

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

## **BEITRAG AUS DER REIHE:**

Werner B. Schneider (Hrsg.)

# Wege in der Physikdidaktik

Band 1

Sammlung aktueller Beiträge aus der  
physikdidaktischen Forschung

ISBN 3 - 7896 - 0090 - 3

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1989

### Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.  
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle  
genutzt werden. Auf der Homepage

[www.solstice.de](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Roman Worg

## **Sind Computer im Unterricht nichts weiter als unnützes Spielzeug?**

### **Softwareentwicklung am Lehrstuhl für Didaktik der Physik der Universität München zwischen 1984 und 1989**

Der Computer ist seit Jahren in der Schule etabliert, zuerst speziell für den Informatikunterricht, aber nach und nach auch in anderen Fächern und natürlich auch im Physikunterricht. Dabei wird intensiv die Frage nach dem sinnvollen Einsatz diskutiert: Ist dieses Spielzeug pädagogisch wertvoll?

Die Gefahren, wie Ersatz für das Experiment, Vernachlässigung von Standardarbeitstechniken und Förderung der Technikgläubigkeit oder gar, daß der Computer die Welt besser beschreiben würde, als die Natur selbst ist, sind vielfach verdeutlicht worden. Sowohl Lehrer wie Fachdidaktiker zeigen in Unterrichtspraxis und Veröffentlichungen (z.B.[1],[2]), daß es verschiedene Methoden gibt, mit denen der Computer zu einem nützlichen Hilfsmittel gerade in der Physiklehre wird. Die Notwendigkeit für Lehrerfortbildung und Entwicklung von Unterrichtsmaterialien ergibt sich von selbst. Dementsprechend wurden und werden von verschiedensten Seiten Software und Hardware sowie Lehrkonzepte entwickelt: Von Lehrern, Lehrmittelfirmen, Verlagen, fachdidaktischen Lehrstühlen und speziellen Instituten wie dem bayerischen "Staatsinstitut Zentralstelle für Computer im Unterricht" in Augsburg.

Der Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der Universität München unter Prof. Dr. K. Luchner ist von Beginn an an dieser Entwicklung beteiligt. Es begann mit dem Taschenrechner als Zähler und reicht bis zur Simulation von Vielteilchensystemen auf leistungsfähigen Personalcomputern. Man hat sich zuerst speziell mit der Entwicklung von computerunterstützten Experimenten beschäftigt: Die Namen Dr. Parsche und Dr. Bube sind damit verbunden, das entwickelte Meßsystem und das Programm "DME - Digitale Meßwerterfassung" ([3],[4],[5]) sind noch immer aktuell und an vielen Schulen im Gebrauch. In den vergangenen Jahren ging diese Entwicklung weiter, zur Meßwerterfassung kamen noch Simulationen, die speziell für entdeckendes Lernen ausgelegt sind. Die zugrundeliegenden physikalischen Themen sind vor allem die Physik von nichtlinearen Systemen (Chaos), die Festkörperphysik und spezielle Experimentiermethoden. Als übergreifender Aspekt ist die Animation zum Studieren durch attraktive Graphiken anzuführen. Hierbei ist nicht gemeint, daß der dargestellte Bildschirm wie

ein Werbeprospekt aufgebaut ist, sondern daß die Graphiken, die sich aus dem physikalischen Sachverhalt ergeben, den Schüler anregen, bestimmte Bilder (z.B. geschlossene Bahnen) zu erzeugen. Einige der später dargestellten Bilder sind in diesem Sinne inzwischen in ein Schulbuch eingegangen. Dafür wiederum ist er indirekt aufgefordert, die schon bekannte Physik so gut zu reflektieren, daß er das Experiment bzw. die Simulation entsprechend beeinflussen kann. Die Diskussion der erzielten physikalischen Ergebnisse geschieht sicherlich hauptsächlich auf dem Weg der plausiblen Erklärung. Durch diese Arbeitsart wird das physikalische Vorstellungsvermögen, gefördert.

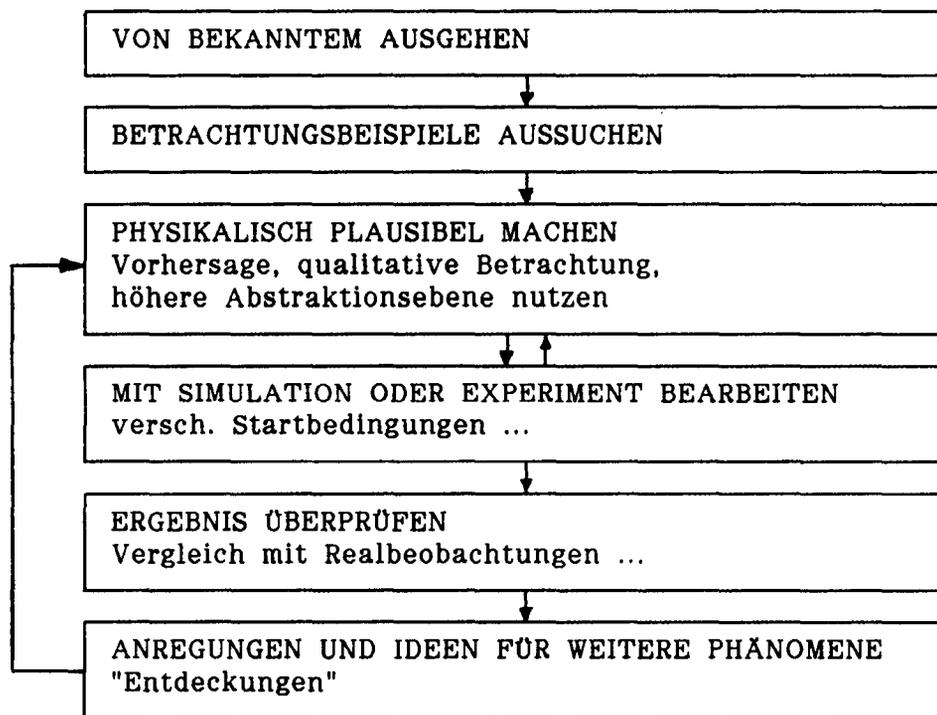


Abb.1) Arbeitsweise beim interaktiven Umgang mit dem Computer

Im Folgenden soll ein Überblick über die Entwicklungen der letzten Jahre gegeben werden. Dabei werden nicht nur Programme vorgestellt, sondern auch anhand exemplarischer Beispiele die Ideen und Ansätze aufgezeigt; wie das "Spielzeug Computer" nicht nur Spaß machen, sondern auch physikalische Inhalte übermitteln kann.

### 1. Programme zum nichtlinearen Rotationspendel. (siehe [7],[8],[9])

Für die Einführung in die Dynamik chaotischer Systeme scheint es natürlich, zuerst einen einfachen Fall zu betrachten: Die erzwungene Schwingung eines Pendels, bei dem die rücktreibende Kraft nichtlinear von der Auslenkung abhängt. Zur Realisierung solch eines Systems nehme man das Pohl'sche Rotationspendel - es ist wohl bereits an vielen Gymnasien vorhanden - und setze eine

kleine Zusatzmasse (Unwucht) darauf. So entsteht ein  $\omega$ -förmiges Potential mit einem instabilen und zwei stabilen Gleichgewichtspunkten.

An diesem Experiment lassen sich viele der grundlegenden Phänomene der nicht-linearen Physik und des deterministischen Chaos studieren:

- ◆ Abhängigkeit der Eigenfrequenz von der Amplitude.
- ◆ Definition und Bedeutung von Begriffen wie Potential, Attraktor, Liapunov-Exponent, Phasenraum, Fourieranalyse, "Intermittency", ...
- ◆ Der Weg von der harmonischen Schwingung über Bifurkationen zum Chaos.
- ◆ Die Aufnahme des Feigenbaum-Diagramms.
- ◆ Die Beschreibung des Attraktors auf einem Torus.
- ◆ Die Existenz von "Fenstern" im Feigenbaum.
- ◆ Unterschied von Rauschen und Chaos.
- ◆ Die Sensibilität von den Anfangsbedingungen, daraus entwickelt sich der "seltsame Attraktor".
- ◆ Die Existenz von verschiedenen Schwingungsmoden und die Aufnahme der Einzugsbereiche für diese beiden Attraktoren. Daraus resultierende Separatrix (Trennungslinie zwischen den Einzugsbereichen) und hyperbolischer Punkt.
- ◆ Einschwingvorgänge im Phasenraum; stroboskopisch mit einer bestimmten Erregungsphase dargestellt.

All diese Inhalte können am Experiment studiert und erklärt werden, der Computer dient als Darstellungs- und Analysehilfe.

**Programmbeschreibung:**

Programmname:           ROPENEXP

Benutzersprache:        Deutsch

Hardwarekonfiguration: · Handelsübliches Pohl'sches Drehpendel  
                          ergänzt durch:  
                          · Schrittmotor zur Erregung (hoher Gleichlauf und Reproduzierbarkeit) und entsprechender Ansteuerungselektronik;  
                          · Drehpotentiometer zur Aufnahme der momentanen Winkelstellung;  
                          · Lichtschranke zur Aufnahme der Erregungsperiode und -phase.  
                          · Stromkonstanter für die Wirbelstromdämpfung.  
                          · Zwei Analog-Digital-Wandler (Winkel und Dämpfung).  
                          · Ein Digitaleingang (für Lichtschranke).

Programmiersprache:    Turbo-Pascal 4.0

Computerkonfiguration: MS-DOS-Computer mit EGA oder VGA-Graphik; math. Co-Processor empfehlenswert.

Computervorkenntnisse: keine

Experimentvariablen: Dämpfung; Periode und Amplitude der Erregung; Zusatzmasse

Programmvariablen: Darstellungsmaßstäbe;  
Grenzen zur Berechnung der Fourierkomponenten;  
Erregungsphase für stroboskopische Darstellung im Phasenraum

- Graphiken:
- gemessenes Winkel-Zeit-Diagramm;
  - errechnetes Winkelgeschwindigkeit-Zeit-Diagramm;
  - Phasenraum (Winkel über Winkelgeschwindigkeit);
  - Häufigkeitsverteilung der unteren Umkehrpunkte der Schwingung (entspricht einer Linie im Feigenbaumdiagramm);
  - Verschiebung und Maßstabsänderung auf Tastendruck;
  - Darstellung der gemessenen Werte für Erregungsperiode und Dämpfung in SI-Einheiten;
  - Möglichkeit für Fourieranalyse der Schwingung;
  - Großdarstellung des Phasenraumes mit Option für stroboskopische Darstellung synchronisiert mit frei wählbarer Erregungsphase (hiermit lassen sich die Einzugsbereiche messen);

Autor: R. Worg

### Beispiele:

Abb.2)

Chaotische Bewegung des Pendels:  
links oben: Winkel über Zeit;  
links unten: Winkelgeschwindigkeit über Zeit;  
rechts unten: Phasenraum: Winkel über Winkelgeschwindigkeit;  
rechts oben: Häufigkeitsverteilung der unteren Umkehrpunkte entspricht Punktmenge für den vorliegenden Dämpfungswert.

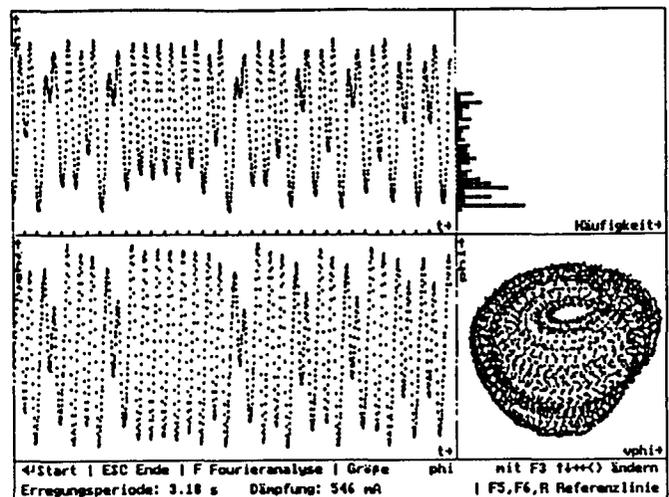
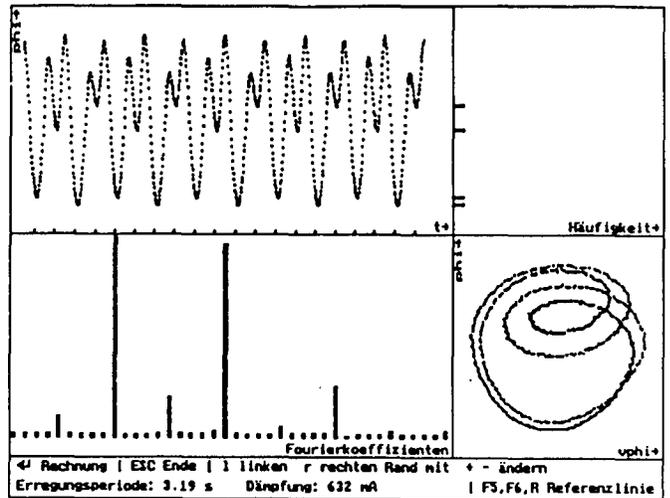


Abb.3)

Die zweite Bifurkation: Deutlich sind die Aufspaltungen im Phasenraum erkennbar. Entsprechend ergeben sich vier Linien in der Häufigkeitsverteilung. Die Fourierkomponenten (links unten) zeigen nicht nur die erwarteten subharmonischen Komponenten, sondern auch Oberschwingungen.



Zur Ergänzung des Experimentes existiert das Programm SYNTHE: Es kann Schritt für Schritt eine komplizierte Schwingung aus harmonischen Schwingungen zusammengesetzt werden. Hiermit läßt sich der Einfluß der einzelnen Fourierkomponenten der Messung auf die Gesamtschwingung untersuchen.

Neben dem oben beschriebenen Experiment wurde noch die Simulation des Rotationspendels programmiert. Hier können Anfangsort, und -geschwindigkeit frei gewählt werden. Das Programm kann zu Voruntersuchungen für Dämpfung und Erregungsperiode des Experimentes benutzt werden. Außerdem kann hiermit auch die Selbstähnlichkeit des "seltsamen Attraktors" verdeutlicht werden. Dazu werden viele Simulationen parallel gerechnet, deren Anfangsbedingungen sehr nahe aneinander liegen. Die stroboskopische Darstellung des Phasenraumes zeigt den Attraktor, Ausschnittsvergrößerungen die Selbstähnlichkeit.

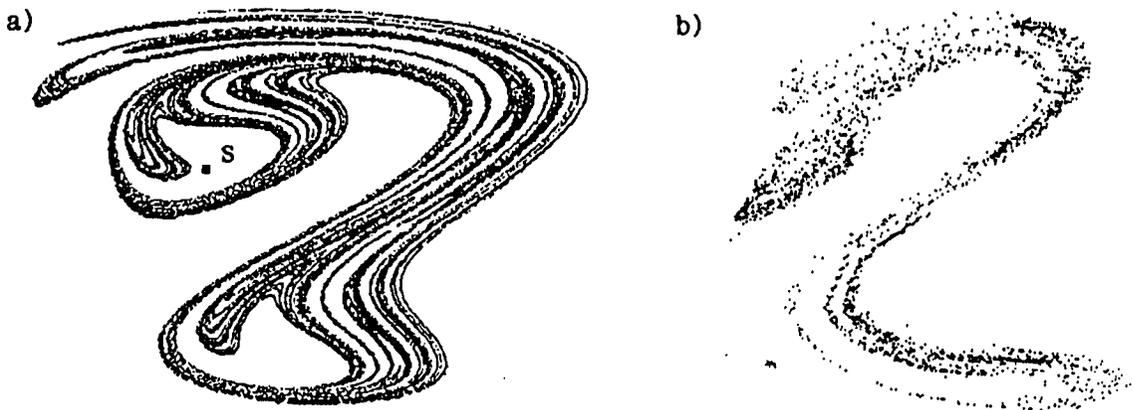


Abb.4) Der "seltsame Attraktor" des verstimmtten Rotationspendels:

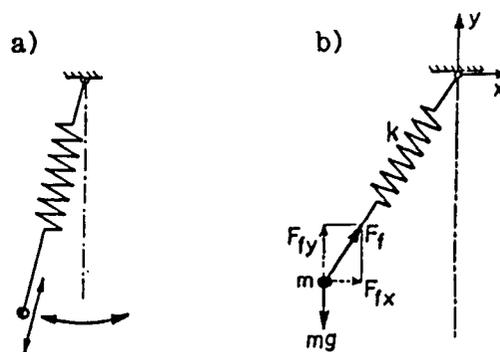
- a) Gewonnen aus einer parallel gerechneten Simulation von 400 eng beieinanderliegenden Startpunkten (Startviereck S; Abbruch nach 192 Anregungsperioden). Die Punkte wurden jeweils zur Phasenlage  $90^\circ$  gezeichnet.
- b) Entsprechendes Diagramm aus dem Experiment bei ähnlichen Parametern (Abbruch nach 2500 Anregungsperioden).

## 2. Simulation des ebenen elastischen Pendels. (siehe [6],[7])

Klassische Schulbeispiele für Schwingungen sind das Federpendel und das Fadenpendel, letzteres für kleine Auslenkungen. Beide haben die "physikalisch angenehme" Eigenschaft, daß sie die harmonische Schwingung darstellen. Aber schon eine Kombination aus beiden; d.h., ein Federpendel, welches in der Ebene schwingt, symbolisiert ein fast "unästhetisches" System: Es ist nicht geschlossen lösbar - nicht integrierbar. Dabei sind die Kräfte so einfach darzustellen und dementsprechend die Bewegungsgleichungen mit elementaren Kenntnissen aufzustellen.

Abb.5) Das "ebene elastische Pendel":

- a) Winkelstellung und Federlänge sind variabel.
- b) Kraftkomponenten zur Aufstellung der Bewegungsgleichungen des Massenpunktes.



Die Resultate aus der Simulation sprechen allerdings den ästhetischen Sinn des Betrachters wieder an und fordern ihn heraus, Näheres darüber herauszufinden. Dieses zweidimensionale, nichtlineare System gibt die Möglichkeit, **periodischen**, **quasiperiodischen** und **chaotischen Bahnen** zu untersuchen. Als praktische Hilfe zur Analyse und Definition dieser verschiedenen Bahntypen erweist sich das **Poincaré-Diagramm**, ein Schnitt durch den vierdimensionalen Phasenraum.

### Programmbeschreibung:

- Programmname: EEP
- Versionen: Deutsch und Englisch
- Programmiersprache: Basic
- Computerfiguration: MS-DOS-Computer oder Apple II
- Computerkenntnisse: keine
- Variablen: Anfangsort und Geschwindigkeit; Pendelparameter; Maßstab und Zeitschritt; Wahl von neuen Anfangsbedingungen bei gleicher Energie.
- Graphiken: Spur der Pendelmasse (x-y-Diagramm); Poincaré-Schnitt (vy-y-Diagramm für vx = 0).
- Datenausgaben: optional momentane Energien und Energieabweichung (zur Kontrolle der Simulation)
- Autoren: A. Weingart, R. Worg

Beispiele:

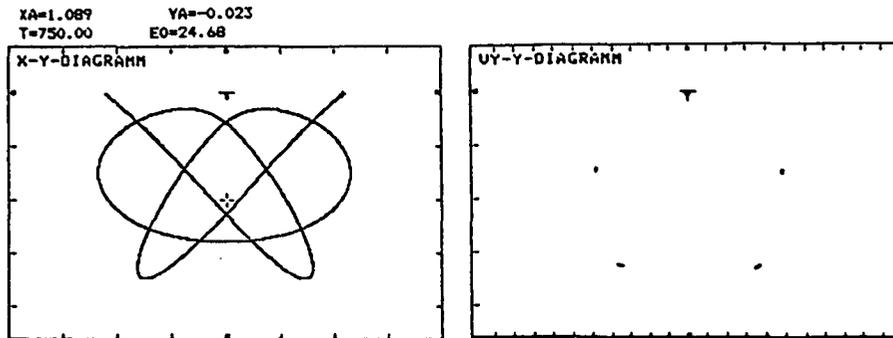


Abb.6) Periodische Bahn der Pendelmasse und zugehöriges Poincaré-Diagramm. (T: Koordinatenursprung; +: Ruhelage der an der Feder hängenden Masse). Der Poincaré-Schnitt zeigt fünf diskrete Punkte.

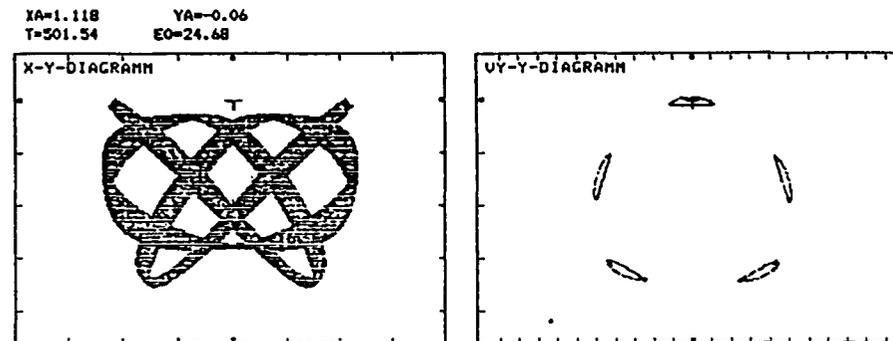


Abb.7) Veränderte Anfangsbedingung: Die streng periodische Bahn wird quasi-periodisch, im Poincaré-Diagramm erscheinen fünf linsenförmige Linien.

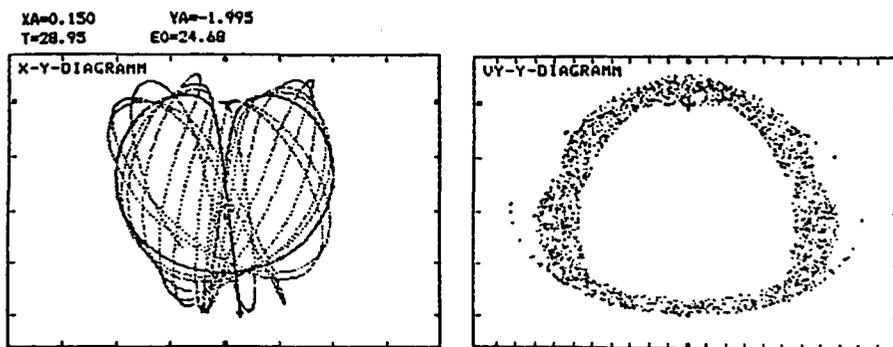
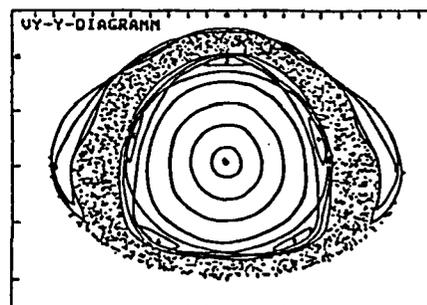


Abb.8) Das Poincaré-Diagramm einer chaotischen Bahn ergibt eine Punktwolke.

Abb.9) Poincaré-Diagramm für viele verschiedene Anfangsbedingungen bei jeweils gleicher Anfangsenergie.



### 3. Das sphärische Magnetpendel. (siehe [8],[9])

Ein Permanentmagnet, an einem Faden aufgehängt, kann sich über einer horizontalen Ebene (x,y) bewegen, auf welcher andere Permanentmagnete angebracht sind. In einfacher Form gibt es die Anordnung als Spielzeug. Bei geeigneter Stellung der Magnete läßt sich gut beobachten, wie das Pendel bei sehr großen und sehr kleinen Amplituden (fast) harmonisch schwingt, dazwischen aber, besonders bei Annäherung an einen Potential-Sattelpunkt, chaotisch wird. Wir haben somit ein leicht realisierbares Experiment für ein nichtharmonisches, schwingungsfähiges System in zwei Dimensionen. Um die Bahn des Pendels aufzunehmen wird das Datenerfassungssystem ORVICO ([17]) verwendet. Die so im Computer abgespeicherten Bahndaten können dann rechnerisch weiterverarbeitet werden. Interessant ist zunächst die Klassifikation von streng periodischen, quasiperiodischen oder chaotischen Fällen. Hierfür wird ein Poincaré-Schnitt durch den vierdimensionalen Phasenraum durchgeführt (hier Darstellung von Winkel versus Winkelgeschwindigkeit für jeden Umkehrpunkt der Bahn, also bei Radialgeschwindigkeit gleich null).

Folgende Phänomene bieten sich zur Behandlung an:

- ◆ Unterscheidung verschiedener Bahntypen
- ◆ Einfluß der Potentialform
- ◆ Einfluß der Dämpfung
- ◆ Wechsel verschiedener Bahntypen
- ◆ Symmetrien in Bahn bzw. Poincaré-Schnitt
- ◆ Nichtreproduzierbarkeit im chaotischen Fall

#### Programmbeschreibung:

Programmname: ORVMAGPE

Hardwarekonfiguration: • sphärisches Pendel (Länge 1m);  
• Pendelmasse ist ein Permanentmagnet;  
• Leuchtdiode in Pendelmasse für Datenaufnahme;  
• weitere Permanentmagnete variabel unter dem Pendel fixierbar;  
• Datenaufnahme mit Videokamera und ORVICO-Interfacekarte;

Software: Grundprogramm zu ORVICO erweitert mit Poincaré-Schnitt-Algorithmus. (Turbo Pascal 4.0)

Computerkonfiguration: MS-DOS-Computer mit EGA-Graphik

Computervorkenntnisse: keine

Experimentvariablen: Startbedingungen;  
Magnetkonstellation (Potential);

Programmvariablen: Maßstab, Verschiebung usw.  
Graphiken: Pfad der Pendelmasse zweidimensional von unten gesehen;  
Poincaré Diagramm:  $v$  aufgetragen gegen  $\phi$  für jeden Umkehrpunkt  $v_r = 0$ .  
Diskettenoperationen: Speichern und Laden der Daten nach dem ORVICO-Grundprogramm.  
Autoren: R. Dengler (ORVICO), R. WORG (Auswertung)

Beispiele:

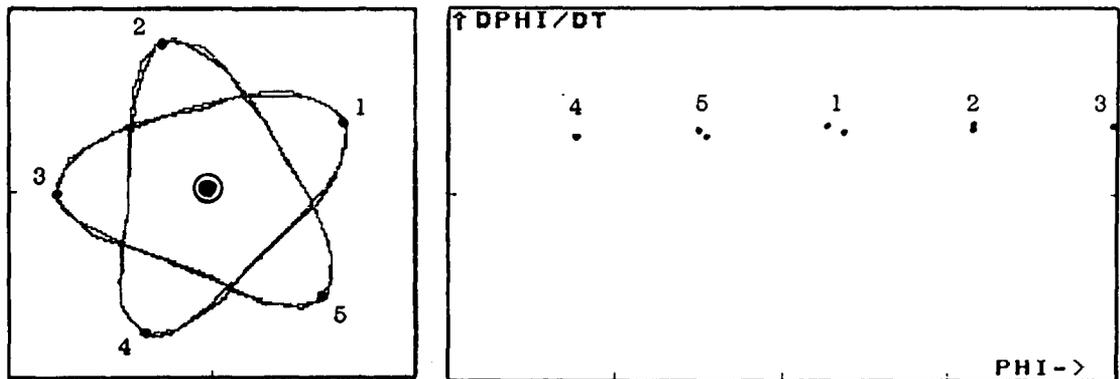


Abb.10) Periodische Bahn um einen abstoßenden (⊙) Magnet in der Mitte, das zugehörige Poincaré-Diagramm zeigt diskrete Punkte.

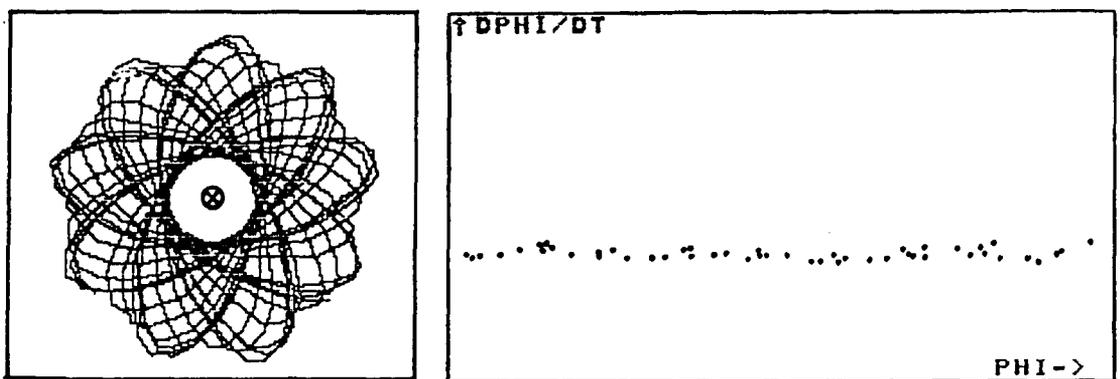


Abb.11) Quasiperiodische Bahn, das Poincaré-Diagramm erscheint als Linie.

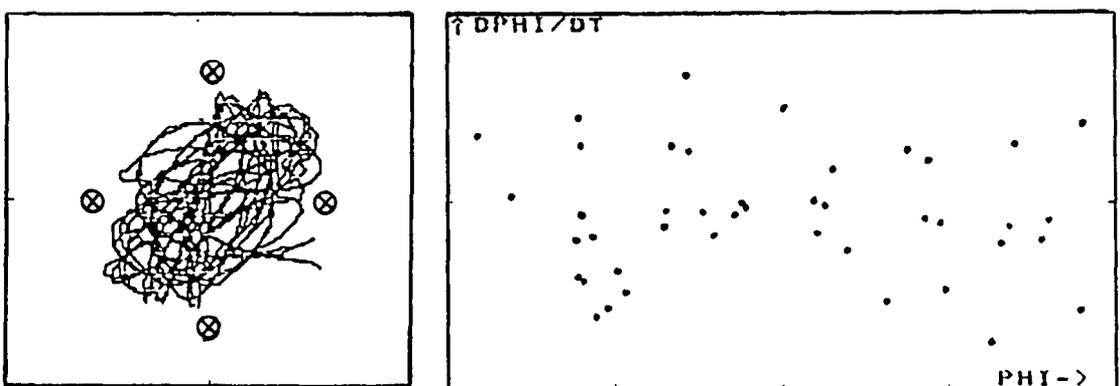


Abb.12) Chaotische Bahn mit entsprechender "Punktwolke" (4 abstoßende Magnete).

Beim Experimentieren mit diesem Pendel wird natürlich nicht nur das physikalische Interesse an einem unbekanntem Objekt geweckt, sondern der Benutzer aufgrund der ansprechenden Bilder auch angeregt, bestimmte Bilder zu erzeugen.

Nach einigem Probieren wünscht der Student sich hierfür Hilfen aus der Physik; so wird ein praktischer Nutzen für die Benutzung eines höheren Abstraktionsniveau - dem Potential - erkannt. Hierfür wurde das Programm **MAGPOTDREIDIM** geschrieben (Apple II), welches es erlaubt, das entsprechende Potential aus Gravitations- und Magnetpotentialen dreidimensional darzustellen.

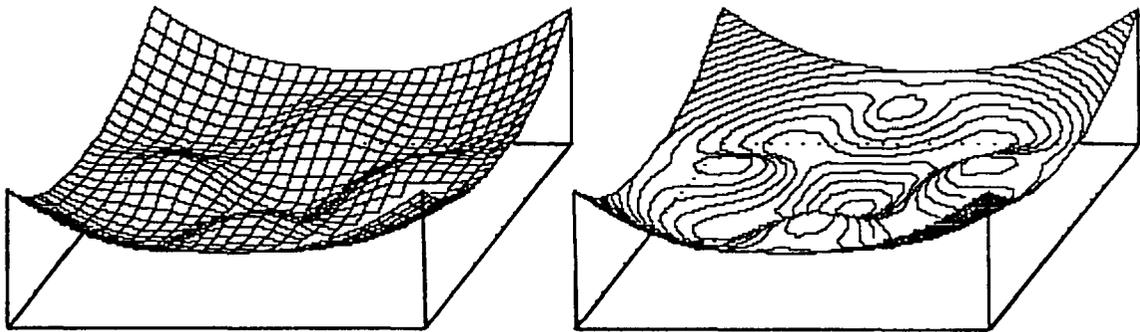


Abb.13) Potential für das Magnetische Pendel mit vier abstoßenden Permanentmagneten.(links: Fläche als Netz; rechts: Höhenlinien)

**4. PLANSYS - Simulation zum eingeschränkten Dreikörperproblem** (siehe [10],[11])  
Satellitenbahnen, z.B. die Bahn des Mondes als Erdsatellit, sind als Modellfall für das Zweikörperproblem schon vor langer Zeit in die Schulphysik eingegangen. Durch die Möglichkeit der Computerberechnung lassen sich Bewegungen von mehr als zwei Himmelskörpern studieren. Das Medium Computer soll hierbei nicht weitere Detailkenntnisse anbieten; sondern vor allem das Konzept des "exemplarischen Lernens" stützen: Anhand von realen Beobachtungen oder Gedankenexperimenten wird die physikalische Intuition gefördert und das Basiswissen gefestigt. Alle durch die Simulation erreichten Ergebnisse müssen in der Diskussion plausibel gemacht werden.

Das reine Zweikörperproblem läßt sich einfach ausweiten: Zu zwei miteinander wechselwirkenden Körpern (z.B. Sonne und Jupiter) bringt man einen dritten Körper von vergleichsweise kleiner Masse hinzu. Die Masse soll so klein sein, daß die Bahnen der beiden anderen praktisch nicht beeinflußt werden. Damit liegt es nahe, diesen Sonderfall des Dreikörperproblems zu lösen, indem man die Bahnen der beiden großen Körper aus dem Zweikörperproblem übernimmt. Findet die Bewegung des kleinen Körpers innerhalb einer Ebene (eines Inertialsystems) statt, und beschreiben die beiden anderen Kreisbahnen, so liegt das sogenannte "eingeschränkte" (oder "restringierte") Dreikörperproblem vor.

Mit dieser Näherung lassen sich interessante Phänomene des Sonnensystems studieren:

- ◆ Existenz und Stabilität von exotischen Mondbahnen;
- ◆ Auffälligkeiten in der Asteroidenverteilung (z.B. Lücken und Anhäufungen);
- ◆ Librationspunkte und ihre Stabilität.
- ◆ Einfluß der Sonne auf die Mondbahn;

Beim Studium dieser Beispiele sollen klassische Lerninhalte vertieft werden:

- ◆ die Kepler'schen Gesetze;
- ◆ Inertialsystem - Rotierendes Bezugssystem (Epizyklen);
- ◆ Zusammenspiel von Gravitations- Zentrifugal- und Corioliskraft.

**Programmbeschreibung:**

- Programmname: PLANSYS  
Versionen: Deutsch und Englisch  
Programmiersprache: Turbo-Pascal 4.0  
Computerkonfiguration: MS-DOS-Computer mit EGA- oder VGA-Graphik; math. Coprozessor empfehlenswert.  
Computervorkenntnisse: keine (Menu-gesteuerter Ablauf)  
Variablen: Massenverhältnis von Sonne und Planet; Startort und Startgeschwindigkeit des dritten Körpers; Realdaten aus dem Sonnensystem abrufbar.  
Graphiken: Inertialsystem und rotierendes Bezugssystem; Diagramme wie Energien, Abstand vom Schwerpunkt bzw. Planeten und Winkel zum Planeten; Maßstabsänderung und Verschiebung möglich.  
Datenangaben: momentaner Ort u. Geschwindigkeiten in versch. Bezugssystemen, Energien usw.  
Diskettenoperationen: Speichern und Laden von Datensätzen und Bildern.  
Autor: R. Worg

**Beispiele:**

Abb.14)

Exotische Mondbahn mit "Spitzen" im rotierenden Bezugssystem  $\Sigma'$ : Ein Körper startet mit  $v'=0$  auf der Bahn der Erde; es ergibt sich eine geschlossene Bahn. Nach 2,5 Erdumläufen bricht der Trabant aus, die Bahn ist nicht stabil.

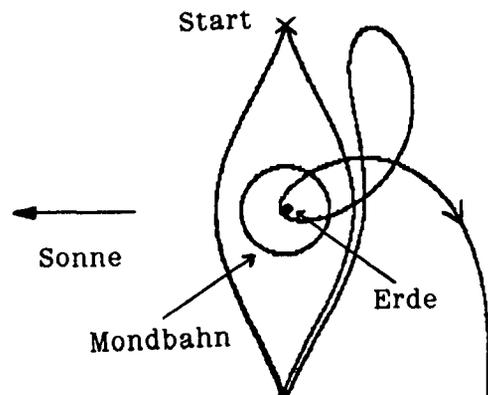


Abb.15)

Bahn eines möglichen Jupitermondes. Die Bahn erweist sich in der Simulation als stabil.

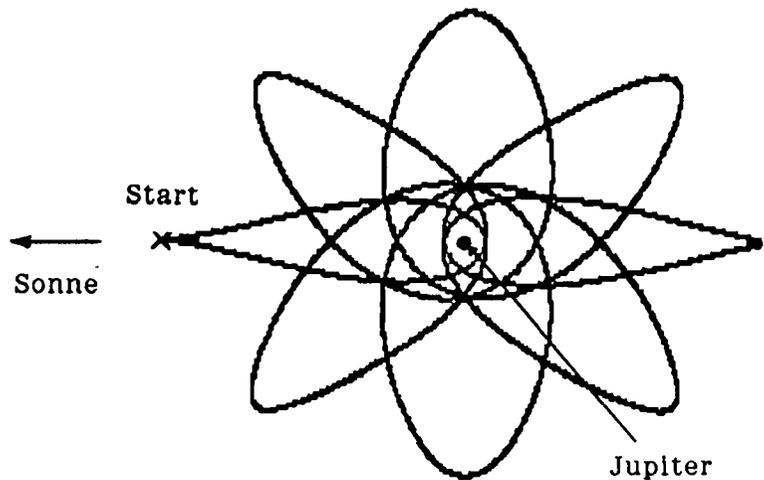
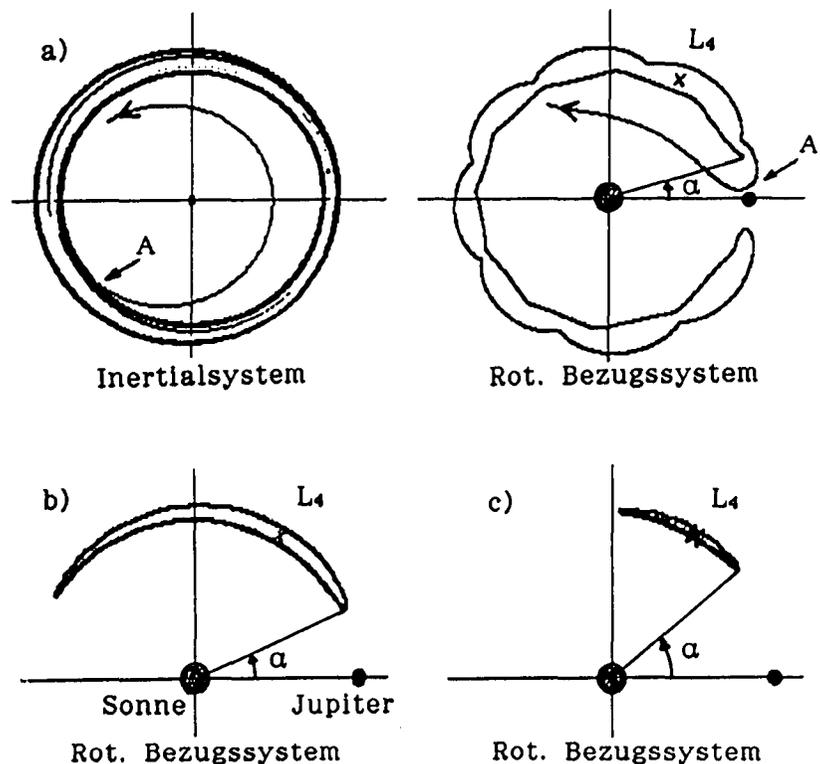


Abb.16)

Ein Planetoid startet auf der Jupiterbahn mit der Umlaufgeschwindigkeit von Jupiter. Abhängig vom Startwinkel  $\alpha$  ergeben sich unterschiedliche Bahnen. In a) wirkt die Annäherung an Jupiter drastisch - die jeweilige Bahn wird gewechselt. In b) und c) ergeben sich nierenförmige Bahnen, die stabil bleiben.



### 5. MOLDYN - Simulation zur Molekulardynamik. (siehe [12],[13])

Makroskopische Phänomene auf mikroskopischer Ebene erklären zu wollen ist eine didaktische Aufgabe von besonderem Reiz: Es wird ein Schritt in Richtung auf tieferes physikalisches Verständnis getan, und es wird ein höherer Anspruch an das Vorstellungsvermögen, die "innere Anschauung" gestellt.

In dieser Situation bietet sich die Computersimulation an. Zwar kann der Compu-

ter das Realexperiment nicht ersetzen, aber gerade hier bietet er Möglichkeiten, die man im Realexperiment nie hat: Man kann den Teilchen ihre Anfangsbedingungen und ihre Wechselwirkung nach Wunsch vorgeben und zusehen, was sich daraus entwickelt; darüber hinaus kann man neben dem mikroskopischen Geschehen die (daraus berechneten) makroskopischen Daten darstellen und so zunächst die typische Denkweise, die Gegenüberstellung makroskopisch-mikroskopisch, initiieren und schließlich ausschärfen bis zum Bedürfnis nach Aussagen über gesetzesmäßige Zusammenhänge dazu.

MOLDYN simuliert die Dynamik eines Ensembles von bis zu 250 Teilchen in zweidimensionaler Anordnung. Als paarweise Wechselwirkung der Teilchen kann gewählt werden: "harte Kugeln", "Hookesche Feder" oder "Lennard-Jones-Potential". Die Randbedingungen und die Startparameter können in vielfältiger Weise variiert werden. Ausgehend von einer frei wählbaren Ausgangskonstellation (Orte, Impulse) wird Schritt für Schritt nach dem Euler-Formalismus deren zeitliche Entwicklung berechnet und laufend dargestellt. Zur Vermeidung von Randeffekten kann die Option "periodische Randbedingungen" gewählt werden. Aus den vielen mikroskopischen Daten entstehen makroskopische Aussagen (Temperatur, Druck, Energien, Geschwindigkeitsverteilung, Paarkorrelationsfunktion), die ebenfalls dargestellt werden.

So lassen sich mit MOLDYN verschiedene Problemstellungen plausibel machen und interaktiv studieren:

◆ Demonstration bekannter makroskopischer Phänomene in einem mikroskopischen Teilchenmodell:

- |                                     |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| - Gitterstrukturen                  | - Thermische Längenausdehnung |
| - Aggregatzustände, Phasenübergänge | - Wärmeleitung                |
| - Kristallisation                   | - Mischungen, Legierungen     |
| - Einfluß von Heizen und Kühlen     | - Stöße, Stoßwellen           |

◆ Gewinnung weiterführender Erkenntnisse durch Studien im mikroskopischen Modell:

- Thermalisierung
- Leerstellendiffusion
- Diffusion in Flüssigkeiten
- Grenzen eines physikalischen Modells, Vergleich mit Realdaten
- Bearbeitung von Wenigteilchensystemen (Impuls und Drehimpuls, chaotische Bewegung, u.a.)

**Programmbeschreibung:**

**Programmname:** MOLDYN  
**Versionen:** Deutsch und Englisch  
**Programmiersprache:** Turbo Pascal 4.0  
**Computerkonfiguration:** MS-DOS Computer, math. Coprozessor und EGA- oder VGA-Graphik empfehlenswert.  
**Computervorkenntnisse:** keine (Menu-gesteuerter Ablauf)  
**Variablen:** Teilchenzahl; Startpositionen (kubisch, hexagonal oder einzeln); Massen; Wirkungspotential (Lennard-Jones, quadratisch oder "harte Kugeln"); Zeitschritt.  
**Graphiken:** Spurbild bzw. momentane Lage der Teilchen; Geschwindigkeitsvektoren; Geschwindigkeitsverteilung (theoretische Maxwellverteilung einzeichnenbar); Paarkorrelationsfunktion, d.h. Verteilung der Abstände zwischen den einzelnen Teilchen (Potential einzeichnenbar); Maßstabsänderung und Verschiebung auf Tastendruck  
**Datenangaben:** Temperatur, Energien und Druck in momentanen und gemittelten Werten.  
**Diskettenoperationen:** Speichern und Laden von Datensätzen und Bildern  
**Autoren:** H. Deger, R. Worg

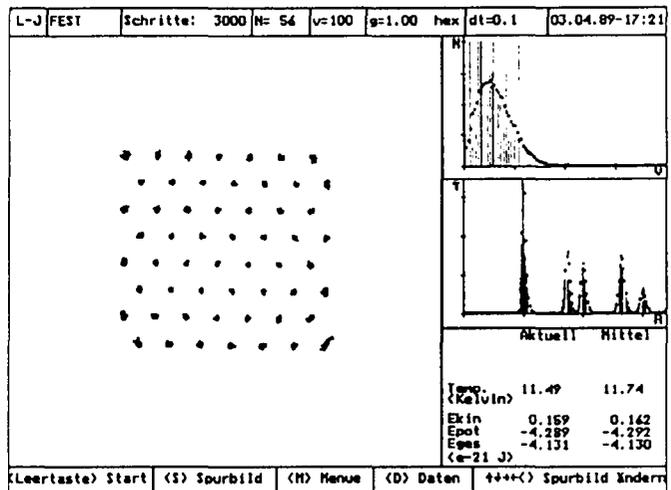
**Beispiele:**

Abb.17)

Phasenübergang eines Lennard-Jones-Ensembles:

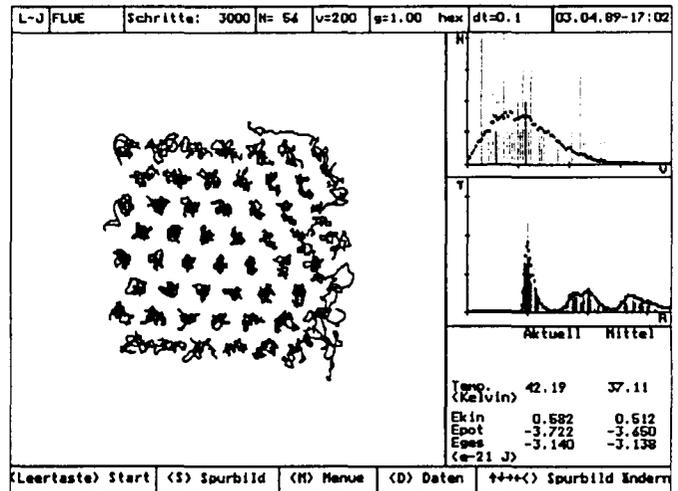
**a) Fester Körper:**

Die anfängliche hexagonale Startaufstellung bleibt erhalten. Die durch Lücken voneinander abgesetzten schmalen Maxima der Paarkorrelationsfunktion (Diagramm in der Mitte der rechten Spalte) zeigen eine Fernordnung über mehr als 5 Nachbarn.



b) Schmelzender Festkörper:

Die hexagonale Struktur ist lokal und temporär noch vorhanden (Nahordnung), aber es ist deutlich zu erkennen, daß Teilchen auf andere Gitterplätze wechseln. (Die Lücken in der Radialverteilung sind verschmiert; einzelne Maxima überlagern sich.) Das Ensemble ist insgesamt noch zusammengehalten ( $E_{ges} < 0$ ).



c) Dichtes Gas:

Die Teilchen sind nicht mehr gebunden ( $E_{ges} > 0$ ), man sieht freie Bewegungen und Stöße. Der Kasten ist als feste Wand zu betrachten; dort auftreffende Teilchen werden reflektiert.

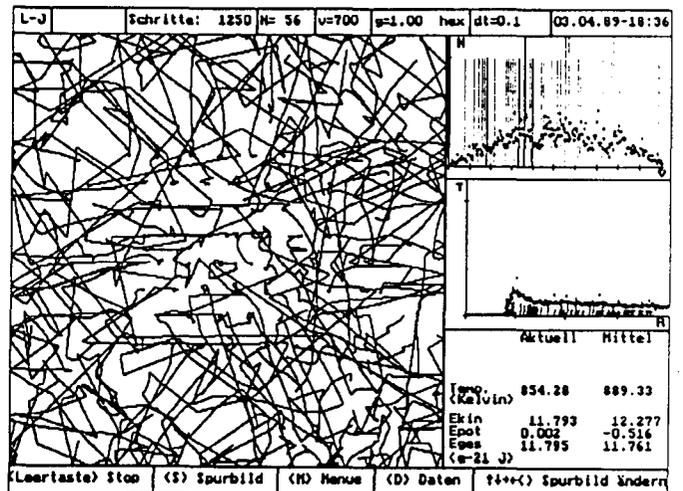
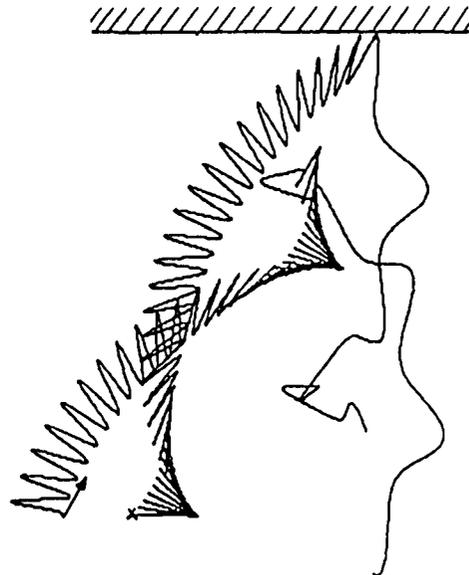


Abb.18)

Bewegung von zwei Teilchen gleicher Masse, die durch eine Feder verbunden sind: Die Anfangsbedingungen sind durch Geschwindigkeitspfeile gekennzeichnet. Die Figur zeigt die Spur der Teilchen. Daraus kann abgeleitet werden, wie sich die Impulse vor und nach dem Stoß an die Wand ändern.



## 6. Weitere Programme

Neben den ausführlicher beschriebenen Programmen entstanden in den letzten Jahren noch weitere Programme. Diese sollen im Folgenden nur kurz angesprochen werden, weitere Informationen sind über den Autor zu erhalten.

Zum Bereich "Chaos" existiert eine Sammlung mit mathematischen Iterationsprogrammen. Sie behandeln folgende Detailthemen:

- ◆ Die **logistische Funktion**  $x_{n+1} = c \cdot x_n \cdot (1 - x_n)$
- ◆ Die **Koch'sche Kurve**, das **Sierpinski-Dreieck**; das **Black-Spleenwart-Farn**; zufälliges Wachstum von **"Wurzel-Formationen"** und **Baumwachstum** mit **Evolutionsbedingungen** als Beispiele für **fraktale Gebilde**.
- ◆ Bei einigen dieser Gebilde kann die **fraktale Dimension** berechnet und plausibel gemacht werden.
- ◆ Ein Programm zur Untersuchung der **fraktalen Dimension** von **zeitabhängigen Vorgängen** (anharmonische Schwinger, Rauschen, Bewölkungsdichte, Gehirnströme usw.) ist in Arbeit.

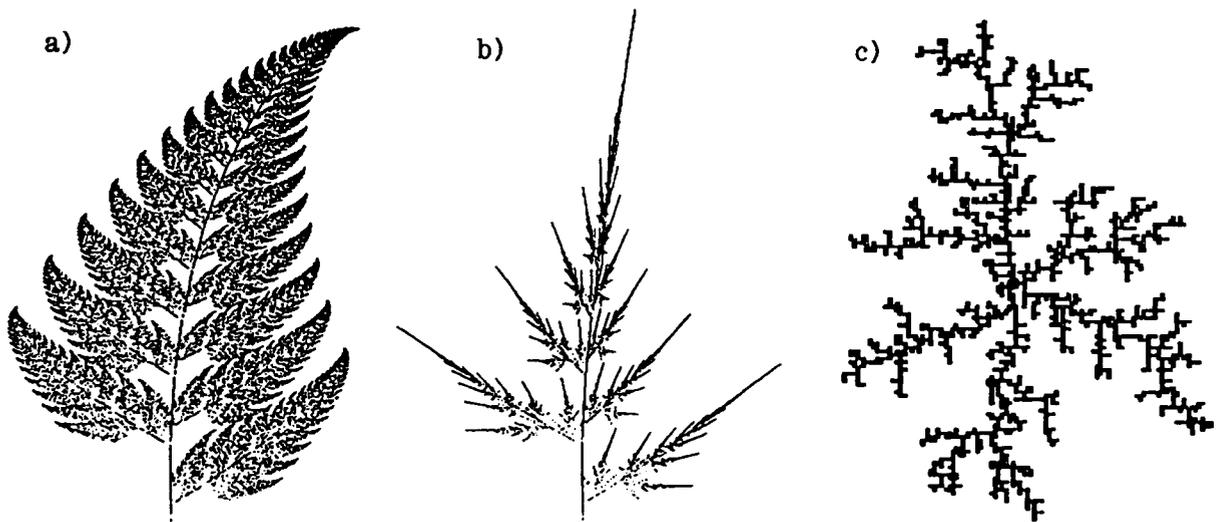


Abb.19) Beispiele fraktaler Gebilde:

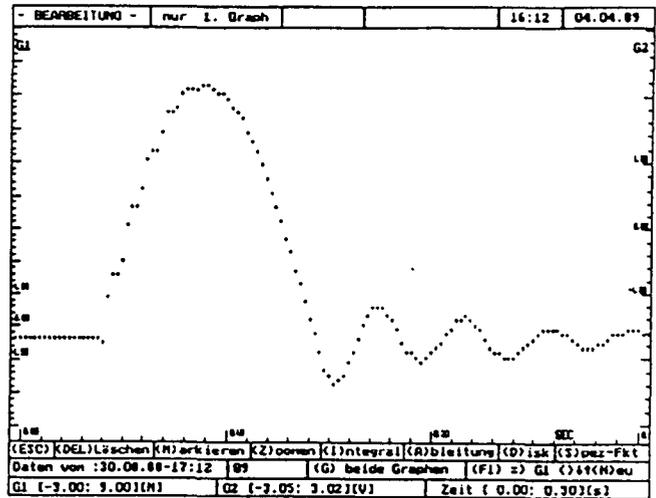
- a) Ein über eine iterative affine Abbildung generiertes Farnblatt. Deutlich ist die Selbstähnlichkeit z.B. zwischen Gesamtform und Teilblatt zu erkennen.
- b) Die gleiche Iteration wie in a) nur mit veränderten Abbildungsparametern.
- c) Zufälliges Wurzelwachstum: Ausgehend von einem "Keimpunkt" im Zentrum lagern sich zufällig wandernde Punkte an. Die Figur hat eine fraktale Dimension  $D_f=1,67$ .

Im Zusammenhang mit anderen Arbeiten wurden noch weitere Programme zur Datenaufnahme und Auswertung erstellt:

- ◆ **COMPUTEROSZILLOGRAPH:** Ein Programm zur Aufnahme, Darstellung und Auswertung von veränderlichen Spannungen. Das Programm ist so komfortabel gestaltet (zwei Kanäle, Trigger, Datenabspeicherung, Eichung, Graphikbearbeitung, Integration, Differentiation ...), daß es als vielseitiges Hilfsmittel für Labor- und Schulexperimente dient (für MS-DOS-Computer). [14]

Abb.20)

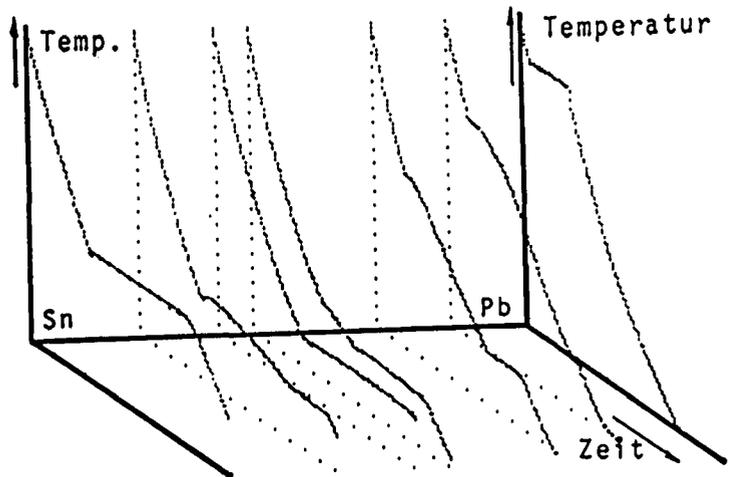
Dynamische Messung eines Stoßes auf der Fahrbahn. Als Aufnehmer wurde ein Dehnungsmeßstreifen verwendet, der auf der Stoßfeder aufgeklebt war.



- ◆ **PHADIA:** Zur Aufnahme von Phasendiagrammen bei Mischkristallen (z. B. Blei-Zinn) werden zuerst die Abkühlkurven für verschiedene Mischungsverhältnisse aufgenommen. Aus diesen Kurven kann die dreidimensionale und zweidimensionale Darstellung des Phasendiagramms gewonnen werden (für Apple II-Computer). [15]

Abb.21)

Dreidimensionales Phasendiagramm für Blei-Zinn (Nach rechts Mischungsverhältnis, nach oben Temperatur, nach vorne Zeit).



- ◆ **SUBACK:** Im Zusammenhang mit der Herstellung von Supraleitern wurde zum definierten Aufheizen und Abkühlen die nötige Soft- und Hardware für eine Ofensteuerung entwickelt (für C-64). [16]
- ◆ **ORVICO:** Die Aufnahme von zweidimensionalen Bewegungen erfordert normalerweise großen Aufwand. Mit Vidokamera und Computer kann dies in eleganter Weise geschehen. [17]

Neben den experimentunterstützenden Programmen sind noch zwei Simulationen zu erwähnen:

- ◆ **BEUGUNG AM SPALT:** Das Programm erklärt die Entstehung von Beugungsbildern für verschiedene Gitter- und Spaltformen. Die der Berechnung zugrundeliegende Zeigerdiagramm-Methode wird demonstriert und Beugungsbilder berechnet (Apple IIe). [18],[19]

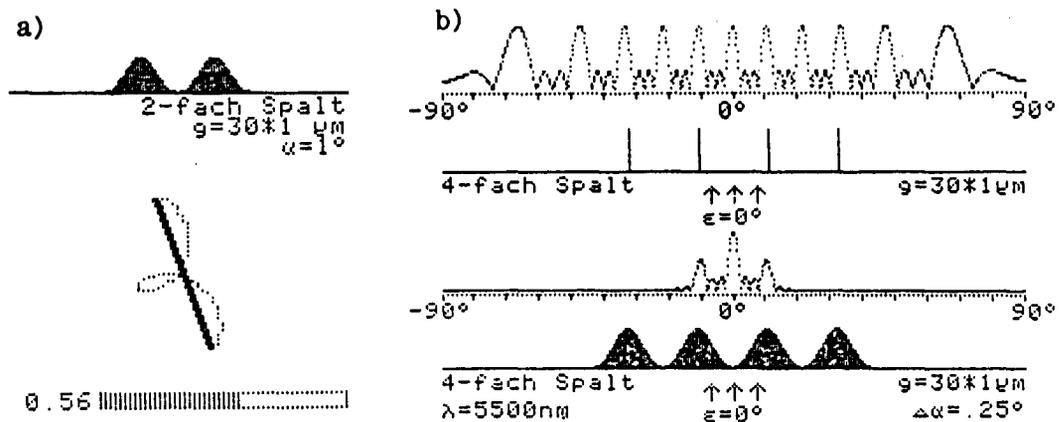


Abb.22) a) Zeigerdiagramm für einen Zweifach-Cosinusspalt (Beobachtungswinkel  $1^\circ$ )

b) Vergleich von idealem Vierfachspalt und Vierfach-Cosinusspalt.

- ◆ **FAHRSIMULATOR:** Ausgehend vom Themenkomplex Verkehr behandelt das Programm Einflüsse auf die geradlinige Bewegung von Fahrzeugen (Fahrzeugleistung und -form, Untergrund, Luftwiderstand usw.). Das Programm ist speziell für spielerisches Lernen konzipiert, dem Benutzer werden aber auch Daten und Diagramme zur Argumentation bereitgestellt. (für C-64) [20]

Mittlerweile hat sich für die Erstellung von Unterrichtssoftware die Programmiersprache Turbo Pascal in weiten Bereichen durchgesetzt. Diese Hochsprache erlaubt die Verwendung von Toolkits, die das Programmieren erheblich erleichtern. Aufbauend auf Erfahrungen eines Forschungsaufenthaltes in den USA wurden dort im M.U.P.P.E.T.-Projekt (Maryland University Project in Physics and Educational Technology) entstandene Toolkits ([21],[22]) weiterentwickelt:

- ◆ **MASKE:** Ein Maskeneditor zur komfortablen Erstellung und Nutzung von interaktiven Datenmasken.
- ◆ **WIND:** Ein Toolkit für spezielle Anwendungen der Graphik (Windowdefinitionen, Skalierung, Zoom, Zeichenhilfen, Graphikauswahl, Schriftdarstellung, Bildabspeicherung usw.)

Diese Hilfen liegen als Units für Turbo Pascal 4.0 vor.

## 7. Schlußbemerkungen

Die oben angeführten Computerprogramme sind fast alle im Rahmen von Forschungsarbeiten der wissenschaftlichen Mitarbeiter bzw. schriftlichen Hausarbeiten von Studenten entstanden. Dementsprechend würden wir uns freuen, wenn sie auch im Unterricht Anwendung finden. Interessenten können die meisten der Programme auf Anfrage erhalten, wenn sie entsprechende Leerdisketten mit spezifizierter Angabe der Computerkonfiguration und des Programmwunsches an folgende Adresse senden:

Universität München, Sektion Physik  
Lehrstuhl für Didaktik der Physik  
z. Hd. Roman Worg  
Schellingstr. 4  
8000 München 40.

## 7. Literatur

- [1] F. Bader, R. Sexl, "Computerprogramme zur Physik", Schroedel, Hannover, 1983
- [2] H. Dittmann, H. Jodl, "programm ideen physik", bsv, München, 1984
- [3] W. Bube, K. Luchner, H. Parsche, W. Kuhn (Hrsg.), Handbuch der experimentellen Physik: Sekundarbereich II. 11: "Computereinsatz", Aulis und Deubner, Köln, 1986
- [4] A. Petermann, W. Bube, "Digitale Meßwerterfassung im Physikunterricht" PhuD 1984, Heft 4 (286-296)
- [5] H. Parsche, BUS, Heft 9, bsv, 1986
- [6] L. Silverberg, K. Luchner, R. Worg, "Nichtlineare gekoppelte Systeme", PhuD 1986, Heft 1 (23-38)
- [7] K. Luchner, R. Worg, "Chaotische Schwingungen", PdN-Ph. 4/1986 (9-22)
- [8] K. Luchner, R. Worg, "Harmonische und chaotische Schwingungen", MNU 40/6, 1987 (337-343)

- [9] K. Luchner, "Introductory Experiments on Chaotic Motion", Proceedings of Int. Conference on Synergetics - Order - Chaos, 10/1987, Madrid, Spanien
- [10] K. Luchner, R. Worg, "Computerstudien zum eingeschränktem Dreikörperproblem", PhuD 1987, Heft 4 (284-298)
- [11] K. Luchner, R. Worg, "Das Dreikörperproblem - Computerunterstützte Diskussion einfacher Sonderfälle", DPG-Tagungsband, FA Didaktik, 1985
- [12] H. Deger, R. Worg: Programmdokumentation zu MOLDYN, Sektion Physik, Universität München (in deutscher und englischer Sprache)
- [13] H. Deger, K. Luchner, R. Worg, "Vielteilchensysteme - Interaktive Computerstudien", eingereicht bei PhuD, voraussichtliches Erscheinen 1990, Heft 1 oder Heft 2
- [14] H. Deger, M. Fröhlich, K. Luchner, R. Worg, "Strain Gauges - Basic Physics and Applications in Condensed Matter Physics", Proceedings of Int. Conference 'Teaching Modern Physics', München, 1988
- [15] H. Deger, R. Worg: Programmdokumentation zu PHADIA, Sektion Physik, Universität München
- [16] H. Deger, R. Worg: Programmdokumentation zu SUBACK, Sektion Physik, Universität München
- [17] R. Dengler, "Auge und Gehirn - Kamera und Computer" im vorliegenden Heft
- [18] C. Gndt, "Demonstration der Zeigerdiagramm-Methode und Erklärung von Beugungsphänomenen mit einem Computerprogramm", schriftliche Hausarbeit, Sektion Physik, Universität München, 1987
- [19] R. Worg, K. Luchner, "Computer simulation of phasor-diagramms in multibeam-interference", Proceedings of ICPE-Conference on Communicating Physics, Duisburg, 1985
- [20] H. Emde, "Fahr Simulator", schriftliche Hausarbeit, Sektion Physik, Universität München, 1986
- [21] K.A. Hennacy, Programm "EDITSCREEN", entstanden im M.U.P.P.E.T.-Projekt, College Park, USA, 1987
- [22] J.M. Wilson, Programme "WILTOOL" und "WILGRAPH", entstanden im M.U.P.P.E.T.-Projekt, College Park, USA, 1987