

Der trinkende Storch - eine Verdunstungskraftmaschine

H. Joachim Schlichting

... denn das Erscheinen des Vogels warf unsere ganze bisherige Denkweise über den Haufen.

Italo Calvino Cosmicomics

Unendlicher Durst

Vor uns steht ein zauberhafter schwarzer Vogel mit langem Hals und rotem Kopf der Spezies technischer Spielzeuge [1 - 8]. Bevor wir uns daranmachen, ihm physikalisch zu Leibe zu rücken und sein Verhalten dadurch zu "entzaubern", wollen wir ihn einige Zeit in Aktion erleben (Abb.1):

Langsam taucht er seinen Schnabel in das vor ihm stehende Wasserglas, richtet sich danach ganz artgerecht wieder auf und schwingt aufgeregzt hin und her, als ob er es nicht abwarten kann, einen weite-

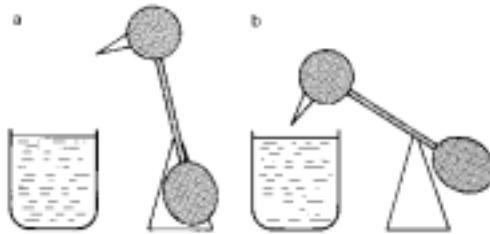


Abb. 1: Nach einigen Schwingungen taucht der Storch den Schnabel ins Wasserglas ein.

ren Schluck zu nehmen. In der Tat werden die Schwingungen allmählich wieder kleiner, der Vogel beugt sich abermals vor und taucht den Schnabel erneut ins Wasser.

Wer dem Vogel zum ersten Mal beim Trinken zusieht, wird spätestens dann unruhig, wenn abzusehen ist, daß er offenbar einen unendlichen Durst zu stillen hat: Solange man auch wartet, er macht keine Anstalten, das Trinken einzustellen. Er kann damit stundenlang, ja tagelang fortfahren, sofern für genügend Flüssigkeit gesorgt ist. Er ist eben ein wahrer Schluckspecht!

Seltsames Verhalten

Dieser Eindruck wird dadurch noch verstärkt, daß er dem Glas noch häufiger zuspricht, wenn ihm statt Wasser Alkohol angeboten wird. Während er den Schnabel nur etwa zweimal pro Minute in das Wasserglas eintaucht, steigert er seine Schluckfrequenz bei Alkohol auf fast 13 mal pro Minute.

Auch durch ein leichtes seitliches Anblasen des Kopfes (eine mechanische Beeinflussung durch den Luftstrom muß vermieden werden) spornt man den Vogel zu größerer Eile an. Ja, sogar das Bestrahlen mit Licht oder Wärme läßt den Storch nicht kalt. Er reagiert jedoch unterschiedlich je nach dem, ob man den Kopf oder das Hinterteil bestrahlt. Richtet man die Lichtquelle auf den Kopf, so wird der Storch träge und stellt seine Trinkbewegungen schließlich ganz ein. Hingegen treibt man ihn zu noch größerer Aktivität an, wenn das Licht auf das Hinterteil fällt.

Schließlich stellt der Vogel auch dann nach einiger Zeit seine "Lebensvorgänge" ein, wenn man ihn samt Trinkgefäß von der Außenwelt abschließt, also z.B. unter eine Glasglocke stellt. Es scheint, als lebte er nicht von Flüssigkeit allein, sondern - wie andere Lebewesen- auch von Luft, und müßte ersticken, wenn der Luftaustausch mit der Umgebung unterbrochen wird.

Wie ernährt sich der Storch?

Anders gefragt: Wodurch vermag er seine Lebensvorgänge aufrechtzuerhalten? Wie gelingt es ihm, seine unverwechselbare Individualität, die sich auf die oben beschriebene "Trinkfestigkeit" reduzieren läßt, zu bewahren? Diese Frage stellt sich insbesondere angesichts der Schwierigkeit, eine äußere Energiequelle auszumachen, durch die die Lebensvorgänge des Vogels aufrechterhalten werden. Ohne eine solche Energiequelle würde die in der Schwingung des Storches zum Ausdruck kommende mechanische Energie schnell

dissipiert werden, also als Wärme an die Umgebung übergehen. Der umgekehrte Fall, daß ein System wertlose Wärme aus der Umgebung aufnimmt und in mechanische Energie "aufwertet", steht im Widerspruch zur Erfahrung, die im sog. *Entropiesatz* bzw. Prinzip der *Energiedissipation* zum Ausdruck gebracht wird.

Eine solche *Energieaufwertung* wäre nur dann möglich, wenn gleichzeitig ein selbsttätiger Prozeß mit einer so großen *Energieentwertung* abliefe, daß die Aufwertung mindestens kompensiert würde (ausführlich in [9]).

Die Antwort auf die obige Frage läuft daher auf die Identifizierung (mindestens) eines selbsttätigen Prozesses hinaus, der die ständige Energieaufwertung, die sich in den "Lebensvorgängen" des Vogels, in seinen Schwingungsfiguren, manifestiert, durch eine entsprechende Energiedissipation bzw. Entwertung ausgleicht und folglich als Antriebsvorgang anzusehen ist.

Der einzige äußerlich erkennbare selbsttätige Vorgang besteht in der Verdunstung des Wassers, das im filzüberzogenen Kopf des Vogels gespeichert ist und durch das Eintauchen des Schnabels in das Wasserglas ständig nachgeliefert wird.

Wir sind es gewohnt, die Energie als das universelle Antriebssubstrat anzusehen. Die Verdunstung hat aber zunächst überhaupt nichts mit Energie zu tun. Wenn sie dennoch als Antrieb des Vogels in Frage kommt, so deshalb, weil sie es ermöglicht, daß Wärme aus der Umgebung in mechanische Energie aufgewertet werden kann, um die mit der Schwingung verbundenen Dämpfungsverluste auszugleichen. Nicht die Energie ist

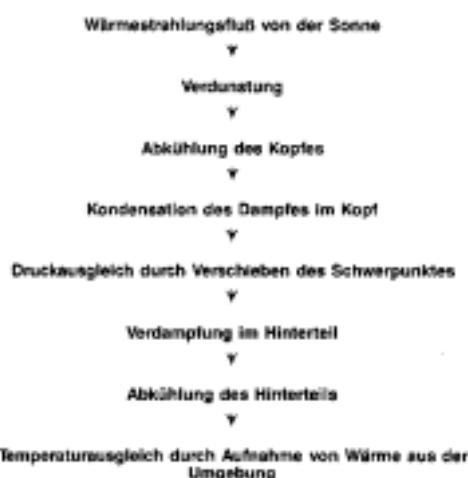


Abb. 2: Der Storch lebt letztlich wie andere Lebewesen auch von der Sonne. Thermodynamische Vorgänge während eines „Trinkzyklus“

entscheidend zum Antrieb bzw. zur Aufrechterhaltung einer Struktur. Letzlich kommt es nur dar-

auf an, daß ein geeigneter selbsttätiger Vorgang abläuft, der die Vorgänge zurückspult, die für die Aufrechterhaltung der Struktur, hier: der Schwingung des Vogels, von Bedeutung sind. Die mit der Verdunstung einhergehende Entwertung kompensiert die mit der Umwandlung von Umgebungs-wärme in mechanische Energie verbundene Aufwertung (vgl.[9]).

Rein anschaulich besteht die Entwertung durch Verdunstung darin, daß Wasser über ein großes Volumen gewissermaßen unauffindbar verteilt wird. Voraussetzung dafür ist allerdings das Vorhandensein einer genügend geringen Luftfeuchte. Sie ist in offenen Systemen vorhanden, weil die Sonnenstrahlung für ein Aufsteigen der Feuchtigkeit in größere Höhen sorgt, wo sie schließlich wieder kondensiert und als Niederschlag zur Erde zurückkommt (Wasserkreislauf [10]). Deshalb muß der Vogel auch unter der Glashölle "erstick-en": Durch die ständige Verdunstung wird das nunmehr begrenzte Luftvolumen feuchtigkeitsge-sättigt, d.h. es verdunstet dann im zeitlichen Mittel genausoviel Wasser wie wieder auskondensiert (die relative Luftfeuchte nimmt den Wert 1 an).

Letztlich haben wir es also bei unserem Storch mit einer besonders raffinierten Form eines Solarantriebs zu tun (siehe Abb. 2).

Mechanismen

Diese rein thermodynamische Betrachtung der Lebensvorgänge des Vogels verrät noch nichts über die in seinem Innern ablaufenden Prozesse, die Mechanismen also, durch die der Antrieb zu standegebracht wird. Im Unterschied zu realen Lebewesen gibt es den trinkenden Storch auch in einer durchsichtigen Version, die uns einen Blick in das Innenleben erlaubt. (Normalerweise ist der Storch durchsichtig. Wir stellen den Schülern zunächst aus "didaktischen" Gründen eine schwarz gestrichene Black-Box-Version vor).

Man kann auf diese Weise unmittelbar beobachten, wie die Schwingungen des Vogels hervorgerufen werden. Im Körper des Vogels befindet sich eine farbige Flüssigkeit, die langsam in den Hals des Vogels aufsteigt (Abb. 3a). Infolgedessen wird der Schwerpunkt des Vogels allmählich nach oben verschoben, der Vogel neigt sich nach vorn (Abb. 3b), bis der Schnabel schließlich in das bereitstehende Wasser eintaucht (Abb. 3c). Dabei hebt sich die "Speiseröhre" aus der Flüssigkeit im Hinterteil des Vogels heraus, so daß die darin aufgestiegene Flüssigkeit zurückströmen kann. Mit der Entleerung der "Speiseröhre" verschiebt sich auch wieder der Schwerpunkt nach unten. Der Storch kippt in seine ursprüngliche senkrechte Lage zurück, schwingt einige Male hin und her

noch zu klären, auf welche Weise die Verdunstung das Aufsteigen der Flüssigkeit betreibt. Durch die Verdunstung wird der Umgebung, also



Abb. 3a: Während der Storch hin und herschwinge, steigt ihm die rote Flüssigkeit zu Kopf.

Abb. 3b: Infolgedessen überschreitet der Schwerpunkt den Drehpunkt, und der neigt sich nach vorn.

Abb. 3c: Während der Schnabel ins Wasser eintaucht, wird die "Speiseröhre" aus der Flüssigkeit im Hinterteil herausgehoben, so daß die Flüssigkeit aus der Röhre zurückfließen kann.

vor allem dem benetzten Kopf des Storches, Wärme entzogen, die zur Trennung und Fortbewegung der Wasserteilchen benötigt wird. Da das Gleichgewichtsbestreben, das sich in der Verteilung der Wasserteilchen über ein größeres Volumen manifestiert, offenbar größer ist als das Temperaturausgleichsbestreben, kühlt sich der Kopf auf eine Temperatur unterhalb der Umgebungstemperatur ab.

Im Innern des Storches befindet sich eine leicht verdampfende Flüssigkeit im Gleichgewicht mit ihrem Dampf, der unter einem der jeweiligen Temperatur entsprechenden Druck steht. Durch die Abkühlung des Kopfes wird dieses Gleichgewicht (lokal) gestört, ein Teil des Dampfes kondensiert an der abgekühlten Wand aus. Infolgedessen sinkt der Dampfdruck im Kopf unter den Dampfdruck der Flüssigkeit im Hinterteil des Storches. Ein Druckausgleich ist aber nur dadurch möglich, daß Flüssigkeit durch die "Speiseröhre" hochgedrückt wird.

Da aufgrund des Druckausgleichs jetzt auch im Hinterteil des Storches der Druck abnimmt, kommt es hier zu einer der Druckerniedrigung entsprechenden Verdampfung von Flüssigkeit. Die dafür benötigte Wärme wird vornehmlich der Flüssigkeit entzogen, die auf diese Weise unter die Umgebungstemperatur abgekühlt wird. Die Temperaturausgleichstendenz setzt daraufhin einen Wärmestrom von der Umgebung auf den Körper des Storches in Gang.

Letztlich bedingt also die Abkühlung des Kopfes auch einen die Temperaturdifferenz ausgleichenden Wärmestrom von der Umgebung über den Umweg des Hinterteils. Da dies nicht ohne ein Heben und Senken von Flüssigkeit im Körper

möglich ist, kommt es zu einer Aufwertung eines Teils der aufgenommenen Wärme in mechanische Bewegungsenergie.

Der Storch- eine sinnreiche Kombination aus Wärmepumpe und Wärmekraftmaschine

In typisch thermodynamischer Sprechweise ist der Storch also eine Kombination aus *Wärmepumpe* und *Wärmekraftmaschine*. Wie in einer *Wärmepumpe* (z.B. einem Kühlschrank) wird durch einen Verdunstungs- bzw. Verdampfungsvorgang, der letztlich als kleiner "Abzweiger" des solarbetriebenen Wasserkreislaufs anzusehen ist [10], ein Körper, hier der Kopf des Storches, unter Umgebungstemperatur abgekühlt. Die dadurch hervorgerufene Temperaturdifferenz zwischen kaltem Kopf und warmem Hinterteil wird nunmehr wie in einer *Wärmekraftmaschine* dazu ausgenutzt, nach dem soeben beschriebenen Mechanismus mechanische Energie zu "erzeugen", die sich in der Bewegung des Storches manifestiert.

Das kann man auch auf direktem Wege erreichen, indem man die Temperaturdifferenz zur Umgebung durch Erwärmung des Hinterteils hervorruft: Wird dieses beispielsweise der Strahlung einer heißen Lampe ausgesetzt, so macht der Storch auch dann seine typischen Schluckbewegungen, wenn sein Kopf trocken bleibt. Umgekehrt kann man - wie eingangs geschildert- die "Lebensäußerungen" des Vogels "abwürgen", wenn man den feuchten Kopf bestrahlt. Es genügt bereits, daß auf diese Weise die für die Verdunstung nötige Wärme direkt durch die Strahlung zugeführt wird und eine Abkühlung des Kopfes unterbleibt.

Wenn der Kopf leicht angeblasen wird, antwortet der Vogel mit einem erhöhten Nickfrequenz. Von Schülern wird demgegenüber häufig erwartet, daß das Anblasen des Kopfes eine ähnliche Wirkung hat wie die Wärmestrahlung. Denn - so wird argumentiert - die Atemluft sei wärmer als die Umgebungsluft, da sie ungefähr die Körpertemperatur des Menschen angenommen habe. Wenn man den Kopf anbläst, erwärmt man ihn aber nicht nur, sondern erhöht auch die Verdunstungsrate. Denn die Verdunstung hemmende feuchte Luft wird unmittelbar über dem nassen Kopf beseitigt. Die dadurch hervorgerufene Abkühlung ist offenbar viel größer als eine mögliche Erwärmung. Diesen Sachverhalt kann man sich beispielsweise dadurch klarmachen, daß man den zunächst trockenen und anschließend befeuchteten Handrücken anbläst. Im ersten Fall spürt man eine Erwärmung im letzten Fall eine deutliche Abkühlung.

Die Ersetzung des Wassers durch Alkohol hat ebenfalls eine Erhöhung der Verdunstungsrate zur

Folge, weil Alkohol weitaus "flüchtiger" ist als Wasser. Die erfrischende Wirkung eines mit Eau de Cologne (also vor allem Alkohol) benetzten Körperteils wird durch die relativ starke Abkühlung aufgrund der großen Verdunstungsrate des Alkohols hervorgerufen.

Vor- und Nachfahren des Storches

Das Prinzip des trinkenden Storches ist keine Erfindung unserer Tage. Zum ersten Mal erwähnt wird eine dem Storch ähnliche Vorrichtung von *Johann Bernoulli* in einem Brief an *Leibniz* im Jahre 1698 [11]. *Bernoulli* hatte jedoch keine Kraftmaschine, sondern ein Thermometer im Sinn, das geeignet war, sich die in einem bestimmten Zeitraum erreichten maximalen Temperaturen zu "merken" (siehe Abb. 4). Dabei wurde natürlich nicht die Verdunstung ausgenutzt, sondern der Wärmeaustausch mit der Umgebung aufgrund von Temperaturschwankungen. Dieses Thermometer ist damit gleichzeitig als Vorläufer des heutigen Minimax-Thermometers anzusehen, dem allerdings ein völlig anderes Prinzip zugrundeliegt. Eine Variante dieses Thermometers ist ein

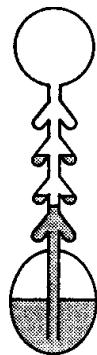


Abb. 4: Vorläufer des Storches; das Maximum Thermometer von *Bernoulli*.

in unseren Tagen unter Bezeichnungen wie *Temperamentsmesser* und *Liebesthermometer* erhältliches Spielzeug [12].

Die mechanischen Wirkungen des obigen Prinzips wurden spätestens im Jahre 1874 erkannt. *Bernardi* [13] beschreibt unter der Bezeichnung *thermométrische Schaukel* eine Verdunstungskraftmaschine, die unserem Storch schon sehr ähnlich ist. Er dachte auch bereits an eine technische Ausnutzung dieses raffinierten Antriebstricks. Er konstruierte durch Verbinden dreier solcher Schaukeln ein sog. thermomotorisches Rad (Abb. 5). Die kontinuierliche Drehung bad auftauchenden Kugeln verdunstet und eine leicht siedende Flüssigkeit zum Aufsteigen bringt. Dadurch werden die oberen Kugeln schwerer als die unteren, bewegen sich unter Drehung des Rades

nach unten, tauchen erneut in das Wasser ein und drehen die gegenüberliegenden stark benetzten leichten Kugeln aus dem Wasser heraus usw.

Wie bereits am Beispiel des trinkenden Storches verdeutlicht wurde, kann der Verdunstungsantrieb auch dadurch unterstützt oder sogar ersetzt werden, daß dem System direkt Wärme zugeführt wird. Erwärmst man nämlich die Glaskugeln des Rades, indem man sie durch ein warmes Wasserbad gehen läßt, so resultiert unabhängig von der Verdunstung eine Drehung des Rades. In diesem Fall wird das Aufsteigen der Flüssigkeit und die zur Drehung führende Exzentrizität des Rades vor allem bedingt durch die Erwärmung der jeweils ins Wasserbad eintauchenden Kugeln. Durch die Drehung werden dann die an der Luft erkaltenen Kugeln wieder ins warme Wasser befördert, und

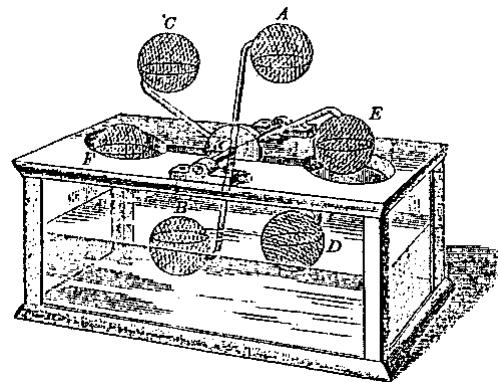


Abb. 5: Thermometrisches Rad - eine durch Verdunstung betriebene Wärmekraftmaschine.

der Vorgang kann sich wiederholen. Die durch direkte Erwärmung hervorgerufene Drehung übersteigt in ihrer Wirksamkeit den parallel dazu ablaufenden Verdunstungsantrieb um ein Vielfaches.

Diese Variante des *thermométrischen Rades* ist vor einigen Jahren [14] zur Nutzung der in vielfältiger Form in der Natur vorliegenden und aufgrund technischer Vorgänge anfallenden Nieder temperaturwärme vorgeschlagen worden.

Quantitative Abschätzungen

Spielzeuge als physikalische Untersuchungsobjekte haben zahlreiche Vorteile gegenüber physikalischen Geräten, die eigens für ein bestimmtes Experiment konstruiert wurden. Sie haben aber auch Nachteile. Der größte Nachteil besteht wohl darin, daß quantitative Untersuchungen sich entweder schwierig gestalten oder auf grobe Abschätzungen beschränkt bleiben müssen.

Wir wollen im folgenden dennoch einige solcher groben Abschätzungen am Beispiel des trinkenden Storches vornehmen, um daran beispielhaft

- die Quantifizierung von Beobachtungsdaten,
- typische Idealisierungen und Näherungen und
- die Beziehungen zwischen quantitativen Gesetzmäßigkeiten und qualitativen Argumenten zu illustrieren.

In diesem Sinne werden die folgenden quantitativen Abschätzungen durchgeführt:

1. *Wieviel Wärmeenergie läßt sich maximal mit Hilfe der Verdunstung aufwerten, d.h. in mechanische Energie umwandeln?*
2. *Wie groß muß die zur Aufrechterhaltung der Schwingung des Storches benötigte mechanische Energie mindestens sein?*

ad. 1:

Zur Beantwortung der ersten Frage ist es nötig, die Verdunstungsrate des Wassers festzustellen, das beim "Trinken" durch den Filzüberzug des Kopfes aufgenommen wird. Die einfachste Methode besteht darin, mit Hilfe einer Laborwaage den Massenverlust des Wasserglases zu ermitteln, aus dem der Storch das Wasser entnimmt. Dazu mißt man den Gesamtmassenverlust des Wasserglases über einen genügend großen Zeitraum (etwa 24 Stunden) und subtrahiert davon den Massenverlust aufgrund der direkten Verdunstung aus dem Glas. Diesen kann man durch Wägung eines zweiten Glases feststellen, das nur durch Verdunstung Wasser verliert.

Aufgrund einer solchen Messung haben wir für den feuchten Kopf des Storches bei einer Zimmertemperatur von $\vartheta = 21^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte $f_{\text{rel}} = 48\%$ eine Verdunstungsrate von $m = 0,010 \text{ mg/min}$ ermittelt.

Als nächstes muß bestimmt werden, welche Abkühlung unter diesen Bedingungen erreichbar ist. Auf den ersten Blick erscheint es plausibel, dabei folgendermaßen vorzugehen: Die Abkühlung durch Verdunstung wird begrenzt durch den Taupunkt des Wassers. Das ist die Temperatur, bei der die absolute Luftfeuchte gleich der maximalen wird, das Verhältnis aus beiden, die sog. relative Luftfeuchte f_{rel} , einen Wert von 100% annimmt. Dann nämlich halten sich die Verdunstungstendenz und der dieser entgegenwirkende Dampfdruck genau die Waage. Aus der Kenntnis der aktuellen relativen Luftfeuchte f_{rel} , die man an einem Hygrometer ablesen, und dem Dampfdruck P_w bei der jeweils herrschenden Temperatur, den man einem geeigneten Tabellenwerk (z.B. [15]) entnehmen kann, läßt sich der Taupunkt und damit die Temperaturabnahme aufgrund der Ver-

dunstung leicht abschätzen: Bei einer Temperatur ϑ von 21°C beträgt der Dampfdruck von Wasser $P_w(21^\circ\text{C}) = 2,486 \text{ kPa}$. Bei einer tatsächlich herrschenden relativen Luftfeuchte $f_{\text{rel}} = 48\%$ beträgt der Teildruck P des Dampfes in Luft demnach: $P = P_w \cdot 0,48 = 1,193 \text{ kPa}$, was gemäß Tabelle einem Dampfdruck von Wasser bei einer Temperatur von $9,5^\circ\text{C}$ entspricht.

Auf den zweiten Blick wird jedoch klar, daß diese Temperaturabnahme selbst unter idealen Bedingungen nicht erreicht werden kann. Denn die Temperatur des feuchten Kopfes sinkt natürlich nur so lange, bis die Wärmezufuhr aus der Luft (die mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Umgebung steigt), den Wärmeverlust durch Verdunstung gerade kompensiert. Wir haben daher die Temperaturabnahme mit Hilfe eines sogenannten Psychrometers gemessen, welches im Prinzip ein Thermometer darstellt, dessen Vorratsgefäß mit einem feuchten Tuch umgeben ist. Die die Verdunstung und damit die Abkühlung fördernde Bewegung des Storches kann durch eine entsprechende Bewegung des Psychrometers simuliert werden. Auf diese Weise haben wir unter den gegebenen Bedingungen eine Abkühlung des Kopfes von $\vartheta = 21^\circ\text{C}$ auf $\vartheta_k = 16,5^\circ\text{C}$ ermittelt.

Würde der Vogel wie eine ideale Wärmekraftmaschine zwischen Zimmertemperatur ϑ und der Temperatur ϑ_k des feuchten Kopfes arbeiten, so könnte er dies mit einem maximalen Wirkungsgrad von

$$\eta = 1 - \frac{T_k}{T} = 0,015$$

tun (T und T_k sind die entsprechenden absoluten Temperaturen).

Um eine Wassermasse $\dot{m} = 10 \text{ mg/min}$ zu verdunsten, muß bei einer spezifischen Verdampfungswärme von 2461 kJ/kg (genommen bei ϑ_k) eine Leistung

$$P_v = 2461 \text{ kJ/kg} \cdot 0,010 \text{ g/min} = 0,41 \text{ W}$$

aufgenommen werden. Legt man den obigen Wirkungsgrad zugrunde, so könnte aus P_v maximal eine mechanische Leistung $P_m = \eta \cdot P_v = 0,006 \text{ W}$ gewonnen werden.

ad. 2:

Daß der Vogel in seinem energetischen Wirkungsgrad weit von einer idealen Wärmekraftmaschine entfernt ist, kann man durch eine Abschätzung der Energie klarmachen, die zur Aufrechterhaltung der Schwingung nötig ist. Sie ergibt sich aus der potentiellen Energie, die aufzuwenden ist, um die Flüssigkeitssäule so hoch zu heben bis der Vogel kippt:

In unserem Fall kommt es im Mittel zu 2,7 Schwingungen pro Minute, wobei die Flüssigkeit jeweils um etwa $h = 11$ cm gehoben wird. Die Flüssigkeitssäule hat einen Radius von schätzungsweise $r = 3$ mm. Die Dichte der Flüssigkeit (z.B. Methylenchlorid, Siedetemperatur bei 40,1 °C) beträgt $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$. Um diese Schwingungen aufrechtzuerhalten, ist eine mechanische Leistung von

$$P_{\text{real}} = \Delta E_{\text{pot}} / dt = v \rho g \int h dV = v \pi r^2 \rho g \int h dh \\ = \frac{1}{2} v \pi r^2 \rho g h^2 = 0,0001 \text{ W}$$

erforderlich. Vergleicht man P_{real} mit P_m , so zeigt sich, wie weit der Vogel davon entfernt ist, ideal zu arbeiten.

Schließlich ist noch daran zu erinnern, daß im Grunde nur die Leistung in Betracht gezogen wurde, mit der der Vogel seine eigenen "Lebensfunktionen", nämlich die Schwingungen des Körpers aufrechterhält. Würde man nur die Arbeit berücksichtigen, die der Storch tatsächlich an der Umgebung verrichten könnte, (z.B. mit Hilfe einer geeigneten Vorrichtung mit jedem Nicken ein Gewichtstück zu heben,) so sähe die Bilanz noch viel schlechter aus. Der trinkende Storch ist eben ein Spielzeug und kein technisch optimiertes Kraftwerk.

Literatur

- [1] Erhältlich z.B. bei: Physik-Boutique. Stark Verlag. Postfach, 8050 Freising
- [2] Bent, H.A, Teague, J.J: The Hydro- Thermal-Dynamical Duck. J. College Science Teaching 8, 18 (1978)
- [3] Gaines, J.L.: Dunking Bird. Am. J. Phys. 27, 189 (1959)
- [4] Kolb, K.B.: Reciprocating Engine. Physics Teacher 4, 121 (1966)
- [5] Kluge, R.: Erkenntniswege im Physikunterricht. Stuttgart: Klett 1970
- [6] Miller, J.S.: Physics of the Dunking Duck. Am.J. Phys. 26, 42 (1958)
- [7] Plumb, R.C.: Physical Chemistry of the Dunking Bird. J. Chem. Education 50, 213 (1973)
- [8] Sauer, J.: Suffi, eine merkwürdige kleine Dampfmaschine. Phys. Bl. 22/3, 118 (1966)
- [9] Schlichting, H.J.: Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983.
- [10] Schlichting, H.J.: Zum Antrieb natürlicher Stoffkreisläufe. physica didactica 16/4, 47 (1989).

[11] zit. nach Ref. [2].

[12] Dieses Liebesthermometer ist seit kurzem in der Bundesrepublik vom Bundesgesundheitsministerium verboten und daher nicht mehr erhältlich. Persönl. Mitteilung von Chr. Ucke.

[13] zit. nach: Reis, P.: Lehrbuch der Physik. Leipzig: Quandt & Händel 1876.

[14] Minto, W.: The Minto Wheel and Wheel Supplement. San Power Systems, Inc. 1121 Lewes Ave, Sarasota 33577 USA 1975

[15] Weast, R.C., Astle, M.J.: Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton: CRC Press 1981