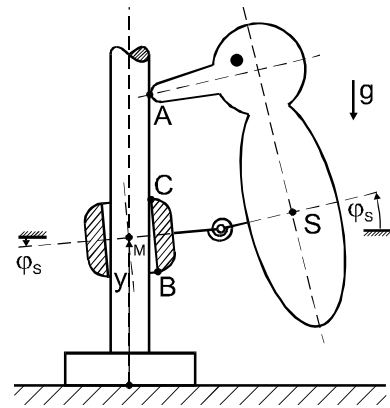


# Der Spielzeugspecht

Christoph Glocker und Christian Ucke

*Die genaue Analyse der Bewegungsabläufe dieses scheinbar so einfachen Spielzeugs führt auf ziemlich komplexe Differentialgleichungen. Die theoretische Mechanik befaßt sich aktuell mit Fragestellungen des hier auftretenden Reibstoßes, der eine große Bedeutung für die Technik hat.*

Tippt man den oben an der Stange befindlichen Specht an, wippt er mit dem Schnabel an die Stange klopfend nach unten. Erfunden wurde der Spielzeug-, Klopf- oder Pickspecht möglicherweise um die Jahrhundertwende im Erzgebirge, seit jeher ein Zentrum für ingeniöse Holzspielwaren. Andere - unsichere - Aussagen deuten auf einen Ursprung im Fernen Osten. (Wir wären sehr interessiert an Hinweisen auf die Entstehung.) Es gibt den Specht in Riesenausführungen mit einer Stangenlänge von über einem Meter und ebenso in einer Miniausführung, die in einem „Überraschungsei“ Platz hat. Auch andere Realisierungen z.B. mit einem Schmetterling sind uns bekannt.



**Abb. 1. Schematische Darstellung des Spechts**

Genauer besehen, besteht das Spielzeug aus einer Muffe, die über eine Stange geschoben wird, und einem Vogel, der mit einer Feder an der Muffe befestigt ist (Abbildung 1). Schiebt man jetzt die Muffe ans obere Ende der Stange und läßt sie vorsichtig los, so bleibt der Specht dort in Ruhe stehen. Der Grund dafür, daß er nicht abrupt die Stange hinunter rutscht, ist in der speziellen Konstruktion der Muffe zu suchen. Sie hat gegenüber der Stange etwas Spiel, so daß sie sich unter dem Gewicht des Spechts schräg stellt und verkantet. Dieser Mechanismus wird Selbsthemmung genannt und funktioniert um so zuverlässiger, je schwerer der Specht ist, oder genauer gesagt, je größer die aus dem Spechtgewicht resultierende durch die Feder übertragene senkrecht zur Stange stehende Kraftkomponente am Muffenpunkt B ist (Abbildung 1). Eine Verstärkung dieser Kraftkomponente, der Normalkraft, führt zu einer gleichzeitigen Verstärkung derjenigen tangentialen Kontaktkraft, die überwunden werden muß, um einen Übergang von Haften nach Gleiten zu ermöglichen. Haften ist also für den ruhenden Specht eine sichere Angelegenheit, die nur dann durch Gleiten ersetzt würde, wenn der Specht zu leicht wäre.

Dieser Selbsthemmungsmechanismus tritt nicht nur beim Specht auf, sondern wird in vielen technischen Systemen ausgenutzt. Einfache Beispiele sind Keile, die etwa das Zuschlagen von Türen verhindern sollen, oder spezielle halbkreisförmige Steigeisen, die zum Erklettern von Holzmasten von Stromleitungen benutzt werden. In abgeschwächter Form findet man den Verstärkungsmechanismus der Reibkraft auch bei den auflaufenden Bremsbacken der im Fahrzeugbau verwendeten Trommelbremsen.

Der Vorgang des abwechselnden Pickens und Rutschens, der sich immer wieder mit verblüffender Regelmäßigkeit einstellt, wird hauptsächlich durch die Muffe bestimmt. Je nachdem, ob sie die Stange berührt oder nicht, schaltet sie den oben beschriebenen Selbsthemmungsmechanismus ein oder aus und regelt damit die Schwingungen des Spechts.

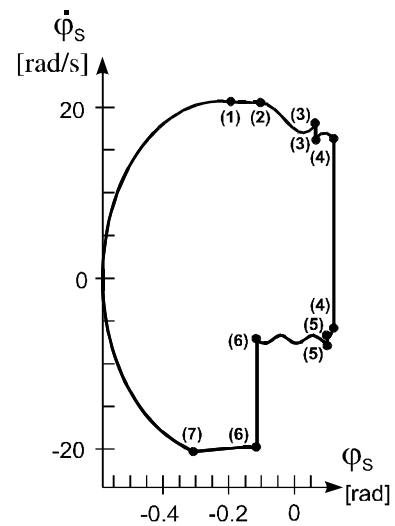
Daß sich die Schwingung nach einer bestimmten Zeit immer in der gleichen Art und Weise einstellt, unabhängig davon, wie der Specht losgelassen wird, ist in einem internen Regelmechanismus begründet, der das System immer in den in Abbildung 2 gezeigten Schwingungszustand zurückführt, bei dem ein energetisches Gleichgewicht zwischen zugeführter und dissipierter Energie vorliegt. Der Specht rutscht pro Schwingungsperiode um einen bestimmten Betrag die Stange herunter. Damit nimmt die Lageenergie des Systems ab und wird über die Muffe dem Specht zugeführt und in Schwingungsenergie umgewandelt. Mit dieser zugeführten Energie können die bei den Stößen und Gleitphasen auftretenden Verluste ausgeglichen werden. So dissipiert bei dem hier berechneten Specht ca. 50% der zugeführten Energie beim Schnabelstoß und 38% beim unteren Muffenstoß. Die restlichen 12% teilen sich in die beiden oberen Muffenstöße und die Gleitphasen auf.

Der Rückkopplungsmechanismus, der den Specht immer in diesen Gleichgewichtszustand zwingt, ist relativ einfach zu verstehen, wenn man bedenkt, daß die Energiezufuhr fast ausschließlich in den Freiflugphasen erfolgt. Wird der Specht zum Beispiel so angestoßen, daß die Amplitude der Schwingung zu groß ist, so führt dies dazu, daß er die Freiflugphasen schneller passiert. Damit bleibt ihm weniger Zeit, um nach unten zu fallen; der pro Periode nach unten zurückgelegte Weg nimmt also ab. Dies bedeutet aber, daß dem Specht weniger Lageenergie zugeführt wird und in Schwingungsenergie umgesetzt werden kann. Bei zu kleinen Amplituden drehen sich die Verhältnisse gerade um. Insgesamt ergibt sich also das folgende Verhalten: Sind die Amplituden der Schwingung zu groß, so wird die Energiezufuhr vermindert. Sind die Amplituden zu klein, so wird sie erhöht. Damit wird zwangsläufig ein Zustand erreicht, bei dem die Amplituden gerade so groß sind, daß sie zur zugeführten Energie passen und nicht mehr verändert werden. Die Schwingung, die zu diesem Zustand gehört, heißt Grenzykel [3]. Dieser ist sehr stark abhängig von den eingesetzten Parametern (Reibungskoeffizient, Innendurchmesser und Länge der Muffe, Ausgangsbedingungen). Es kann sogar chaotisches Verhalten auftreten oder der Specht fällt im Extremfall einfach die Stange hinunter, ohne zu picken.

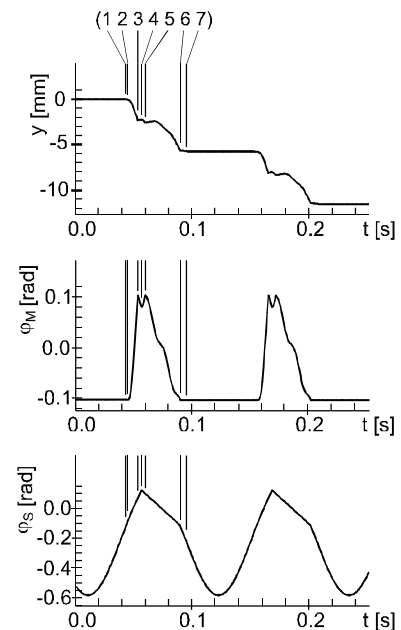
Solche selbsterregten Systeme, die nach einem internen Regelmechanismus arbeiten, trifft man in der Technik sehr häufig an. Hierzu gehören zum Beispiel das Knarren von Türangeln, das Quietschen von Kreide auf der Tafel, das Tragflügelflattern bei Flugzeugen oder das Hochgeschwindigkeitspendeln bei Motorrädern. Die diesen Schwingungen zugrunde liegenden Rückkopplungsmechanismen sind zum Teil äußerst komplex und können nur mit großem Aufwand analysiert werden [1, 2].

### Das Schwingungsverhalten

Eine detaillierte Analyse des Schwingungsverhaltens gewinnt man zum Beispiel aus einer numerischen Auswertung der Bewegungsgleichungen des in Abbildung 1 dargestellten Systems. Die drei Koordinaten  $y$ ,  $\varphi_M$  und  $\varphi_S$  beschreiben die vertikale Lage des Muffenschwerpunkts  $M$ , den Neigungswinkel der Muffe, und den des Spechts. Weiter müssen drei mögliche Kontaktpunkte A, B, C vorgesehen werden, denn der Schnabel kann an die Stange schlagen, und die Muffe kann an ihrem unteren oder oberen Ende die Stange berühren. Abbildung 2 zeigt die Phasenkurve der Spechtschwingung, also die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{j}_S$  des Spechts in Abhängigkeit des aktuellen Neigungswinkels  $\varphi_S$ .



**Abb.2:** Die Phasenkurve stellt die Winkelgeschwindigkeit  $\dot{j}_S$  des Spechts in Abhängigkeit des aktuellen Neigungswinkels  $\dot{j}_S$  dar. Die eingeklammerten Nummern beziehen sich auf die in Tabelle 1 wiedergegebenen Zustandsübergänge.



**Abb. 3.** Aus dem zeitlichen Verlauf der vertikalen Lage  $y$ , des Muffenwinkels  $\dot{j}_M$  und des Neigungswinkels  $\dot{j}_S$  lassen sich die abrupten Übergänge deutlich erkennen.

Wir starten die Diskussion bei Punkt (7). Hier hat die Muffe am Punkt B Kontakt mit der Stange und haftet. Der Selbsthemmungsmechanismus ist also aktiv. Der Specht schwingt nach unten durch, bis er seine tiefste Stellung bei einem Winkel von knapp  $-0.6$  rad erreicht. Dort kehrt sich seine Bewegung um, er ist jetzt auf dem Weg nach oben. Je weiter er nach oben schwingt, desto mehr entspannt sich die Feder zwischen Specht und Muffe. Dies bedeutet aber, daß auch die am Kontaktpunkt B wirkende Normalkraft zurückgeht und schließlich am Punkt (1) der Selbsthemmungsmechanismus aufgelöst wird. Die Muffe beginnt nach unten zu gleiten, während der Specht wegen seiner Trägheit weiter nach oben schwingt. Die Normalkraft nimmt deswegen weiter ab, bis sich bei (2) die Muffe von der Stange löst. Zwischen (2) und (3) hat kein Teil der Muffe mehr Kontakt mit der Stange; das System befindet sich jetzt in der sogenannten Freiflugphase, in der keine der drei Koordinaten mehr blockiert ist.

Freiflugphasen zeichnen sich dadurch aus, daß sie Systemen die maximal mögliche Bewegungsfreiheit geben, was sich hier in einer Überlagerung von drei Schwingungszuständen äußert: Specht und Muffe rotieren wie ein einziger starrer Körper, Specht und Muffe bewegen sich wie ein einziger starrer Körper translatorisch nach oben, Specht und Muffe schwingen gegeneinander und lenken dabei die Feder aus. Obwohl sich der Specht nach oben bewegt, wird in dieser Phase die Muffe wegen der gemeinsamen Rotation nach unten gedrückt, wie im Zeitverlauf  $y(t)$  in Abbildung 3 zu sehen ist. Am Punkt (3) trifft nun das obere Muffenende C auf die Stange. Dieser Stoß ist allerdings für das System von untergeordnetem Interesse, denn der entsprechende Kontakt löst sich auch sofort wieder auf. Kurze Zeit später erreicht der Schnabel des sich immer noch nach oben bewegenden Spechts die Stange. Der erfolgreiche Reibstoß (4) führt zu einer sprunghaften Umkehr der Spechtgeschwindigkeit, wie man an der senkrechten Linie in der Phasenkurve sehen kann. Nach einem zweiten kleinen oberen Muffenstoß (5) ist das System wieder in der Freiflugphase, wobei sich jetzt der Specht nach unten bewegt. Hier wird der zweite Teil der Muffenfallhöhe pro Schwingungsperiode erzielt. Zusätzlich ist in der Phasenkurve sehr deutlich eine Schlangenlinie zu erkennen, die der hochfrequenten Schwingung der Muffe gegenüber dem Specht entspricht. In Punkt (6) hat sich das Gesamtsystem so weit gedreht, daß das untere Muffenende B die Stange berührt. Es erfolgt ein ausgeprägter Reibstoß, der die Fallgeschwindigkeit der Muffe drastisch reduziert, allerdings hier nicht ganz ausreicht, um Haften zu bewirken. Deswegen schließt sich eine kurze Gleitphase an. An Punkt (7) kommt die Muffe auf Grund von Reibung zum Stillstand. Dies bedeutet, daß der Selbsthemmungsmechanismus aktiv werden kann, und der Specht nach unten durchschwingt.

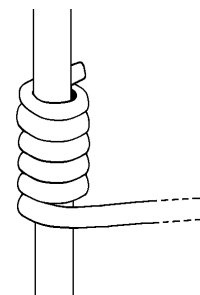
Damit ist die in Abbildung 2 gezeigte Schwingung einmal durchlaufen, und der Prozeß beginnt von vorne. Die Bewegung des Spechts zeichnet sich vor allem dadurch aus, daß laufend Koordinaten durch Stöße und Reibung gesperrt oder freigegeben werden. Solche Systeme, die abschnittsweise durch unterschiedlich viele Differentialgleichungen beschrieben werden müssen, haben in der Praxis eine große Bedeutung. Die mathematischen Methoden dazu sind auch erst in den letzten Jahren entwickelt worden. Reib- und Stoßprobleme treten, erwünscht oder unerwünscht, in nahezu allen technischen Systemen auf. Man denke nur an Schlagbohrmaschinen, an das sogenannte Kupplungsrupfen in Kraftfahrzeugen, oder an Stöße, die beim Auflaufen von Ketten auf ihre Kettenräder entstehen.

Der grundsätzliche Aufbau des Spielzeugspechts kann relativ leicht realisiert werden [4, 5]. Eine - metallene - Blattfeder aus einem Aktenhefter wird mit einem Loch auf eine Metall- oder Holzstange mit einem Durchmesser von 5mm geschoben. Am anderen Ende wird durch Probieren ein geeignetes Gewicht befestigt. Dieses System schwingt schon pendelnd hinunter. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, einen dünnen Draht (z.B. gerade gebogene Büroklammer) als Spiralfeder eng um einen 3 bis 5mm dicke Metallstab zu drehen. Wenige Windungen genügen bereits (Abbildung 4). Am Ende der selbstgewickelten Feder wird ein leichter Gegenstand, z.B. ein Schmetterling aus buntbemalter Pappe, befestigt. Es zeigt sich hier übrigens, daß der Schnabelstoß des zu Beginn erwähnten Spechts für die Funktion gar nicht notwendig ist.

Bei diesen einfachen Eigenkonstruktionen lassen sich allerlei Parameter variieren. Durch Änderung der Drahtlängen, - durchmesser, Endgewichte, Material der Stange ergeben sich verschiedene Frequenzen.

**Tabelle 1: Zustandsübergänge der Bewegung. Hierin bedeuten: H. Haften, G: Gleiten und S: Separation**

Punkt in Abb. 2.	Kontakt	Bewegung
(1)	B	H→G
(2)	B	G→S
(3)	C	S→S
(4)	A	S→S
(5)	C	S→S
(6)	B	S→G
(7)	B	G→H



**Abb. 4. Eine selbstgedrehte Spiralfeder als Halterung**

## Literatur:

- [1] F. Pfeiffer: Mechanische Systeme mit un stetigen Übergängen, *Ingenieur-Archiv* **54** (1984), 232-240
- [2] Ch. Glocker, F. Pfeiffer: Multiple Impacts with Friction in Rigid Multibody Systems, in: *Nonlinear Dynamics* (Hrsg. A. Nayfeh), Kluwer Academic Publishers, ersch. 1995
- [3] H.-J. Schlichting: Der Pickspecht - ein sich selbst organisierendes System, *Naturwissenschaften im Unterricht, Physik* **36** (1988), 37-39
- [4] J. Wittmann.: Trickkiste 1, Experimente, wie sie nicht im Physikbuch stehen, bsv München 1983
- [5] C. Wirth: Demonstration der Selbststeuerung einer Blattfederschwingung, *Praxis der Naturwissenschaften, Physik* **26** (1977), 19-20

## Anschriften:

Dipl.-Ing. Christoph Glocker, Lehrstuhl B für Mechanik, Techn. Univ. München, 85747 Garching  
Dr. Christian Ucke, Physikdepartment E 20, Techn. Univ. München, 85747 Garching