

# Smartphone Physics Challenge



Abschlussdokumentation der Kooperationsphase 2021/22

Betreut von Frau Dr. Bergmann und Herrn Dahm, KIT

Jakob Kopp, Kurs KA 16

## **Abstract**

This project was inspired by the paper *61 Ways to Measure the Height of a Building with a Smartphone* by F. Bouquet, A. Kolli, J. Bobroff and G. Ortanini, of whom the former and latter helped develop the *Smartphone Physics Challenge*.

This challenge was created to introduce students to physical experimentation. In this article five of the 61 methods will be tested and their results examined. Furthermore it will be discussed, how to treat measurement uncertainties and how far the methods are practical under given circumstances.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>1</b>
2.1	Verwendete Smartphone Sensoren . . . . .	1
2.2	Theorie zur Fehlerbetrachtung . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Freier Fall</b>	<b>3</b>
3.1	Methoden . . . . .	3
3.2	Ergebnis und Fehlerdiskussion . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Fadenpendel</b>	<b>4</b>
4.1	Methoden . . . . .	4
4.2	Ergebnis und Fehlerdiskussion . . . . .	4
<b>5</b>	<b>Trigonometrie</b>	<b>5</b>
5.1	Methoden . . . . .	5
5.2	Ergebnis und Fehlerdiskussion . . . . .	6
<b>6</b>	<b>Waagrechtter Wurf</b>	<b>6</b>
6.1	Methoden . . . . .	6
6.2	Ergebnis und Fehlerdiskussion . . . . .	7
<b>7</b>	<b>Akustik</b>	<b>8</b>
7.1	Methoden . . . . .	8
7.2	Ergebnis und Fehlerdiskussion . . . . .	8
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>9</b>
<b>9</b>	<b>Danksagungen</b>	<b>10</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>11</b>
10.1	Messergebnisse Freier Fall . . . . .	11
10.2	Messergebnisse Fadenpendel . . . . .	11
10.3	Messergebnisse Trigonometrie . . . . .	12
10.4	Messergebnisse waagrechtter Wurf . . . . .	13
10.5	Messergebnisse Akustik . . . . .	14
<b>11</b>	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>16</b>

# 1 Einleitung

In einer Veröffentlichung von Wissenschaftlern der Paris-Saclay Universität sowie der Sapienza Università di Roma werden 61 Methoden vorgestellt und erprobt, um ein Gebäude mit Hilfe eines Smartphones und Alltagsgegenständen zu vermessen. Als Ziel setzten sie sich, das physikalische Experimentieren Schülern näher zu bringen. Ausgehend davon entwickelten Frédéric Bouquet und Giovanni Organtini in Kooperation mit „Physics Reimagined“, die „Smartphone Physics Challenge“ [2], welche Schüler und andere junge Physikinteressierte dazu auffordert sich mit den physikalischen Messmethoden und deren Auswertung zu beschäftigen.

Von diesem Aufruf inspiriert, beschäftigt sich dieses Projekt mit einer Auswahl aus den 61 Messmethoden. Der Fokus liegt dabei auf dem Umgang mit potentiellen und gemessenen Ungenauigkeiten sowie den Vor- und Nachteilen der Methoden.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Verwendete Smartphone Sensoren

- Quarzuhr

Die in den meisten Smartphones verbauten Uhren messen die Zeit mithilfe eines schwingenden Piezokristalles. Diese Kristalle verformen sich, wenn eine Spannung an sie angelegt wird und erzeugen eine Spannung wenn sie verformt werden. Der Kristall wird in der Uhr durch einen elektrischen Impuls zum Schwingen angeregt und die folgenden aus der Schwingung resultierenden elektrischen Impulse gemessen. Wenn der Kristall typischerweise mit 32768 Hertz schwingt, kann aus der Anzahl der erhaltenen Impulse die vergangene Zeit berechnet werden.[6]

- Umgebungslichtsensor

Der Umgebungslichtsensor in Smartphones besteht meistens aus einem Fotowiderstand. Dieser verändert seinen elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von der einfallenden Lichtintensität.[9]

- Gyrosensor

Gyrosensoren in Smartphones werten in der Regel nur die Messdaten von Beschleunigungssensoren aus und messen keine eigenen Werte. Da das Smartphone sich im Normalfall auf der Erdoberfläche befindet, wirkt die Erdbeschleunigung auf die Sensoren. Durch die Kombination von drei rechtwinklig zueinander platzierten Beschleunigungssensoren kann die Richtung der Erdbeschleunigung bestimmt werden und somit die Lage des Smartphones im Raum.[8]

- Kamera

Der Sensor in einer Smartphonekamera besteht aus sehr vielen einzelnen Sensoren, welche die Lichtintensität über einen kurzen Zeitraum messen. Durch einen darüber liegenden Farbfilter erhalten die einzelnen Sensoren nur Licht aus einem Wellenlängenbereich. Aus der Kombination von Sensoren, welche rotes, grünes oder blaues Licht erhalten, kann ein Farbbild erfasst werden. Eine detaillierte Erklärung findet man unter [7].

- Mikrofon

Die häufig in Smartphones verwendeten Mikrofone bestehen aus einer beweglichen Platte, welche durch Schallwellen in Schwingung versetzt wird. Eine zweite Platte ist hinter der beweglichen Platte montiert. Eine der Platten wird permanent geladen, sodass die Platten einen Kondensator bilden. Schwingt nun die bewegliche Platte, verändert sich die Kapazität des Kondensators und damit die Spannung, welche an der festen Platte gemessen wird. Diese Spannung kann per Software ausgewertet und in eine Audio-Ausgabe konvertiert werden.[10]

## 2.2 Theorie zur Fehlerbetrachtung

- Fehlertypen

Man unterscheidet zwischen systematischen Fehlern und statistischen Fehlern. Systematische Fehler beschreiben Fehler, die zu einer konstanten Abweichung des physikalischen Wertes führen. Diese spiegeln sich in einem stets zu hohen oder zu niedrigen Mittelwert wider. Statistische Fehler treten durch zufällige positive oder negative Abweichungen beim Messen auf. Je häufiger gemessen wird, desto kleiner wird der statistische Fehler im Mittelwert.[5]

- Mittelwert

Der Mittelwert einer Messung wird mit der Formel  $M = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \cdot x_i$  berechnet. Er beschreibt den Durchschnitt aller Ergebnisse beziehungsweise die Tendenz deren statistischen Verteilung.[13]

- Standardabweichung

Die Standardabweichung beschreibt die durchschnittliche Abweichung der Messwerte vom Mittelwert. Diese lässt sich mit der Formel  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2}{n}}$  berechnen. Die Standardabweichung zeigt somit die gesamte statistische Ungenauigkeit der Messung auf, nicht aber, ob diese von systematischen Fehlern behaftet ist.[15]

- Fehlerfortpflanzung

Bei der Verwendung mehrerer Messwerte zur Berechnung einer Größe pflanzen sich die Fehler fort. Das heißt bei Additionen und Subtraktionen addieren sich die Fehler auf, bei Multiplikationen und Divisionen werden sie in Abhängigkeit der gemessenen Werte addiert.[4]

### 3 Freier Fall

#### 3.1 Methoden

Ein Fallkörper wird entlang des Gebäudes fallen gelassen und die Dauer des Falles mit der Stoppuhr des Smartphones gestoppt. Da Objekte im Gravitationsfeld der Erde mit bekannter Beschleunigung in Richtung des Erdkerns beschleunigt werden, kann über die Formel der gleichmäßig beschleunigten Bewegung  $H = \frac{1}{2}gt^2$  die Höhe des Gebäudes ermittelt werden.

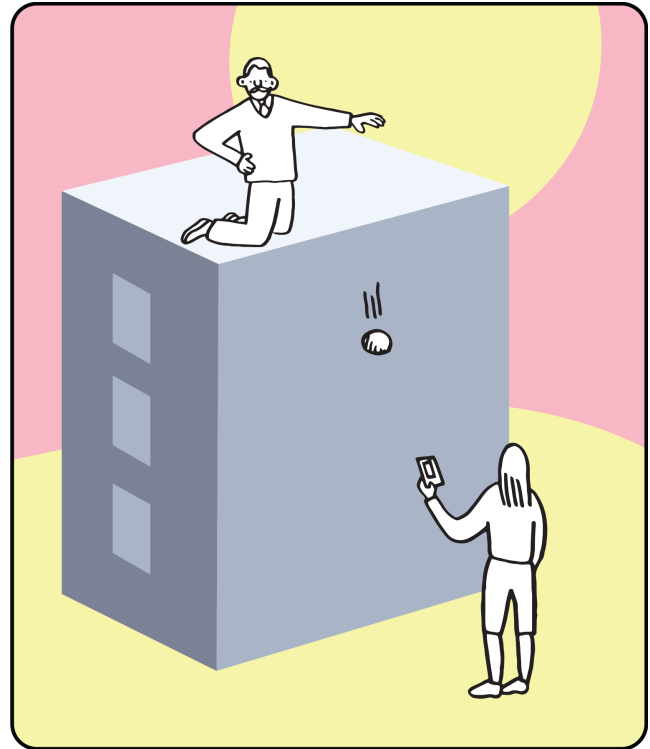


Abbildung 1: Bestimmung der Falldauer per Stoppuhr[1]

#### 3.2 Ergebnis und Fehlerdiskussion

Fehler, die bei dieser Messung auftreten, sind eine Dilatation, die durch die Laufzeit, welche das Licht benötigt um zu der messenden Person zu gelangen, entsteht. Diese ist jedoch vernachlässigbar, da die Laufzeit beim Starten und Stoppen fast ausgleichen und Licht sich mit  $c = 3 \cdot 10^{-8}$  fortbewegt. Die Reaktionszeit der messenden Person und Zeit, welche benötigt wird, um die Stoppuhr zu bedienen, gleicht sich auch annähernd aus, es bleibt aber ein statistischer Fehler, da eine Person nie gleich schnell reagiert. Die Größe des Fehlers wäre also bei  $0,03s$  für einen durchschnittlichen Menschen [12]. Auch die Erdbeschleunigung ist nicht genau für den Ort der Messung bestimmt worden. Es ist deswegen anzunehmen, dass sie etwa  $0,002 \frac{m}{s^2}$  von dem verwendeten Wert systematisch abweicht [11]. Zuletzt entsteht durch die Vernachlässigung des Luftwiderstandes ein systematischer Fehler. Da der Luftwiderstand sich mit dem Geschwindigkeitsquadrat steigert kann die Messung nur bei geringen Höhen und geringen Fallgeschwindigkeiten verwendet werden.

Der gemessene Mittelwert war bei dieser Messung  $M = 12,10m \pm 0,91m$ .

Durch die Fehlerfortpflanzung kann die Ungenauigkeit berechnet werden. Diese liegt bei  $\sigma = 0,48m$ . Dass sie nicht der gemessenen Ungenauigkeit entspricht, kann an mehreren Gründen

liegen. Ob es jedoch an falschen Vorhersagen oder nicht beachteten Ungenauigkeiten liegt, kann nicht mit gegebenen Informationen beantwortet werden.

## 4 Fadenpendel

### 4.1 Methoden

Es wird ein Fadenpendel mit einem Massekörper vom höher zum niedriger gelegenen Messpunkt aufgehängt. Der Lichtintensitätssensor des Smartphones wird unter das Pendel gelegt, sodass er im tiefsten Punkt der Schwingung des Pendels von dem Massekörper bedeckt ist. Es wird der zeitliche Verlauf der Lichtintensität aufgenommen. Die Periodendauer  $T$  entspricht dann der Zeitdauer zwischen einer Messung niedriger Lichtintensität und der übernächsten Messung ähnlicher Intensität. Zusammen mit der Erdbeschleunigung  $g$  und der Formel für die harmonische Schwingung eines Fadenpendels  $H = g\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$  wird die Höhe  $H$  des Gebäudes berechnet. Die Formel kann aus der Differentialgleichung  $s''(t) + \frac{g}{H} \cdot s(t) = 0$  hergeleitet werden [3]. Man beachte dabei, dass die Formel nur eine Näherung ist und nur bei Ausschlägen bis  $\alpha=4^\circ$  mit ausreichender Genauigkeit nutzbar ist.

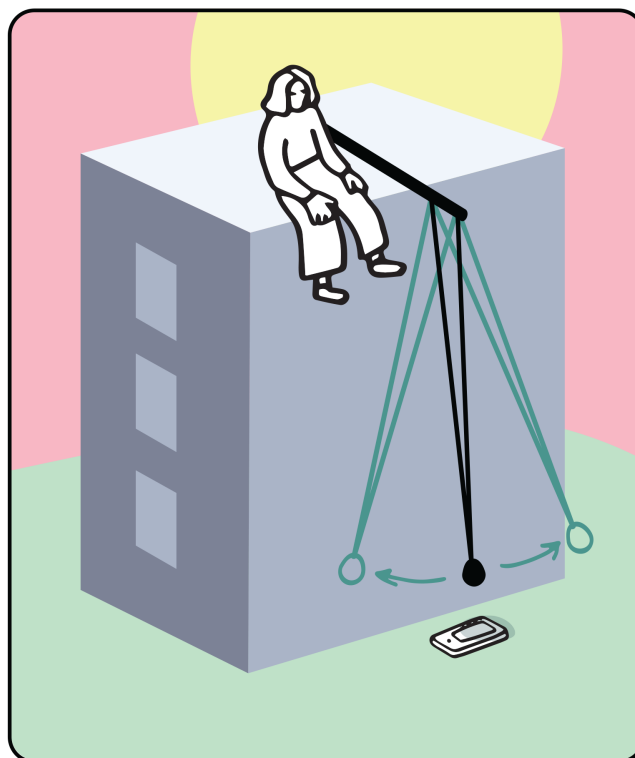


Abbildung 2: Positionierung des Sensors[1]

### 4.2 Ergebnis und Fehlerdiskussion

Bei diesem Versuch kommt es einerseits auf das Pendel selbst an, welches nicht exakt die Länge des Gebäudes hat, sich von Windböen leicht beeinflussen lässt und sich biegen kann. Das zu kurze Pendel führt zu einem systematischen Fehler in Höhe der Dicke des Smartphones und des Raumes zwischen dem Massekörper und dem Sensor, etwa  $0,01m$ . Die elastischen Eigenschaften des Pendels sind auch ein systematischer Fehler, da bei der Biegung des Pendels die Strecke zwischen dem Befestigungspunkt und des Massekörpers kürzer wird. Die mit diesem kürzeren Pendel gemessene Periodendauer wird bei geringen Ausschlägen aber nur um circa  $0,1s$  verkürzt. Statistische Fehler entstehen durch mögliche Windböen. Da der Tag der Messung aber relativ windstill war, sollte sich dieser Fehler nur um  $0,01s$  auf die Periodendauer auswirken. Zuletzt spielt der Lichtintensitätssensor auch einen statistischen Fehler mit ein, da dieser leicht zeitverzögert auf die Lichteinstrahlung reagiert. Diese Zeitverzögerung ist nicht bei jeder Messung identisch, weswegen ein statistischer Fehler der Periodendauer von  $0,048s$  entsteht [9].

Bei Betrachtung der Messergebnisse fällt auf, dass der Mittelwert dieser Messung mit  $M = 11,46m \pm 0,27m$  signifikant niedriger ist als der Mittelwert aus dem ersten Versuch. Dies überrascht nicht, da in dem Mittelwert nicht die systematischen Fehler beachtet werden. Gleicht man die systematischen Fehler im Mittelwert aus, so erhält man den weniger abweichenden Wert  $M = 11,81m \pm 0,27m$ . Die vorhergesagte Abweichung ist mit  $\sigma = 0,20m$  erneut unter der gemessenen Standardabweichung  $\sigma = 0,27m$ .

## 5 Trigonometrie

### 5.1 Methoden

In diesem Versuch wird der Gyrosensor des Smartphones benutzt um den Winkel relativ zur Horizontalen zu messen, wenn man mit dem Smartphone die Spitze der zu vermessenden Höhe ansteuert. Das Smartphone wird auf ein Rohr montiert, welches zum Peilen genutzt wird (3). Per Zollstock werden die Länge  $l$  zur Wand und die Höhe  $h$  des Auges der vermessenden Person über dem Boden gemessen. Da die Strecke  $l$ , die Höhe des Gebäudes abzüglich der Augenhöhe  $h$  und die Strecke zwischen dem höchsten Punkt des Gebäudes sowie des Auges ein rechtwinkliges Dreieck bilden, kann über die Formel  $h = l \tan(\alpha)$  die gesuchte Höhe ermittelt werden. Um weitere Aussagen über den Versuch treffen zu können, wird die Distanz  $l$  variiert.

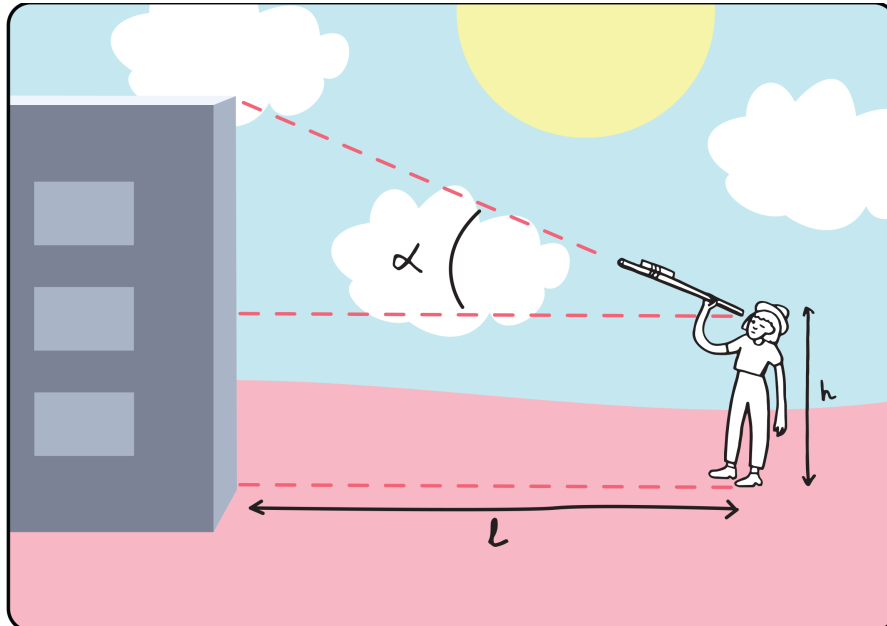


Abbildung 3: Der Versuchsaufbau bei mittlerer Distanz  $l$ [1]



## 5.2 Ergebnis und Fehlerdiskussion

Obwohl der Mittelwert mit  $M = 12,44m \pm 0,99m$  plausibel ist, erkennt man große Diskrepanzen in der Höhe bei den unterschiedlichen Abständen zur Wand. Woher diese kommen ist nicht eindeutig, es könnte ein Fehler beim Messen der Länge  $l$  entstanden sein, was diese aber nicht mehr als  $0,05m$  verändern sollte. Es könnte ein Fehler bei der Inkonsistenz des Anvisierpunktes entstanden sein, jedoch führt dies nicht zu Fehlern von bis zu  $3m$ . Weitere Fehlerquellen sind unwahrscheinlich, da sie entweder insignifikant wären, wie die Höhe  $h$ , die auf  $0,05m$  genau gemessen wurde, oder einen relativen Fehler einbringen würden, wie die Ungenauigkeiten beim Messen des Winkels. Wenn man diese quantitativ bei einer potentiellen Abweichung bis  $1^\circ$  bestimmt, so erhält man eine gesamte geschätzte Ungenauigkeit von  $\sigma = 0,51m$ . Da in der theoretischen Fehlerbetrachtung kein systematischer Grund für die stark variierenden Werte gefunden werden konnte, liegt nahe, dass dieser Versuch nicht ausreichend Genau und Konsistent ausgeführt wurde. Somit ist das Messergebnis sowie die Genauigkeit unter diesem Aspekt zu betrachten und nicht als eindeutig zu sehen.

## 6 Waagrechter Wurf

### 6.1 Methoden

Für diesen Versuch wird ein Wurfkörper mit konstanter horizontaler Geschwindigkeit von dem oberen zu vermessenden Punkt parallel zum Boden und senkrecht zur oberen Vermessungskante gerollt. Dabei wird diese Rollbewegung von einer Kamera gefilmt, sodass die horizontale Geschwindigkeit  $v_0$  des Wurfkörpers mit der Bildrate der Kamera und der horizontalen Distanz, welche der Ball zwischen zwei Bildern des Videos zurücklegt, berechnet werden kann. Dafür wird als Referenz ein Zollstock parallel zur Rollbahn gelegt. Als zweite Information wird die Distanz  $l$  des Auftreffpunktes des Wurfkörpers zum Gebäude mit einem Zollstock gemessen. Man nimmt an, dass sich der Ball während des Fallens mit konstanter horizontaler Geschwindigkeit  $v_0$  bewegt und linear vertikal mit der Erdbeschleunigung  $g$  beschleunigt wird. Setzt man die Formeln für diese zwei Bewegungsarten ineinander ein, so folgt  $H = \frac{1}{2}g\left(\frac{l}{v_0}\right)^2$ .

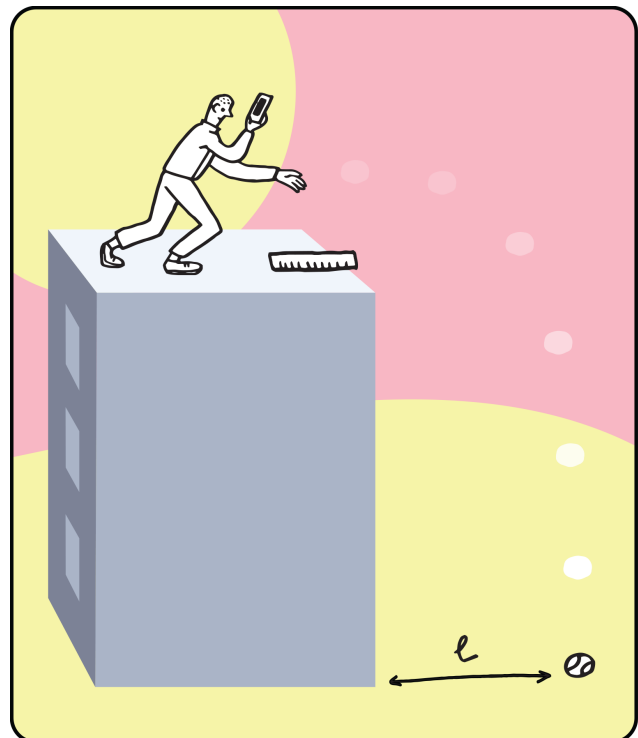


Abbildung 4: Man beachte, dass im rechten Winkel zur Rollbahn gefilmt wurde, um Bildverzerrung zu minimieren[1]

## 6.2 Ergebnis und Fehlerdiskussion

Zu den Fehlern und Ungenauigkeiten, welche auftreten, gehören die Vernachlässigung des Luftwiderstandes und anderer aerodynamischer Effekte, wie den Magnus-Effekt. Diese würden die vertikale und horizontale Geschwindigkeit des Wurfkörpers beeinflussen, jedoch sollte bei niedrigen Höhen die vertikale Geschwindigkeit stärker beeinflusst werden, was zu einem systematischen Fehler von  $0,1 \frac{m}{s}$  der vertikalen Geschwindigkeit  $v_0$  führt. Weitere Fehler entstehen durch das Filmen und die Auswertung des Films und verfälschen  $v_0$  statistisch um  $0,15 \frac{m}{s}$ .

Besonderer Augenmerk wird bei diesem Versuch auf das manuelle Ablesen der Distanz  $l$  zum Gebäude gelegt, da man beim Messen nicht nur einen Wert ermitteln kann, sondern einen Bereich, in dem der Wurfkörper aufgekommen ist. Die Größe dieses Bereiches entspricht der Genauigkeit, mit der die Distanz im jeweiligen Versuch ermittelt werden konnte. Je kleiner der Bereich desto genauer. Damit dieser Variation Rechnung getragen wird, wird jedem Versuch entsprechend der Sicherheit beim Ablesen eine Wichtung zugeteilt, sodass genauere Messungen das gewichtete Mittel mehr beeinflussen als Messungen, die eine große Unsicherheit haben. Wenn dieses Gewicht als  $\frac{1}{(Unsicherheit)^2}$  gesetzt wird erhält man den gewichteten Mittelwert  $M_{Gewichtet} = 7,225m \pm 1,81m$ . Gleichet man die vorhergesagten systematischen Fehler aus und beachtet die statistischen Fehler, erhält man einen in der Theorie genaueren Mittelwert:  $M_{Bereinigt} = 9,56m \pm 1,87m$ . Das Ergebnis an sich ist nicht genau, was an der hohen Standardabweichung zu erkennen ist und ist zusätzlich durch die Vernachlässigung mehrerer aerodynamischer Effekte fehlerhaft und könnte durch deren Implementierung in die Formel eine weitaus verlässliche Methode werden.

## 7 Akustik

### 7.1 Methoden

Bei diesem Versuch werden zwei Smartphones als Tonaufnahmeegeräte verwendet. Zu Beginn werden die Smartphones nebeneinander an den unteren Vermessungspunkt gelegt, die Aufnahme gestartet und ein kurzes, lautes akustisches Signal nahe der Smartphones ausgelöst. Anschließend wird eines der beiden Smartphones an den oberen Vermessungspunkt gebracht, sodass die Smartphones vertikal übereinander liegen. Es wird ein zweites akustisches Signal ausgehend von dem Standort einer der beiden Stoppuhren abgegeben. Wenn nun die Tonspuren der beiden Stoppuhren beim ersten Signal synchronisiert werden, gibt die Differenz des zeitlichen Abstandes zum zweiten Signal die Zeit  $t$  an, die der Schall braucht um die Strecke des Gebäudes zurückzulegen.

Diese Differenz entspricht der Laufzeit des akustischen Signals zwischen den Smartphones. Es wird angenommen, dass die Schallgeschwindigkeit über diese Strecke konstant ist, wodurch sich die Höhe  $H$  des Gebäudes mit der Formel für unbeschleunigte Bewegungen  $H = v \cdot t$  berechnen lässt.

Um die Schallgeschwindigkeit zu präzisieren, wird die Temperatur zum Zeitpunkt der Messung per Thermometer erfasst.

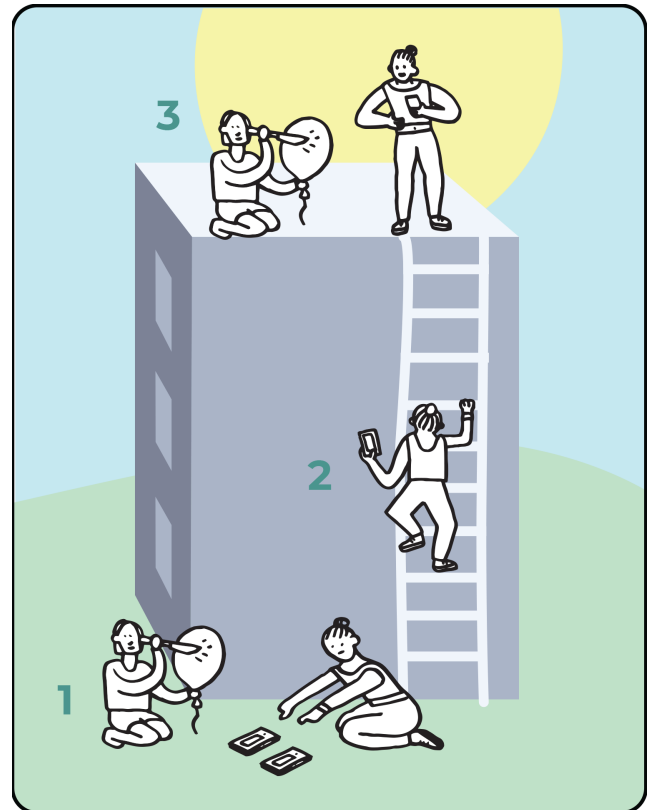


Abbildung 5: Als Signal kann ein platzen-der Ballon genutzt werden[1]

### 7.2 Ergebnis und Fehlerdiskussion

Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass bei drei Messungen die Höhen um den Faktor drei abweichen. Wahrscheinlich ist ein Fehler während des Messens aufgetreten. Da die drei Messungen mit der selben Synchronisation durchgeführt wurden und eine ähnlich große Differenz zum Erwartungswert haben, liegt die Vermutung nahe, dass der Fehler schon bei der Synchronisation aufgetreten ist. Bei der Berechnung des Mittelwertes und der Fehlerbetrachtung werden diese Werte ignoriert. Eine besondere Fehlerquelle, welche spezifisch für diesen Versuch ist, ist die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit ([14]) von der Temperatur, dem Luftdruck und der Luftfeuchtigkeit. Da im Normalfall keine Sensoren dafür in einem Smartphone vorhanden sind,

wurde in dem Versuch nur die Temperatur berücksichtigt, da diese den größten Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit hat. Falls ein Thermometer nicht vorhanden ist, kann ein Wetterbericht benutzt werden. Die akustische Methode ist sehr genau im Hinblick auf relative Ungenauigkeiten. So ist die Standardabweichung mit  $\sigma = 0,473m$  verhältnismäßig klein. Auch der Mittelwert  $M = 12,53m$  befindet sich im realistischen Bereich. Auch bei der theoretischen Betrachtung fallen wenige Fehler auf. Da das zweite Signal nicht sofort an dem daneben liegenden Smartphone ankommt, sondern auch eine kurze Zeit braucht um aufgenommen zu werden, wird die gemessene Höhe um  $0,05m$  systematisch verfälscht. Eine weitere Fehlerquelle ist die Schallgeschwindigkeit, die nicht nur von der Temperatur abhängt. Diesem Fehler einen Wert zu geben ist rückwirkend nicht sinnvoll, da die wirklichen Werte vor Ort nicht bekannt sind, und von denen in größerer Umgebung abweichen könnten. Statistische Fehler treten durch Variationen in der Positionierung der Smartphones und des Signales auf, sollten aber für keine Ungenauigkeit größer als  $0,03m$  sorgen.

## 8 Fazit und Ausblick

In jeder physikalischen Messung versucht man möglichst genau einen unbekanntem Wert zu ermitteln, jedoch wird nie der Istwert das Ergebnis sein, denn keine Messung kann dies. Um statistische Fehler zu minimieren, bedarf es möglichst vieler Messungen, und einer gründlichen Untersuchung und Mitigation systematischer Fehler. Eine weitere Herangehensweise um herauszufinden, ob systematische Fehler vorliegen, ist mehrere verschiedene Messmethoden zu verwenden.

Die Genauigkeit und Schwierigkeit einer Methode sind unterschiedlich, je nach Höhe des Gebäudes. Im Falle der 61. Methode der *Smartphone Physics Challenge* „The Architect“, welche beinhaltet den Architekten anzurufen und ihn nach der Höhe des Gebäudes zu fragen, ist die Schwierigkeit je nach Status des Gebäudes unterschiedlich. Bei dem in den fünf Versuchen vermessenen Gebäude war es zum Beispiel nicht möglich den Architekten ausfindig zu machen, auch nach einer versuchten Kontaktaufnahme mit potentiellen Informanten abseits des Architekten oder der Architektin.

Von den in dieser Dokumentation erprobten Versuchen gibt es aus diesem Grund keine beste Methode. Die Methode „Freier Fall“ ist besonders einfach durchzuführen. Man braucht aber einen geeigneten Wurfkörper und eine Absicherung des Auftreffbereiches, damit Sicherheit gewährt werden kann. Die Methode ist für kleine und mittelhohe Gebäude geeignet.

Das Fadenpendel aufzubauen ist im Vergleich zu den anderen Methoden zeit- und materialaufwendig, ebenso die Auswertung. Dafür ist das Fadenpendel genauer, und ist auch bei größeren Gebäuden verwendbar.

Der größte Vorteil der Methode per Trigonometrie ist die Unabhängigkeit von der Höhe des Gebäudes. Jedoch müssen eine Vielzahl an Größen gemessen werden, was den Versuch komplexer macht.

Der ungeeigneteste Versuch in dieser Erprobung ist eindeutig der waagrechte Wurf. Durch die gleichzeitige Messung der Distanz des Auftreffpunktes am Fuß des Gebäudes sowie der Filmaufnahme auf dem Dach werden mehrere Personen benötigt. Zusätzlich ist dieser Versuch

materialaufwendig mit zwei Zollstöcken und einem Wurfkörper. Die Auswertung des Films ist besonders zeitaufwendig für eine Messung. Noch dazu zeigte sich bei diesem Versuch keine große Genauigkeit.

Am einfachsten ist der Versuch per Akustik. Er benötigt zwar zwei Smartphones, braucht aber sonst kein Material. Der gesamte Zeitaufwand um ein Ergebnis zu erlangen hält sich in Grenzen und die Genauigkeit ist ausreichend hoch.

Nun ist diese Feststellung nur temporär gültig, denn Smartphones sind einer der sich am schnellsten weiterentwickelnden Technologien. Die Sensoren, welche in Smartphones verbaut werden, nehmen an Qualität und Quantität zu. Es ist also nur eine Frage der Zeit, bis sich neue, genauere, einfachere Messmethoden mit einem Smartphone durchführen lassen und es nicht mehr nur 61 Methoden gibt, um mit einem Smartphone die Höhe eines Gebäudes zu messen.

## 9 Danksagungen

Ich danke besonders Frau Dr. Bergmann und Herrn Daam des Karlsruher Instituts für Technologie, die das Projekt betreut und mich unterstützt haben.

Gleichermaßen möchte ich mich bei meinen Kursleitern Herrn Gruber und Herrn Krieg bedanken, die mir besonders bei der Organisation des Projektes geholfen haben, und mich zusammen mit Herrn Bischof und Frau Richert sowie den anderen Kursleitern aus Karlsruhe in den Jahren im Hector-Seminar betreut haben.

Einen Dank möchte ich auch meinen Brüdern Leopold Kopp und Paul Kopp aussprechen, die mich bei der Durchführung der Versuche tatkräftig unterstützt haben.

Abschließend gilt mein besonderer Dank dem Ehepaar Josephine und Dr. Hans-Werner Hector, durch deren Stiftung ich die Möglichkeit bekommen habe, sechs Jahre lang Erfahrungen auf dem Gebiet des wissenschaftlichen Arbeitens zu sammeln und davon viele Erinnerungen mitzunehmen.

## 10 Anhang

### 10.1 Messergebnisse Freier Fall

Zeit [s]	Höhe [m]
1,7	14,175
1,6	12,557
1,58	12,245
1,5	11,036
1,67	13,680
1,5	11,036
1,57	12,090
1,57	12,090
1,58	12,245
1,61	12,714
1,6	12,557
1,6	12,557
1,57	12,090
1,6	12,557
1,52	11,333
1,45	10,313
1,49	10,890
1,57	12,090
1,55	11,784
1,56	11,937

### 10.2 Messergebnisse Fadenpendel

Periodendauer [s]	Höhe [m]
6,85	11,690
6,73	11,285
6,71	11,218
6,74	11,318
6,74	11,318
6,85	11,690
6,72	11,251
6,66	11,052
6,96	12,067
6,83	11,622
6,71	11,218
6,785	11,470
6,73	11,285
6,84	11,656
6,78	11,453
6,775	11,436
6,83	11,622
6,71	11,218
6,83	11,622
6,96	12,067
6,72	11,251
6,71	11,218

### 10.3 Messergebnisse Trigonometrie

Winkel[°]	Distanz l zur Fassade[m]	Meine Größe[m]	Höhe der Fassade[m]
76,89	2	1,62	10,208
77,96	2	1,62	10,997
77,92	2	1,62	10,965
71,81	3,82	1,62	13,245
72,46	3,82	1,62	13,706
72,33	3,82	1,62	13,611
71,82	3,82	1,62	13,252
61,73	5,82	1,9	12,722
62,83	5,82	1,9	13,239
62,12	5,82	1,9	12,901
52,99	7,82	1,9	12,274
53,45	7,82	1,9	12,449
52,98	7,82	1,9	12,270
46,44	9,82	1,9	12,226
46,93	9,82	1,9	12,405
47,54	9,82	1,9	12,632

## 10.4 Messergebnisse waagrechter Wurf

Geschwindigkeit[m/s]	Distanz[m]	Höhe[m]	Sicherheit[+/-cm]
1,018	1,45	9,945	10
1,252	1,44	6,493	2
1,019	1,44	9,798	2
0,993	1,34	8,929	3
1,305	1,35	5,253	2
1,408	1,62	6,490	10
1,461	1,75	7,033	3
1,907	1,99	5,339	8
1,084	1,25	6,523	10
1,496	1,86	7,583	5
1,021	1,29	7,830	3
1,137	1,13	4,841	3
1,223	1,43	6,709	4
0,924	1,12	7,200	3
1,379	1,58	6,437	3
0,883	1,16	8,458	5
0,895	1,12	7,674	10
0,905	1,13	7,644	2
0,959	1,21	7,813	3
0,978	1,175	7,076	2



## 10.5 Messergebnisse Akustik

Messung unten[s]	Messung oben[s]	Zeitdifferenz[s]	Höhe [m]	Temperatur [°C]
115,939	115,978	0,039	13,093	7
65,466	65,569	0,103	34,578	7
75,251	75,351	0,100	33,571	7
80,564	80,665	0,101	33,906	7
127,108	127,148	0,040	13,308	2
133,962	134,001	0,039	12,975	2
139,561	139,601	0,040	13,308	2
121,202	121,24	0,038	12,642	2
135,711	135,748	0,037	12,310	2
101,356	101,394	0,038	12,654	2,5
122,107	122,146	0,039	12,987	2,5
88,156	88,193	0,037	12,321	2,5
94,826	94,863	0,037	12,321	2,5
101,97	102,006	0,036	11,999	3
92,186	92,224	0,038	12,665	3
98,99	99,026	0,036	11,999	3
107,517	107,553	0,036	11,999	3
99,526	99,563	0,037	12,332	3
106,129	106,166	0,037	12,332	3
115,893	115,931	0,038	12,665	3
131,246	131,281	0,035	11,665	3

## Literatur

- [1] Bildquelle. URL: <https://hebergement.universite-paris-saclay.fr/supraconductivite/smartphone-physics-challenge/a-propos/?lang=en> (besucht am 02.10.2022).
- [2] Die Smartphone Physics Challenge. URL: <https://hebergement.universite-paris-saclay.fr/supraconductivite/smartphone-physics-challenge/?lang=en> (besucht am 26.08.2022).
- [3] Differentialgleichung Fadenpendel. URL: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/mechanische-schwingungen/aufgabe/loesung-der-differentialgleichung-des-ungedaempften-fadenpendels> (besucht am 02.10.2022).
- [4] Fehlerfortpflanzung. URL: <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/daten/statistik/fehlerfortpflanzung.vlu.html> (besucht am 02.10.2022).
- [5] Fehlertypen. URL: <https://www.ingenieurkurse.de/physik/mathematische-grundlagen/systematische-und-statistische-messfehler.html> (besucht am 02.10.2022).
- [6] Funktionsweise der Quarzuhr. URL: <https://www.planet-wissen.de/technik/werkstoffe/sand/pwiequarzuhr100.html> (besucht am 02.10.2022).
- [7] Funktionsweise der Smartphonekamera. URL: <https://thesmartphonephotographer.com/how-phone-camera-works/> (besucht am 02.10.2022).
- [8] Funktionsweise des Gyrosensors. URL: <https://www.digikey.de/de/articles/apply-sensor-fusion-to-accelerometers-and-gyroscopes> (besucht am 02.10.2022).
- [9] Funktionsweise des Lichtintensitätssensors. URL: <http://lednique.com/opto-isolators-2/light-dependent-resistor-ldr/> (besucht am 02.10.2022).
- [10] Funktionsweise des Mikrofons. URL: <https://mynewmicrophone.com/what-kind-of-microphones-are-used-in-cell-phones/> (besucht am 02.10.2022).
- [11] Gravitationszonen. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationszone> (besucht am 02.10.2022).
- [12] Menschliche Reaktionsgeschwindigkeit. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/reaktionszeit/12540> (besucht am 02.10.2022).
- [13] Mittelwert. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Mittelwert> (besucht am 02.10.2022).
- [14] Schallgeschwindigkeit. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schallgeschwindigkeit> (besucht am 02.10.2022).
- [15] Standardabweichung. URL: <https://matheguru.com/stochastik/standardabweichung.html> (besucht am 02.10.2022).

## 11 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit unter der Bereuung durch Frau Dr. Bergmann und Herrn Daam am Karlsruher Institut für Technologie sowie Dietmar Gruber und Norbert Krieg am Hector-Seminar, selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden, sowie Zitate deutlich gemacht wurden.

Karlsruhe, den 05.10.2022

.....  
Jakob Kopp