Kai Stratmann
Binsenstraße 2
26129 Oldenburg
Tel.:0441-7770444

E-Mail: kai.stratmann@mail.uni-oldenburg.de

Lehramt Gymnasium
(Physik, Mathematik)
Matrikelnummer: 6862330

Das Toast-Problem
oder
Ist Materie bösartig?

Hausarbeit im Proseminar II zur Physik
für Lehramt
im Sommersemester 1999
Leitung: Prof. Dr. V. Mellert

I. Einleitung

Haben unbelebte Gegenstände eine Seele? Handeln sie möglicherweise sogar unter Vorsatz, und sind sie uns dabei böse gesinnt? Es gibt immer wieder Situationen, in denen manche Menschen vermuten, dass diese Fragen mit ja zu beantworten sind.
Ein sehr schönes Beispiel für einen solchen Irrglauben findet sich in einer Geschichte von Ephraim Kishon:
„Mein Großvater, der ein sehr gescheiter Mann war, glaubte an übernatürliche Phänomene. [...] Nicht gerade an Geister. Aber er war überzeugt, dass tote Gegenstände – es klingt ein wenig lächerlich, entschuldigen Sie –, also dass Dinge, wie ein Tisch, eine Schreibmaschine, ein Grammophon, [ein Toast,] sozusagen ihre eigene Seele haben. [...] Mein Großvater schwor, dass sein Grammophon ihn hasste. [...] Und eines Nachts – aber das hat natürlich nichts damit zu tun – fanden wir ihn leblos neben dem Grammophon liegen. Die Platte spielte noch.“ (S. 80)

Eine ähnliche Situation, die viele Menschen schon am frühen Morgen ereilt, soll hier näher beleuchtet werden.
Bestimmt ist es den meisten Menschen schon oft genug passiert: Beim Frühstück rutscht die mit Marmelade oder Honig beschmierte Toastscheibe einem aus Versehen vom Tisch oder vom Teller – und sie landet grundsätzlich auf der beschmierten Seite und nötigt einen, schon am frühen Morgen den Teppich gründlich zu reinigen. Da kann man schon ins Grübeln kommen, ob die Materie es böse mit einem meint; wie einfach wäre es doch gewesen, wenn der Toast auf der sauberen Seite gelandet wäre, sodass man ihn noch hätte essen können und man kein Problem mit der Teppichreinigung gehabt hätte.
Mein ehemaliger Physiklehrer hat im Unterricht in der neunten Klasse einmal scherzhaft behauptet, dass die Tatsache, dass eine beschmierte Scheibe Toast immer auf der Marmeladenseite auf dem Boden landet, wenn sie vom Tisch fällt, ein eindeutiger Beweis dafür sei, dass Materie grundsätzlich bösartig ist. Er berichtete dann auch von einem Experiment, das er angeblich während seines Studiums durchgeführt hat. Dabei sollen von 200 beschmierten Brötchenhälften, die vom Tisch geschoben wurden, 80 % auf der beschmierten Seite gelandet sein. Das erinnert alles sehr stark an das sogenannte Gesetz von Murphy, das besagt, dass alles, was schief gehen kann, auch schief gehen wird – und die daraus abgeleitete Beziehung, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Toastscheibe auf der Honig- oder Marmeladenseite landet, proportional zum Preis des Teppichs ist.
Nun bin ich im Rahmen *meines* Studiums ebenfalls auf dieses Problem gestoßen und habe nicht nur praktische Erfahrungen mit herunterfallenden Brotscheiben gemacht, sondern auch einige Veröffentlichungen über die theoretischen Grundlagen dieses Problems gelesen.

Diese Arbeit soll nun diese theoretischen Grundlagen darstellen und erläutern, warum die Toastscheibe einfach auf der unerwünschten Seite landen *muss*, und warum es nicht Murphys Gesetze, sondern vielmehr die der klassischen Mechanik sind, die den Ausgang eines solchen Experiments bestimmen. Außerdem habe ich einen entsprechenden Versuch durchgeführt, den ich im dritten Kapitel beschreiben werde. Desweiteren werde ich untersuchen, ob dieses Problem nur auf der Erde eintritt, oder ob auch Lebewesen auf anderen Planeten mit ähnlichen Problemen zu kämpfen haben. Abschließend möchte ich noch auf die Seiten eingehen, die ich zu diesem Thema im Rahmen des Projektes „Physik für Kids“ ins Internet gestellt habe.

II. theoretische Grundlagen

Zu Beginn sollte man sich erst einmal klar machen, was denn eigentlich dazu führt, dass die Toastscheibe am Boden auf der Seite ankommt, die vorher oben lag. Die Antwort ist klar: Während des Fallens rotiert der Toast und dreht sich dabei gerade so, dass die beschmierte Seite nach unten zeigt, wenn er unten ankommt. Wenn man davon ausgeht, dass der Toast anfangs mit der beschmierten Seite nach oben auf dem Tisch lag[1], ist klar, dass er eine ungerade Anzahl von halben Umdrehungen hinter sich haben muss, wenn er auf der beschmierten Seite landet. Die folgenden theoretischen Überlegungen werden zeigen, dass der Toast bei einer üblichen Tischhöhe stets ungefähr eine halbe Umdrehung schafft, und so immer auf der beschmierten Seite landen muss.

Die folgenden Herleitungen basieren im Wesentlichen auf dem Artikel von Darryl Steinert, da mir dessen Weg im Gegensatz zu den anderen in VI. genannten Artikeln allgemein genug und gleichzeitig nicht zu aufwendig erschien.

Für die theoretische Betrachtung des Fallens der Toastscheibe können wir zunächst eine Reihe von Vereinfachungen vornehmen. Zu aller erst müssen wir uns von der naiven Vorstellung lösen, dass es bei dem Vorgang tatsächlich darauf ankommt, ob der Toast mit Butter, Marmelade, Honig, Nutella oder sogar überhaupt irgend etwas beschmiert ist – ebenso wenig von der Tatsache, ob das Brot getoastet ist oder nicht. Die Menge Butter, die ungefähr auf einem Toast verteilt wird, hat eine Masse von ca. 4g, was im Vergleich zur Masse des Toasts von ca. 35g sehr klein ist. Wenn man nun noch bedenkt, dass die Butter zu einem großen Teil auch in den Brotteig eindringt, wird klar, dass sie keinen nennenswerten Beitrag zu den dynamischen Eigenschaften des Toasts leiten kann. Auch die Veränderung der Aerodynamik der Scheibe durch den Belag sind zu vernachlässigen.

Der Toast kann nun vereinfacht als flacher Quader der Masse m und der Kantenlänge l angesehen werden, der von einer Tischplatte, die vom Fußboden aus die Höhe h besitzt, herunterfällt.

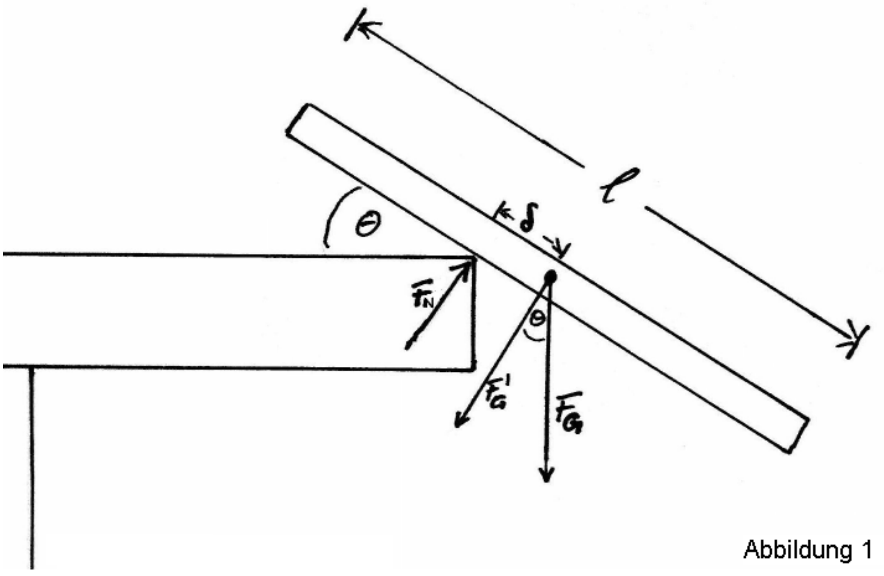

Abbildung 1

[1] Nach R. D. Edge behauptet ein Artikel im *Journal of Irreproducible Results* übrigens:
„Wenn Brot mit der beschmierten Seite noch oben landet, war es ursprünglich auf der Unterseite beschmiert.“
„If the bread lands butter-side up, it was originally buttered on the underside.“

Dieser Vorgang läuft folgendermaßen ab: Der Schwerpunkt des Toasts ragt um die Strecke δ über die Tischkante hinaus (vgl. Abb.1). Wir ignorieren hier, wie der Toast in diese missliche Lage gekommen ist und nehmen an, dass er keine horizontale Geschwindigkeit besitzt. Das ist in der Regel aber auch legitim, worauf ich später noch eingehen werde. Die Gewichtskraft, die auf den Toast wirkt, erzeugt ein Drehmoment, das dafür sorgt, dass der Toast sich um die Tischkante (seine Auflagelinie) dreht. Ab einem bestimmten Winkel kann die Haftreibung den Toast nicht mehr halten, und er beginnt, vom Tisch zu rutschen. Mit der zuvor erzeugten Rotation fällt der Toast dann zu Boden. Während des Rutschens wird die Rotation zwar weiterhin durch ein Drehmoment beschleunigt, jedoch werden wir diesen Anteil vernachlässigen, da er zum einen extrem aufwendig zu berechnen ist und zum anderen diese Beschleunigung der Drehbewegung auch nur eine sehr kurze Zeit lang einwirkt.

Für die Bewegung des Toasts sind folgende Kräfte von Bedeutung:

- Die Gewichtskraft $F_G = m\,g$
- Der Anteil der Gewichtskraft, der senkrecht zur Unterseite des Toasts wirkt $F_G' = m\,g\cos\theta$
- Die Normalkraft F_N, die den Toast auf den Tisch drückt
- Die Reibungskraft F_R

Als erstes Betrachten wir das Drehmoment T, das auf den Toast wirkt:

$T = F_G'\delta = mg\delta\cos\theta$ aber auch $T = I\dot{\omega}$

$\Rightarrow mg\delta\cos\theta = I\dot{\omega}$

wobei $\dot{\omega}$ die Winkelbeschleunigung und I das Trägheitsmoment des Toasts ist. Wenn wir den Toast als einen Stab annehmen, der sich um einen Punkt dreht, der um δ von seinem Schwerpunkt entfernt ist, gilt nach dem Steiner'schen Satz:

$I = I_0 + m\delta^2$

mit (laut Formelsammlung) $I_0 = \frac{1}{12}ml^2$

Also folgt die Gleichung

$$mg\delta\cos\theta = \left(\frac{1}{12}ml^2 + m\delta^2\right)\dot{\omega}\,, \qquad (1)$$

die wir später noch benötigen werden.

Als nächstes wollen wir die Normalkraft F_N berechnen. Dazu betrachten wir zunächst die Kraft, mit der der Schwerpunkt beschleunigt wird. Diese Kraft muss nach der Skizze sein: $F = F_G' - F_N = mg\cos\theta - F_N$

Sie lässt sich aber nach dem zweiten Newton'schen Axiom auch darstellen als: $F = ma$, wobei *a* die Beschleunigung des Schwerpunktes ist. Diese ist hier gegeben durch $a = \delta\dot{\omega}$, denn wenn man den vom Schwerpunkt überstrichenen Bogen *ds* betrachtet, kennt man folgende Beziehungen:

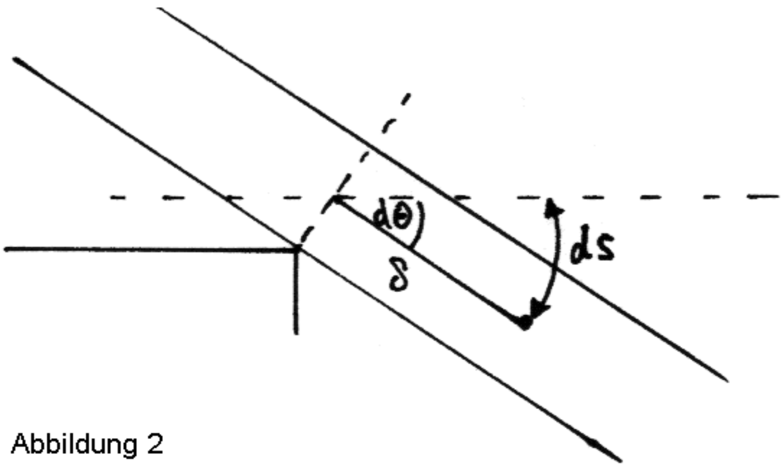

Abbildung 2

$a = \ddot{s};$

$\dot{s} = \frac{ds}{dt}$ und mit $d\theta = \frac{ds}{\delta}$ <=> $ds = \delta d\theta$

und $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ gilt $\dot{s} = \delta\omega$

=> $a = \delta\dot{\omega}$

Also wissen wir:

$m\delta\dot{\omega} = mg\cos\theta - F_N$

<=> $F_N = mg\cos\theta - m\delta\dot{\omega}$

womit wir nun die Normalkraft kennen.

Eine sehr wichtige Rolle bei diesem Vorgang spielt wie schon erwähnt die Haftreibungskraft F_R. Diese lässt sich berechnen, indem man in Betracht zieht, dass die Reibungskraft sowohl die Kraft ausgleicht, die aufgrund der Gewichtskraft auf den Toast in Richtung seiner Rutschbewegung wirkt als auch die Zentripetalkraft seiner Drehung. Es gilt also

$F_R = mg\sin\theta + m\delta\omega^2$,

wobei der erste Summand den Anteil der Gewichtskraft in Bewegungsrichtung des Toast darstellt und der zweite Summand der Zentripetalkraft entspricht. Allgemein kann man die Reibungskraft aber auch als Produkt aus Normalkraft und dem Reibungskoeffizienten μ angeben. μ ist dann also der Quotient aus Reibungskraft und Normalkraft und ist eine materialspezifische Konstante. Wenn wir unsere bisherigen Ergebnisse einsetzen, erhalten wir:

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} = \frac{mg\sin\theta + m\delta\omega^2}{mg\cos\theta - m\delta\dot{\omega}} \qquad (2)$$

Nun soll der Winkel θ berechnet werden, ab dem die Reibung den Toast nicht mehr auf dem Tisch halten kann. Dazu lösen wir zunächst (1) nach $\dot{\omega}$ auf und integrieren dann.

$$\dot{\omega} = \frac{mg\delta\cos\theta}{I} = \frac{g\cos\theta}{\delta\left(1 + \frac{l^2}{12\delta^2}\right)}$$

Das ergibt:

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{\delta\left(1 + \frac{l^2}{12\delta^2}\right)}\sin\theta} \qquad (3)$$

wie man durch Ableiten zeigen kann:

$$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\theta}\frac{d\theta}{dt}$$

$$= \sqrt{\frac{2g}{\delta\left(1 + \frac{l^2}{12\delta^2}\right)}} * \frac{1}{2}\sqrt{\sin\theta}^{-1} * \cos\theta * \frac{d\theta}{dt}$$

mit $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ kann man nun obige Formel für ω einsetzen :

$$\dot{\omega} = \sqrt{\frac{2g}{\delta\left(1+\frac{l^2}{12\delta^2}\right)}} * \frac{1}{2}\sqrt{\sin\theta}^{-1} * \cos\theta * \sqrt{\frac{2g}{\delta\left(1+\frac{l^2}{12\delta^2}\right)}\sin\theta}$$

$$= \frac{2g}{\delta\left(1+\frac{l^2}{12\delta^2}\right)}\frac{1}{2}\cos\theta = \frac{g\cos\theta}{\delta\left(1+\frac{l^2}{12\delta^2}\right)}$$

Setzt man dieses Ergebnis in (2) ein, erhält man:

$$\mu = \frac{g\sin\theta + \delta\frac{2g}{\delta\left(1+\frac{l^2}{12\delta^2}\right)}\sin\theta}{g\cos\theta - \delta\frac{g\delta^2\cos\theta}{\frac{1}{12}l^2+\delta^2}} = \frac{1+\frac{2}{\left(1+\frac{l^2}{12\delta^2}\right)}}{1-\frac{1}{\left(1+\frac{l^2}{12\delta^2}\right)}}\tan\theta = \frac{1+\frac{2}{\beta}}{1-\frac{1}{\beta}}\tan\theta = \frac{\beta+2}{\beta+1}\tan\theta$$

$$= \frac{3+\frac{l^2}{12\delta^2}}{\frac{l^2}{12\delta^2}}\tan\theta = \frac{36\delta^2+l^2}{l^2}\tan\theta$$

$$\mu = \left(1+36\frac{\delta^2}{l^2}\right)\tan\delta$$

$$<=> \tan\theta = \frac{\mu}{1+36\left(\frac{\delta}{l}\right)^2} \qquad (4)$$

Mit Gleichung (4) kann man nun für gegebene *μ, δ* und *l* den Winkel berechnen, bei dem das Rutschen beginnt. Durch Einsetzen in (3) erhält man die jeweilige Winkelgeschwindigkeit ω.

Nun kommt endlich die Tischhöhe *h* ins Spiel. Während seines Sturzes legt der Toast nämlich eben diese Strecke zurück und wird dabei gleichmäßig durch die Schwerkraft beschleunigt. Für diesen freien Fall gilt:

$$h = \tfrac{1}{2}gt^2$$

Für die Fallzeit t also: $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$

Man kann dann die Anzahl der Umdrehungen u berechnen, die ein Toast in dieser Zeit schafft.

$$u = \frac{\omega}{2\pi}\sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Die Werte für *l* und μ gibt einem die Beschaffenheit von handelsüblichem Toast vor. Die Toastsorten, die im Supermarkt zu finden sind, haben eine annähernd quadratische Grundfläche mit einer Kantenlänge von 9 cm. Wobei es aber auch den sogenannten Sandwich-Toast gibt mit einer Länge von 11 cm.

μ kann man für diese Materialkombination (Holz – Brotteig) leider nicht in mir bekannten Nachschlagewerken finden. Robert Matthews erwähnt in seinem Artikel allerdings, dass er bei seinen Versuchen mit einem speziellen Weißbrot-Imitat und einer Küchenarbeitsplatte für den Koeffizienten der Haftreibung einen Wert von μ = 0,25 gefunden hat. Dieser Wert erscheint mir allerdings zu klein, denn das würde bedeuten, dass ein Toast auf einer schiefen Ebene schon bei einem Winkel von 14° zu rutschen beginnen würde. Denn bei einem solchen Aufbau ist μ gerade der Tangens dieses Neigungswinkels. Ich habe also selber einen Test durchgeführt und für eine Sperrholzplatte und einen Vollkorntoast einen Winkel von 32° gemessen, was einen Reibungskoeffizienten von μ = 0,63 ergibt.

Die folgenden Tabellen zeigen für die beiden Toastgrößen und die beiden Reibungskoeffizienten jeweils für verschiedene Werte für den Überhang δ die zugehörigen Winkel θ und die resultierende Winkelgeschwindigkeit ω. Außerdem ist zu erkennen wie viele Umdrehungen der Toast bei üblichen Tischhöhen während seines Falls schafft.

μ = 0,25

L in m	***Überhang δ in m***	***Winkel θ in °***	***Winkelgeschw. ω in 1/s***
0,11	0,01	10,91	5,79
	0,02	6,51	5,62
	0,03	3,89	4,57
	0,04	2,49	3,61

Umdrehungen	Tischhöhe h in m		
	Couchtisch	*Esstisch*	*Stehtisch*
Überhang δ in m	***0,47***	***0,77***	***1,12***
0,01	0,32	0,40	0,47
0,02	0,30	0,37	0,45
0,03	0,24	0,30	0,36
0,04	0,18	0,23	0,28

L in m	***Überhang δ in m***	***Winkel θ in °***	***Winkelgeschw. ω in 1/s***
0,09	0,01	9,82	6,57
	0,02	5,14	5,72
	0,03	2,86	4,32
	0,04	1,77	3,26

Umdrehungen	Tischhöhe h in m		
	Couchtisch	*Esstisch*	*Stehtisch*
Überhang δ in m	***0,47***	***0,77***	***1,12***
0,01	0,35	0,44	0,53
0,02	0,30	0,37	0,45
0,03	0,22	0,28	0,34
0,04	0,17	0,21	0,25

μ = 0,63

L in m	***Überhang δ in m***	***Winkel θ in °***	***Winkelgeschw. ω in 1/s***
0,11	0,01	25,90	8,79
	0,02	16,05	8,78
	0,03	9,72	7,22
	0,04	6,24	5,72

Umdrehungen	Tischhöhe h in m		
	Couchtisch	*Esstisch*	*Stehtisch*
Überhang δ in m	***0,47***	***0,77***	***1,15***
0,01	0,51	0,63	0,75
0,02	0,48	0,60	0,72
0,03	0,38	0,48	0,58
0,04	0,30	0,38	0,46

L in m	***Überhang δ in m***	***Winkel θ in °***	***Winkelgeschw. ω in 1/s***
0,09	0,01	23,56	10,06
	0,02	12,78	8,99
	0,03	7,18	6,84
	0,04	4,44	5,17

Umdrehungen	Tischhöhe h in m		
	Couchtisch	*Esstisch*	*Stehtisch*
Überhang δ in m	***0,47***	***0,77***	***1,15***
0,01	0,56	0,70	0,84
0,02	0,48	0,60	0,73
0,03	0,36	0,45	0,55
0,04	0,27	0,34	0,41

Die gekennzeichneten Werte sind diejenigen, bei denen der Toast theoretisch auf der Marmeladenseite landen muss – also dann, wenn er mindestens eine viertel höchstens aber eine dreiviertel Umdrehung durchläuft. Man sieht, dass das fast immer der Fall ist. Die Werte werden sogar noch etwas verbessert, wenn man bedenkt, dass der Toast sich noch etwas schneller dreht, da seine Rotation auch während des Rutschens noch beschleunigt wird. Lediglich bei kleinem Reibungskoeffizienten (den ich wie gesagt für unwahrscheinlich halte) und großem Überhang schafft der Toast keine Vierteldrehung und müsste demnach auf der unbeschmierten Seite landen. Außerdem tritt bei großem μ und hohen Tischen das Problem auf, dass es tatsächlich auf den Überhang ankommt, denn ist δ sehr klein, schafft der Toast möglicherweise mehr als eine Dreivierteldrehung und bleibt dann auf der unbeschmierten Seite liegen. Das wird aber im Experiment nochmals aufgegriffen.

Durch die durchgeführten Berechnungen dürfte bewiesen sein, dass es nicht etwa eine Böswilligkeit der Materie ist, die dafür verantwortlich ist, dass uns herunterfallender Toast immer einen verschmierten Fußboden beschert. Es ist vielmehr seine Beschaffenheit und die unserer Tische, die dazu führt, dass sich der Toast aufgrund der Gesetze der Mechanik einfach so verhalten muss.

Was ist nun aber davon zu halten, dass die horizontale Geschwindigkeit vernachlässigt wurde. Es liegt ja nahe, anzunehmen, dass der Toast nicht mit einem gewissen Überhang auf die Tischkante gelegt wird, sondern vielmehr versehendlich dorthin gestoßen wird. Dann hätte er allerdings auch eine Geschwindigkeit in horizontaler Richtung. Diese Frage stellt sich auch Robert Matthews in seinem Artikel. Er kann dort allerdings zeigen, dass erst Geschwindigkeiten ab einem Wert von ungefähr 1,6m/s dafür sorgen, dass die Drehung nicht mehr die Bewegung dominiert, sodass der Toast dann wie ein einfaches Geschoss entlang einer Parabellinie vom Tisch zu Boden fällt und sich kaum dreht, was dazu führen würde, dass der Fußboden von der Marmelade verschont bliebe. Diese Geschwindigkeit ist jedoch recht hoch, und es ist nicht zu erwarten, dass ein Toast unabsichtlich so schnell vom Tisch gestoßen wird. Allerdings könnte es eine gute Strategie sein, den Fußboden zu schonen, indem man einem fallenden Toast durch einen Schlag noch eine hohe horizontale Geschwindigkeit verpasst. Man könnte ihm aber auch eine hinreichend große Rotationsgeschwindigkeit verpassen, sodass er während seines Falls mehr als eine Dreiviertelumdrehung zurücklegt und so auf der sauberen Seite landet. Allerdings sollte man bei diesen ‚Tricks' bedenken, dass dies möglicherweise auch dazu führen kann, dass der Toast mit viel Schwung gegen die nächste Wand fliegt.

III. Das Experiment

Aufbau und Durchführung:

In diesem Abschnitt soll es nun darum gehen, die theoretischen Erkenntnisse aus dem vorigen Kapitel zumindest ansatzweise experimentell zu überprüfen. Ich habe dazu eine Scheibe Toast jeweils 20 mal von drei verschieden hohen Holztischen geschoben. Dabei habe ich überprüft, auf welcher Seite der Toast am Boden liegen bleibt. Den tatsächlichen Drehwinkel konnte ich mit meinen einfachen Mitteln leider nicht bestimmen. Dazu hätte man beispielsweise eine Filmaufnahme machen müssen, oder ein langbelichtetes Foto, wobei der Toast mit einem Stroboskop beleuchtet wird.

Ich konnte bei meinem Versuch allerdings untersuchen, ob der Toast mehr als eine Vierteldrehung, mehr als eine Dreivierteldrehung oder annähernd genau einen der beiden Grenzwinkel während der Drehung vollzogen hat. Bei einem Winkel von mehr als 90° und weniger als 270° bleibt der Toast auf der Seite liegen, die zuvor unten lag. Bei mehr als 270° und weniger als 90° liegt er nach dem Fall auf derselben Seite wie vorher. Bei einem der Grenzfälle fällt er auf die Kante und „entscheidet" sich erst dann für eine Seite.

Für meinen Versuch habe ich ein Golden Toast Vollkorn der Firma Wendeln verwendet, das ich allerdings unbeschmiert gelassen habe, und drei verschieden hohe Tische aus Kiefernholz. Wie schon im vorigen Kapitel erwähnt habe ich für diese Materialien einen Reibungskoeffizienten von $\mu=0{,}63$ ermittelt. Also müsste man theoretisch die Werte der letzen Tabelle erhalten.

Messwerte:

		Drehwinkel		
Tischhöhe in cm		*größer 90°*	*größer 270°*	*Grenzfälle*
Couchtisch	*47*	20	0	0
Esstisch	*76*	20	0	2
Stehtisch	*112*	6	14	4

Auswertung:

Zunächst einmal kann man festhalten, dass ich in den meisten Fällen froh war, dass ich keine Marmelade auf den Toast geschmiert hatte. Die meisten Versuche gingen nämlich so aus, wie es die Theorie vorhergesagt hatte. Für die beiden üblichen Höhen eines Frühstückstisches fiel der Toast in allen 20 Fällen auf die beschmierte Seite. Beim Stehtisch sieht das jedoch etwas anders aus. Hier landete der Toast meistens auf der unbeschmierten Seite, wobei es auch vier Grenzfälle gab. Allerdings war auch dieser Ausgang von der Theorie her zu erwarten. Denn wie man in der letzten Tabelle in Kapitel II erkennt, kommt es bei einem Stehtisch sehr stark auf den Überhang des Schwerpunktes an, den ich beim Schieben nur schwer beeinflussen konnte, obwohl man bei langsamem Schieben wohl davon ausgehen kann, dass der Überhang eher klein ist.

Außerdem bewegten sich die Werte für die Anzahl der Umdrehungen sehr dicht an 0,75. Das heißt, der Toast landet nur knapp auf der einen oder der anderen Seite. Daher reagiert das Experiment sehr empfindlich auf die äußeren Bedingungen. Hier macht sich sicher auch die horizontale Anfangsgeschwindigkeit bemerkbar, die ich zwar möglichst gering zu halten versuchte, die aber nicht gleich null war. Außerdem kommen dabei auch noch allerlei Dinge ins Spiel, die die theoretische Berechnung nicht vorsieht, wie zum Beispiel der Luftwiderstand, Unregelmäßigkeiten in der Massenverteilung und der Oberflächenstruktur des Toasts u.ä. Von daher kann man, denke ich, festhalten, dass das Experiment die theoretischen Überlegungen zumindest im Rahmen seiner Möglichkeiten bestätigt hat.

IV. Sind wir die einzigen, die unter dem Toastproblem leiden ?

Man könnte nach diesen Erkenntnissen glauben, dass wir mit diesem Problem sozusagen Opfer eines unglücklichen Zufalls geworden sind. Zufälligerweise sind unsere Frühstückstische nicht hoch genug und unser Toast hat eine unvorteilhafte Größe. Was ja nicht zuletzt direkt mit unserer Körpergröße zusammenhängt. Dazu kommt dann auch noch die Schwerkraft unseres Heimatplaneten, die dafür sorgt, dass unser Toast sich nicht oft genug drehen kann, bevor er am Boden auftritt – begleitet vom Platschen seines Marmeladenbelags.

Diese Auffassung teilen Robert Matthews und Ian Stewart in ihren Artikeln ganz und gar nicht. Sie versuchen zu zeigen, dass dieses Problem auf allen Planeten auftritt. Alle zweibeinigen Lebewesen auf sämtlichen bewohnten Planeten haben ihrer Auffassung nach dasselbe Problem.

Das liegt vor allem daran, dass zweibeinige Lebewesen eine bestimmte Größe nicht überschreiten können. Der Grund dafür ist, dass zweibeinige Lebewesen im Gegensatz zu Vierbeinern wesentlich instabiler sind. Bei ihnen besteht eine viel größere Gefahr, dass sie umfallen, da sich ihr Schwerpunkt nur ein wenig von seiner stabilen Position zwischen den Füßen wegbewegen muss, um den Zweibeiner zum Fallen zu bringen. Das schlimmste, was einem bei einem solchen Sturz passieren kann, ist eine lebensgefährliche Kopfverletzung, als Folge des Aufpralls auf dem Boden. Um diese Gefahr zu minimieren, darf die Körpergröße einen Höchstwert nicht überschreiten. Die Natur hat erfolgreich dafür gesorgt, dass das auch bei uns Menschen der Fall ist. Schließlich ist es kein Zufall, dass wir deutlich kleiner sind als Giraffen.

In seinem Artikel bezieht sich Robert Matthews auf die Erkenntnisse von W. H. Press, der beweist, dass organisches Material ab einer Fallhöhe von 3m der Belastung nicht mehr standhalten kann. Interessanterweise ist diese Höhe unabhängig von der Gravitation – also der Masse des Planeten – und ist vielmehr in der Struktur der Moleküle begründet ist.

Also kann ein zweibeiniges Lebewesen – egal auf welchen Planeten es lebt – nicht größer als 3m sein, wenn es davor geschützt sein soll, durch einfaches Umfallen tödlich verletzt zu werden. Was bedeutet das aber nun für die Größe von Toastscheiben und die Höhe von Tischen? Auch diese Größen werden wahrscheinlich denen auf der Erde sehr ähnlich sein. Ein Tisch ist sinnvollerweise etwa halb so hoch, wie sein Besitzer, also sind auch die Tischhöhen auf anderen Planeten gewissermaßen begrenzt.

Nun konnte man skeptisch sein und sich fragen, ob nicht auf einem Planeten mit geringerer oder größerer Schwerkraft der Fall des Toasts auf andere Weise verändert würde. Wäre beispielsweise g kleiner als auf der Erde, dann würde der Toast langsamer fallen und mehr als eine halbe Umdrehung zurücklegen. Das ist aber insofern falsch, als dass man bedenken muss, dass dann auch die Winkelgeschwindigkeit, die anfangs auf den Toast wirkt um denselben Faktor – nämlich $\sqrt{g}$ – kleiner ist, was dazu führt, dass der Toast sich entsprechend langsamer dreht. Dadurch gleichen sich also diese Abweichungen wieder aus.

Angesichts dieser ernüchternden Erkenntnis kommt wieder die anfängliche Frage auf, ob man nicht doch behaupten könnte, dass Materie grundsätzlich böse ist – und zwar nicht nur zu Menschen, sondern zu allen intelligenten Lebensformen. Matthews äußert am Ende seines Artikels einen ähnlichen Gedanken. Er sagt, dass nach Einstein Gott zwar raffiniert aber nicht böswillig sei. Sein Einfluss auf fallenden Toast lasse aber ganz klar noch vieles zu wünschen übrig.[2]

Kishon formuliert es am Ende seiner schon zitierten satirischen Geschichte über einen ‚bösen' Grammophon noch treffender:

„Ob tote Gegenstände eine Seele haben, weiß ich nicht. Aber sie haben bestimmt keinen Humor."

V. Das Toast-Problem bei „Physik für Kids"

Das Toastproblem findet sich nicht nur in wissenschaftlicher Literatur, sondern auch auf den Internetseiten des Projekts „Physik für Kids". Dies ist ein Projekt von einigen Lehramtsstudenten des Fachbereichs Physik an der Universität Oldenburg, das sich zum Ziel gesetzt hat, über das neue Medium Internet, das bei Jugendlichen immer mehr an Bedeutung gewinnt, Kindern und Jugendlichen im Mittelstufenalter die Physik auf spielerische Art näher zu bringen. Auf der entsprechenden Internetseite gibt es mehrere Rubriken – unter anderem das „Labor", das ich zur Zeit betreue. Dort werden einfache Freihandversuche beschrieben, die ausdrücklich zum Nachmachen gedacht sind. Durch eine spannende Erzählweise sollen die Kinder dazu motiviert werden, diese physikalischen Phänomene selbst auszuprobieren. Es soll ihre Neugier und ihr Interesse an der Physik im Alltag geweckt werden. Wir erhoffen uns davon auch, dass sie dadurch mit offeneren Augen ihre Umwelt beobachten.

Die Seiten über die Versuche sind dabei immer nach den gleichen Schema aufgebaut: Über die „Labor"-Seite gelangt man über den Versuchstitel, der bewusst nicht immer erkennen lässt, warum es gleich gehen wird, zur ersten Seite über den Versuch. Dort gibt es meist eine kleine Einleitung, auf die dann die Beschreibung des Experiments folgt (Material, Aufbau, Durchführung). Am Schluss steht auch das Ergebnis des Versuchs. Man könnte meinen, dass das die Spannung nimmt, jedoch glaube ich, das ein vorgegebenes Ergebnis den Ergeiz der Kinder viel mehr weckt, als ein offenes Ende – besonders wenn das Ergebnis so erstaunlich ist, wie zum Beispiel beim Versuch mit dem Schlüsselbund und der Streichholzschachtel. Am Ende

---

[2] „We end up by noting that, according to Einstein, God is subtle, but He is not malicious. That may be so, but His influence on falling toast clearly leaves much to be desired."

der Seite befinden sich manchmal noch einige Tipps zur Durchführung oder zur Variation des Versuchs. Für interessierte Leser gibt es dort auch einen Link zur Seite „Wie funktioniert das?“. Dort wird versucht, die physikalischen Vorgänge, die beim vorangegangenen Versuch entscheidend sind, auf einfache, kindgerechte und vor allem formelfreie Weise zu erklären. Wer dann immer noch nicht genug hat, kann sich bei manchen Experimenten auch die Mathematik hinter den Versuchen anschauen; und zwar unter dem dann folgenden Link „Wo sind denn die Formeln?“. Diese Seiten sind dann allerdings eher für ‚Spezialisten‘ gedacht – etwa Oberstufenniveau.

Die Seite über das Toastproblem ist zwar weniger zum Nachmachen gedacht – zumindest sage ich das in der Einleitung – schon deswegen, weil man schließlich nicht mit Essen spielen soll, aber es geht mir dabei um eben den Punkt, dass die Kinder die Physik hinter den Phänomenen im Alltag erkennen sollen. Das Toastproblem ist dafür meiner Meinung nach ein sehr lebensnahes und zugleich auch amüsantes Beispiel. Als ich davon in Robert Ehrlichs Buch, das Quelle von vielen der Versuche im „Labor“ war, gelesen habe, musste ich es sofort ausprobieren, und ich hoffe, dass die Kinder es ebenso spannend finden. Ich habe mich übrigens auf der mathematischen Seite zum Toastproblem an die Herleitungen von Ehrlich gehalten, die zwar nicht ganz vollständig sind, aber zu wesentlich einfacheren Berechnungen führen als etwa die von Steinert. Letztlich liefern sie auch ähnliche Ergebnisse.

Neben den beschriebenen drei Ebenen, gibt es beim Toastproblem auch noch eine Seite über die Tatsache, dass auch Außerirdische dasselbe Problem haben wie wir. Vielleicht sind die Argumente für die Kinder etwa schwer zu durchschauen, aber ich denke, dass man gerade heutzutage die Kinder mit Themen, die an Science-Fiction erinnern, fesseln kann.

Eine Kopie der Internetseiten zum Toastproblem findet sich im Anhang dieser Arbeit.

VI. Literatur

- Darryl Steinert „It’s not Murphy’s Law, It’s Newton’s“ in *The Physics Teacher*, May 1996, p. 288
- Robert A. J. Matthews „Tumbling toast, Murphy’s Law an the fundamental constants“ in *European Journal of Physics*, 16 (1995), p. 172
- Robert Ehrlich: „Why Toast Lands Jelly-Side Down“, Princeton 1997
- Ian Stewart „Mathematical Recreations“ in *Scientific American*, December 1995, p. 85
- R. D. Edge „Murphy’s Law or Jelly-Side Down“ in *The Physics Teacher*, September 1988, p. 392
- http://www.physik.uni-oldenburg.de/~forkids
- Ephraim Kishon „Seligs atmosphärische Störungen“ in „Arche Noah Touristenklasse“, München 1963, S. 78-82