

## Modellexperiment und experimentelle Untersuchung zur modernen mikroskopischen Theorie des Phänomens „Reibung“

Patrik Vogt\*, Andreas Müller<sup>+</sup>, Thorsten M. Gaschler<sup>#</sup>

\*Pädagogische Hochschule Freiburg, Abteilung Physik, <sup>+</sup>University of Geneva, Faculty of Sciences / Physics Department and Institute of Teacher Education, <sup>#</sup>Universität Koblenz-Landau, Campus Landau  
[patrik.vogt@ph-freiburg.de](mailto:patrik.vogt@ph-freiburg.de), [Andreas.Mueller@unige.ch](mailto:Andreas.Mueller@unige.ch)

### Kurzfassung

Bei der Reibung (im speziellen der Gleitreibung) handelt es sich um ein aus dem Alltag bestens bekanntes Phänomen, welches jedoch lange Zeit auf der mikroskopischen Ebene kaum untersucht und verstanden wurde. Die ersten Modellvorstellungen zur Reibungsentstehung gehen auf Coulomb zurück, der die Reibungskraft auf die Verzahnung von Mikrorauigkeiten der aneinander berührenden Oberflächen zurückführte. Dieses Modell findet sich auch heute noch in zahlreichen Schulbüchern wieder, obgleich bereits eine einfache Überlegung zeigt, dass die „Verzahnung“ alleine die Energiedissipation und damit die Gleitreibung nicht erklären kann!

Das heutige Verständnis geht davon aus, dass die Umwandlung der Bewegungsenergie in Wärme vorrangig durch die Anregung von Schall, auf mikroskopischer Ebene von Schallquanten (Phononen) erfolgt (Tomlinson-Modell und Nachfolger [1]). Im Artikel wird ein Modellexperiment vorgestellt, mit dem diese Grundidee veranschaulicht und verschiedene daraus folgende Zusammenhänge experimentell untersucht werden können (insbes. zwischen Gleitreibungskraft und Schalldruck). Der Versuch fügt sich in eine Reihe zur Nutzung der experimentellen Möglichkeiten von Smartphones ein (z. B. [2], [3]); des Weiteren werden zur Durchführung des Experiments ausschließlich Alltagsmaterialien und –gegenstände benötigt. Es ergibt sich eine gute Bestätigung der vorgeschlagenen Zusammenhänge.

### 1. Empirische Gesetze der Festkörperreibung und die erste Modellvorstellung

Die ersten experimentellen Untersuchungen der Reibung und die Formulierung der wichtigsten Gesetzmäßigkeiten gehen bereits auf Leonardo da Vinci zurück [4], wurden ca. 200 Jahre später von G. Amontons wiederentdeckt und durch Coulomb ergänzt [5]. Die Reibungskraft eines über eine Oberfläche gleitenden Körpers ist demnach zu seiner Normalkraft proportional und von der Berührungsoberfläche sowie Gleitgeschwindigkeit unabhängig. Diese Reibungsgesetze wurden empirisch gefunden und man war bestrebt, die Entstehung von Reibung auch theoretisch zu deuten.

Die ersten Modellvorstellungen zur Reibungsentstehung gehen auf Coulomb zurück, der die Reibungskraft auf die Verzahnung von Mikrorauigkeiten der aneinander berührenden Oberflächen zurückführte. Dieser Erklärungsansatz wurde lange Zeit verwendet und findet sich auch heute noch in zahlreichen Schulbüchern wieder (Abb. 1); so heißt es z. B. in [7]: „Die Reibungskräfte entstehen, weil selbst eine glatt erscheinende Oberfläche mikroskopisch betrachtet rau ist. Die Unebenheiten beider Oberflächen greifen ineinander und behindern die Bewegung der Körper.“ Bereits eine einfache Überlegung zeigt jedoch, dass das von Coulomb eingeführte Modell unvollständig ist und lediglich die Haftrei-

bung erklären kann (Abb. 2): Damit ein Atom über eine raue Oberfläche gleiten kann, muss es zunächst ein Hindernis bestimmter Steigung überwinden. Die gewonnene potentielle Energie wandelt sich beim Herabgleiten ins nächste Tal in kinetische um, wodurch die nächste Barriere ohne weitere Energiezufuhr genommen werden müsste [8]. Es stellt sich also die Frage, woher denn die allgegenwärtige Reibung und die damit verbundene Energiedissipation überhaupt kommen. Heute wissen wir [1], dass die Umwandlung der Bewegungsenergie in Wärme insb. durch die Anregung von Phononen (Schallquanten) erfolgt, was durch das vorgestellte Experiment makroskopisch veranschaulicht werden soll.

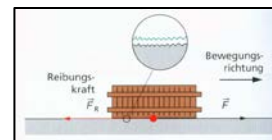


Abb. 1: Überwiegende Erklärung in Schulbüchern [6]

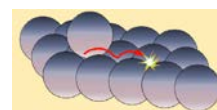


Abb. 2: Ein Atom gleitet über eine raue Oberfläche; Reibung entsteht nur dann, wenn das Atom Energie abgeben kann, z. B. durch Trennung atomarer Bindungen oder durch Anregung von Schwingungen [8].

## 2. Modellexperiment zur Entstehung der Gleitreibung

### 2.1. Ziel und Grundidee des Experiments

Dass die Energie bei der Gleitreibung u. a. durch die Anregung von Phononen und letztlich durch die Abgabe von Schallwellen dissipiert, soll durch das nachfolgend beschriebene Experiment bestätigt werden. Die Grundidee des Versuchs ist die Überprüfung einer positiven Korrelation zwischen dem bei der Gleitreibung entstehenden Schalldruck und der Gleitreibungskraft selbst. Damit das Experiment für den Physikunterricht reproduzierbar ist, sollen neben einem Smartphone, welches zur Messung des Schallpegels dient, lediglich Alltagsmaterialien zum Einsatz kommen.

Den zunächst genutzten Versuchsaufbau zeigt die Abb. 3. Ein Hartschalenkoffer wird mit Massestücke unterschiedlich stark belastet und mit einem an einer Schnur befestigten Kraftmesser über den jeweils gleichen Untergrund gezogen. Die Messung des Lautstärkepegels erfolgt mit einem iPhone 4 und der App „Decibel Ultra“ (Abb. 4, [9]). Die Messrate beträgt 10 Hz. Zur Bestimmung des entsprechenden Lautstärkepegels werden die Daten per E-Mail exportiert und ihr Mittelwert bestimmt.

Obwohl das Experiment für jede der 10 Zuladungen mit anschließender Mittelwertbildung 10-mal wiederholt wurde, war eine positive Korrelation zwischen dem Schalldruck und der Gleitreibungskraft zunächst nicht nachweisbar.

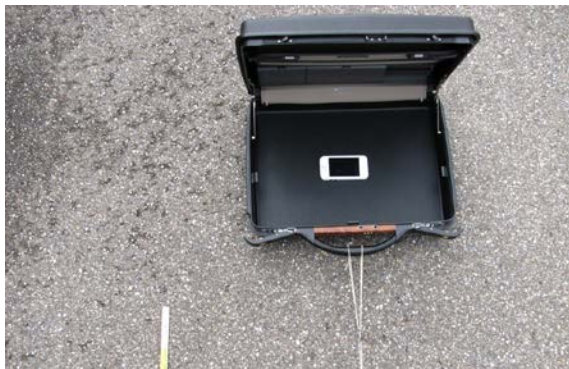


Abb. 3: Grundidee des Experiments



Abb. 4: Screenshot der eingesetzten App „Decibel Ultra“ [9]

### 2.2. Probleme und Lösungsansätze

Die Ursachen für die nicht nachweisbare Abhängigkeit des Schalldrucks von der Gleitreibungskraft sind sehr vielfältig und werden – zusammen mit den Lösungsansätzen – im Folgenden stichpunktartig erläutert:

- Durch das Ziehen des Koffers mit der Hand kommt es zu ruckartigen Bewegungen, wodurch der Koffer immer wieder kurzzeitig den Kontakt zur Oberfläche verliert. Dies wird durch ein kontinuierliches Ziehen des Koffers mit Hilfe eines Akkuschraubers (Makita BHP 343, Stufe 1, 400 U/min) verhindert (Abb. 6).
- Die zunächst verwendeten Massestücke aus Metall schlagen aneinander und erzeugen so einen zusätzlichen Schalldruck. Statt der Massestücke aus der Physiksammlung werden 1 kg-Zuckerpackungen (Masse kontrolliert) verwendet (Abb. 5).
- Der Koffer wurde im Vorversuch geschlossen über den Untergrund gezogen. Durch zusätzliches Beladen ändert sich deshalb das Volumen des Resonanzkörpers, was das Messergebnis stark beeinflusst. Die obere Kofferhälfte wird deshalb vor der Versuchsdurchführung entfernt.
- Bewegliche Teile, welche durch Vibrieren zusätzlichen Schall erzeugen (z. B. Scharniere) werden entfernt oder mit Heißkleber fixiert.

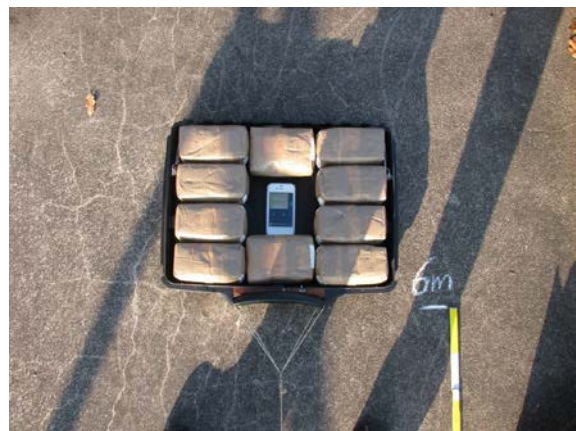


Abb. 5: Kofferhälfte, mit Zuckerpackungen und iPhone



Abb. 6: Überarbeiteter Versuchsaufbau

## 2.3. Verbesserte Durchführung und Ergebnisse

### 2.3.1. Bestimmung der Gleitreibungskoeffizienten

Um die beim Experiment auftretenden Gleitreibungskräfte möglichst genau rechnerisch zu bestimmen, wurden die Gleitreibungskoeffizienten zwischen dem Koffer und den untersuchten Oberflächen (Beton, Parkett, Keramik-Fliesen, Teer und PVC, Abb. 7) unter Beachtung der in 2.2 beschriebenen Verbesserungen zunächst anhand umfangreicher Messreihen bestimmt. Hierzu wurde der Koffer ohne und mit den verschiedenen Zuladungen nacheinander mit Hilfe eines Kraftmessers (Messbereich 20 bzw. 100 N) über die verschiedenen Oberflächen gezogen und die Gleitreibungskraft abgelesen. Aufgrund der Beziehung

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad \{1\}$$

ergeben sich beim Abtragen der Gleitreibungskraft  $F_R$  gegen die Normalkraft  $F_N$  – sie entspricht der Gewichtskraft des Koffers und seiner Zuladungen – Geraden, deren Steigungen dem jeweiligen Gleitreibungskoeffizienten  $\mu$  entsprechen (Abb. 8). Die mittels linearer Regression ermittelten Gleitreibungskoeffizienten liegen in einem engen Bereich und sind in Tab. 1 dargestellt.



Abb. 7: Untersuchte Oberflächen

Material	Experimentell bestimmte Gleitreibungskoeffizienten Material-Koffer
Teer	0,32
PVC	0,35
Parkett	0,33
Fliesen	0,23
Beton	0,23

Tab. 1: Ermittelte Gleitreibungskoeffizienten

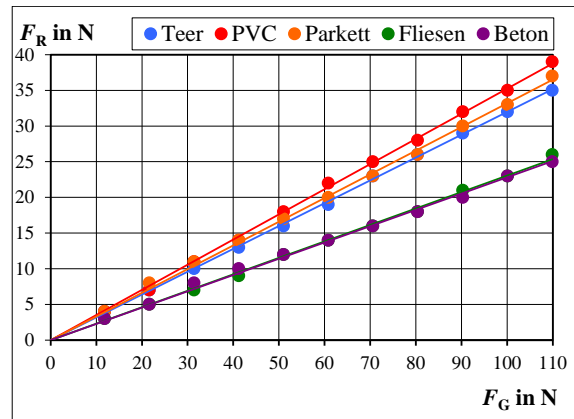


Abb. 8: Abhängigkeit der Reibungskraft von der Normalkraft; die Steigungen der Geraden liefern die Gleitreibungskoeffizienten

### 2.3.2. Zusammenhang Schalldruck-Gleitreibungskraft

Zunächst noch einige Angaben zu experimentellen Details. Der Versuch zum Nachweis der positiven Korrelation zwischen Schalldruck und Gleitreibungskraft wurde unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Zum Ziehen des Koffers wurde eine Paketschnur mit einem Durchmesser von 2,1 mm verwendet.
- Die Länge der Paketschnur wurde so gewählt, dass der Einfluss des Bohrers auf die Messung gering ist.
- Die Messungen erfolgten in einem Abstand von 6 – 4 m zum Akkuschauber, der Koffer wurde also bei jeder Messung zwei Meter weit gezogen.
- Der Akkuschauber wurde durch Unterlegen dünner Holzbretter so justiert, dass die Paketschnur parallel zum Boden verlief.
- Es wurde mit 11 unterschiedlichen Zuladungen gearbeitet (ohne Zuladung, Zugabe von bis zu zehn 1 kg-Zuckerpakete).
- Die Messfrequenz betrug wie bereits beim Vorversuch zur Bestimmung der Gleitreibungskoeffizienten 10 Hz.
- Jede Messung wurde 10-mal durchgeführt und im Anschluss der Mittelwert gebildet.
- Das Experiment wurde auf diese Weise auf allen fünf Oberflächen durchgeführt.

Mit der App „Decibel Ultra“ wurde der Schalldruckpegel  $L$  gemessen, welcher ein logarithmisches Maß zur Beschreibung der Lautstärke darstellt. Zur Überprüfung der vermuteten Korrelation wurde der Schalldruck zunächst in die intervallskalierte Größe Schalldruck  $p$  umgerechnet. Es gilt:

$$L = 10 \log_{10} \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} \quad \text{bzw.} \quad \{2\}$$

$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{L(\text{in dB})}{20}} \quad \{3\}$$

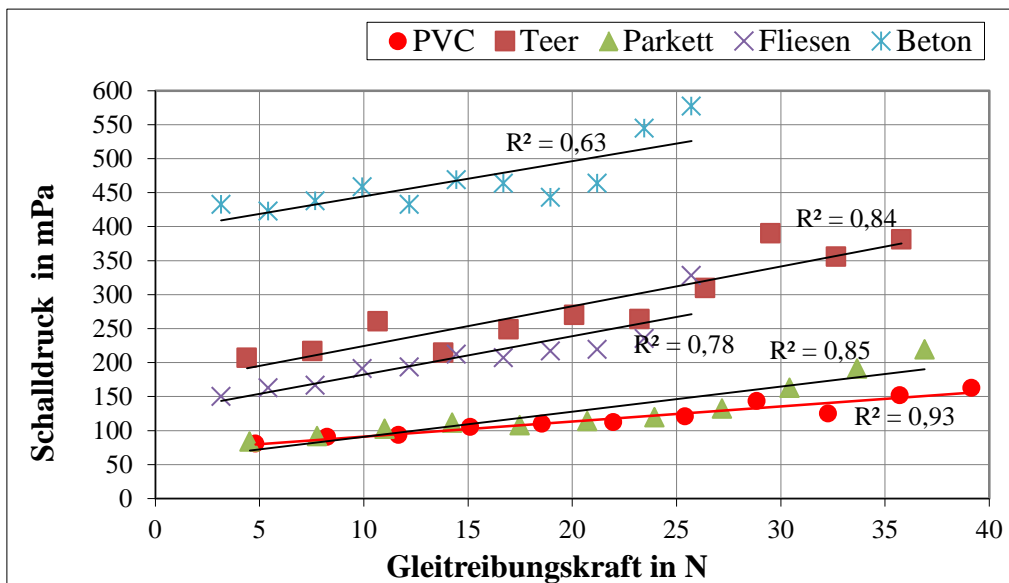


Abb. 9: Ergebnisse des Experiments: Gemessener Schalldruck in Abhängigkeit von der Gleitreibungskraft

Material	Bestimmtheitsmaß der lin. Regression Schalldruck vs. Gleitreibungskraft $R^2$	Pearsonscher Korrelationskoeffizient $r$
Teer	0,84	0,92
PVC	0,93	0,96
Parkett	0,85	0,92
Fliesen	0,78	0,88
Beton	0,63	0,79

Tab. 2: Zusammenhang zwischen dem Schalldruck und der Gleitreibungskraft; der pearsonsche Korrelationskoeffizient entspricht der Quadratwurzel aus dem Bestimmtheitsmaß

$p_0$  ist ein Bezugswert und beträgt 20  $\mu\text{P}$  – diesen Wert hielt man früher für die Hörschwelle bei 1 kHz, tatsächlich liegt sie jedoch etwas höher [10].

Der Schalldruck in Abhängigkeit der Gleitreibungskraft ist für alle fünf Oberflächen in Abb. 9 dargestellt. Unabhängig von dem verwendeten Untergrund ergeben sich zwischen den beiden Größen offensichtlich lineare Zusammenhänge, welche durch die berechneten Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen bzw. durch die berechneten Korrelationskoeffizienten (im Mittel 0,89!) gestützt werden. Somit konnte ausschließlich mit Alltagsmaterialien experimentell nachgewiesen werden, dass bei der Gleitreibung ein wesentlicher Teil der Energiedissipation durch Schallanregung im Festkörper erfolgt. Quantitativ kann festgestellt werden, dass für das makroskopische Modellexperiment zwischen 60 % und 90 % der Variation bei verschiedenen Werten der Gleitreibungskraft durch einen linearen

Zusammenhang mit dem Schalldruck erklärt werden können.

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das von Coulomb eingeführte Erklärungsmodell die Gleitreibungskraft nicht effizient erklären kann. Vielmehr lässt sich die Energiedissipation durch die Anregung von Phononen (mikroskopisch) bzw. Schall (makroskopisch) deuten. Im vorgestellten Modellversuch, für dessen Durchführung man neben einem Smartphone ausschließlich Alltagsmaterialien benötigt, konnte eine positive Korrelation zwischen Schalldruck und Gleitreibungskraft nachgewiesen werden. Aufbauend auf den dargelegten Ergebnissen sind Untersuchungen weiterer Faktoren, wie z. B. die Homogenität der Oberfläche oder der Geschwindigkeits(un)abhängigkeit geplant. Damit besteht die Hoffnung, die in den vorliegenden Ergebnissen vorhandene unerklärte Variation noch besser verstehen zu können.

### 4. Literatur

- [1] Portal Nano-World an der Universität Basel: <http://www.nano-world.org/Info/de>; insbes.: Lehrbuch: <http://www.nano-world.org/Lab/demo/frictionmodule/textbook>; (Stand: 5/2013)
- [2] Vogt, Patrik; Kuhn, Jochen (2011): Beschleunigungssensoren von Smartphones: Beispielexperimente zum Einsatz im Physikunterricht. In: PdN-PhiS. 60, 7, 15-23.
- [3] Vogt, Patrik; Kuhn, Jochen (2012): Akustik mit dem iPhone. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik 132, 43-44.
- [4] Popov, Valentin L. (2009): Kontaktmechanik und Reibung. Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik, Springer: Heidelberg.

- [5] Wiesner, Hartmut; Wilhelm, Thomas et al. (2014): Moment mal ... Woher kommt die Gleitreibung? In: PdN-PhiS.
- [6] Meyer, Lothar; Schmidt, Gerd-Dietrich (Hrsg.) (2005): Physik. Gesamtband Sekundarstufe I, Duden Paetec Schulbuchverlag, Berlin.
- [7] Appel, Thomas; Bissel, Jürgen; Eiselt, Frank et al. (2010): Spektrum Physik. Gymnasium SI, Schroedel: Braunschweig.
- [8] Heuberger, Manfred (2007): Nanotribologie. Wie entsteht Reibung? In: Physik in unserer Zeit 38, 3, 142-148.
- [9] Downloadmöglichkeit der App „Decibel Ultra“: <https://itunes.apple.com/de/app/decibel-ultra/id410139517> (Stand 5/2013)
- [10] Internetenzyklopädie Wikipedia, Stichwort „Schalldruckpegel“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schalldruckpegel> (Stand 5/2013)