönes Beispiel dazu führt L. Mathelitsch an (2003): *In der Mathematik ist ein Punkt etwas völlig Verschiedenes als eine Ebene. Das ist in der Physik nicht so – ein Punkt kann eine Ebene sein, es hängt vom Bezugssystem ab. Für eine Wurfbewegung – etwa in einem Zimmer – ist die Erde eine Ebene mit einem homogenen Gravitationsfeld. Betrachte ich das Sonnensystem als ganzes, ist es sinnvoll, die Erde auf einen Massenpunkt zu reduzieren.*

Beispiele zur Koordinierung – IMST-Projekte

Wie für jede fächerübergreifende Aktivität gibt es auch für die Zusammenarbeit zwischen Physik und Mathematik verschiedene Organisationsformen – eine Übersicht bieten Häußler u. a. (1998). Die Bandbreite reicht von kurzen abgestimmten Sequenzen bis zu integrativer themenzentrierter Projektarbeit. Im Rahmen der Aktionen IMST, IMST² und IMST³ des bm:bwk wurden mehrere solcher Versuche durchgeführt und dokumentiert, die Projektberichte sind über die IMST-Webseiten zugänglich.

Im BG Zaunergasse Salzburg wurde der organisatorische Rahmen verändert: Jeweils zwei Wochenstunden wurden in einer 8. Klasse gemeinsam durch die beiden Lehrer/innen (M/Ph) unterrichtet. In diesen Teamteaching-Stunden wurde nach der Methode des selbst organisierten Lernens insbesondere versucht, mathematische Modelle auf physikalische Aufgabenstellungen anzuwenden (Ginzinger, Unterriener 2005). Dieser Versuch ist auch insofern interessant, als er längerfristig angelegt ist. Im Schuljahr 2005/06 wird die Koordination nach dieser Organisationsform in einer 6. Klasse durchgeführt. Die Autoren kamen zu dem Schluss, *„dass viele kleine Schritte durch die fächerübergreifende Zusammenarbeit die Transformation von aus der Mathematik bekannten Rechenmodellen auf physikalische Anwendungen verbesserten.“* (S. 13) Allerdings wurde die Überwindung des „Kasterldenkens“ als ständige Herausforderung bezeichnet.

Was tun, wenn die notwendige Mathematik zur Beschreibung von Pendelschwingungen noch nicht vorhanden ist? Im RG Rahlgasse in Wien wurde das Tool „mathe-online“ (dazu gab es einen großangelegten MNI-Projektverbund) zur Kompensation der mathematischen Defizite eingesetzt. Anhand eines Lernpfades wurde teilweise in offenen Lernsequenzen eine mathematische Modellierung von Schwingungen von Fadenpendeln durchgeführt und evaluiert (Wieninger 2005). Mit hohem Zeitaufwand gelang es, den Schüler/innen die notwendigen mathematischen Grundlagen zu vermitteln.

Im Projekt „Differenzialrechnung? Anwendungen in der Physik“ (BORG Monsberger Graz) wurde ebenfalls mit Computerunterstützung versucht, die Kluft zwischen den beiden Gegenständen zu überbrücken. Dabei wurden die unterschiedlichen Themen der Differenzialrechnung mit Hilfe einer vorbereiteten Website in SchülerInnengruppen durchgeführt. Zu Differentialquotient, Extremwertaufgaben und Kurvendiskussionen fanden sich WebLinks mit physikalischen Anwendungen (Kiesling 2005).

Auch hier wurde der fächerübergreifende Unterricht grundsätzlich positiv bewertet, die Differenzialrechnung wurde verständlicher.

Einen sehr spezifischen Zugang zur Veranschaulichung von Mathematik wählte man an der HTL Anichstraße in Innsbruck (Holl u.a. 2005). „Schwingende Mathematik“ am Monochord machte Brüche und Mittel hörbar und gemahnte so an Pythagoras, einen der Ersten einer mathematischen

Welterklärung und -beschreibung.

Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bewegungsdiagramme waren der physikalische Ausgangspunkt für die „Fächerübergreifende Erarbeitung des Funktionsbegriffs“ in einer 4. Klasse des HIB Liebenau Graz. Von Seiten der Mathematik ging es um die lineare Funktion, aber auch grundsätzlich um den Umgang mit Proportionen, Graphen und Formeln. Messdaten aus Schülerversuchen wurden im Mathematikunterricht ausgewertet (Köberl, Kögler 2002). Der Fächerübergreifende Unterricht wurde nach dem Projekt überwiegend als „gut“ empfunden.

Interdisziplinär und breit angelegt war ein fächerübergreifendes Projekt des BRG 6 Wien zum Thema „Vermessung“. Inspiriert durch das Buch „Längengrad“ von Dana Sobel arbeitete man in Physik über Orientierung und Navigation, in Mathematik an Problemen der Geodäsie und Landvermessung, auch auf praktische Weise. Erstellt wurden u. a. Poster und Portfolios (Fertl u.a. 2002).

Projekte zum gleichen Thema wurden auch am BRG Kapfenberg (Weißbacher 2002) und am GRG XI Wien (Drexler u.a. 2001) durchgeführt und veröffentlicht.

Von vielen dokumentierten fächerübergreifenden „Labors“ (insbesondere im IMST²-Schwerpunkt S2) integrierten wenige die Mathematik. Im BG/BRG/BORG Eisenstadt versuchte man die Zusammenarbeit im Projekt „MN³⁺“ (Bauer u. a.), um die Attraktivität des naturwissenschaftlichen Zweiges zu steigern. *„Am schwierigsten war es, Querverbindungen zwischen der Mathematik und den drei naturwissenschaftlichen Fächern herzustellen. Sehr häufig würde dabei die Mathematik nur als Hilfswissenschaft fungieren.“* (S. 7). Eine Untersuchung der Rückwirkung auf die Stamm-Fächer ergab, dass gerade in Mathematik und Physik das Interesse nur bei einem Teil der Schüler/innen gestiegen war, bei einem Teil (in Mathematik etwa ein Viertel) sank es sogar. Die Abstimmung der Lehrpläne mündete in ein Fach „Naturwissenschaftliches Arbeiten“ – in dem jedoch nur mehr Chemie und Biologie vertreten waren.

Eine „Einführung in die Vektorrechnung“ verwendete in einem Stationenbetrieb auch physikalische (experimentelle) Beispiele für Vektoren wie das Kräfteparallelogramm oder die Bestimmung von Schwerpunkten. Gerade diese zeigten jedoch Denkschwierigkeiten der Schüler/innen (Akademisches Gymnasium Wien, (Kendl 2003)).

Dieser Überblick erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, die Recherche zeigte aber, dass der Anteil der fächerübergreifenden Vorhaben Mathematik – Physik innerhalb der Vielzahl von Projekten gering ist (die Gesamtzahl der dokumentierten Projekte beträgt ca. 350). Mathematik mit den Naturwissenschaften abzustimmen ist nicht mehr „in Mode“. Dabei zogen alle genannten Projekte grundsätzlich positive Resümeees, was Zufriedenheit und Interesse der Lehrer/innen sowie der Schüler/innen betrifft. Erkauft wurden die Erfolge jedoch oftmals durch hohen Zeit- und Arbeitseinsatz.

MPH5, MPH6 – Projekte am BRG Kepler Graz

Unter den genannten Titeln versuchten und versuchen wir (Waltraud Knechtel, Christa Preis und der Autor) in den letzten beiden Jahren (unterstützt durch IMST) den Unterricht in Physik und Mathematik in der 5. und danach in der 6. Klasse aufeinander abzustimmen. Wir verwenden eine Art des koordinierenden Unterrichts, die wir bei einem vorangehenden IMST-Projekt (Knechtel u. a. 2004) entwickelt haben mit dem Ziel, mit relativ wenig Aufwand und weitgehend personenunabhängig durchführbar zu sein. Diese Organisationsform ermöglicht, immer wieder koordinierte Sequenzen bei passenden Themen anzusetzen, und soll so den punktuellen Charakter gemeinsamer Projekte überschreiten und permanent Denkbarrieren überwinden helfen.



Die Systematik der beiden Fächer bleibt im Wesentlichen erhalten, es gibt aber immer wieder Themen bzw. Bereiche, wo aufeinander Bezug genommen wird. Notwendig dazu ist eine Abstimmung der Lehrstoffverteilungen zu Jahresbeginn, bei der bereits die zu koordinierenden Themen ins Auge gefasst und grob zeitlich zugeordnet werden. Der Rest erfolgt während des Schuljahrs, oft „zwischen Tür und Angel“ oder per Mail. Wichtig waren für uns gemeinsame Workshops, in denen am Projekt gearbeitet werden konnte.

Was bringt das koordinierte Unterrichten?

Allgemeiner Profit fächerübergreifender Vorhaben

Im Sinne konstruktivistischer Prinzipien wie „Wissen in verschiedenen Kontexten anwenden lernen“ (IMST² Grundbildungskonzept, Anton 2003) erwarten wir ein tieferes und breiteres Verständnis für wesentliche Konzepte und Methoden beider Fächer.

Anwendungen und Sinnzusammenhänge

Die Mathematik braucht Kontexte – die Physik kann ihr diese beisteuern. Der Physikunterricht kann zeigen, wozu mathematische Konzepte tatsächlich gebraucht werden. Anwendungen von mathematischen Techniken stehen im Physikunterricht in anderen und vielfältigeren Zusammenhängen als im Mathematikunterricht, wo sich ihr Sinn meist auf das Einüben von Kalkülen beschränkt.

Beispiel: Potenzfunktion (gebrochene Hochzahlen). Die Standard-Rechnungen zum 3. Kepler-Gesetz wurden in Physik mit weiterem Sinn „unterfüttert“, etwa mit aktuellen Fragen zum Sonnensystem (Gibt es einen 10. Planeten? Wie weit ist er entfernt?)

Mathematische Fertigkeiten

Die Physik braucht mathematische Werkzeuge – die Mathematik kann ihr diese liefern. Die Komplexität und Vielfalt der Physik lässt oft wenig Zeit, sich mit Rechengängen genauer zu befassen. Die quantitative Auswertung von Messdaten aus Physikstunden kann im Mathematikunterricht stattfinden. Ein weiteres Beispiel sind Umformungen innerhalb des physikalischen Größensystems („Ableiten von Formeln“).

Beispiel: Exponentielle Abnahmen. In Physik wurde die Abkühlung von heißem Wasser gemessen (Temperatur, Zeit). Diese Realdaten wurden in Mathematik durch Funktionsgraphen angenähert.

Die Koordinierungen in der 5. und 6. Klasse im Überblick

Mathematik	Physik
Zehnerpotenzen, Exponentialschreibweise	Größenordnungen: Raum und Zeit, Fermi-Probleme
Funktionen	Bewegungsaufgaben, Diagramme
Winkelfunktionen, Trigonometrie	Entfernungsmessung, Positionsbestimmung, Kraftkomponenten
Vektoren	Kraft, Impuls, Arbeit
Trigonometrische Funktionen	Schwingungen und Wellen
Geometrische Folgen und Reihen	Springender Ball, Gedämpfte Schwingung
Exponentialfunktion	Abkühlkurve, Entladung von Kondensatoren
Logarithmus	Weber-Fechner'sches Gesetz, Lautstärke, dB
Stochastik	Statistische Mechanik – Gase; L. Boltzmann

Die bisherigen Erfahrungen mit diesem Konzept sind durchwegs positiv und motivieren uns, das Projekt weiterzuführen. Für die beteiligten Lehrer/innen ergaben sich Einblicke in das jeweils andere Fach, die Erkenntnis von Ähnlichkeiten, Parallelitäten und Unterschieden. Wir passten Methodiken und Begrifflichkeiten aneinander an bzw. wiesen auf die Verwendung im anderen Fach hin. Zum Teil waren es nur kleine Unterschiede in Bezeichnungen und Sprechweisen, die sich dadurch einebnen ließen (zum Beispiel die Verwendung von „Zehnerpotenzschreibweise“ – „Exponentenschreibweise“ – „Gleitkommadarstellung“ für das gleiche Konzept).

Bei den Schüler/innen traten Effekte schon auf, als sie erkannten, dass die beteiligten Lehrer/innen über das jeweils andere Fach Bescheid wussten und explizit darauf Bezug nahmen. Auch verstärkte Einsicht in die Sinnhaftigkeit diverser Themen aus beiden Fächern war unmittelbar aus Äußerungen erkennbar.

Auf weitere Aktivitäten wie Evaluation und Dokumentation der Sequenzen oder Untersuchungen zur Qualität von Aufgaben kann hier nicht eingegangen werden. Sie sind im Projektbericht sowie auf unseren aktuellen Webseiten zugänglich (s. Literatur).

Zusammenfassung

Physik und Mathematik haben sich in verschiedene Richtungen entwickelt, sie haben sich tatsächlich „auseinandergelebt“. Zur Überbrückung der Unterschiede finden sich nur vereinzelte, zumeist punktuelle Versuche der Koordination. Meiner Meinung nach liegt hier ein großes Potential brach, die Zusammenarbeit dieser beiden Fächer könnte wegen der grundsätzlichen Bedeutung der Mathematik für die Physik mit wenig Aufwand viel für Schüler/innen bringen.

Daher folgen die Vorhaben am BRG Kepler einem systematischen, langfristig aufbauenden Ansatz, der letztlich alle Schuljahre der Sekundarstufe umfassen soll. Wenn beide Gegenstände einander wieder besser verstehen, sollten sie auch besser verstanden werden.

Literatur

- Anton M. u.a.: Ein dynamisches Konzept für mathematisch-naturwissenschaftliche Grundbildung. IMST²-Newsletter, Jahrgang 2/8, 2003/04. Herausgegeben vom IFF im Auftrag des bm:bwk
- Bauer S., Kaiser C., Kirisits D.: MN³+ Netzwerke BG/BRG/BORG Kurzwiese, Eisenstadt 2001 und 2002
- bm:bwk: Lehrplan AHS Oberstufe, Bundesministerium für Unterricht, Wien. BGBl. II Nr. 277/2004
http://www.bmbwk.gv.at/schulen/unterricht/lp/abs/ahs_lehrplaene_oberstufe.xml
- Dittmann H., Näpfel H., Schneider W.: Die zerrechnete Physik. In: Wege in der Physikdidaktik, Band 1. Palm&Enke, Erlangen 1991
- Drexler A. u.a.: Trigonometrie – Mathematik, Physik und Darstellende Geometrie. GRG XI Geringergasse, Wien 2001
- Ehlers G.: Mathematik und physikalische Wirklichkeit. In: Der Mathematikunterricht Jg. 6 (1960), Heft 4, S. 11ff
- Eisner, M.: Physics Educators and Mathematics Educators Should work together. In: The Physics Teacher 10/91, S. 478 ff
- Fertl I., Salner-Gridling I., Schaberreiter C., Schröder B.: Fächerübergreifende Lehrerkooperation im Unterrichtsprojekt „Vermessung“, BRG 6 Marchettigasse, Wien 2002
- Fleischmann R.: Die Struktur des physikalischen Begriffssystems. In: Zeitschrift für Physik, Bd. 129, 1961, S. 377ff.
- Ginzinger R., Unterrainer K.: Lösen physikalischer Aufgaben mit mathematischen Modellen. Versuch der Überwindung des „Kasterldenkens“. BG Zaunergasse, Salzburg 2005
- Häußler u.a.: Perspektiven für die Unterrichtspraxis, S. 44 ff. IPN Kiel 1998
- Holl A., Gabriel-Peer M., Huber J.: Schwingende Mathematik am Monochord. HTL Anichstraße Innsbruck 2005
- IMST²: <http://imst2.uni-klu.ac.at> IMST3: <http://imst.uni-klu.ac.at/>
- Jung, W.: Bericht: Joint ICMI/ICPE/CTE/UNESCO/IDM – Conference on Cooperation between science teachers and mathematics teachers, 1978. In: physica didactica 5 (1978), S. 263 ff
- Kendl, G.: Einführung in den Vektorbegriff. Akademisches Gymnasium, Wien 2003
- Kiesling, S.: Differenzialrechnung? Anwendungen in der Physik. BORG Monsberggasse, Graz 2005
- Kirchlechner, S.: Aspekte zur Koordination des Physik- und des Mathematikunterrichts an AHS. Diplomarbeit am Inst. f. Physik der Universität Graz, 1994
- Knecht, W.: Die Koordination des Mathematik- und Physikunterrichts. In: Physikunterricht heute. Diesterweg-Verlag Frankfurt/Main 1967, S. 23 ff
- Knechtl W., Rath G., Sprenger S.: Fächerkoordinierender Unterricht – Beiträge zur Grundbildung? IMST²-Projektbericht, Graz 2004
- Knechtl W., Rath G.: MPh5. Mathematik - Physik in der 5. Klasse Realgymnasium koordiniert unterrichten. BRG Kepler, Graz 2005
- Köberl-Kögler I., Kögler H.: Fächerübergreifende Erarbeitung des Funktionsbegriffs in der 4. Klasse HIB Liebenau, Graz 2002
- Liebers, K.: Zu einigen Problemen der Anwendung der Mathematik im Physikunterricht. In: Physik in der Schule, 10/1978, S. 413ff
- Mach, E.: Entwurf einer Lehrinstruction für den physikalischen Unterricht an Mittelschulen. In: Verordnungsblatt des Ministeriums für Cultus und Unterricht, Wien 1879, S. 298ff
- Mathelitsch L.: Mathematik und Physik. Manuskript (unveröffentlicht) zu einer gleichnamigen Lehrerfortbildungsveranstaltung, PI Steiermark 2003
- MPh5: <http://rath.brgkepler.at/imst/mp5>
- MPh6: <http://rath.brgkepler.at/imst/mp6>
- Oy, K. v.: Was ist Physik? Klett, Stuttgart 1977
- Rang O.: Zum praktischen Umgang mit dem Größenkalkül. In: Weninger J., Dierks W.: (Hrsg.): Arbeiten zu Größen- und Einheitenproblemen. IPN Arbeitsberichte, Kiel 1983, S. 9 ff
- Röhrl, E.: Bedeutung von Zahlausdrücken. In: Der Mathematikunterricht, Heft 4/1984, S. 92 ff
- Weißbacher A.: Variationen über ein mathematisches Thema. BG/BRG Kapfenberg 2002
- Wieninger, H.: Einsatz von Mathe Online im Physikunterricht einer 6. RG-Klasse AHS im Projektverbund „mathe-online network“. GRG6 Rahlgasse, Wien 2005