

## Vorwort

Dieses Buch beschäftigt sich mit der Klassischen Punktmechanik, dem starren Körper und der Wellengleichung. Das Buch endet mit der Relativistischen Mechanik. Es wendet sich an Studenten der Physik, der Mathematik und des Maschinenbaus. Für das Verständnis werden nur Grundkenntnisse der Analysis, der Linearen Algebra und der Experimentalphysik vorausgesetzt. Durch *zahlreiche Beispiele* und *viele Aufgaben mit ausführlichen Lösungen* ist das Buch zum Selbststudium geeignet. Die kompakte Darstellung ermöglicht eine schnelle und gezielte Wiederholung.

Die Mechanik ist eine zentrale Disziplin der Physik. Kein anderer Zweig der Physik hat einen solchen Reichtum an verschiedenen Formulierungen und Prinzipien entwickelt und hat so viele Verbindungen zu anderen Gebieten der Physik und zur Technik. In diesem Buch werden die wichtigsten Prinzipien der Mechanik vorgestellt und die Zusammenhänge mit anderen Gebieten der Physik eingehend besprochen. So können Leser einen Eindruck von dieser Vielfalt erhalten und erkennen, dass Fundamente der Wellenlehre, der Statistischen Mechanik und auch der Quantenmechanik bereits in der Klassischen Mechanik liegen.

Dieses Buch unterscheidet sich in den inhaltlichen Schwerpunkten und vor allem in der methodischen Ausführung von anderen Büchern. Dies äußert sich in den folgenden Merkmalen:

- *Zahlreiche und sorgfältig ausgewählte Beispiele* werden eng in den Lehrstoff eingearbeitet, um *grundlegende Aussagen illustrativ zu verdeutlichen*, neu auftretende Probleme und Schwierigkeiten praxisnah vorzubereiten und Rechenmethoden einzuüben. Darüber hinaus machen sie den Leser auch mit wichtigen Anwendungen im Maschinenbau bekannt. Die Beispiele werden durch einen grauen Rahmen markiert.  
Die *Aufgaben* am Ende der Kapitel mit *ausführlichen Lösungen* am Ende des Buches lehnen sich ebenfalls nah an den behandelten Stoff an und dienen demselben Zweck. Viele Ergebnisse werden eingehend diskutiert und mit Resultaten anderer Aufgaben verglichen.
- Nach Möglichkeit sollen Vorlesungen und Bücher auch die Freude an der Physik fördern. Wichtigste Grundbedingung dafür ist sicherlich eine klare und verständliche Darstellung des Stoffes. Darüber hinaus lässt sich Motivation wohl am ehesten durch Beispiele und Aufgaben steigern, die faszinierende Phänomene und Beobachtungen erklären oder auf Fragen eingehen, die schon lange interessieren, aber anderswo unbeantwortet bleiben. Dieser Gesichtspunkt war bei der Auswahl etlicher Aufgaben maßgebend; besonders in den Kapiteln 9, 12 und 13 kommen neben den vorherrschenden „Standardaufgaben“, die auch in Vorlesungen, Übungen und Prüfungen zu finden sind, zusätzlich *weiterführende Aufgaben* vor. Diese Aufgaben sollen vor allem Interesse und Freude an der Mechanik wecken. Daher lässt sich das Buch auch nach bestandener Prüfung immer wieder mit Gewinn lesen.
- In den Lösungen werden häufig *Kurven* dargestellt und interpretiert, die durch die numerische Integration analytisch nicht lösbarer Differentialgleichungen gewonnen wurden. Wegen der ständig wachsenden Bedeutung von numerischer Software und Rechenpaketen wird Erfahrung in der Auswertung numerisch berechneter Kurven immer wichtiger.

- Wichtigkeit und Nutzen der behandelten Themen werden, wie bereits ein kurzer Blick in das Inhaltsverzeichnis zeigt, meistens in einem eigenen Unterkapitel gewürdigt. *Bewertung und Einordnung* scheinen mir vor allem in der Klassischen Mechanik erforderlich zu sein, da es hier mehrere äquivalente Prinzipien gibt, die alle ihre eigene „Daseinsberechtigung“ haben.
- Zu dem Buch wurde das Programm **Mechanicus** entwickelt. Es wurde mit **MatLab** erstellt, hat eine grafische Benutzeroberfläche und ermöglicht die Untersuchung von 52 mechanischen Systemen: Rollenden und hüpfenden Bällen, Kreiseln, Pendeln, Oszillatoren, Satelliten und anderen Systemen. Direkt nach der *numerischen Lösung* der bereits fest installierten Dgln. können *zwei- und dreidimensionale Kurven*, *Fourierspektren* sowie (bei 43 Systemen) schnelle *3D-Animationen* betrachtet werden.

Das Programm liegt jetzt auch als **Exe-File** vor und läuft daher ohne **MatLab**.

Der Leser findet das Programm bei [www.wiley-vch.de/textbooks](http://www.wiley-vch.de/textbooks) (suchen Sie bitte nach „K“ wie Kuypers) unter dem Punkt „Dozentenmaterial“. Zugriff darauf erhalten Sie mit der E-Mail-Adresse [kuypers@wiley-vch.de](mailto:kuypers@wiley-vch.de) und dem

**Password C7HuZ.**

Weitere Informationen zu diesem Programm findet der Leser auf den Seiten VIII bis XI dieses Vorspanns.

- Zum Programm **Mechanicus** gehören über 80 *fotorealistische Filme* mit den Bewegungen von 31 wichtigen oder faszinierenden mechanischen Systemen. Wegen der Filme ist das Gesamtpaket knapp 4 GB groß. Die Animationen wurden mit dem Render-Programm **POV-Ray** erstellt. Die fertigen Filme im avi-Format können z. B. mit dem **Windows-Media-Player** oder – noch besser – mit dem **VLC-Media-Player** abgespielt werden, haben eine Farbtiefe von 3 Byte und größtenteils eine Auflösung von 1280x1024 Pixel. Die Filmlänge beträgt in der Regel 2 Minuten.

Momentaufnahmen einiger Filme findet der Leser auf den Seiten XII bis XVI dieses Vorspanns.

Im *Flussdiagramm* auf der folgenden Seite sieht der Leser übersichtlich, welche Kapitel essentiell sind und welche Kapitel er zusätzlich lesen kann. Das Flussdiagramm ermöglicht eine individuelle Stoffauswahl.

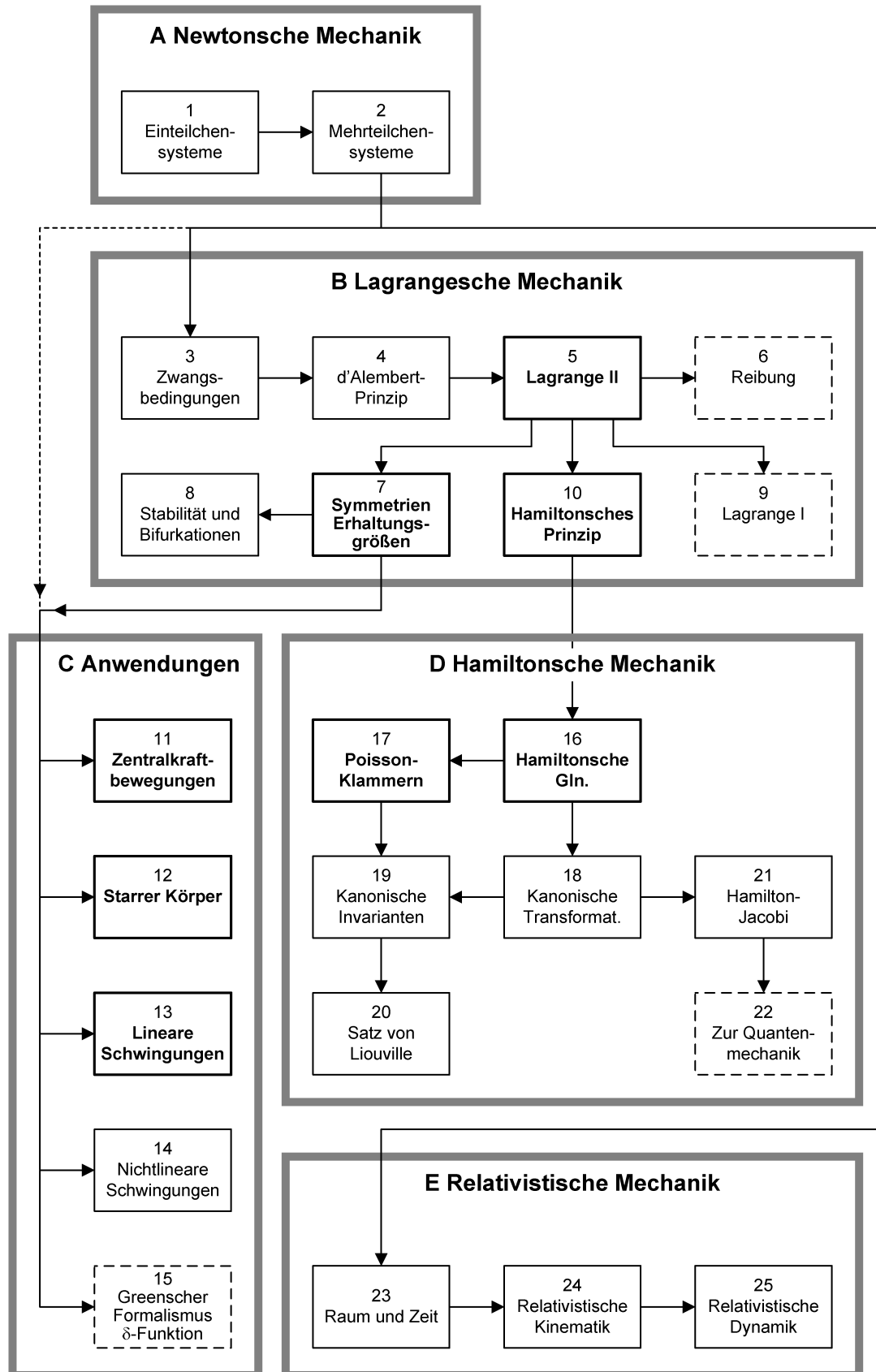
Auch hier möchte ich allen Lesern wieder für Hinweise und konstruktive Kritik danken. Prof. Dr. R. J. Jelitto hat mich auf ein Beispiel aufmerksam gemacht, in dem die Wirkung  $S$  einen Sattelpunkt hat. Mein besonderer Dank für viele Verbesserungsvorschläge gilt Dr. W. Happle.

Ich bin allen Lesern sehr dankbar, die durch Fragen, Bemerkungen oder Anregungen zur Verbesserung des Buches oder des Programmes **Mechanicus** beitragen. Meine E-Mail-Adresse lautet:

[friedhelm.kuypers@oth-regensburg.de](mailto:friedhelm.kuypers@oth-regensburg.de)

Regensburg, im Februar 2016

Friedhelm Kuypers



## MECHANICUS

Das Programm **MECHANICUS** liegt nun auch als **Exe-File** vor. Es wurde mit **MatLab** erstellt und arbeitet mit einer **graphischen Benutzeroberfläche**.

Das Programm enthält unter anderem über **80 bereits fertig gestellte fotorealistische Filme im avi-Format**. Sie können z. B. mit dem VLC-Media-Player abgespielt werden.

In **MECHANICUS** sind die Dgln. von 52 mechanischen und zwei nichtmechanischen Systemen einprogrammiert. Diese sog. *eingebetteten Dgln.* können nicht geändert werden und beschreiben rollende und hüpfende Bälle, Kreisel, Pendel, Oszillatoren, Satelliten und andere Systeme.

Die Dgln. werden numerisch gelöst. Anschließend können zu den berechneten Bewegungen zwei- und dreidimensionale Kurven sowie Fourierspektren betrachtet werden. Für 43 mechanische Systeme können auch direkt nach numerischen Berechnungen 3D-Animationen aufgerufen werden.

Das Programm **MECHANICUS** hat folgende Merkmale:

- Mit dem Programm lassen sich die Bewegungen der meisten mechanischen Systeme, die in Lehrbüchern und Vorlesungen behandelt werden, leicht berechnen und untersuchen.
- Der Benutzer, der das Programm nicht als Exe-File, sondern unter **MatLab** laufen lässt, kann auch eigene, sog. *benutzerdefinierte* explizite Dgln. 1. Ordnung eingeben. Dazu muss er zuerst der Reihe nach den Namen der Dgln., die Zahl der Dgln. und der Parameter sowie die Namen der Variablen und der Parameter eintippen. Anschließend sind die expliziten Dgln. einzugeben.
- Die größtenteils intuitive Bedienung ist für die benutzerdefinierten Dgln. (nach deren Eingabe) und für 53 fest installierte Dgln. *vollständig identisch*; nur der Kettenschwinger ist eine Ausnahme. Der Anwender muss die sehr einfache Bedienung nur *einmal* lernen.
- Die Dgln. können mit sieben verschiedenen mathematischen Verfahren, die **MatLab** zur Verfügung stellt, numerisch gelöst werden.
- Das Programm erkennt die meisten Eingabefehler und fordert den Benutzer zur Korrektur auf.
- Zwei Arten von **3D-Animationen** werden angeboten:
  - 1) 43 mechanische Systeme ermöglichen 3D-Animationen, die sich sofort nach der numerischen Lösung der Dgln. starten lassen (siehe die beiden Momentaufnahmen auf Seite XI). Diese Animationen sind relativ einfach: Sie enthalten zwar Glanzpunkte auf den Oberflächen, aber keine Schatten. Üblicherweise werden etwa 15 bis 30 Bilder pro Sekunde abgespielt.
  - 2) Für 31 mechanische Systeme hat der Autor über 80 aufwendige, **fotorealistische** 3D-Animationen erstellt (siehe die Momentaufnahmen auf den Seiten XII bis XVI).

Die Bilder und Texte auf den folgenden drei Seiten IX – XI geben dem Leser einen ersten Eindruck von den Eingabemasken und den Möglichkeiten von **MECHANICUS**. Eine **Bedienungsanleitung** steht im Verzeichnis **Hilfe** des Programmpaketes unter

Mechanicus\Hilfe\Bedienungsanleitung.doc    oder

Mechanicus\Hilfe\Bedienungsanleitung.pdf



### Pulldown-Menü Eingebettete Systeme

In MECHANICUS sind 54 Systeme fest installiert, deren Dgln. nicht geändert werden können. Im zweiten Menü kann im Untermenü **Eingebettetes System wählen** ein neues System gewählt werden. Das zweite und dritte Untermenü öffnen eine Acrobat- bzw. eine Word-Datei mit ausführlichen Kommentaren, evtl. auch mit Dgln. und Literaturhinweisen zum aktuell gewählten System.

**Parameter Input Section:**

Phi	0	Phi-Pkt	0.5
x-1	0	x-1-Pkt	0.35
<b>meter</b>			
Oszillatormasse m-1	1	Federkonstante D	10
Amplitude A-x	0.1	Omega	3.1
Pendelmasse m-2	0	Länge l	1
Reibung c-1	0.6	Reibung c-2	0.2

**Diagram:** A mass  $m_1$  on a horizontal surface is connected to a wall by a spring with constant  $D$  and a damper with coefficient  $c_1$ . The displacement is  $x_1$ . A pendulum of mass  $m_2$  and length  $l$  is attached to the mass  $m_1$  at an angle  $\varphi$ . The surface displacement is  $A_x \sin(\Omega t)$ .

**Integrationsparameter:**

T-Ende	12	Schrittweite	0.02
RelTol	1E-006	AbsTol	1E-008

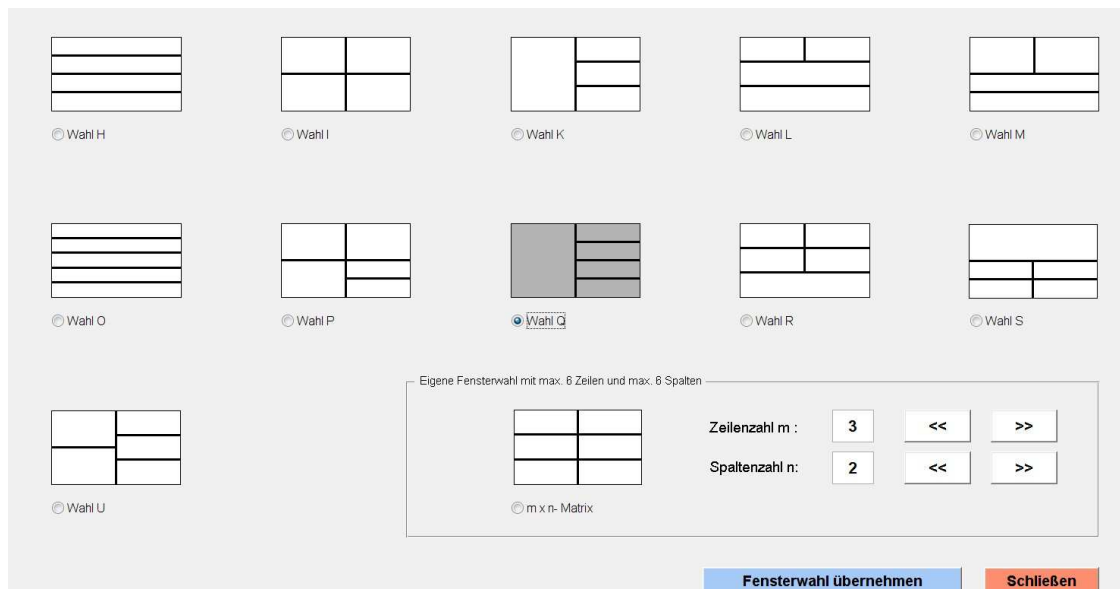
**Datei-Vorname:** m2 = 0.0

**Buttons:** Berechnen, Neue Grafik, Animation, Hauptmenü, Alte Grafik

### Numerische Lösung der Dgln.

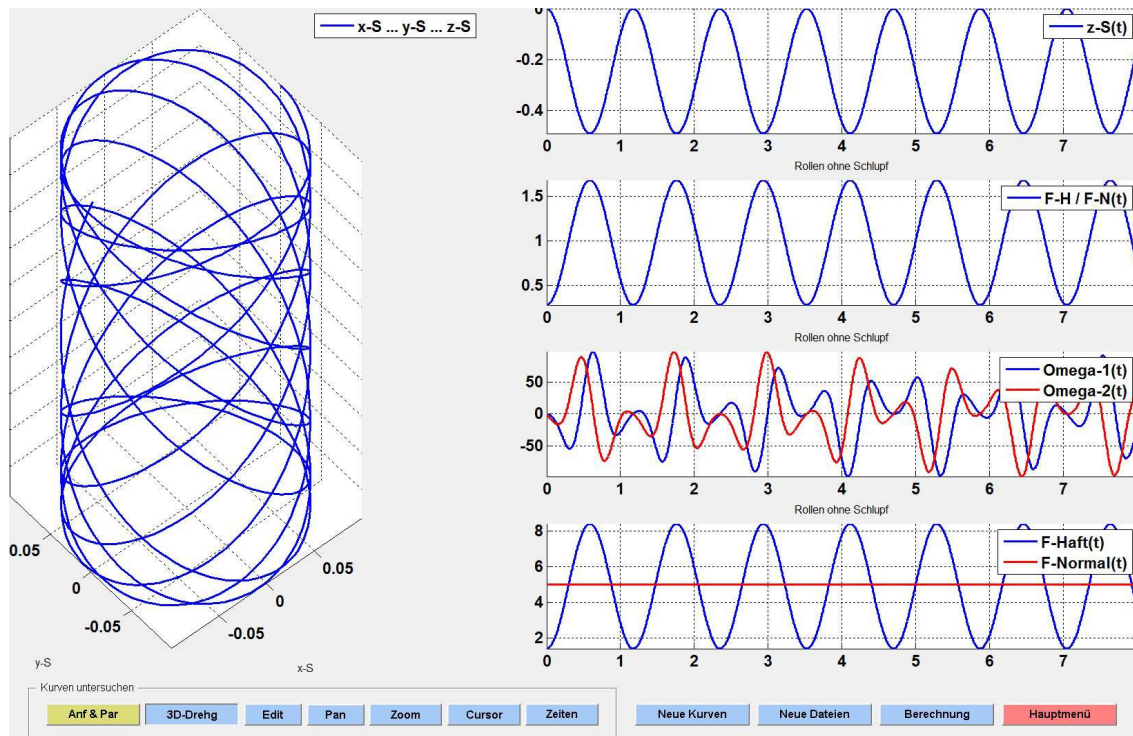
Vor der numerischen Lösung der Dgln. müssen die Anfangsbedingungen, die physikalischen Parameter, vier Integrationsparameter und der Name der Datei, die die numerische Lösung aufnimmt, eingegeben werden. Klicken des Buttons **Berechnen** startet die numerische Berechnung.

Nach der numerischen Lösung führt der Button **Neue Grafik** auf die Auswahl *neuer* Kurven. Der Button **Alte Grafik** liefert – für die neu berechnete Datei – automatisch die bereits früher ausgewählten Kurven. Eine einfache 3D-Animation der neu berechneten Bewegung ist hier ebenfalls möglich.



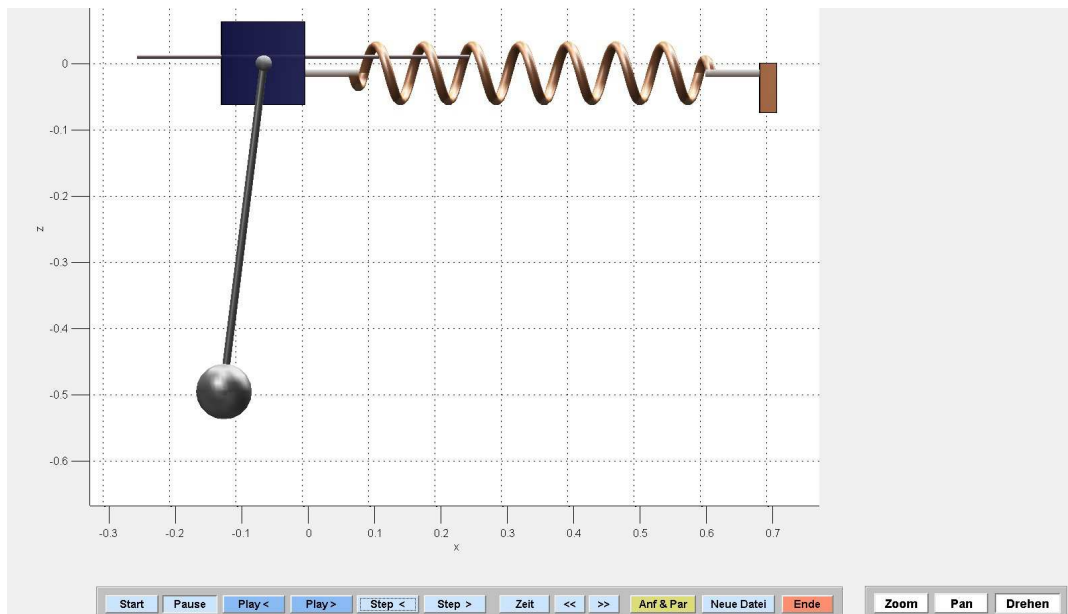
### Ausschnitt der Fensterauswahl

Ein Mausklick legt Zahl und Anordnung der Fenster fest, in denen die numerisch berechneten Kurven gezeichnet werden sollen.



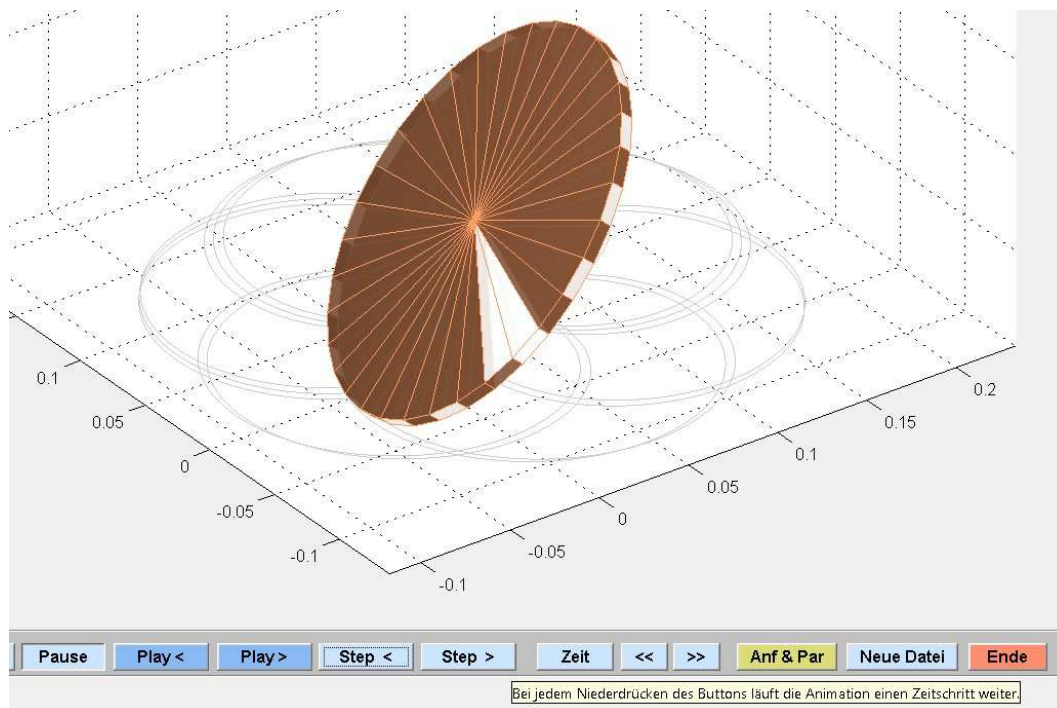
### Kurvenansicht

Hier werden links eine 3D-Kurve und rechts sechs 2D-Kurven gezeigt. Die Bedeutung der Pushbuttons am unteren Bildschirmrand wird durch Kommentare verdeutlicht, die nach kurzem Kontakt mit der Maus automatisch eingeblendet werden.



### Einfache 3D-Animation des Gleitpendels

Direkt nach der numerischen Berechnung kann MECHANICUS für 43 mechanische Systeme eine 3D-Animation starten, wobei etwa zwischen 15 und 30 Bilder pro Sekunde abgespielt werden.



### Einfache 3D-Animation einer rollenden Scheibe – Vergrößerter Teilausschnitt

Die Bedeutung der Pushbuttons am unteren Bildschirmrand wird durch Kommentare verdeutlicht, die nach kurzer Verzögerung eingeblendet werden, wenn die Maus auf dem entsprechenden Button steht. Hier ruht die Maus auf dem Button [Step >](#).

In Aufgabe 12–18 werden die Dgln. aufgestellt und die Bewegungen untersucht.



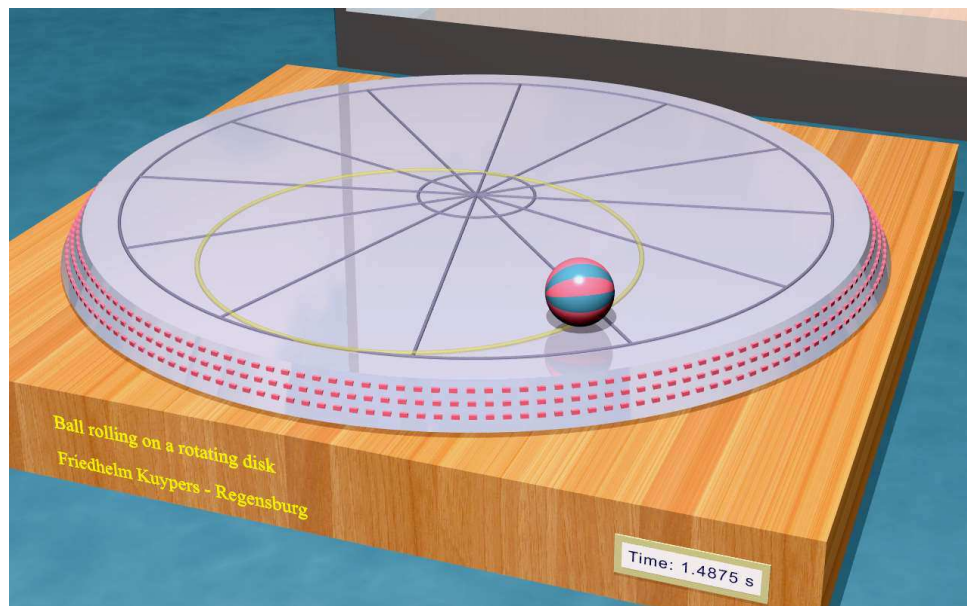
## Fotorealistische Filme

Das Programmpaket enthält über 80 fotorealistische Filme, die mit dem kostenfreien Renderprogramm POV-Ray für 31 mechanische Systeme erstellt wurden. Die Filme im avi-Format können von MECHANICUS aus oder aber auch durch Doppelklick im Windows-Explorer gestartet und z. B. mit dem VLC-Media-Player abgespielt werden.

Die POV-Ray-Filme

- haben in der Regel eine Auflösung von 1280x1024 Pixel.
- haben 3 Byte Farbtiefe.
- spielen mindestens 25 Bilder pro Sekunde ab.
- haben meistens eine Abspielzeit von 2 Minuten (mit 3000 Einzelbildern).

Die folgenden Farbbilder zeigen Ausschnitte von Momentaufnahmen einiger Filme.



**Ball rollt auf rotierender Scheibe.** Man mag es kaum glauben: Auf einer waagerechten, rotierenden Scheibe – hier als Plattenspieler dargestellt – rollen Bälle, deren Reibungsverluste vernachlässigt werden können, auf raumfesten Kreisbahnen. Noch verwunderlicher sind die Bewegungen, wenn die rotierende Scheibe geneigt ist.

In Aufgabe 12–16 werden die Dgln. aufgestellt und analytisch gelöst. Die Ergebnisse von Experimenten werden kurz beschrieben und mit der Theorie verglichen. Die Übereinstimmung von Theorie und Experimenten ist überzeugend. Abschließend werden bemerkenswerte Analogien zu den Bewegungen geladener Teilchen in elektromagnetischen Feldern aufgezeigt.



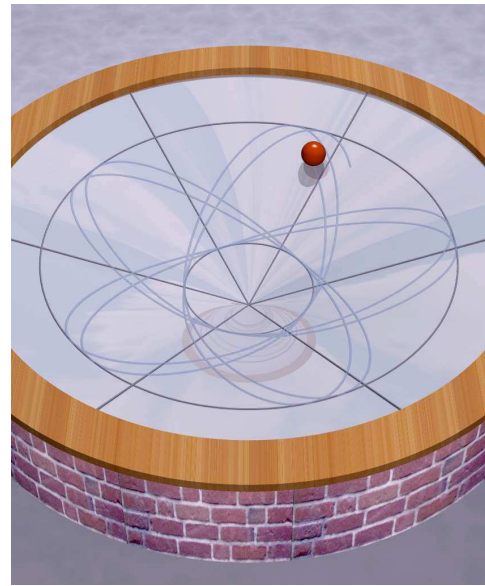


**Stehaufkreisel.** Der Stehaufkreisel kostet wenige Euro und gehört zu den faszinierendsten physikalischen Spielzeugen. Er richtet sich nach dem schnellen Andrehen zwischen Daumen und Zeigefinger auf dem Stift auf.

Aufgabe 12–19 untersucht die Reibung und stellt die Dgln. auf. Numerisch berechnete Kurven werden interpretiert.

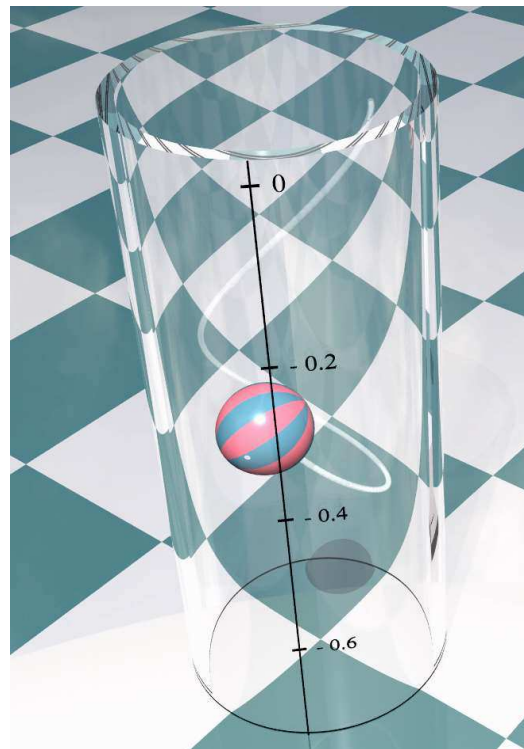
**Ball rollt in vertikalem Rohr.** Völlig unerwartet ist die Bewegung eines Balls, der ohne Schlupf und ohne Energieverlust in einem ruhenden vertikalen Rohr rollt: Der Ball rollt nicht nach unten, wie wohl jeder Physiker erwartet, sondern periodisch zwischen einem tiefsten und einem höchsten Punkt auf und ab – ohne auf den Boden zu treffen.

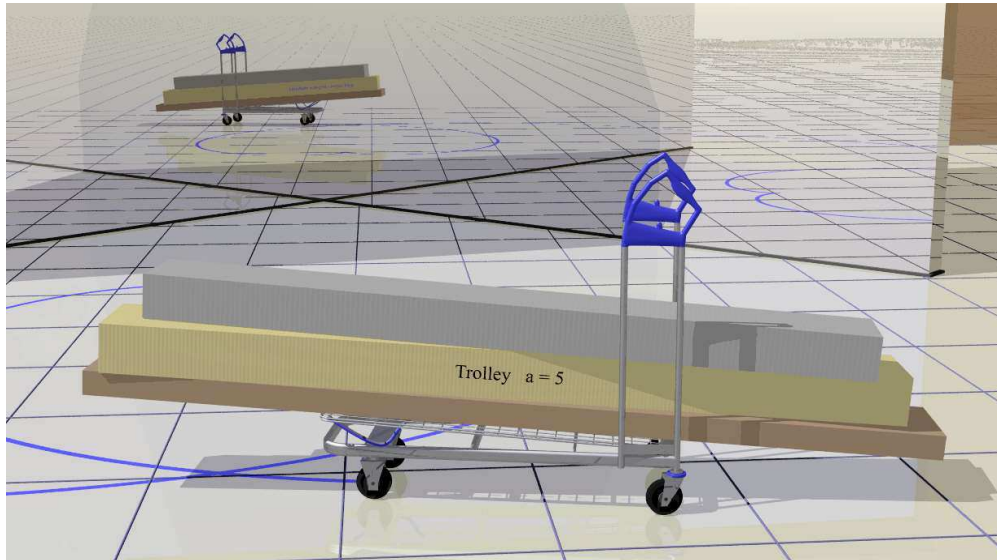
In Aufgabe 12–17 werden die Dgln. aufgestellt und numerische Lösungen untersucht.



**Kreiskegel.** Eine Kugel mit vernachlässigbarem Trägheitsmoment rollt ohne Reibungsverluste in einem Kreiskegel.

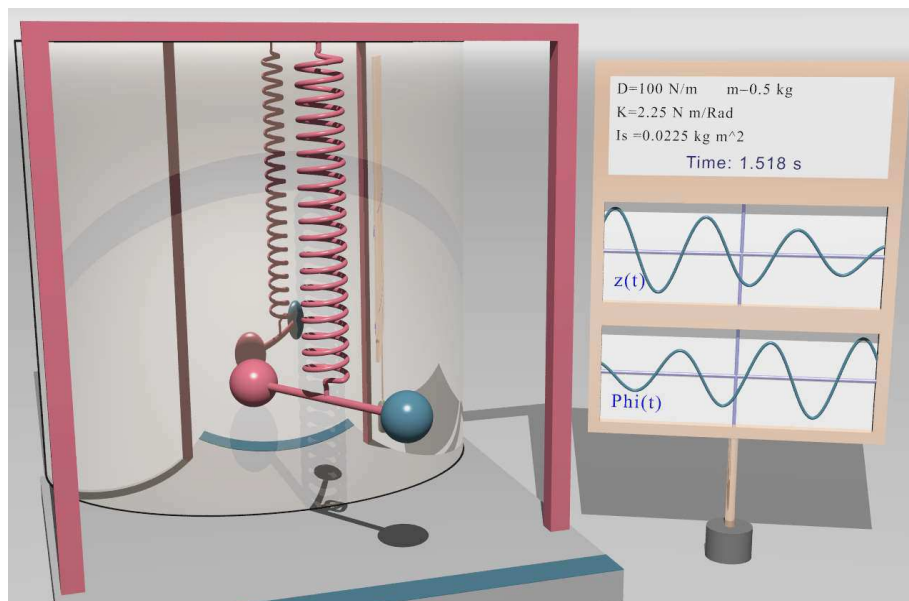
Die Dgln. werden mit verschiedenen Methoden in mehreren Beispielen aufgestellt. Beispiel 11.5–2 zeigt, dass die Kugel zwischen zwei Kreisen auf und ab läuft.





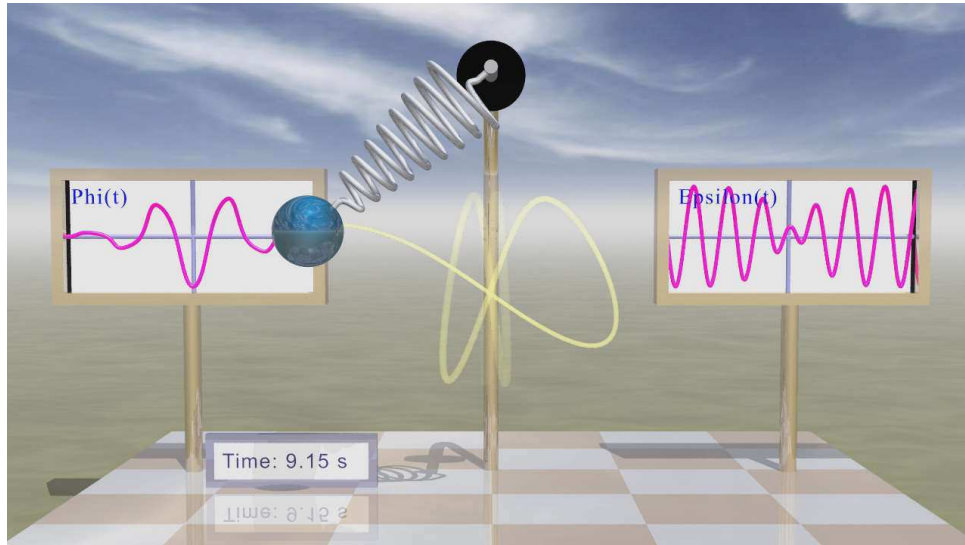
**Einkaufswagen.** Ein Einkaufswagen (hier vor zwei Spiegeln) rollt ohne menschliche Führung und reibungsfrei auf einer [herzförmigen Kurve](#). Dabei dreht er sich mehrmals um die Hochachse, bevor er asymptotisch auf eine Gerade zuläuft. Physiker mit Spieltrieb können die berechneten Bewegungen mit solchen beladenen Einkaufswagen bestätigen, bei denen sich nur die beiden Räder unter den blauen Handgriffen um die Hochachse schwenken lassen.

In Aufgabe 9–14 werden die Dgln. aufgestellt. Die Zahl der Drehungen um die Hochachse wird analytisch berechnet.



**Wilberforce-Pendel.** Hier treten schwebungsartige Wechsel zwischen vertikalen Federschwingungen und Torsionsschwingungen auf.

Dieses Pendel wird im Lehrbuch nicht behandelt. Aber im Programm **MECHANICUS** können die Dgln. und Erläuterungen gelesen werden.

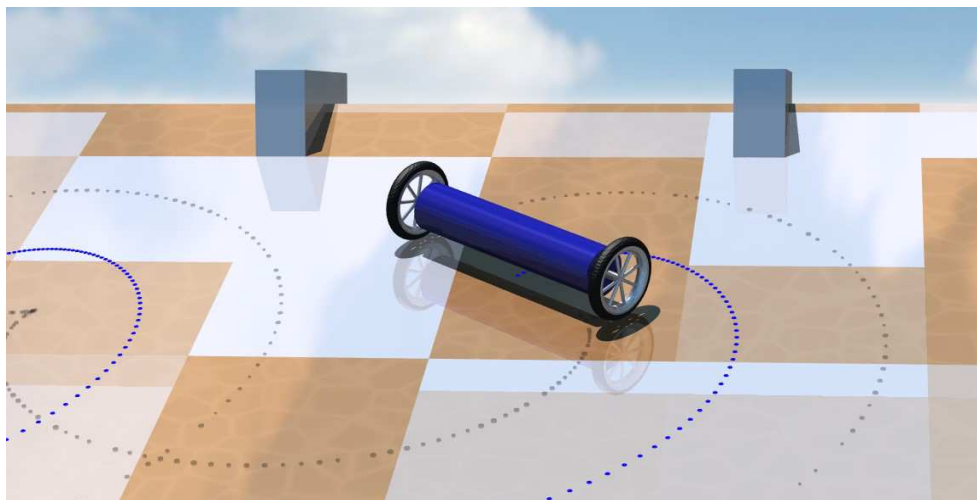


**Federpendel.** Die **vertikale Schwingung** eines harmonischen Oszillators ist **instabil**, wenn Masse  $m$ , Federkonstante  $D$  und Federlänge  $l$  die Gl.

$$\sqrt{g/l} = n/2 \cdot \sqrt{D/m} \quad n = \text{natürliche Zahl}$$

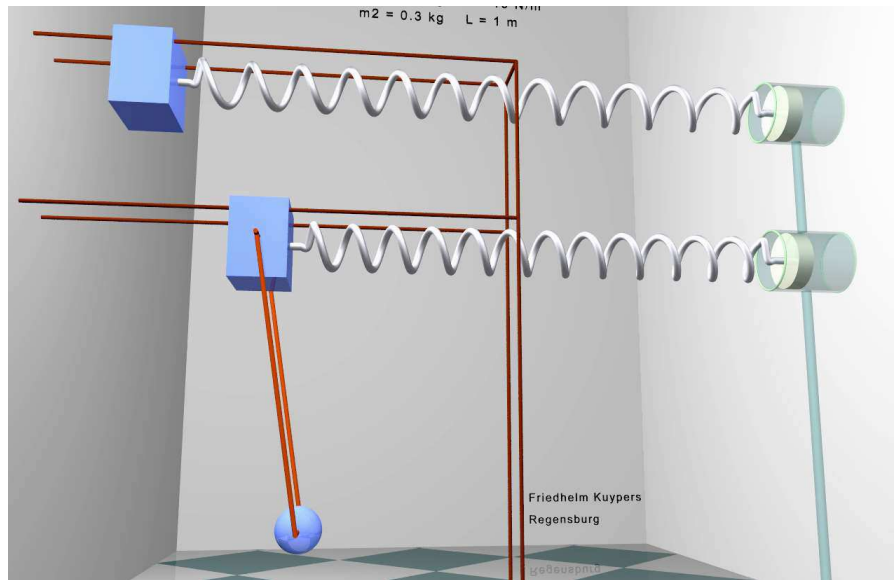
erfüllen. Auch bei kleinsten *seitlichen* Anfangs-Auslenkungen ( $\varphi(0) \neq 0$ ) wechselt die Bewegung endlos zwischen nahezu vertikalen Schwingungen und starken seitlichen Pendelausschlägen. In der Aufnahme ist  $\varphi \approx -48,5^\circ$ .

In Aufgabe 5–12 werden die Dgln. aufgestellt und die kritischen Bedingungen für die Parameter untersucht.



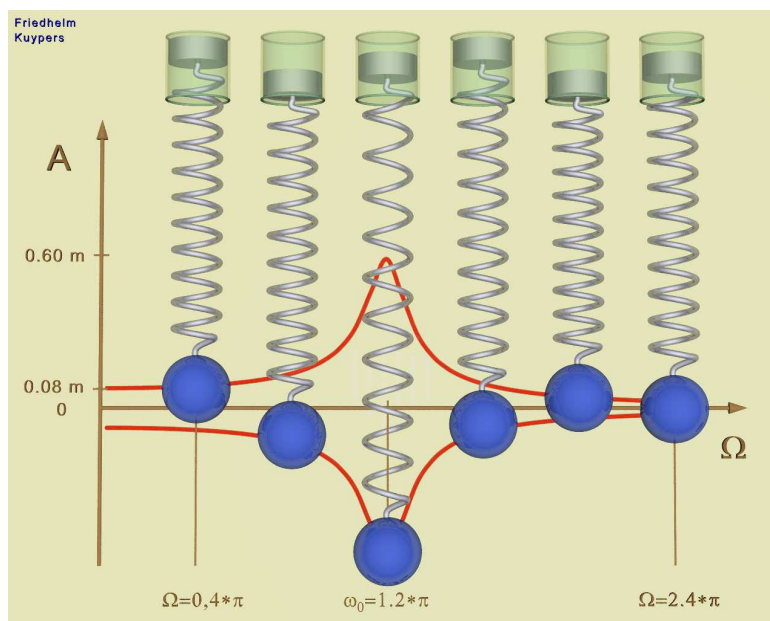
**Schwere Achse.** Auch hier erleben wir eine faustdicke Überraschung: Die schwere Achse läuft auf einer schiefen Ebene nicht den Hang hinab, sondern **quer zum Hang auf zyklidenartigen Kurven**.

In Beispiel 9.1–3 werden die Dgln. aufgestellt und gelöst. Die Begründung für die überraschende Bewegung ist sehr anschaulich.



**Gleitpendel.** Die erzwungenen Schwingungen des unten dargestellten Gleitpendels verdeutlichen die Wirkungsweise der [Schwingungstilger in Hochhäusern](#). Im 500 m hohen Wolkenkratzer Taipei 101 hängt ein Pendel mit einer Länge von 42 m und einer Pendelmasse von 660 Tonnen(!). Es soll die durch Taifune und Erdbeben ausgelösten Hochhaus-Schwingungen tilgen.

In Aufgabe 13–9c werden die Dgln. des angeregten Gleitpendels aufgestellt. Dort wird auch ausführlich auf den Wolkenkratzer Taipei 101 eingegangen.



**Harmonischer Oszillator.** Die Animation zeigt die erzwungenen Schwingungen von 6 identischen, gedämpften Oszillatoren bei 6 verschiedenen Erregerfrequenzen  $\Omega$ . Die rote Resonanzkurve  $A(\Omega)$  und die Phasenverschiebung  $\varphi(\Omega)$  zwischen Erregung und Schwingung werden bestätigt.

In Beispiel 13.1–2 werden erzwungene Schwingungen des linearen Oszillators untersucht.