

Modellbildungssysteme am Beispiel realer Bewegungsvorgänge im Leistungsfach mit fachübergreifenden Aspekten

**StR' i.P. Petra Hüther
26.02.2002**

Inhaltsangabe:

| | | |
|---|--------------|----|
| 1. Reale Bewegungsvorgänge unter fachübergreifenden Aspekten | <i>Seite</i> | 2 |
| 1.1 Über reale Bewegungsvorgänge | <i>Seite</i> | 2 |
| 1.2 Wo bietet der Lehrplan des Leistungskurses Möglichkeiten reale Bewegungen zu behandeln? | <i>Seite</i> | 2 |
| 1.3 Fachübergreifendes Unterrichten in Physik | <i>Seite</i> | 2 |
| 1.4 Wo bietet der Lehrplan Physik Ansatzpunkte für fachübergreifende Aspekten? | <i>Seite</i> | 3 |
| 2. Modellbildung | <i>Seite</i> | 3 |
| 2.1 Modelle und ihre Klassifikation | <i>Seite</i> | 3 |
| 2.2 Modellieren und Modellbildung | <i>Seite</i> | 5 |
| 2.3 PISA und Modellbildung | <i>Seite</i> | 5 |
| 2.4 Der Modellbildungsprozess | <i>Seite</i> | 6 |
| 2.5 Modellbildungswerkzeuge | <i>Seite</i> | 7 |
| 3. Modellbildungssysteme | <i>Seite</i> | 7 |
| 3.1 Was ist ein System? | <i>Seite</i> | 7 |
| 3.2 Modellbildungssysteme | <i>Seite</i> | 8 |
| 3.3 Modellbildungssysteme im Lehrplan | <i>Seite</i> | 8 |
| 4. Das Modellbildungssystem Dynasys | <i>Seite</i> | 8 |
| 4.1 Die theoretischen Hintergründe des Dynasys-Graphik-Editors | <i>Seite</i> | 9 |
| 4.2 Die numerischen Hintergründe von Dynasys | <i>Seite</i> | 9 |
| 4.3 Didaktische Überlegungen zum Einsatz von Dynasys | <i>Seite</i> | 10 |
| 5. Beispiele für fachübergreifende reale Bewegungsabläufe, die mit Dynasys modelliert wurden | <i>Seite</i> | 11 |
| 5.1. Der Diskuswurf | <i>Seite</i> | 11 |
| 5.2 Weitere Beispiele | <i>Seite</i> | 15 |
| 6. Literaturangaben | <i>Seite</i> | 16 |

Zusammenfassung

Dieses Handout gibt vertiefte Informationen, die über die in unserer 30-minütigen Fachsitzung vermittelten Eindrücke hinausgehen und in einer Fachsitzung mit normaler Länge erarbeitet werden können.

Die Begriffe „reale“ und „ideale“ Bewegung werden gegenübergestellt und ihre Legitimation für den Unterricht dargestellt. Innerhalb des Lehrplans werden Möglichkeiten aufgezeigt, fachübergreifend reale Bewegungsvorgänge zu untersuchen.

Aufbauend auf den Begriffsdefinitionen von Modell und Modellbildung wird der Modellbildungsprozess als Kreislauf erläutert und ein Überblick über mögliche Modellbildungswerkzeuge gegeben. Ein Ausschnitt aus den PISA-Ergebnissen zeigt die aktuelle Relevanz des Themas.

Eine kurze Einführung in den wissenschaftlichen Begriff „System“ ermöglicht die Analyse von Modellbildungssystemen auch in Bezug auf den Lehrplan.

Das Modellbildungssystem „Dynasys“ und didaktische Überlegungen dazu werden vorgestellt.

Am Beispiel des Diskuswurfes wird ein Modellbildungsprozess exemplarisch durchgeführt. Es werden Literaturangaben zu weiteren ausgearbeiteten Beispielen gegeben.

Die abschließende Literatursammlung ist nach Themengebieten gegliedert.

1. Reale Bewegungsvorgänge unter fachübergreifenden Aspekten

1.1 Über reale Bewegungsvorgänge

Die einfachste Definition eines **realen Bewegungsvorganges** ist die folgende:

„**Reale Bewegungsvorgänge** sind alle diejenigen, die in der Realität vorkommen“.

Wo liegt der Unterschied zu den aus der Physik des Schulalltags bekannten Bewegungsvorgängen?

Um Bewegungsvorgänge verständlich, nicht zu komplex und im Unterricht mathematisch behandelbar zu machen, werden in der Regel **Idealisierungen** vorgenommen, wie z.B.

- **Anwenden des Massepunkt-Modells:** Betrachtet man den Körper realistisch, so müssen Masseverteilung und folglich Trägheitsmomente, Volumen- und Oberflächeneffekte berücksichtigt werden.
- **Vernachlässigung von Reibung:** Insbesondere Luftreibungskräfte sind Funktionen der Geschwindigkeit und führen zu Differentialgleichungen, die nicht einfach zu lösen sind.
- **Nichtbehandeln von Strömungseffekten:** Dabei treten Fragen nach Kriterien für laminare oder turbulente Strömung auf, der Magnuseffekt spielt eine Rolle, . . .
- **Vernachlässigung des dynamischen Auftriebs:** Im Gegensatz zum statischen Auftrieb ist der dynamische Auftrieb geschwindigkeitsabhängig, was zu komplexen Differentialgleichungen führt.

Warum sollte man diese Bewegungsvorgänge behandeln, wenn sie so kompliziert sind?

- Sie vertiefen das Fachwissen.
- Sie sind ein Teil der täglichen Schülererfahrung.
- Dadurch machen sie die Physik interessanter.
- Es kommt zu einer Themenbereicherung.
- Sie ermöglichen bessere Einblicke in die wissenschaftlichen Arbeitsweise
- . . .

1.2 Wo bietet der Lehrplan des Leistungskurses Möglichkeiten reale Bewegungen zu behandeln?

Hier sollen zunächst nur aus dem Fach Physik stammende reale Bewegungen angedacht werden. Möglichkeiten bieten sich innerhalb der folgenden Bausteine:

- „*Wurfbewegungen*“
- „*Reibung*“: Hier nimmt der Lehrplan direkt Bezug auf reale Bewegungen. Genannt werden der Fall in Luft sowie Anfahr- und Bremsvorgänge.
- „*Teilchen in Feldern*“: komplexe Bewegungen wie z.B. Elektronen in Fernschröhren
- „*Mechanische Schwingungen II*“: gedämpfte Schwingungen, Resonanzphänomene, Gebäudeschwingungen bei Erdbeben, . . .
- „*Strömungsphysik*“: Flugzeuge, Schiffe, Wasserströmungen in Rohren, . .

1.3 Fachübergreifendes Unterrichten in Physik

Auf die Begriffsvielfalt und die Spielvarianten zum Begriff „**fachübergreifendes Unterrichten**“ soll hier nicht eingegangen werden.

Im Zusammenhang mit realen Bewegungsabläufen kann man allein im Physikunterricht arbeiten oder die unterrichtliche Zusammenarbeit mit anderen Fächern (von einfacher Absprache bis zur Durchführung von Unterrichtsprojekten) anstreben.

„Im fachübergreifenden Kontext spielt die Physik wegen ihres Grundlagencharakters und ihres Anwendungsbezuges eine wichtige Rolle“, so der Lehrplan Physik der Oberstufe in Kapitel „1.3 Das Fach im fachübergreifenden Kontext“ (S.12). Hier werden auch die drei wichtigsten Ziele formuliert:

- Anregung zum Denken in Zusammenhängen und Übung darin
- Entwicklung und Förderung des Methodenwissens durch Projektarbeit
- Förderung der Fähigkeit zur interdisziplinären Kommunikation

Im Lehrplan werden konkrete Vorschläge für fachübergreifendes Lernen gegeben.

1.4 Wo bietet der Lehrplan Physik Ansatzpunkte für fachübergreifende Aspekten?

Für reale Bewegungsvorgänge bieten sich im **Leistungskurs** folgende Bausteine und Themen:

„*Physik und Verkehr*“: Aquaplaning, Kurvenfahren, Benzinverbrauch bei verschiedenen Geschwindigkeiten, . . .

„*Physik und Sport*“: Diskuswurf, Skispringen, Hochsprung, Radrennen, Fallschirmspringen, . . .

Der **Grundkurseslehrplan** schlägt einen weiteren Baustein vor:

„*Physik und Medizin*“: Blutfluss bei Verengung der Adern, Blutfluss bei Einnahme von Blutverdünnern, . . .

2. Modellbildung

2.1 Modelle und ihre Klassifikation

Je nach Autor und dessen Fachrichtung gibt es die verschiedensten Definitionen des Begriffes „**Modell**“. Der Lehrplan Physik für die Oberstufe bietet hier in der fachdidaktischen Konzeption (S. 10) folgende Definition:

„Ein Modell ist eine objekthafte, bildhafte, symbolische oder begriffliche Darstellung eines realen Objektes oder Vorgangs. Wegen seines Abbildungscharakters ist es weder wahr noch falsch, sondern zweckmäßig oder unzweckmäßig. Modelle sind Hilfsmittel bei der Aufstellung, Anwendung und Weiterentwicklung von Theorien.“

Alle Definitionen stellen die **drei wesentlichen Merkmale** eines Modells heraus:

- **Abbildungsmerkmal**: Modelle sind stets Abbildungen oder Repräsentationen eines Originals und können ohne Vorbild nicht existieren.
- **Verkürzungsmerkmal**: Sie erfassen niemals alle Attribute des Originals, sondern nur die für den Modellierenden relevanten.
- **Pragmatisches Merkmal**: Es gibt keine eindeutige Zuordnung zwischen Original und Modell, sondern nur eine für bestimmte Personen, für bestimmte Zeiträume oder unter bestimmten Voraussetzungen gültige.

Es bieten sich viele Möglichkeiten Modelle zu klassifizieren (qualitativ oder quantitativ, stochastisch oder deterministisch, dynamisch oder statisch, linear oder nicht linear, diskret oder kontinuierlich, ...). Für unsere Betrachtungen eignet sich die folgende Einteilung:

Anschauungsmodelle oder Strukturmodelle:

Sie geben ein (meist verkleinertes oder vergrößertes) strukturelles Abbild der Wirklichkeit und dienen in der Regel dem Ausbau von Vorstellungen (z.B. gebastelte Atommodelle). Diese Modelle sind statisch.

Funktionsmodelle:

Sie zeigen den Aufbau und die Funktion von technischen Geräten (z.B. Modell der elektrischen Klingel). Sie sind dynamisch.

Verhaltensmodelle:

Bei diesen Modellen bezieht sich die Analogie zum Original auf die Gleichheit des Verhaltens und nicht notwendig auf die Struktur und Funktionsweise (z.B. Lichtstrahlenmodell, Wasserkreislauf für den Stromkreislauf). Sie sind meist Modelle für Vorgänge und folglich dynamisch.

Im Zusammenhang mit realen Bewegungsabläufen hat man es im wesentlichen mit Verhaltensmodellen zu tun. Zur Arbeit mit Modellbildungssystemen (siehe Kapitel 3 und 4) werden die Verhaltensmodelle selbst in verschiedene Abstraktionsstufen eingeteilt, die aus dem Ansatz der System Dynamics (siehe Kapitel 4.1) resultieren. Sie sollen im folgenden vorgestellt und gleichzeitig an einem Beispiel illustriert werden:

| Allgemein | Beispiel „Fall mit Luftwiderstand“ |
|---|---|
| <p>Wortmodelle: Die verbale Beschreibung eines Vorgangs ist an keine äußere Form gebunden und damit am wenigsten formalisiert. Sie ist die einfachste und offenste Form eines Verhaltensmodells und hat einen geringen Abstraktionsgrad. Zu beachten ist, dass dieselbe Situation auf verschiedenste Arten beschrieben werden kann; ebenso kann eine bestimmte Beschreibung unterschiedlich interpretiert werden.</p> | <p>Beim Fall in Luft wird ein Körper einerseits durch die Erdanziehung kontinuierlich beschleunigt, andererseits mit zunehmender Geschwindigkeit durch den größer werdenden Luftwiderstand immer stärker abgebremst. Die Beschleunigung des Körpers ist proportional zur Erdbeschleunigung, die als konstant betrachtet werden kann, solange sich der Abstand des Körpers zum Erdmittelpunkt nicht nennenswert ändert. Der Luftwiderstand ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit (sofern angenommen wird, daß die Dichte der Luft sich im Laufe des freien Falls nicht ändert).</p> |
| <p>Ursache-Wirkungsdiagramme: Diese Diagramme eignen sich besonders, um die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen des Vorgangs graphisch zu skizzieren. Dabei werden die einzelnen Systemgrößen als „Knoten“, die Zusammenhänge als Pfeile dargestellt, die jeweils von der Ursache zur Wirkung weisen. Mit Hilfe einer Bewertung der Pfeile durch die Vorzeichen "+" und "-" können verstärkende bzw. dämpfende Einflüsse unterschieden werden. Geschlossene Pfeilketten repräsentieren Rückkopplungskreise. Diese Darstellungsform verlangt bereits einiges an Abstraktionsvermögen.</p> | <p style="text-align: right;">Abb 7</p> |
| <p>Flussdiagramme: In Flussdiagrammen werden bereits quantitative Eigenschaften der den Vorgang bestimmenden Größen unterschieden (Konstanten, zeitlich veränderliche Größen), ohne jedoch explizite mathematische Gleichungen anzugeben. Die Darstellungsform hängt von der mit der Systemmodellierung verbundenen Zielsetzung und dem verwendeten Modellierungswerkzeug (siehe 2.5) ab. Die Unterscheidung des quantitativen Verhaltens der einzelnen Größen stellt einen weiteren Schritt im Abstraktionsprozess dar.</p> | |
| <p>mathematische Modelle: Aus dem Flussdiagramm kann als nächster und höchster Formalisierungsschritt eine Darstellung in Form von Gleichungen (Differenzgleichungen bzw. Differentialgleichungen) entwickelt werden.</p> | $F_{ges} = F_G - F_{Luftwid}$ $F_G = mg$ $F_{Luftwid} = \frac{1}{2} c_w \cdot \rho_{Luft} \cdot A \cdot v^2$ $F_{ges} = ma = m \frac{dv}{dt}$ $m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{1}{2} c_w \cdot \rho_{Luft} \cdot A \cdot v^2$ |

2.2 Modellieren und Modellbildung

Unter „**Modellieren**“ oder „**Modellbildung**“ versteht man **den Prozess, bei dem von einem realen Objekt, einer realen Situation oder einem realen Vorgang ein Modell erstellt wird.**

Die hinter der Modellbildung stehenden Absichten lassen sich im wesentlichen in drei Kategorien einteilen, die alle natürlich auf Erkenntnisgewinnung ausgerichtet sind:

1. Vereinfachung/Veranschaulichung
2. Überprüfung von Hypothesen
3. Erstellung von Prognosen

Warum sollte man im Unterricht modellieren?

Weil es

- die Entwicklung von Problemlösestrategien fördert
- vernetztes Denken fördert
- Analysefähigkeit fördert
- den Arbeitsweisen der heutigen Wissenschaft entspricht
- ...

Außerdem schlägt der Lehrplan an den verschiedensten Stellen den Einsatz von Modellbildungssystemen vor (siehe 3.3), die das Modellieren zwingend voraussetzen

Welche Bedeutung dem Modellbilden in der heutigen didaktischen Forschung zukommt, zeigt nicht zuletzt der hohe Anteil an Modellierungsaufgaben, die im Rahmen der PISA-Studie gestellt wurden.

2.3 PISA und Modellbildung

Modellierung ist zwar in unserem Lehrplan verankert, dass es aber noch nicht zu unserem Schulalltag gehört, zeigen die Ergebnisse der PISA-Studie im Bereich der Naturwissenschaften. Hier ein Auszug aus den Ergebnissen, zu finden auf dem deutschen Bildungsserver (<http://www.mpib-berlin.mpg.de/pisa/pdfs/ergebnisse.pdf>):

„Die Leistungsunterschiede im Vergleich zu den PISA-Teilnehmerstaaten werden deutlicher, wenn man die Anteile deutscher Schülerinnen und Schüler für die einzelnen Kompetenzstufen berechnet und sie den Verteilungen für andere Länder gegenüberstellt. Auf den unteren Kompetenzstufen sind die Anteile der Schülerinnen und Schüler in der deutschen Stichprobe größer, auf den höheren Kompetenzstufen kleiner. So befinden sich in Deutschland 26,3 Prozent der Schülerinnen und Schüler auf dem unteren Niveau einer nominellen naturwissenschaftlichen Grundbildung und **nur 3,4 Prozent erreichen das Niveau einer konzeptuellen und prozeduralen Grundbildung auf der Basis eines Denkens mit Modellen.**

...

Die erheblichen Schwierigkeiten, die deutsche Schülerinnen und Schüler im Bereich des naturwissenschaftlichen Verständnisses und bei der Anwendung ihres Wissens haben, weisen darauf hin, dass der naturwissenschaftliche Unterricht in Deutschland noch **zu wenig problem- und anwendungsorientiert angelegt ist.**

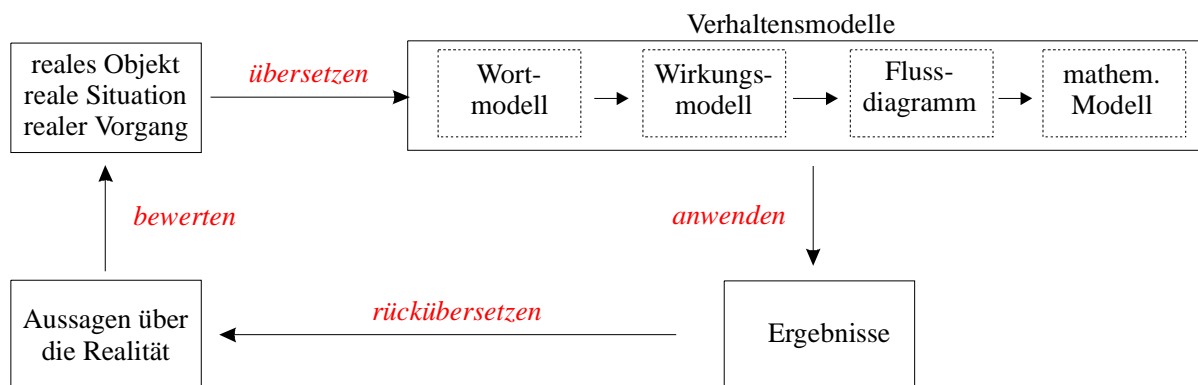
...

Nach wie vor gilt es, die in Deutschland erkennbare Neigung zum fragend- entwickelnden und fachsystematisch orientierten Unterricht zu überwinden und durch Anwendungsbezug, Problemorientierung **sowie Betonung mentaler Modelle** das Interesse an den Naturwissenschaften und die Entwicklung eines tiefer gehenden Verständnisses und flexibel anwendbarem Wissens zu fördern. ...“

2.4 Der Modellbildungsprozess

Ich möchte mich in allen folgenden Überlegungen auf Verhaltensmodelle beschränken, da diese die Grundlage zur Modellierung realer Bewegungsabläufe bilden.

Der **Modellbildungsprozess** ist ein Kreislauf, der aus vier „Handlungsschritten“ zusammengesetzt ist:



1) Übersetzen

Die Modellbildung beginnt mit der Beschreibung der realen Situation, einer Problemstellung und der Formulierung des Untersuchungszieles. Um einen realen Vorgang in ein Modell „übersetzen“ zu können, muss man sich unter anderem folgende Fragen stellen:

- Welche Faktoren haben einen Einfluss auf den realen Vorgang?
- Welche uns unbekannt Faktoren könnten im realen Vorgang eine Rolle spielen?
- Welche Relevanz haben die einzelnen Faktoren im realen Vorgang?
- Welche Faktoren kann man vernachlässigen oder reduzieren?
- Wie werden die ausgewählten Faktoren mathematisch beschrieben?
- Welcher mathematische Zusammenhang besteht zwischen den einzelnen Faktoren?

2) Anwenden

„Anwenden“ des Verhaltensmodells heißt Berechnen der interessierenden Größen. Dazu muss man sich für bestimmte Startwerte und Parametergrößen, den Simulationszeitraum, das Rechenverfahren und die Schrittweite entscheiden. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt als Zeitkurve, Wertetabelle, Phasendiagramm, Animation, ...

3) Rückübersetzen

Die aus den Berechnungen erhaltenen Ergebnisse müssen nun in Aussagen über den realen Vorgang „rückübersetzt“ werden, d.h. Zahlenwerte, Diagramme, ... müssen ausgewertet und interpretiert werden.

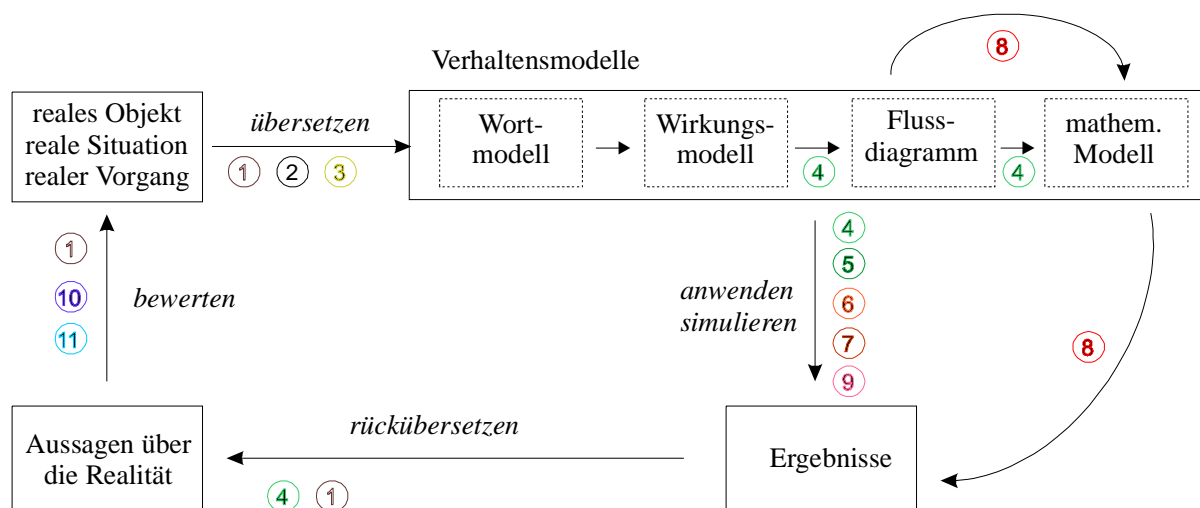
4) Bewerten

Mit den rückübersetzten Daten muss man nun das entwickelte Modell „bewerten“, d.h. man muss es durch einen Vergleich mit der Realität absichern und die Ergebnisse in Bezug auf die Grenzen des Modells kritisch beurteilen (**Modellkritik**). Aus der kritischen Analyse ergibt sich die Möglichkeit zur Erweiterung oder Verfeinerung des Modells.

Der Modellbildungsprozess ist anspruchsvoll und schwierig, da er neben der Fähigkeit zum Analysieren, Strukturieren, Interpretieren, ... auch eine Menge mathematischer Fähigkeiten erfordert. Für die Arbeit innerhalb des Prozesskreislaufes stehen dem Modellierenden verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, die die auftretenden Schwierigkeiten verringern oder sogar umgehen helfen.

2.5 Modellbildungswerkzeuge

Bei der Modellbildung werden die verschiedensten **Modellbildungswerkzeuge** verwendet:



- ① Der Kopf / das Gehirn des Modellierenden
- ② Informationsquellen: Literatur (Fachbücher, Lexika, ...), Internet, Fachleute, ...
- ③ Papier, Schere, Holz, ...
- ④ Die Mathematik ganz allgemein
- ⑤ Spezielle mathematische Verfahren: Optimierungsverfahren, Runge-Kutta-Verfahren, Milne-Verfahren, ...
- ⑥ Tabellenkalkulationsprogramme: Excel, ...
- ⑦ Mathematikprogramme: Derive, Mathematica, ...
- ⑧ Simulationsprogramme mit graphischer Eingabe: Dynasys, Stella, Powersim, Vensim, ...
- ⑨ Taschenrechner, speziell grafikfähige
- ⑩ Experimente
- ⑪ digitale Videoanalyse

Natürlich kommen nicht immer alle Werkzeuge zum Einsatz. Die Art des zu modellierenden Vorganges und die Vorkenntnisse der Modellierenden bestimmen die sinnvoll verwendbaren Werkzeuge.

3. Modellbildungssysteme

3.1 Was ist ein System?

Der Begriff „Modellbildungssysteme“ wird unter Fachleuten und auch in der Literatur mit unterschiedlichen Bedeutungen belegt.

Um ein besseres Verständnis für diesen Begriff zu erzeugen soll kurz erläutert werden, was man in der Wissenschaft unter einem **System** versteht. Obwohl der Begriff durch die Anwendung in den unterschiedlichen Fachbereichen völlig andere Bedeutungen annimmt (Ökosystem, Schranksystem, Gleichungssystem, Lottosystem, ...) lassen sich dennoch folgende Gemeinsamkeiten als kennzeichnende Merkmale heranziehen:

- Ein System besteht aus Elementen
- zwischen denen eine Wechselbeziehung besteht.
- Es hat eine klare Grenze nach außen.
- Seine Elemente können selbst wieder Systeme (Subsysteme) sein.
- Meist ist ein zeitlicher Entwicklungsprozess vorhanden, es handelt sich dann um ein dynamisches System.

Dies soll zum besseren Verständnis an zwei einfachen, bekannten Beispielen verdeutlicht werden.

a) *Abkühlungsvorgang von Kaffee in einer Tasse als dynamisches physikalisches System:*

Elemente: Tasse, Flüssigkeit, umgebende Luft

Wechselbeziehung: Die Temperaturen gleichen sich an, der Prozess hängt vom vorhandenen Temperaturgefälle und vom Wärmefluss zwischen den einzelnen Elementen ab.

Grenze: Temperaturen außerhalb des Systems (z.B. des Tisches auf dem die Tasse steht, ...) werden nicht berücksichtigt.

Entwicklungsprozess: Die Temperaturen der Elemente verändern sich zeitlich.

b) *Differentialgleichungssystem als mathematisches System:*

Elemente: Gleichungen

Wechselbeziehung: funktionaler Zusammenhang der Variablen und eingehenden Funktionen

Grenze: Beziehungen der Variablen außerhalb dieser Gleichungen werden nicht berücksichtigt

Entwicklungsprozess: die Funktionen selbst

3.2 Modellbildungssysteme

Was ist ein **Modellbildungssystem**? Auch darüber kann man geteilte Meinungen finden.

Streng wissenschaftliche Interpretation: **alle Systeme, die zur Modellbildung eingesetzt werden, also alle mathematischen Verfahren, mathematischen Programme, stellen Modellbildungssysteme dar.**

In der fachdidaktischen Literatur häufig verwendete Interpretation: **Die speziell zur Modellbildung entworfenen Computerprogramme wie Dynasys, Stella, Vensim, Powersim, Modus ... bezeichnet man als Modellbildungssysteme.**

Den folgenden Betrachtungen wird die zweite Definition zugrunde gelegt.

3.3 Modellbildungssysteme im Lehrplan

Ohne den Begriff „Modellbildungssysteme“ genau zu definieren, schlägt der Lehrplan Physik ihren Einsatz an den verschiedensten Stellen vor:

Baustein „Reibung“: „Entsprechende Formeln angeben und Modellbildungssysteme nutzen.“

Baustein „Wurfbewegung“: „Simulationen und Modellbildungssysteme nutzen.“

Baustein „Relativistische Dynamik“: „Modellbildungssysteme nutzen“

4. Das Modellbildungssystem Dynasys

Das einfachste und preiswerteste der zur Verfügung stehenden Programme ist „DYNASYS“.

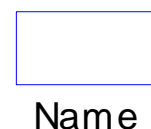
Was kann/macht Dynasys?

Das Programm ermöglicht es, Simulationsmodelle mit Hilfe der Methoden der System Dynamics (siehe 5.1) zu realisieren. Es besitzt einen graphischen Eingabeeditor, mit dem die Modelle in Form von Flussdiagrammen entwickelt werden. Das Programm erstellt daraus selbständig die Modellgleichungen und löst diese näherungsweise mit Hilfe von Diskretisierungsverfahren. Die Ergebnisse der Berechnungen können als Zeitdiagramme, Phasendiagramme und Tabellen ausgegeben werden.

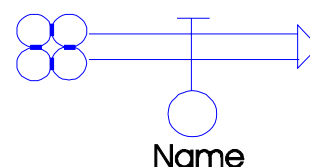
4.1 Die theoretischen Hintergründe des Dynasys-Graphik-Editors

Die Struktur des graphischen Eingabeeditors resultiert aus den Ansätzen der „**System Dynamics**“: Systemdynamik ist eine von J. Forrester um 1960 entwickelte Methode zur Beschreibung, Modellierung und Simulation dynamischer Systeme. Im Mittelpunkt steht einerseits eine leistungsfähige Methode zur Darstellung vernetzter Vorgänge (Flussdiagramme) und andererseits die quantitative Beschreibung und numerische Simulation von solchen Systemen. Im Gegensatz zur traditionellen mathematischen Analyse spielen im "System Dynamics"-Ansatz geschlossene Lösungen keine Rolle. Das Erkenntnisinteresse richtet sich in erster Linie auf die Sachsituation, die (mit relativ elementaren mathematischen Hilfsmitteln) modelliert und numerisch simuliert werden soll. Anders als beim stetigen Konzept der Differentialgleichungstheorie geht man dabei von diskreten Zeitintervallen aus. Dies macht eine Unterscheidung von zeitpunktbezogenen Bestandsgrößen und zeitintervallbezogenen Flussgrößen erforderlich, die auch in der Flussdiagrammdarstellung und in der numerischen Simulation eine Schlüsselrolle spielt:

Bestandsgrößen oder Zustandsgrößen: Ein Zustand in einem dynamischen System kann man sich als eine mengenartige Größe vorstellen. Bestandsgrößen haben **zu jedem Zeitpunkt einen bestimmten Wert** und können sich im Laufe der Zeit ändern. Beispiele für Bestandsgrößen sind: Geschwindigkeiten, Wegstrecken, Volumina, ...



Flussgrößen oder Änderungsraten: Damit sich diese Größe eines Zustandes verändert, muss etwas in den Zustand hineinfließen oder wieder herausfließen. Der Fluss selbst wird durch ein Ventil geregelt. Solche Ventile werden bei dynamischen Systemen auch als Flussgrößen oder Änderungsraten bezeichnet, **sie geben an, um wie viel sich die Zustandsgröße pro gewählter Zeiteinheit verändert**. Beispiele für Flussgrößen sind: Änderung einer Geschwindigkeit



Hilfsgrößen oder Zwischengrößen: Unter Zwischengrößen versteht man Größen, die sich zwar im Laufe der Zeit verändern, die aber ständig aus dem Systemzustand, also aus den Zustandsgrößen, berechenbar sind. Beispiel: Luftreibung



Parameter sind Größen, die über die Beobachtungszeit konstant bleiben, ein Parameter hat daher keinen Eingang und wird im Modelleditor rot gezeichnet. Beispiel: Luftdichte



Wirkungspfeile: Wirkungen werden in Flussdiagrammen durch dünne Pfeile dargestellt. Dabei bedeutet ein Pfeil von Objekt A auf B "A wirkt auf B".



Damit ergibt sich für den Fall eines Massepunktes in Luft das oben in der Tabelle gezeigte Flussdiagramm (siehe 2.1, Seite 4) mit den folgenden Größen:

| | |
|------------------------|---|
| <i>Bestandsgrößen:</i> | Geschwindigkeit v und Wegstrecke s |
| <i>Flussgrößen:</i> | Geschwindigkeitsänderung $dv = a$ und Wegänderung $ds = v$ |
| <i>Zwischengrößen:</i> | Beschleunigung a ; Gewichtskraft und Strömungswiderstandskraft |
| <i>Parameter:</i> | Masse, Erdbeschleunigung, Fläche, Widerstandsbeiwert, Dichte der Luft |

4.2 Die numerischen Hintergründe von Dynasys

Dynasys bietet zwei numerische Rechenverfahren an (aus dem Handbuch zu Dynasys):

Das **Euler-Chauchy-Verfahren** ist ein Verfahren 1. Ordnung und sollte in der Regel bei diskreten Systemen eingesetzt werden, d.h. es findet nur nach der unter dem Zeitintervall angegebenen Dauer eine Veränderung der Zustandsgröße statt. Für die meisten Anwendungen mit einer Zustandsgröße bietet das Euler-Chauchy-Verfahren eine ausreichende Genauigkeit.

Bei Modellen mit zwei oder mehr Zustandsgrößen, z.B. der Simulation eines Pendels oder dem Räuber-Beute-System, werden sehr schnell Fehler deutlich, die sich beim Pendel in einem Anwachsen der Amplituden bemerkbar machen. Sie könnten jetzt durch eine Verkleinerung der Schrittweite den Fehler zwar verringern, erhalten aber dadurch größere Rundungsfehler.

Das Runge-Kutta-Verfahren, ein Verfahren 4. Ordnung, ist selbst bei größeren Schrittweiten wesentlich genauer als das Euler-Chauchy-Verfahren. Man hat allerdings pro Iterationsschritt den vierfachen Rechenaufwand. Dies kann aber durch die Wahl eines größeren Zeitintervalls wieder ausgeglichen werden, so dass in der Regel das Runge-Kutta-Verfahren verwendet werden sollte.

Startzeit und Endzeit

In den beiden Eingabefeldern Start- und Endzeit können Sie den Zeitraum der Simulation festlegen. Dabei muss die Endzeit größer als die Startzeit gewählt werden.

Zeitintervall dt

Das Zeitintervall dt gibt an, nach welcher Zeit ein neuer Iterationsschritt erfolgt. Hat dt den Wert 2, so wird die Zeit bei jedem Simulationsschritt um 2 erhöht. Man kann damit auch abschätzen, wieviel Iterationsschritte durchgeführt werden. Die Anzahl der Iterationsschritte ergibt sich aus der Differenz von Endzeit und Startzeit dividiert durch das Zeitintervall dt .

$$\text{Anzahl der Iterationsschritte} = (\text{Endzeit} - \text{Anfangszeit}) / dt$$

Je kleiner Sie dt wählen, um so genauer wird das Simulationsergebnis werden, desto mehr Iterationsschritte werden aber auch durchlaufen und desto länger ist die Berechnungszeit.

Speicherintervall

Durch einen Eintrag im Feld Speicherintervall können Sie erreichen, daß nicht bei jedem Iterationsschritt die Ergebnisse in der Tabelle und als Punkt im Schaubild festgehalten werden, sondern jeweils nur nach dem eingetragenen Zeitintervall.

Betrachten wir folgendes Beispiel: Sie haben die Startzeit auf Null gesetzt und die Endzeit auf 400. Im Feld Zeitintervall haben Sie den Wert 0,5 eingetragen. Insgesamt werden daher 800 Iterationen durchgeführt. Wenn Sie als Speicherintervall den Wert 2 eintragen, wird nicht jeder Wert in der Tabellenausgabe notiert, sondern nur alle 2 Zeiteinheiten. Insgesamt werden also nur 200 Einträge in der Tabelle erfaßt, was sicherlich zur Übersichtlichkeit der Ergebnisse beiträgt.

Ähnliches gilt für die Ausgabe der Graphen in der Zeitkurve. Bei zu vielen Werten können im Schwarz-Weiß-Modus die gestrichelten Linien nicht korrekt dargestellt werden.

Tip: Wird die Kurve kantig, kann man im Menüpunkt „Numerik“ dt und das Speicherintervall verkleinern.

4.3 Didaktische Überlegungen zum Einsatz von Dynasys

Warum sollte man Dynasys als Modellbildungswerkzeug einsetzen?

- Mit Dynasys können komplexe Vorgänge modelliert werden, da die notwendigen numerischen Berechnungen vom Programm übernommen werden und daher nicht von den Schülern geleistet werden müssen.
- Ein explizites Aufstellen der Modellgleichungen ist nicht notwendig. Die Übersetzung vom Flussdiagramm in die mathematische Darstellung übernimmt das Programm.
- Durch das Arbeiten auf der Ebene der symbolisch-bildhaften Darstellung (Flussdiagramm) wird die Anschaulichkeit erhöht.
- Objekte und Zusammenhänge können direkt am Bildschirm verändert und umgestaltet werden. Die explorative Intervention in den simulierten Prozess erlaubt die Beobachtung der Auswirkung auf das System.
- Wählbare Darstellungsformen: Für die Ein- und Ausgabeformen stehen Tabellen, Graphen, Flüsse zur Verfügung.

Welche Ziele kann man mit dem Einsatz von Dynasys verfolgen?

- Es fördert die fachliche Kompetenz, da vertiefende Fragestellungen untersucht werden können.
- Es ermöglicht und begünstigt fächerübergreifendes Lernen, z.B. bei realen Bewegungsvorgängen.
- Es unterstützt die Behandlung von Phänomenen aus dem Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler.
- Es fördert die Möglichkeiten der Schüler, eigene Hypothesen zu formulieren und zu erproben.
- Es fördert das vernetzte Denken.
- Es bietet sich als „Rechenknecht“ und „Differentialgleichungslöser“ an.

Welche Voraussetzungen brauchen die Schüler?

Da Dynasys Modellgleichungen aus dem Flussdiagramm eigenständig erstellt und die Numerik durchführt, müssen die Schüler keine besonderen mathematischen Fertigkeiten mitbringen. Die Darstellung des Modells als Flussdiagramm ist jedoch gewöhnungsbedürftig und muss eingeübt werden. Erfahrungen zeigen, dass die Arbeit mit dem Programm am sinnvollsten in den folgenden vier Stufen geschieht:

1. Nachvollziehen / Untersuchen eines bereits in Dynasys fertig vorliegenden Modells
2. Verändern eines bereits fertigen Modells, z.B. durch neue Wahl der Parameterwerte
3. Eigenständiger Nachbau eines bereits als Ursache-Wirkungsdiagramms entwickelten Modells in Dynasys
4. Eigenständiges Modellieren eines Problems

Welche Voraussetzungen muss der Lehrer mitbringen?

Zunächst ist es notwendig, sich in die Denkweise der System Dynamics einzuarbeiten und sich mit den Arbeitsweisen des Programms vertraut zu machen. Hinzu kommt die Bereitschaft, sich mit den verschiedensten Lösungsansätzen der Schüler auseinander zu setzen und nicht immer bereits vor der Stunde alle Schritte vorausplanen zu können.

Worauf muss man achten?

Die aus den numerischen Verfahren resultierenden Ergebnisse müssen auf ihre Zuverlässigkeit überprüft werden, da die Modellgleichungen nicht gelöst, sondern nur numerisch approximiert werden. Die Qualität der Ergebnisse hängt von der korrekten Wahl des numerischen Verfahrens und dessen Parameter ab. Dazu bieten sich an: Untersuchung der Stabilität der Simulationsergebnisse bei Verkürzung der Zeitschritte, Untersuchung von Erhaltungsgrößen (Energie, Impuls), Vergleich mit experimentellen Resultaten.

5. Beispiele für fachübergreifende reale Bewegungsabläufe die mit Dynasys modelliert wurden

5.1. Der Diskuswurf

Der Diskuswurf kann z.B. Inhalt eines fachübergreifenden Projektes Physik-Sport sein. Dazu bieten sich folgende Fragestellungen an:

- Welcher Abwurfwinkel erzielt die größte Weite?
- Welchen Einfluss hat die Abwurfgeschwindigkeit?
- Welchen Einfluss hat der Luftwiderstand?
- Hat die Körpergröße des Sportlers einen Einfluss auf die Wurfweite?
- Wie kann man den günstigsten Abwurfwinkel in der Realität erzielen?
- Wie kann man in der Realität die Abwurfgeschwindigkeit verändern?
- Welchen Einfluss hat der Drall?
- ...

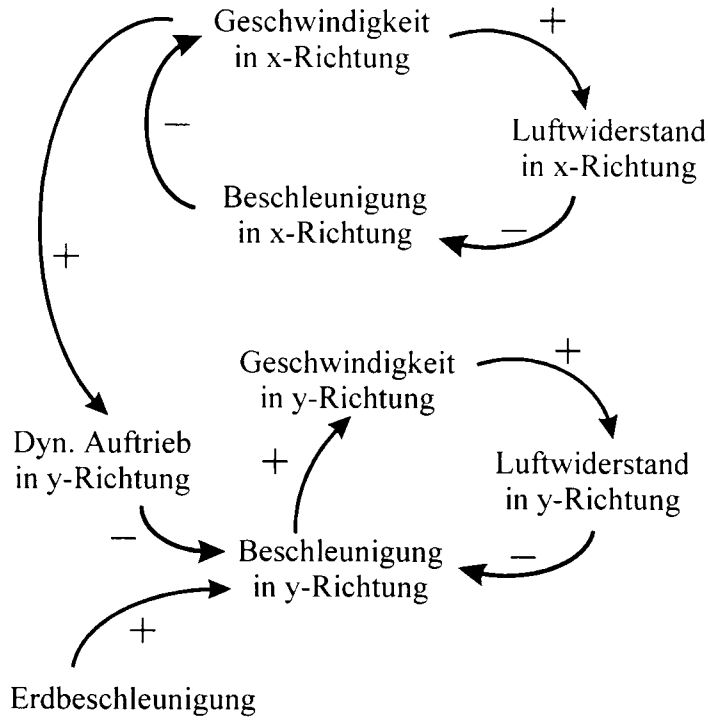
Ein mögliches Wortmodell ist:

Die Diskusscheibe hat in x-Richtung eine Anfangsgeschwindigkeit, die durch den Abwurfwinkel und die Abwurfgeschwindigkeit bestimmt ist. Die Geschwindigkeit in x-Richtung wird durch den Luftwiderstand verringert, der abhängig ist von der Luftdichte, dem c_w -Wert der Scheibe, der angeströmten Fläche A_x und dem Quadrat der Geschwindigkeit in x-Richtung.

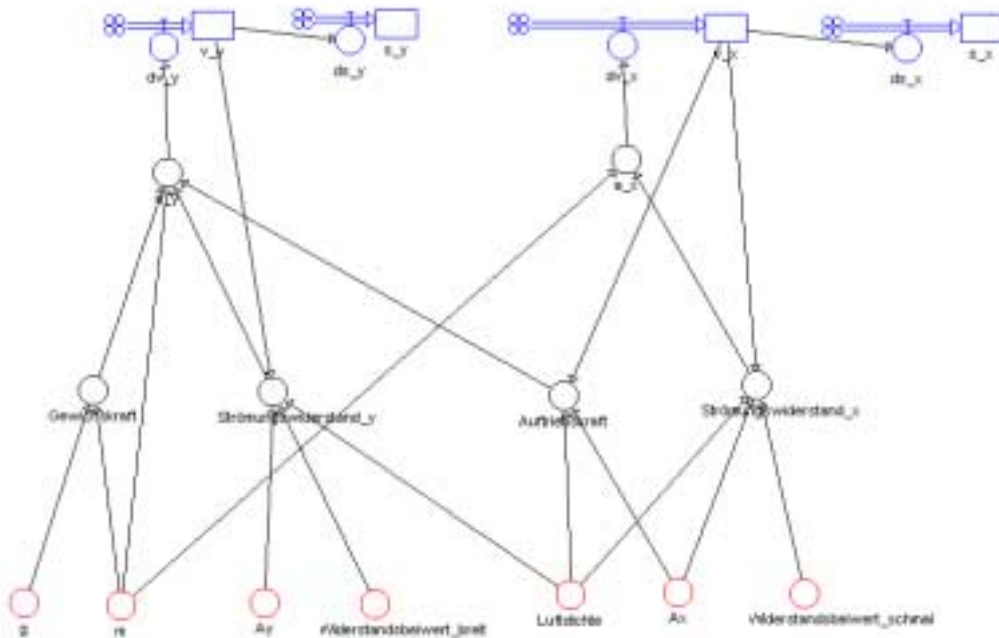
In y-Richtung besteht ebenfalls eine vom Abwurfwinkel und der Abwurfgeschwindigkeit bestimmte Anfangsgeschwindigkeit. Durch die Gravitationskraft wird die Diskusscheibe zum Erdmittelpunkt beschleunigt. Bremsend wirkt auch hier die Luftreibung, die jedoch von einer anderen angeströmten Fläche A_y bestimmt wird. Als weitere bremsende Kraft tritt der dynamische Auftrieb auf, der abhängig ist von der Luftdichte, der angeströmten Fläche A_x und der Geschwindigkeit in x-Richtung

Die Rotation der Diskusscheibe bewirkt, dass die Rotationsachse fast während des gesamten Fluges ihre Richtung beibehält. Daher sind die für Luftreibung und Auftrieb relevanten Flächenkomponenten konstant.

Der Bewegungsvorgang als Ursache-Wirkungsdiagramm:



Daraus ergibt sich folgendes Flussdiagramm:



Dynasys erstellt daraus folgende Modellgleichungen:

Zustandsgleichungen

```
v_y.neu <-- v_y.alt + dt*(dv_y)
  Startwert v_y = 10
s_y.neu <-- s_y.alt + dt*(ds_y)
  Startwert s_y = 0
v_x.neu <-- v_x.alt + dt*(dv_x)
  Startwert v_x = 10
s_x.neu <-- s_x.alt + dt*(ds_x)
  Startwert s_x = 0
```

Zustandsänderungen

```
dv_y = a_y
ds_y = v_y
dv_x = a_x
ds_x = v_x
```

Konstanten

```
m = 2
g = 9,81
Widerstandsbeiwert_breit = 0,3
Ay = 0,03*0.7
Luftdichte = 1,29
Ax = 0,03*0.7
Widerstandsbeiwert_schmal = 1
```

Zwischenwerte

```
Gewichtskraft = m*g
Strömungswiderstand_y = Widerstandsbeiwert_breit*Ay*Luftdichte*Quadrat(v_y)/2
Auftriebskraft = v_x*Luftdichte*Ax
Strömungswiderstand_x = Luftdichte*Widerstandsbeiwert_schmal*Ax*Quadrat(v_x)/2
a_y = (-Gewichtskraft-Strömungswiderstand_y+Auftriebskraft)/m
a_x = -Strömungswiderstand_x/m
```

mathematisches Modell:

Für die Gewichtskraft gilt:

$$F_G = mg$$

Für den Strömungswiderstand in x-Richtung gilt:

$$F_{Sx} = \frac{1}{2} \cdot A_x \cdot c_{wx} \cdot \rho_{Luft} \cdot v_x^2$$

Für den Strömungswiderstand in y-Richtung gilt:

$$F_{Sy} = \frac{1}{2} \cdot A_y \cdot c_{wy} \cdot \rho_{Luft} \cdot v_y^2$$

Für den dynamischen Auftrieb gilt:

$$F_A = v_x \cdot \rho_{Luft} \cdot A_x$$

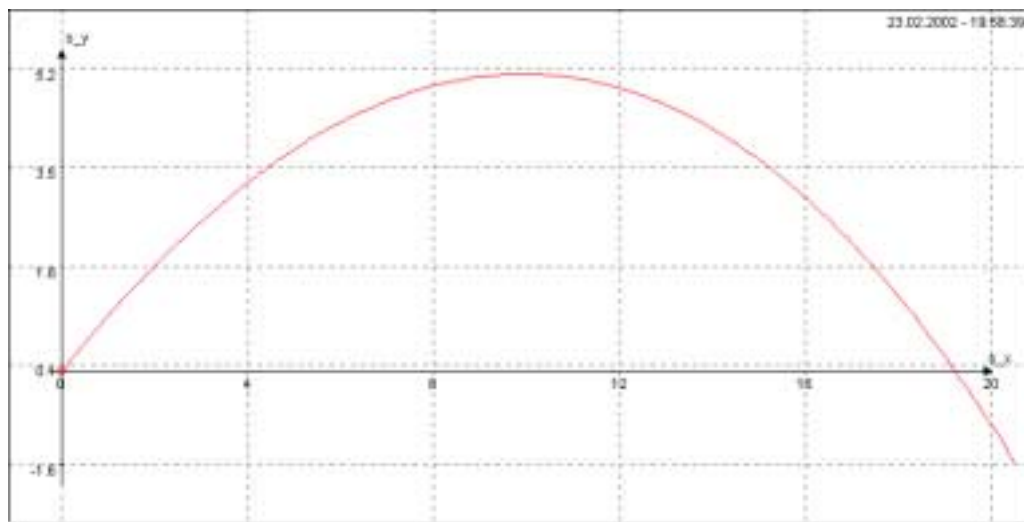
Und damit ergibt sich:

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{1}{2m} \cdot A_x \cdot c_{wx} \cdot \rho_{Luft} \cdot v_x^2$$

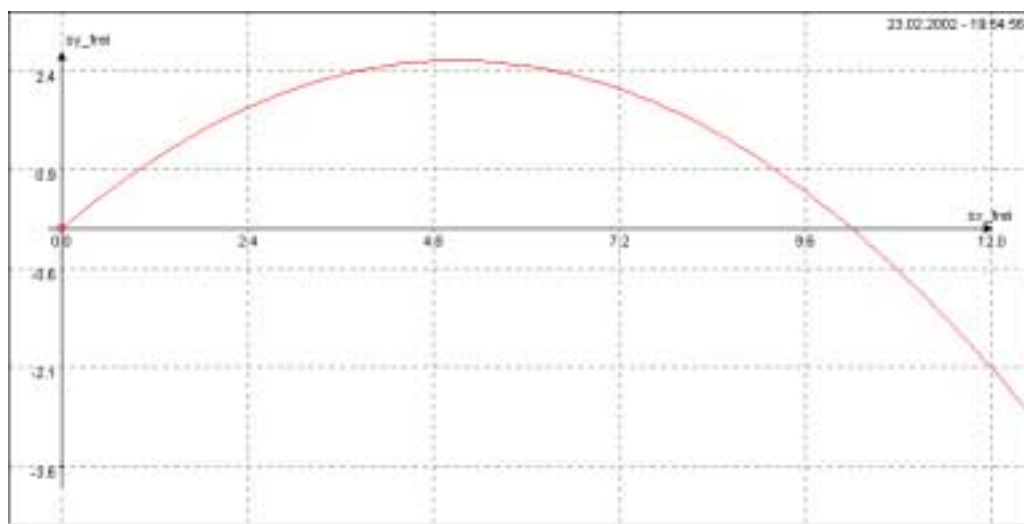
$$\frac{dv_y}{dt} = -g - \frac{1}{2m} \cdot A_y \cdot c_{wy} \cdot \rho_{Luft} \cdot v_y^2 + v_x \cdot \rho_{Luft} \cdot A_x \cdot \frac{1}{m}$$

Beispiele für Simulationsergebnisse:

Die Flugbahn der Diskusscheibe für einen Abwurfwinkel von 45° :

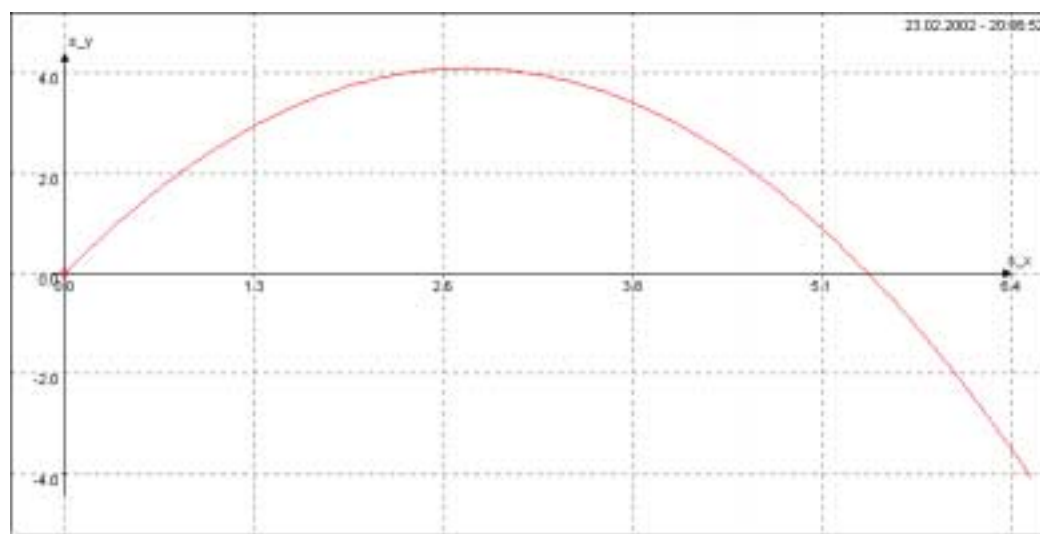


Im Vergleich dazu eine Flugbahn ohne Berücksichtigung des dynamischen Auftriebs:



Man erkennt deutlich die unterschiedliche Weite und damit den entscheidenden Einfluss des dynamischen Auftriebes.

Flugbahn für einen Abwurfwinkel von 60° :



Auch hier erkennt man die deutlich geringere Wurfweite.

Bemerkungen:

- Die beiden Diagramme unter veränderten Bedingungen weisen darauf hin, dass das Modell keine groben Fehler beinhaltet, denn sie entsprechen den theoretischen Erwartungen.
- Leider ermöglicht das Phasendiagramm lediglich den Ausdruck eines einzigen Graphen in einem Diagramm. Ein direkter Vergleich von Diskuswurf mit und ohne Luftwiderstand ist also nur in zeitabhängigen Diagrammen möglich!

Modellkritik:

Widmet man sich den Flugeigenschaften des Diskus im Detail, so stellt sich heraus, dass weitere Mechanismen Eingang in das Modell finden müssen, um eine hinreichende Übereinstimmung mit der Wirklichkeit zu erreichen. So ist der dynamische Auftrieb eine komplexe nichtlineare Funktion der Geschwindigkeit, da die an den Kanten der Scheibe entstehenden Turbulenzen zu einem plötzlichen Auftriebsverlust unterhalb einer kritischen Geschwindigkeit führen. Die Rotation der Scheibe bewirkt, dass linke und rechte Hälfte des Diskus unterschiedliche Kräfte erfahren. Auf der Seite, die der anströmenden Luft entgegenrotiert, ist der Auftrieb geringer, so dass eine kippende Kraft resultiert. Diese hat eine Präzessionsbewegung zur Folge, und die Vorderseite des Diskus kippt nach unten ab. Gute Startpunkte für eine Literaturrecherche im Internet sind das Institut für Angewandte Trainingswissenschaft Leipzig (<http://www.iat.uni-leipzig.de/iat/index.htm>) oder <http://www.frisbee.com/research/potts.html>.

5.2 Weitere Modelle

Die beiden folgenden Beispiele finden sich als fertig ausgearbeitete Modelle mit Interpretationen zum Download auf meiner Homepage

www.schnurzel.de

Dort findet sich außerdem ein Modell zum Anfahren eines Autos und Hinweise auf Beispielmodelle im Internet.

a) BUNGEE JUMPING

Mögliche Fragestellungen für den Unterricht:

- Welches Seil ist für welches Gewicht geeignet?
- Warum ist Schwung holen so gefährlich?
- Was bewirkt eine falsche Angabe der eigenen Masse?
- Welche Kräfte wirken auf den Körper?
- Welche Beschleunigungen (als Vielfache von g) wirken auf den Körper?
- Welche medizinischen Folgen haben z.B. $3,5g$ auf den Körper?
- Welche gesundheitlichen Folgeschäden können auftreten?
- ...



b) Fallschirmspringen

Interessante Fragen für den Unterricht:

Von Interesse sind Höhe, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fallschirmspringers, speziell die Grenzggeschwindigkeit beim freien Fall mit ungeöffnetem Fallschirm und die Geschwindigkeit bei der Landung. Aber auch die auftretenden Kräfte beim Öffnen des Fallschirms oder der Einfluss verschiedener Parameter wie die Größe des Fallschirms, Gewicht des Fallschirmspringers usw. liefern interessante Fragestellung.



6. Literatur

Modell:

- „Physikdidaktik“; Kircher/Girwitz/Häußler; Seite 268 ff.
- „Fachdidaktik Physik“; Bleichroth/Dahncke/Jung/Kuhn/Merzyn/Weltner; Aulis Verlag Deubner; Seite 349 ff.
- „Der Modellbegriff – Definition und Bedeutungsvielfalt“; Mueller Science; <http://www.muellerscience.com/NavStart.htm/>

Modellieren:

- „blikk, Modellieren mit Mathe, eine Unterrichtsentwicklung in Südtirol“; <http://www.schule.suedtirol.it/blikk/angebote/modellmathe/medio.htm/>
- „Modellbildung und Simulation“ <http://www.ikarus.uni-dortmund.de/wissenschaft/modellbildung/>

Systeme:

- „Systemisches Denken und Modellbilden“; G. Ossimitz <http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/pap/go95d.htm/>
- „Didaktik der Systemdynamik, systemisches Denken“; G. Ossimitz <http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/sdyn/sdyn.htm#link/>
- „Einführung und Kommentar zum Lehrplankapitel "Untersuchung vernetzter Systeme"“; G. Ossimitz ; <http://www.uni-klu.ac.at/~gossimit/sdyn/lkom.htm/>

Modellbildungssysteme:

- „Modellbildung und Modellbildungssysteme“; Josef Leisen; <http://www.uni-koblenz.de/~odsleis/modellbildung/modellbildung.pdf/>
- „Physik - Modellieren, graphikorientierte Modellbildungssysteme im Physikunterricht“; Horst P. Schecker; Ernst Klett Verlag; ISBN 3-12-770260-4
- „Modellbildung und Simulation mit dem Computer“; Peter Goldkuhle; Praxis Schriftenreihe Physik; Aulis Verlag
- „Standortbestimmung der Einsatzmöglichkeiten von Simulationen, Modellbildungssystemen und Hypertext-Hypermediaanwendungen für Unterrichtszwecke“; Markus Tippman <http://www-cg-hci.informatik.uni-oldenburg.de/~pgse96/Seminar/MTippmann.html/>

Numerische Verfahren

- „Das Runge-Kutta-Verfahren vierter Ordnung für kontinuierliche Systeme“, <http://www.learn-line.nrw.de/angebote/modell/runge.htm/>
- „Solving Ordinary Differential Equations, Vol.1, Nonstiff Problems“; Hairer/Norsett/Wanner, Springer Verlag 2000, zweite Auflage

Beispiele, Informationen für Lehrer, . . . :

- Sammlung von fertigen Modellen mit Interpretationen auf meiner Homepage unter www.schnurzel.de
- Sammlung von Beispielen und Hinweisen unter www.modsim.de <http://www.ham.nw.schule.de/projekte/modsim/>
- Texte zur Lehrerbildung im Bereich Modellbildungssysteme in Physik unter http://www.learn-line.nrw.de/angebote/lakonkret/medien/ausbild/goldkuhle_pc_physik.pdf/ http://fb6www.uni-paderborn.de/ag-ag-dida/sites/mod_sim/goldk_1.htm/