

Lauftiere – vom Spielzeug zum Roboter

Christian Ucke und Hans Joachim Schlichting

Lauftiere wackeln eine schiefe Ebene hinunter. Schon Kleinkinder sind fasziniert von diesem über 100 Jahre alten Spielzeug. Ingenieure beschäftigen sich aktuell damit, da sich mit dem dahinter stehenden Prinzip überraschend energiesparende Konstruktionen von Laufrobotern realisieren lassen. Eine genaue Analyse ergibt interessante Parallelen zur Stick-and-Slip Bewegung des Pickspechts.

Wie bei vielen Spielzeugen ist der Ursprung von Lauftieren nicht genau überliefert. Bekannt sind jedenfalls Exemplare vom Ende des 19. Jahrhunderts. In der Spielzeugindustrie des Erzgebirges werden sie noch heute in mannigfaltigen Ausführungen in Holz produziert. Ein typischer Vertreter ist die Wackelente (Abbildung 1). Durch leichtes Antippen am Schwanz startet die Wackelente und bewegt sich leicht nach vorn und hinten schaukelnd eine schiefe Ebene hinunter. Eine Videoaufnahme mit der Laufente (englisch: waddling duck) lässt sich bei den Materialien zu diesem Heft herunterladen bzw. einschließlich Zeitlupenaufnahmen bei YouTube ansehen [1].



Abb.1: Eine Wackelente bewegt sich schaukelnd eine schiefe Ebene nach unten. Das Kreuz markiert den Schwerpunkt und hier zugleich Drehpunkt des hinteren Fußes.

Analyse der Laufbewegung der Laufente

Die Konstruktion der Wackelente ist genial einfach. Der vordere Fuß ist mit dem Entengehäuse fest verbunden. Der hintere Fuß ist um den Punkt S drehbar, kann frei schwingen und der maximal mögliche Ausschlag ist durch einen Stopper begrenzt. Zugleich stellt S den Schwerpunkt dar. Der Schwerpunkt muss nicht unbedingt mit dem Drehpunkt zusammenfallen, liegt aber meist doch in der Nähe. Der Schwerpunkt S verändert sich nur sehr wenig, weil die Bewegung des hinteren Fußes und dessen Masse im Vergleich mit der übrigen Masse relativ klein sind. Die Unterseite der Füße ist konvex (teilzylinderförmig) geformt, so dass die Ente darauf abrollen und schaukeln kann. Die Schwingungsdauer der Ente nach vorne und hinten ist etwas größer als die Schwingungsdauer des Fußes. Dadurch wird erreicht, dass der hintere Fuß beim Nachvorneschaukeln der Ente schnell genug nachschwingen kann. Die Ente befindet sich auf einer Rampe mit ‚Bordsteinen‘, so dass sie nicht zur Seite ausweichen kann, wobei die Neigung der Rampe hier etwa acht Grad beträgt. Bei etwa zwei Grad mehr oder weniger läuft die Ente nicht mehr, weil dadurch die Abstimmung der Schwingungsdauern zu stark gestört wird.

Sehr empfindlich reagiert die Ente auch auf eine Veränderung des Schwerpunkts, indem man beispielsweise eine kleine Masse (~5g) am Schnabel oder Schwanz anbringt. Dadurch

wird wie bei der Änderung der Neigung ebenfalls die Abstimmung der Schwingungsdauern aufeinander gestört. Teilweise kann man daher diese Störung durch eine Anpassung der Neigung kompensieren, so dass die beschwerte Ente bei anderer Neigung dann doch wieder zum Laufen gebracht werden kann. Bei gekauften Exemplaren inklusive Rampe sind Schwerpunkt und Rampenneigung optimal aufeinander abgestimmt. Konstruiert man selbst ein Lauftier, ist das Austarieren der Lage des Schwerpunkts bei gegebener Neigung der Rampe extrem wichtig (siehe Bauanleitungen).

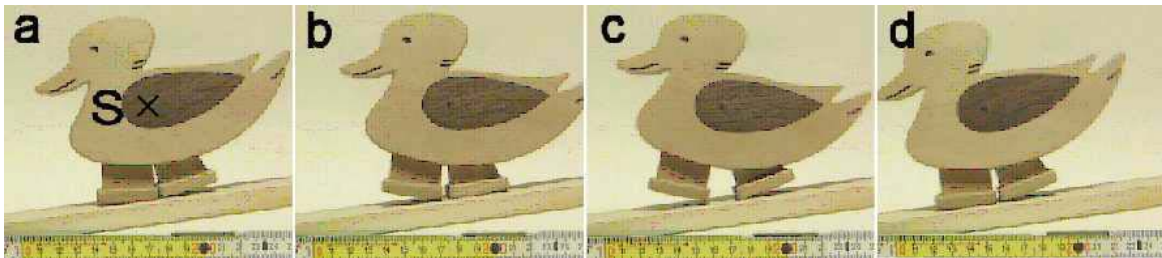


Abb.2: Vier Phasen des Bewegungsablaufes der Wackelente. Die Fotos wurden aus einem Video entnommen. Ein vollständiger Zyklus wird in 0,57s durchlaufen.

Der Bewegungsablauf der Wackelente ist aus Abbildung 2 ersichtlich. Die Ente rollt hier (a) gerade die Füße nach hinten ab. Dadurch verlagert sich der Schwerpunkt etwas nach hinten (ca. 5mm) und liegt über der Spitze des hinteren Fußes. Der vordere Fuß - fest verbunden mit der ganzen Ente - kann sich nun von der Unterlage lösen (b). Die durch die schiefe Ebene bedingte rückwirkende Kraft führt dazu, dass sich der Schwerpunkt anschließend wieder nach vorn bewegt (ca. 30mm) und sich dem Fortschreiten auf der schiefen Ebene entsprechend etwas senkt. Gleichzeitig schwingt der vom Boden gelöste vordere Fuß nach vorne aus. (c). Durch die Senkung des Schwerpunkts setzt der vordere Fuß auf, bevor er Gelegenheit hat, wieder zurückzuschwingen. Gleichzeitig löst sich der hintere Fuß von der Unterlage und schwingt nach vorn, was gleichbedeutend damit ist, dass die Ente insgesamt einen Schritt weiter gekommen ist. Beim Anstoßen des hinteren an den vorderen Fuß (d) gibt es zusätzlich einen kleinen Schubs nach vorne. Der Schwerpunkt hat sich auf einer schwach wellenförmig geneigten Kurve um etwa 3mm nach unten bewegt, wobei die Ente insgesamt um etwa 2 cm vorangekommen ist. Die dafür ‚verbrauchte‘ potenzielle Energie ist wegen der geringen Abwärtsbewegung des Schwerpunkts sehr klein.

In gewisser Hinsicht ähnlich ist die Bewegung eines eine Stange hinunter laufenden Pickspechts [2]. Auch er weist eine Phase auf, in der sich der Schwerpunkt entgegengesetzt zur Richtung der Gesamtbewegung bewegt. Es gibt dort wie hier eine fast frei bewegliche Phase und schließlich auch ein Gleitutschen der Muffe an der Stange. Solche Reibstoß-Effekte (Englisch Stick and Slip) liegen so verschiedenen Vorgängen wie der Erzeugung von Tönen bei Streichinstrumenten und der Plattentektonik bei Erdbeben zugrunde. Aber auch in der Technik ist die Stick-Slip-Bewegung von enormer Bedeutung, allerdings geht es hier hauptsächlich um ihre Vermeidung (z.B. Knarren und Quietschen).

Die Wackelente ist energetisch gesehen ein Modell für eine dissipative Struktur, die von Energie durchflossen wird. Die gesamte zugeführte potenzielle Energie wird durch Reibungsvorgänge dissipiert, so dass die Bewegungsenergie im Mittel konstant bleibt. Die Dissipation wird also konstruktiv zur Fortbewegung genutzt, wobei die einzelnen Phasen der Dynamik in selbst organisierter Weise aufeinander abgestimmt sind. Das System vermag dabei eine konstante Schrittfrequenz einzuregulieren, wobei Störungen (z.B. leichtes Antippen der

Ente oder Beschleunigung/Abbremsen durch Inhomogenitäten auf der schiefen Ebene) durch Rückkopplungsvorgänge immer wieder abgebaut werden. Dieses komplexe Selbstorganisationsverhalten kommt in einer nichtlinearen Dynamik des Systems zum Ausdruck und ist daher mathematisch sehr anspruchsvoll. Eine ausführliche theoretische Beschreibung sowohl der Laufente wie des Pickspechts findet man in [3].

Lauftiere mit zwei nebeneinander liegenden Füßen

Eine normale Ente hat natürlich zwei nebeneinander befindliche Füße, ebenso wie viele andere Tiere und der Mensch. Lauftiere als Spielzeug mit nebeneinander liegenden Füßen gibt jedoch deutlich seltener. Dabei haben sie naheliegenderweise eine größere Relevanz für einen Bezug zum Lauf des Menschen.

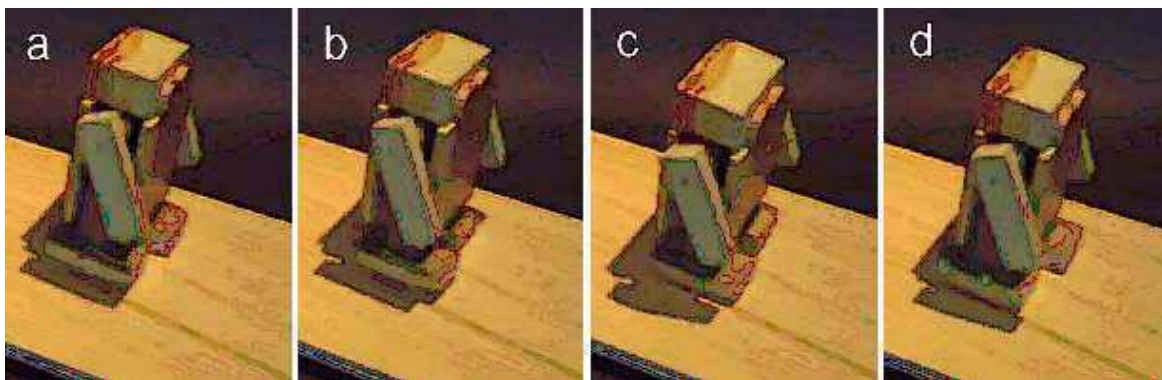


Abb.3: Vier Phasen des Bewegungsablaufes des Walking Robots von Roberto Lou Ma [4]. Die Fotos wurden aus einem Video entnommen.

Ihr Aufbau ist etwas komplizierter, da die Wackelbewegung nicht nur nach vorne und hinten sondern auch nach links und rechts stattfindet. Beide Füße sind frei und unabhängig voneinander schwingend beweglich. Befindet sich das Objekt auf einer schiefen Ebene zunächst auf dem linken Fuß (Abbildung 3a), dann kann der rechte Fuß frei nach vorne schwingen (3b). Sodann schaukelt das Objekt nach rechts auf den rechten Fuß (3c), woraufhin der linke Fuß nach vorne schwingen kann (3d). Die Füße müssen dementsprechend in zwei zueinander senkrechten Richtung konvex geformt sein (z. B. Kugelabschnitte). Die Schwingungsdauern der Hin- und Herbewegung des ganzen Körpers und der Füße müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt und etwa gleich groß sein, damit sich das Lauftier koordiniert bewegen kann (Selbstorganisation). Die Schwingungsamplituden nach links und rechts und vorne und hinten dürfen nicht zu groß sein, da das Objekt sonst leicht umfallen kann. Die Schrittlänge ist entsprechend klein.

Das Prinzip dieses Spielzeugs wurde schon 1888 in den USA unter dem Namen ‚walking toy‘ patentiert [5]. Viele weitere Patente wurden seitdem für ähnlich geartete Spielzeuge erteilt. Käuflich zu erwerben ist der in Abbildung 4a



Abb.4a,b: Zweibeiniger Bär ‚Winnie-the-Pooh‘[6]; Zweibeiniges ‚passive walking toy‘ [7].

dargestellte, zweibeinige Bär ‚Winnie-the-Pooh‘ [6]. Aufgrund der symmetrischen Konstruktion der FüÙe läuft er vorwärts wie rückwärts.

Seit einiger Zeit gewinnen derartige ‚Spielzeuge‘ an wissenschaftlicher Bedeutung, da gewisse Parallelen zum Gang des Menschen ersichtlich sind [7]. In Abbildung 4b ist das Prinzip dieser Konstruktion besonders deutlich zu sehen. Noch ‚menschlicher‘ wird die Konstruktion durch die Einführung von beweglichen Kniegelenken. Mit zusätzlichen Motoren können derartige Maschinen roboterähnlich auf einer Ebene laufen. Im Vergleich zu anderen Laufrobotern brauchen sie erheblich weniger Energie und keine Stabilisierung durch aufwendige Regelelektronik [8].

Lauftiere mit drei FüÙen

Drei FüÙe bzw. Beine klingt zunächst merkwürdig. Es gibt keine Tiere mit drei Beinen, von verletzten Vierbeinern einmal abgesehen. Was gemeint ist, ergibt sich aus Abbildung 5. Einerseits verfügt ein einbeiniger Mensch mit zwei Krücken über drei ‚Beine‘. Zum anderen gibt es Modelle, die ähnliches simulieren (Abbildung 5). Wenige Spielzeuge sind mit solchen Konstruktionen realisiert [10]. Meist sind die Beine starr über eine Achse miteinander verbunden. Auch ein einbeiniger Mensch setzt faktisch beide Krücken gleichzeitig voran und schwingt dann mit dem Körper zwischen den aufgesetzten Krücken hindurch. Beim Laufen auf einer schiefen Ebene sind diese Konstruktionen in Laufrichtung relativ instabil, da sie leicht nach vorne fallen können. Auf horizontaler Ebene gilt – ähnlich wie bei den Zweibeinern mit nebeneinander liegenden FüÙen – dass der Schwerpunkt bei kleinen Schrittweiten nur sehr wenig gehoben bzw. gesenkt wird und sie deshalb ebenfalls als Vorbild für energiesparende Laufroboter dienen.



Abb5: ‚Dreibeiner‘ mit Legobauteilen [9].

Lauftiere mit vier FüÙen

Lauftiere mit vier FüÙen sind weit verbreitet als Spielzeug. Es gibt sie als kleines Mitnahme-Plastikspielzeug, das an einem Faden mit Gewicht mit dem Vorderteil des Spielzeugs verbunden ist. Als etwas edlere Ausführung sind sie in Holz gestaltet (Abbildung 6). Man setzt das Objekt auf einen ebenen Tisch und hängt die Gewichtskugel über den Tischrand. Hier erfolgt die Energiezufuhr durch das Absenken eines Gewichtstücks über einen Seilzug und nicht durch eine schiefe Ebene, Hin und her schaukelnd setzt das Objekt beide FüÙe gleichzeitig jeweils abwechselnd auf einer Seite voran, bewegt sich bis zum Tischrand und bleibt hier in der Regel auch stehen, so als wüsste es um die Gefahr des Abgrunds. Zum Tischrand hin wird der Winkel zwischen Seil und Ebene immer größer, so

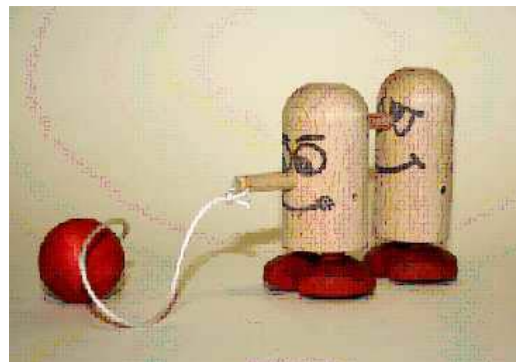


Abb.6: Das vierbeinige Laufobjekt Gwaggli

dass die Translationskomponente immer kleiner wird. Gleichzeitig bewirkt der zunehmende Zug nach unten, dass das Lauftier schließlich nicht mehr in der Lage ist einen Fuß zu heben, so dass es auf der Stelle fixiert wird.

Ohne Gewicht und Seil wackelt Gwaggli auch eine schiefe Ebene hinunter. Diverse Variationen von vierbeinigen Lauftieren aus Holz stellt eine Firma aus dem Erzgebirge her [11]. Im Spielzeugmuseum in Nürnberg ist ein vierbeiniges Lauftier des italienischen Künstlers Agostino Venturini zu bewundern. Auch das Prinzip dieses Spielzeugs wurde als Quadruped schon in dem zitierten Patent von 1888 beschrieben.

Die Lauffläche der Füße dieser Vierbeiner ist wie bei den Zweibeinern mit nebeneinander liegenden Füßen konvex in zwei zueinander senkrechten Richtungen (Kugelkalotte) gestaltet. Durch die feste Verbindung der beiden Körper und zweier hintereinander liegender Fußpaare ist die Stabilität in Laufrichtung sehr gut; senkrecht dazu allerdings nicht besser als bei den Zweibeinern. Es kann leicht zu einer instabilen Schaukelbewegung kommen, die zum Umkippen führt.

Die Schwingungsdauern der Hin- und Herbewegung des Gesamtkörpers und der Fußbewegungen müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt und etwa gleich groß sein, damit sich das Lauftier koordiniert bewegen kann. Bei vierbeinigen Tieren, die beide Beine phasengleich auf einer Seite bewegen, spricht man von Passgang.

*Mit folgenden Stichwörtern findet man bei YouTube viele videos und Webseiten zum Thema:
Lauftiere, Laufente, waddling duck, ramp walking toy, passive walker, dynamic walker*

Zusammenfassung

Lauftiere wackeln eine schiefe Ebene hinunter oder werden durch ein sich absenkendes Gewichtsstück gezogen. Schon Kleinkinder sind fasziniert von diesem über 100 Jahre alten Spielzeug. Ingenieure beschäftigen sich aktuell damit, da sich mit dem dahinter stehenden Prinzip überraschend energiesparende Konstruktionen von Laufrobotern realisieren lassen. Eine genaue Analyse ergibt interessante Parallelen zur Stick-and-Slip Bewegung des Pickspechts.

Eigenbau

Einige Typen von Lauftiere lassen sich mit nicht allzu viel Aufwand selbst bauen. Der Vorteil des Selbstbaus besteht darin, dass man einige Parameter wie beispielsweise Trägheitsmoment, Lage des Schwerpunkts oder Schrittlänge verändern kann.

In dem Buch von Magdalen Bear [12] finden sich Ausschneidebögen aus einem leichtem Karton, die allerdings einige Geduld und Erfahrung beim Zusammenbau erfordern. Immerhin sind da Schere und Klebstoff ausreichend. Die typische Laufente ist eines der Designs.

Im Internet finden sich mehrere Anleitungen. Der Nachbau einer Laufente aus Holz ist in [13] (Englisch) beschrieben. Ein Bauplan (Englisch) für ein wackelndes Rhinoceros mit zwei

Beinen aus Holz ist in [14] ersichtlich. Dazu sind dann schon einige Holzbearbeitungsgeräte notwendig.

Etwas aufwendiger ist ein wackelnder Roboter aus Holz mit zwei nebeneinander liegenden Füßen [4]. Hier ist eine Drehbank hilfreich.

Keine direkten Baupläne, jedoch hinreichend anschauliche Videos können die Eigenkreativität zum Nachbau anregen [15]. Mit Legoteilen lässt sich ein ‚dreibeiniger‘ passiver Walker zusammenstecken [9].

Wittman [16] beschreibt den Bau von vierbeinigen Lauftieren aus Holz.

Literatur bzw. weblinks:

- [1] Waddling Duck Toy Physics, youtube.com/watch?v=huOoqu6O-Yo&feature=related
- [2] Ucke, C., Schlichting, H.J.: Spiel, Physik und Spaß, Wiley-VCH, Weinheim 2011, S. 51
- [3] Leine, R.I. et al.: Nonlinear Dynamics and Modeling of Various Wooden Toys with Impact and Friction, *Journal of Vibration and Control* **vol 9 no. 1-2** (2003) 25-78,
<http://www.zfm.ethz.ch/~leine/toys.htm> , bit.ly/KkbTK1
- [4] ramp-walking wooden robot, <http://blog.dugnorth.com/2011/02/download-plans-for-ramp-walking-wooden.html>; aus dem Video auf der Webseite wurde die Bildfolge der Abb. 3 entnommen.
- [5] Wallis, George T: Walking Toy, American Patent No. 376.588 ,1888
- [6] www.selfwalkingtoys.com/bear.html
- [7] Fong, Ming-fai: Mechanical Design of a Simple Bipedal Robot, Bachelor of Science in Mechanical Engineering, MIT 2005, USA
- [8] Collins, S. et al.: Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers, *Science*, Vol. **307** (2005), 1082
- [9] LEGO Passive Dynamic Walker,
youtube.com/watch?NR=1&feature=endscreen&v=dqW9A5Jk4jE
- [10] Wood hopping bunny toy,
youtube.com/watch?feature=endscreen&NR=1&v=s1qOY_7xrTs
- [11] http://holzgestaltung-lipkowsky.de/rubriken/spielzeug/sz_tiere_1.html
- [12] Bear, M.: Walking Automata, Tarquin Publications, St Albans 2007
- [13] How To Make a Waddle Duck Toy, <http://re.trotoys.com/article/waddling-duck-mechanical-toy/>
- [14] Free plans for a ramp-walking wooden rhino toy,
<http://blog.dugnorth.com/2010/09/plans-to-make-ramp-walking-wooden-rhino.html>
- [15] www.youtube.com/watch?v=izgfCAyFzaM&feature=related , japanisch
- [16] Wittmann, J.: Trickkiste 1, Bayerischer Schulbuch-Verlag, München 1983

Die Autoren

Christian Ucke und Hans-Joachim Schlichting sind die Begründer unserer Rubrik Spielwiese.

Anschriften

Dr. Christian Ucke, Rofanstraße 14B, 81825 München, Ucke@mytum.de

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Didaktik der Physik, Universität Münster,

48149 Münster, Schlichting@uni-muenster.de.