

Physics²Go! – kontextorientierte Physiklehre in Schule und Hochschule

Kolloquium für Physiklehrende (U Ulm)

Lutz Kasper

Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd

Ulm, 12. Januar 2016

Inhalt

Smartphones als mobile “Labore”

Physik in Sport und Verkehr (Mechanik)

Beschleunigungen im Alltag

Bestimmung des c_W -Wertes von Pkw und Fahrrad

Physik und Sport I: Ballgeschwindigkeiten

Physik und Sport II: Energieumwandlung beim Laufen

Akustik, Musik, Schwingungsphänomene

Schallgeschwindigkeit in Gasen und Festkörpern

Resonanzphänomene an Brücken

Akustische Analysen im Alltag: Kirchenglocken

Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Klangstäben

Physik in Biologie und Bionik

Akustische Untersuchung des Insektenfluges

Spechtklopfen – einfache Analysen

Zusammenfassung und Literaturhinweise

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

c_W -Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Smartphones als mobile "Labore"

Das Potenzial von Smartphones und Tablets

- ▶ Experimentieren / Messen
- ▶ Modellieren und Mathematisieren
- ▶ Kommunizieren
- ▶ Dokumentieren und Präsentieren
- ▶ bestmögliche Mobilität!

Aus dem Bildungsplan 2016 Baden-Württemberg
(Anhörungsfassung), Leitlinie "Medienbildung", S. 6:

Medienbildung (MB)

Das naturwissenschaftliche Experiment, die zugehörige Datenerfassung und -auswertung mithilfe des Computers, des Smartphones oder vergleichbarer Geräte sind wichtige Beiträge des Physikunterrichts zur Medienbildung. Es gehört zu den Aufgaben der *Medienbildung* im Physikunterricht, die Schülerinnen und Schüler zu befähigen, sich Informationen zu beschaffen, deren Quellen zu prüfen und deren Darstellungen kritisch zu interpretieren. Sowohl bei der Erarbeitung von fachlichen Inhalten als auch bei der Präsentation von Arbeitsergebnissen greifen die Schülerinnen und Schüler im Physikunterricht auf verschiedene Medien zurück und setzen diese angemessen und verantwortungsbewusst ein.

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

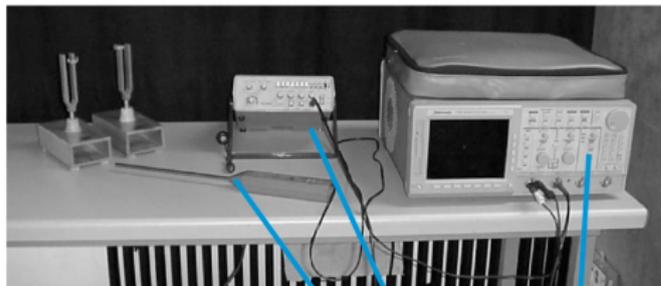
Biologie und Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Neue Wege: Smartphones als mobile "Labore"

Beispiel: Das Akustiklabor für die Hosentasche:



„klassische“
Messanordnung

Mikrofon
Mess-
verstärker
Oszilloskop

sowie:

Frequenzgenerator
Lautsprecher
FFT-Analysator
Tabellenkalkulation
Datenspeicher
Kommunikator



Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

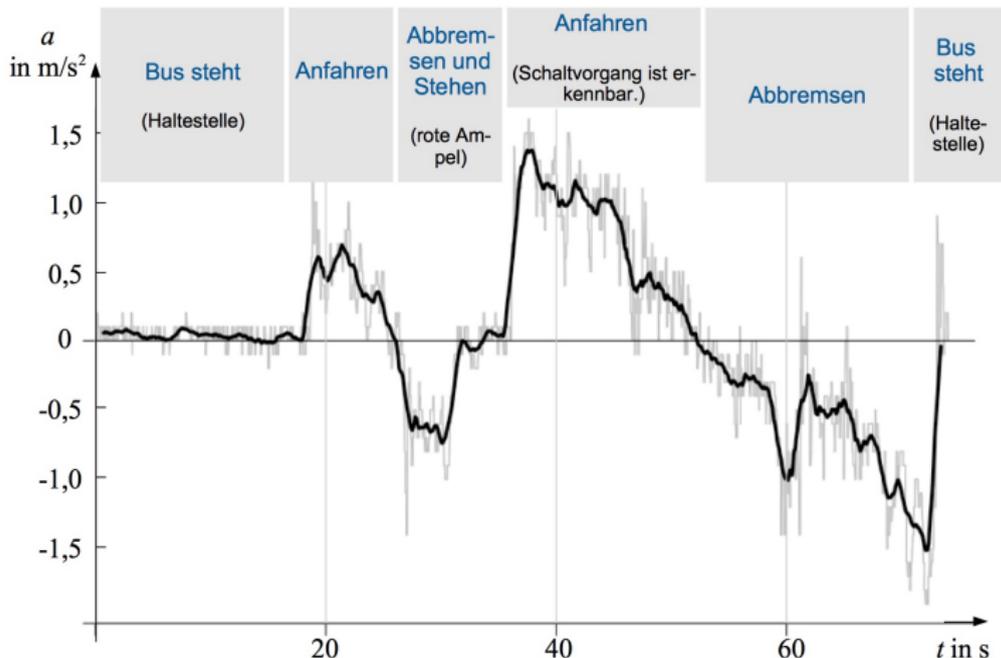
Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Entwicklung fachspezifischer Methoden, z.B.:

- ▶ Messwernerfassung, Datenformate, Datenexport/-import
- ▶ Glätten “verrauschter” Signale
- ▶ Messwertverarbeitung (z.B. numerische Integration von Zeitreihen)
- ▶ Darstellung in Diagrammen
- ▶ Nutzung dieser Methoden/Werkzeuge für komplexere Fragestellungen

Beschleunigungen im Alltag: Beispiel Busfahrt



Ziele: Umgang mit $a(t)$ -Diagrammen (Bsp. hier: Stadtbus-Fahrt);
Glätten von Daten

APPs: SPARKvue von PASCO oder measureApp von PHYWE

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Beschleunigung und Geschwindigkeit im Alltag

Problem:

Ermittlung der Geschwindigkeit aus den Beschleunigungsdaten \rightarrow *numerische Integration* ...

Beispiel:

Messungen in Aufzügen \rightarrow hier: Berlin Potsdamer Platz



Der schnellste Aufzug Europas

Geschwindigkeit:
8,5 m/sec.
Förderhöhe:
90,15 m
Fahrzeit:
20 sec.

Hersteller: Thyssen Aufzüge
Bauherr: DaimlerChrysler

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

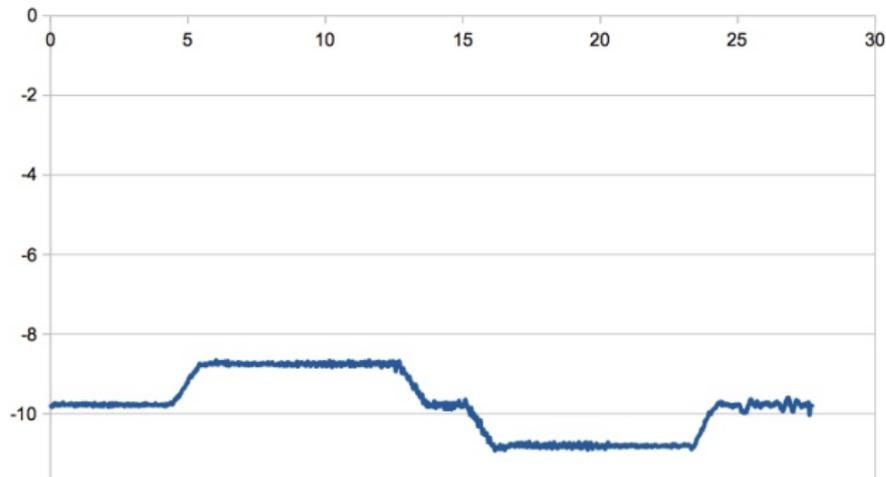
Beschleunigung und Geschwindigkeit im Alltag

Problem:

Ermittlung der Geschwindigkeit aus den Beschleunigungsdaten → *numerische Integration* ...

Beispiel:

Messungen in Aufzügen → hier: Berlin Potsdamer Platz



Messung der Beschleunigung (a_z -Komponente) mit dem Smartphone

(App: Measure von Phywe; Diagramm nach Datenexport in Tab.-Kalkulation)

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

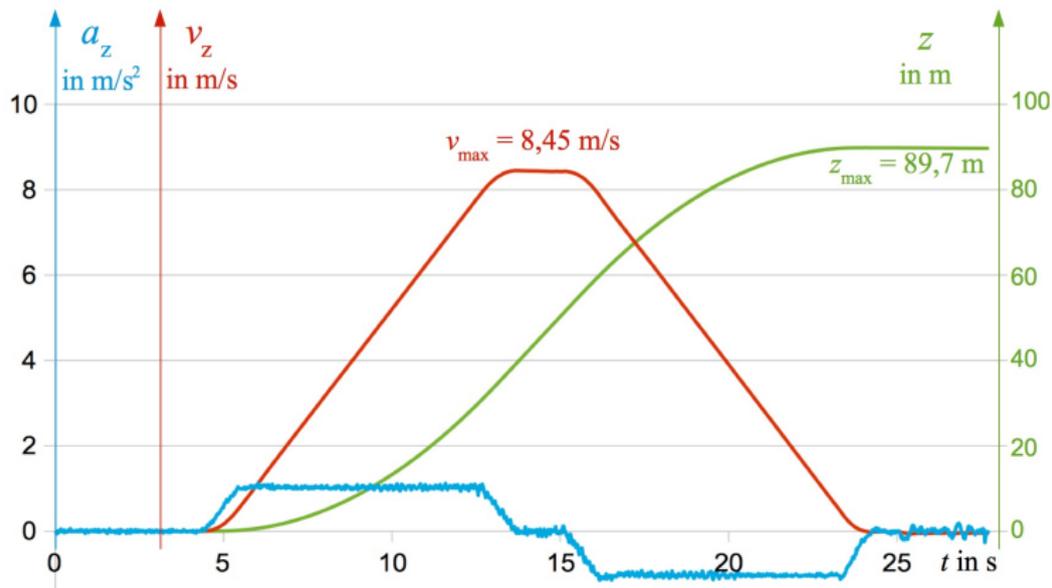
Beschleunigung und Geschwindigkeit im Alltag

Herstellerangabe: $v_{max} = 8,5 \text{ m/s}$

eigene Messung: $v_{max} = 8,45 \text{ m/s}$

Förderhöhe, angegeben: $h = 90,15 \text{ m}$

Förderhöhe, gemessen: $h = 89,69 \text{ m}$



Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Der c_w -Wert von Pkw und Fahrrad

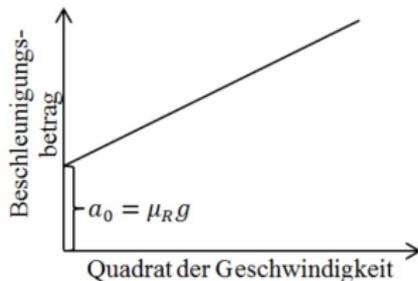
Die Idee:

Beschleunigung und Geschwindigkeit beim Ausrollvorgang

Kraftansatz:



$a(v^2)$ -Diagramm:



$$M \cdot a = F_L + F_R = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 + \mu_R M g$$

$$a = \frac{1}{2} \frac{c_w \rho A}{M} v^2 + \mu_R g$$

Steigung liefert c_w

Ordinatenabschnitt liefert μ_R

Der c_W -Wert von Pkw und Fahrrad

Abschätzung der effektiven Fläche mithilfe von Fotos:

VW Beetle



$$A = 2,22 \text{ m}^2$$

VW T3 Bus



$$A = 3,17 \text{ m}^2$$

LKW von MAN



$$A = 4,90 \text{ m}^2$$

Tourenrad



$$A = 0,6 \text{ m}^2$$

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

c_W -Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

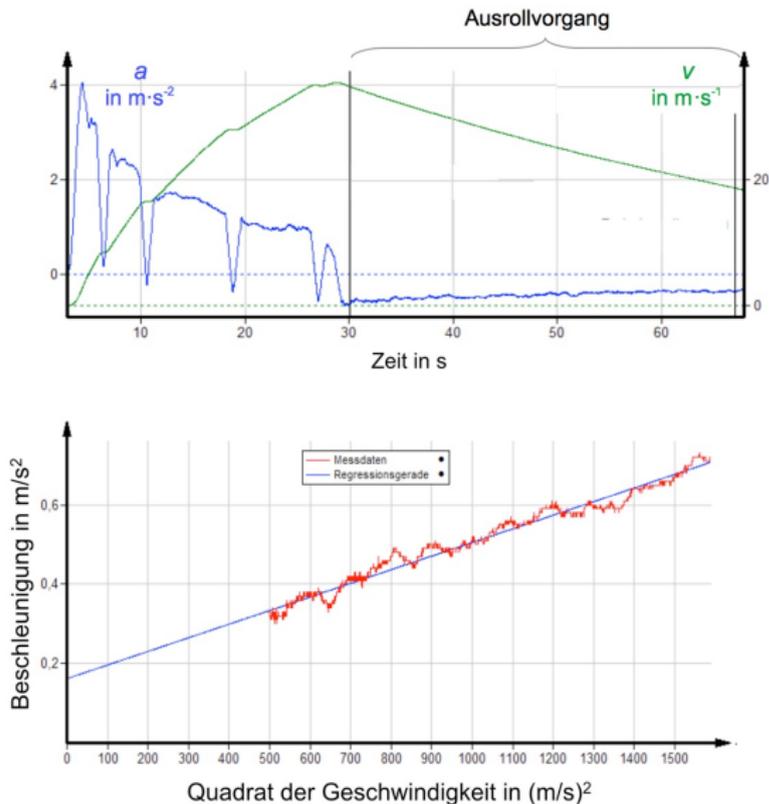
Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Der c_w -Wert von Pkw und Fahrrad



1. Glätten der Beschleunigungsdaten
2. Berechnung der Geschwindigkeit (numerische Integration)
3. Abtragen des Beschleunigungsbetrages gegen das Geschwindigkeitsquadrat
4. Durchführen einer linearen Regression

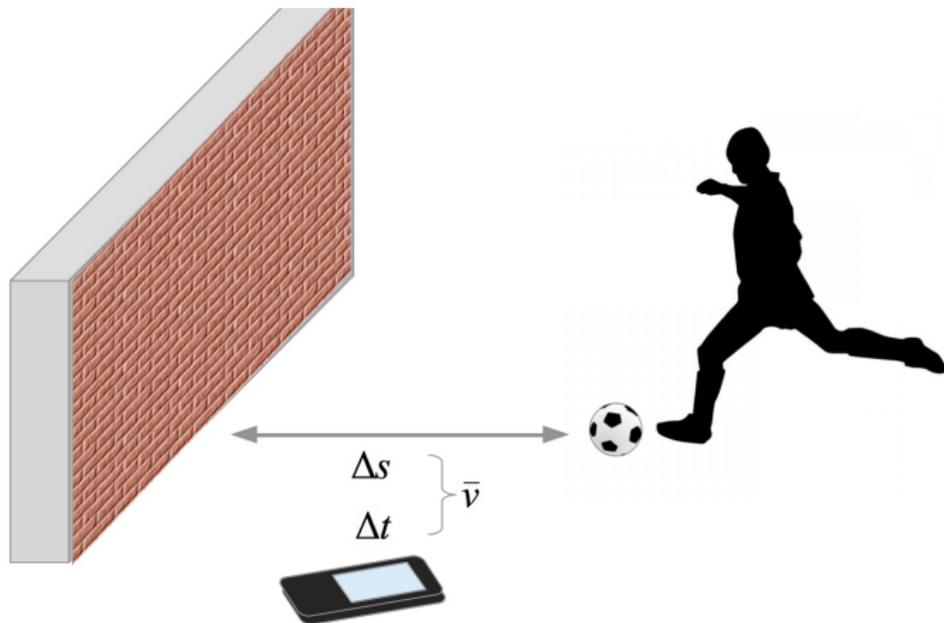
Der c_W -Wert von Pkw und Fahrrad

Ergebnisse

Größe	Volkswagen T3 Bus	Fahradfahrer
Masse m	$2000 \pm 5 \text{ kg}$	$86,5 \pm 0,1 \text{ kg}$
wirksame Fläche A	$3,17 \pm 0,05 \text{ m}^2$	$0,6 \pm 0,05 \text{ m}^2$
Luftdichte ρ	$1,20 \pm 0,05 \text{ kg/m}^3$	$1,20 \pm 0,05 \text{ kg/m}^3$
Literaturwerte		
μ_R (Reifen auf Asph.)	0,01	0,0022 ... 0.005
c_W -Wert	0,51	1,0
Messwerte		
μ_R (Reifen auf Asph.)	$0,0035 \pm 0,0006$	$0,0262 \pm 0,0002$
c_W -Wert	$0,501 \pm 0,023$	$1,12 \pm 0,07$

Physik und Sport I

Geschwindigkeit geschossener oder geschlagener Bälle



→ $\bar{v} \approx v_{start}$ (für sehr kurze Strecken s)

Physik und Sport I

Geschwindigkeit geschossener oder geschlagener Bälle

Beispielmessungen für verschiedene Ballsportarten:

		velocity in km/h	
		male	female
Sport (distance)	<i>N</i>	11	9
Table tennis (2 m)	mean	65.5	44.5
	(<i>SD</i>)	(12.5)	(9.5)
Beach paddle ball (3 m)	mean	74.7	50.2
	(<i>SD</i>)	(13.5)	(10.0)
Soccer (5 m)	mean	67.7	42.1
	(<i>SD</i>)	(8.9)	(10.4)
Badminton (3 m)	mean	81.8	55.7
	(<i>SD</i>)	(12.8)	(17.8)
Volleyball (5 m)	mean	53.4	35.6
	(<i>SD</i>)	(10.7)	(5.9)

(Quelle: Vogt et al 2015)

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert

Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und
Wellen

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Biologie und
Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Physik und Sport II

Modellierung der Energieumwandlung beim Laufen

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

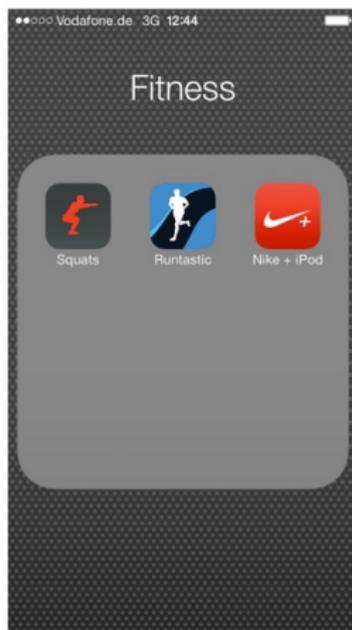
Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Sensoren und Apps für Sport und Fitness



exemplarische Auswahl der App *runtastic* (kostenfreie Versionen für iOS, Android und Windows Phone)



Darstellung der Laufstrecke; Erstellen von Statistiken und Trainingsplänen; soziales Netzwerk



Angabe von Laufzeit, Zwischenzeiten, Geschwindigkeiten, Höhenmetern und: **"verbrannte Kalorien"**

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Insektenflug
Klopfspechte

Modellierung der Energieumwandlung beim Laufen

Was heißt eigentlich **“verbrannte Kalorien”**?

Was ist die korrekte (SI-)Einheit für diese Größe?

Wie kann das mein Smartphone messen?

Welche Sensoren werden dafür benötigt?

Schüler beim Cooper-Test



(Copyright: nwzonline)

Welche Größen bestimmen die Energieumwandlung?

- ▶ “Sprungarbeit” (Anhebung des Körperschwerpunktes pro Schritt)
- ▶ Hubarbeit durch zurückgelegte (positive) Höhenmeter
- ▶ Beschleunigungsarbeit der Gliedmaßen
- ▶ Reibungsarbeit (Luftwiderstand infolge der eigenen Geschwindigkeit und infolge des Windes)
- ▶ Erwärmung des Körpers bzw. Umwandlungswärme (Schweißverdunstung); Aufrechterhalten des thermischen Fließgleichgewichts

⇒ **Sehr komplexer Vorgang!**

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Ein einfaches Modell für die Sekundarstufe I

- ▶ “Sprungarbeit” (Anhebung des Körperschwerpunktes pro Schritt)
- ▶ Hubarbeit durch zurückgelegte (positive) Höhenmeter
- ▶ Beschleunigungsarbeit der Gliedmaßen
- ▶ Reibungsarbeit (Luftwiderstand infolge der eigenen Geschwindigkeit und infolge des Windes)
- ▶ Erwärmung des Körpers bzw. Umwandlungswärme (Schweißverdunstung); Aufrechterhalten des thermischen Fließgleichgewichts

⇒ **Deutliche Reduzierung der Komplexität!**

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Ein einfaches Modell für die Sekundarstufe I

Sprungarbeit: $W_{Sprung} = m_K \cdot g \cdot h_S \cdot n$

n : Anzahl der Schritte

h_K : Körperhöhe

m_K : Körpermasse

h_S : Höhe, um die der Körperschwerpunkt jeweils gehoben wird

Dabei gilt: $h_S = 0,042 \cdot h_K$ (www.laufen-in-siegen.de)

Ermittlung der Schrittzahl:

- ▶ Verhältnis Körperlänge zu Schrittlänge ($\approx 0,5 \dots 0,7$)
- ▶ Schrittfrequenz (≈ 156 pro min)

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Ein einfaches Modell für die Sekundarstufe I

Sprungarbeit: $W_{\text{Sprung}} = m_K \cdot g \cdot h_S \cdot n$

n : Anzahl der Schritte

h_K : Körperhöhe

m_K : Körpermasse

h_S : Höhe, um die der Körperschwerpunkt jeweils gehoben wird

Dabei gilt: $h_S = 0,042 \cdot h_K$ (www.laufen-in-siegen.de)

Ermittlung der Schrittzahl:

- ▶ Verhältnis Körperlänge zu Schrittlänge ($\approx 0,5 \dots 0,7$)
- ▶ Schrittfrequenz pro min (≈ 156)

thermisches Fließgleichgewicht \implies Wirkungsgrad η

η ist abhängig vom Geschlecht und Trainingszustand und wird in der Literatur angegeben mit 0,20 ... 0,33 (vgl. Thaller, S., Mathelitsch L. 2006: Kraft, Leistung und Energie im Muskel. Was leistet ein Sportler? In: PhiZ 2/2006 (3), S. 86-89)

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Ein einfaches Modell für die Sekundarstufe I

Für die umgesetzte Energie ergibt sich:

$$\Delta E = \frac{m_K \cdot g \cdot h_S \cdot n}{\eta}$$

Abschätzung der "Sprunghöhe":

$$\Delta E = \frac{m_K \cdot g \cdot 0,042 \cdot h_K \cdot n}{\eta}$$

Abschätzung der Schrittzahl über die Schrittlänge:

$$\Delta E = \frac{m_K \cdot g \cdot 0,042 \cdot h_K \cdot s}{\eta \cdot 0,51 \cdot h_K}$$

Zusammenfassen, Kürzen und Einsetzen ($\eta = 0,2$):

$$\Delta E \approx 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot m_K \cdot s$$

Oder ("Faustformel"):

4 kJ (1 kcal) pro gelaufenen km und pro kg Körpermasse

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Modell-Evaluation mit Realdaten

erzeugt aus Umfrage in *runtastic*-Community ($n = 10$)

Läufer	m in kg	h_K in m	s in km	t in s	E in kcal
1	89,0	1,91	10,4	3521	935
2	79,5	1,81	7,91	3051	649
3	87,0	1,78	14,8	5400	1310
4	72,5	1,78	11,2	4695	864
5	90,7	1,80	7,0	3460	747
6	76,0	1,82	4,1	1630	322
7	100	1,82	6,5	3135	729
8	76,0	1,80	10,7	3379	802
9	85,7	1,93	5,1	1642	433
10	80,0	1,78	42,6	14198	3387

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und

Bionik

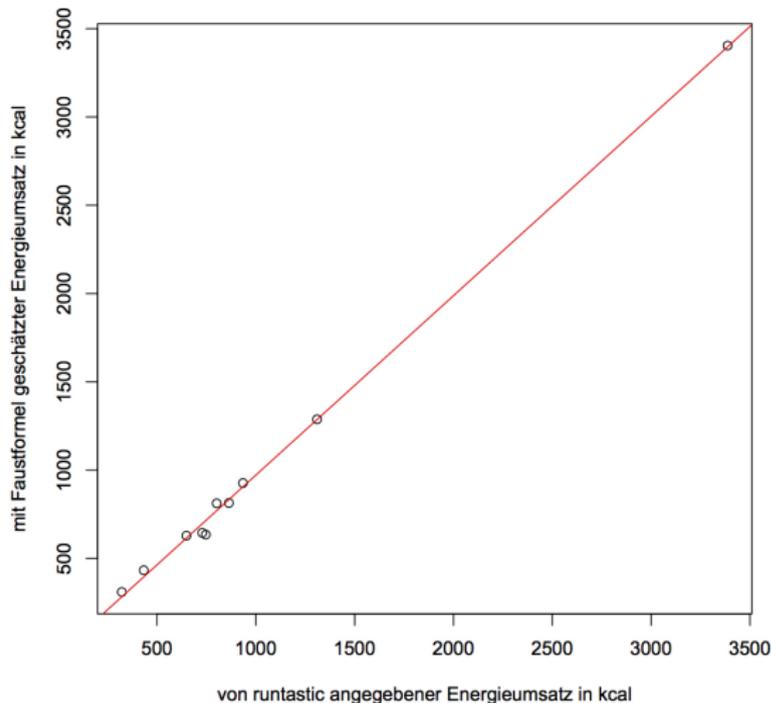
Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Modell-Evaluation mit Realdaten

erzeugt aus Umfrage in *runtastic*-Community ($n = 10$)



**Faustformel vs.
App-Angabe:**

$$R^2 > 0.99$$

(Für direkten Vergleich mit den von der App ausgegebenen Werten wird die Einheit "kcal" verwendet.)

Einsatz im Unterricht

Als **Lernaufgabe** ist dieser Inhalt gekennzeichnet durch

- ▶ Kontextorientierung (in mehrfacher Hinsicht)
- ▶ Interdisziplinarität (Themenfelder Sport und Gesundheit werden verbunden mit physikalischen, technischen und mathematischen Fragestellungen.)
- ▶ Vielfalt der Lösungswege aufgrund hoher Komplexität
- ▶ Aussicht auf Erfolg (Vergleich des gefundenen Modells mit den Angaben der App)
- ▶ Hinweise auf Steigerung von Motivation und Interesse in kleineren Studien (Häfner 2015)

Vogt, P./ Kasper, L. (2014): Energieumwandlung beim Laufen – Experimente und Modellierung mithilfe von Smartphones. In: NiU Physik 143, S. 39-41

Häfner, F. (2015) Ein Modell für die Energieumwandlung beim Laufen – Smartphone-Einsatz im Physikunterricht der Sekundarstufe 1. (unveröff. Staatsexamensarbeit, PH Schwäbisch Gmünd)

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

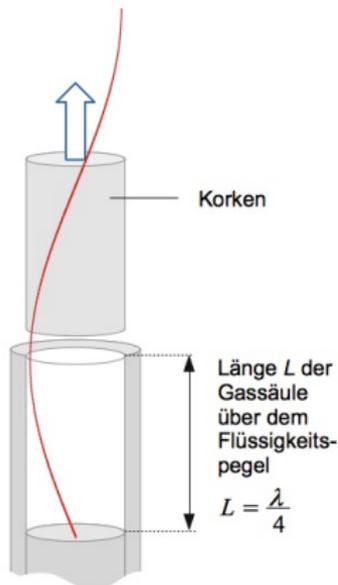
Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Schallgeschwindigkeit in Gasen I

Plopp! Der Flaschenhals als Resonanzrohr

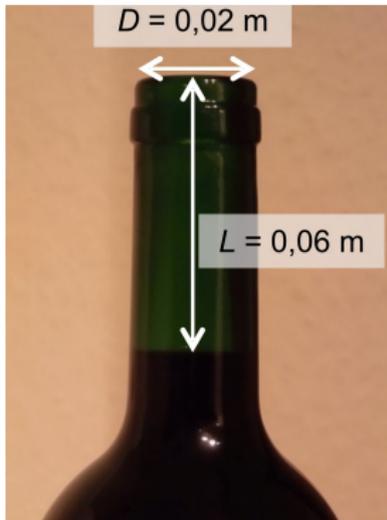


Kasper, L., Vogt, P.: *Korkenziehen und Schallgeschwindigkeit – Ein überraschend einfaches Smartphone-Experiment.*

In: PdN Physik in der Schule, Heft 7, 2015, S. 27-28

Schallgeschwindigkeit in Gasen I

Plopp! Der Flaschenhals als Resonanzrohr



$$\rightarrow L + \Delta L = \frac{\lambda}{4}$$

$$\Delta L = 0,61 \cdot R \quad \text{und} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

$$f_{\text{gemessen}} = 1204 \text{ Hz}$$

$$c = 4(L + \Delta L) \cdot f \approx 318 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

L : Länge der Luftsäule

ΔL : Mündungskorrektur

R : Innenradius des Flaschenhalses

f : Resonanzfrequenz (gemessen)

c : Schallgeschw. (343 m/s für 20°C)

Kasper, L., Vogt, P.: *Korkenziehen und Schallgeschwindigkeit – Ein überraschend einfaches Smartphone-Experiment.*

In: PdN Physik in der Schule, Heft 7, 2015, S. 27-28

Schallgeschwindigkeit in Gasen I

Plopp! Messung der Schallgeschwindigkeit beim Korkenziehen



Variante "Fingerploppen":

L in m	f in Hz	c_{Luft} in m/s
0,03	2355	340
0,04	1740	321
0,05	1488	334
0,06	1225	324
0,07	1058	322
0,08	952	328

Raumtemperatur: 24 °C

→ $c_{erwartet} = 345,6 \text{ m/s}$

→ $\bar{f}_{rel} = 5,1 \%$

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

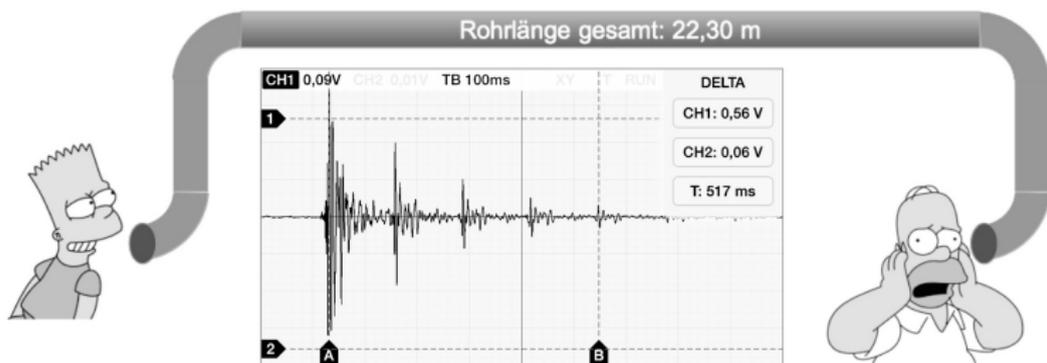
Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Schallgeschwindigkeit in Gasen II

Laufzeitmethode an Schallrohren



Vorteil: Messung für Sek I geeignet, da keine Kenntnisse aus Wellenlehre vorausgesetzt werden.

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{8 \cdot 22,3\text{m}}{0,517\text{s}} = 345,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

($T = 24^\circ\text{C} \rightarrow c_{\text{erwartet}} = 345,6 \text{ m/s.} \rightarrow f_{\text{rel}} = 0,14\%$)

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Schallgeschwindigkeit in Gasen II

Laufzeitmethode an Schallrohren – Abhängigkeit von der Temperatur



(Foto: L. Kasper)

9,48-m-Abflussrohr bei $T = 0^{\circ}\text{C}$



9,48-m-Abflussrohr bei $T = 24^{\circ}\text{C}$



Schallgeschwindigkeit in Gasen II

Laufzeitmethode an Schallrohren – Abhängigkeit von der Temperatur

Messwerte zur Temperaturabhängigkeit:

	Outdoor measurement	Indoor measurement
Pipe length	9.48 m	9.48 m
Pipe radius	0.07 m	0.07 m
Temperature	0 °C	24 °C
Time difference between signal and the echo	0.229 s	0.219 s
Speed of sound in the experiment	333 m/s	348 m/s
Speed of sound in dry air (literature value)	331 m/s	346 m/s

Kasper, L., Vogt, P., Strohmeyer, C.: *Stationary wave tubes and the speed of sound*.
In: The Physics Teacher Vol. 53, 2015, pp 523-524

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

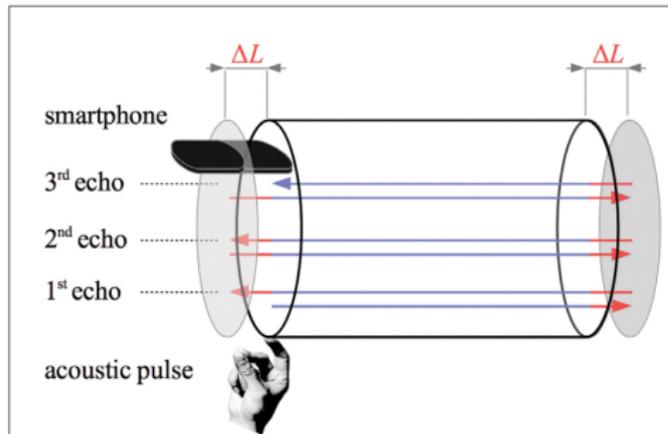
Zusammenfassung, Literatur

Schallgeschwindigkeit in Gasen II

Laufzeitmethode an Schallrohren – Abhängigkeit von der Temperatur

Für größere Genauigkeit → Berücksichtigung der Mündungskorrektur ΔL :

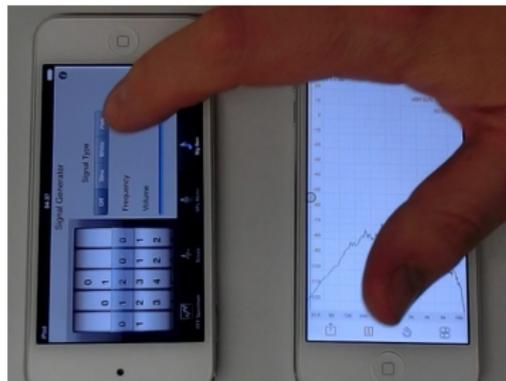
$$\Delta L = 0,61 \cdot R \quad (\text{Levine/Schwinger 1948})$$



Kasper, L., Vogt, P., Strohmeyer, C.: *Stationary wave tubes and the speed of sound.*
In: The Physics Teacher Vol. 53, 2015, pp 523-524

Schallgeschwindigkeit in Gasen III

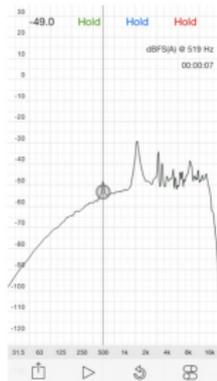
Gläser als Resonanzrohre



weißes Rauschen ohne Resonanzröhre



... mit Resonanzröhre



$f_0 = 519 \text{ Hz}$

$$c = 4 \cdot (L + 0,61 R) \cdot f = 4 \cdot (0,15 \text{ m} + 0,61 \cdot 0,037 \text{ m}) \cdot 519 \text{ s}^{-1} \approx 358 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Monteiro, M., Marti, A.C., Vogt, P., Kasper, L., Quarthal, D. (2015). *Measuring the acoustic response of Helmholtz resonators*. In: The Physics Teacher, Vol. 53, April 2015, pp. 247-249

Schallgeschwindigkeit in Gasen III

Gläser als Helmholtzresonatoren



erwartete Resonanzfrequenz:

$$c = 345 \text{ ms}^{-1} \text{ (bei } \vartheta = 23 \text{ °C)}$$

$$R = 0,04 \text{ m}$$

$$V = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$A = 5,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$l = 0$$

$$f = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{V \cdot (l + 2\Delta L)}}$$

$$\text{mit } \Delta L = \frac{1}{4} \pi R \rightarrow f_{\text{berechnet}} = 587 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{gemessen}} = 586 \dots 601 \text{ Hz}$$

Monteiro, M., Marti, A.C., Vogt, P., Kasper, L., Quarthal, D. (2015). *Measuring the acoustic response of Helmholtz resonators*. In: The Physics Teacher, Vol. 53, April 2015, pp. 247-249

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

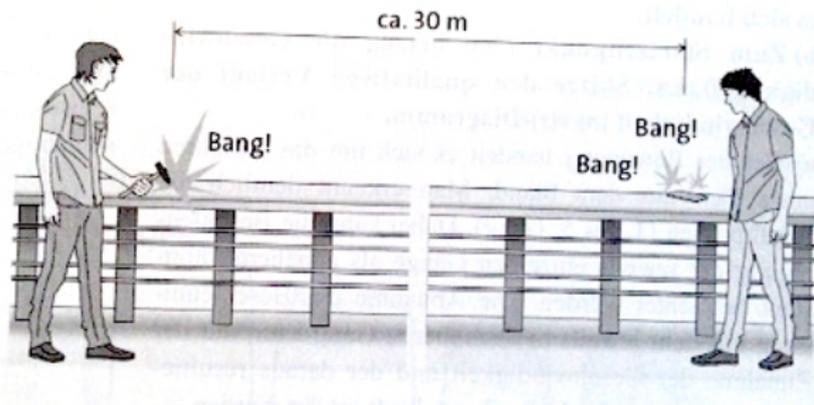
Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Schallgeschwindigkeit in Festkörpern



Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Stahl mithilfe der Laufzeitdifferenz:

$$t_{\text{Stahl}} = \frac{s}{c_{\text{Stahl}}} \quad \text{und} \quad t_{\text{Luft}} = \frac{s}{c_{\text{Luft}}}$$

$$\text{mit} \quad \Delta t = t_{\text{Luft}} - t_{\text{Stahl}} \quad \rightarrow \quad c_{\text{Stahl}} = \frac{1}{\frac{1}{c_{\text{Luft}}} - \frac{\Delta t}{s}}$$

Schallgeschwindigkeit in Festkörpern

Beispielmessung an einem stillgelegten Eisenbahngleis:



$$s = 30 \text{ m}$$

$$T = 5^\circ\text{C} \rightarrow c_{\text{Luft}} = 334 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta t = 0,084 \text{ s (siehe Screenshot)}$$

$$\rightarrow c_{\text{Stahl}} \approx 5150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{(Literaturwert: } c_{\text{Stahl}} = 5100 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow f_{\text{rel}} < 1\%)$$

Kasper, L., Vogt, P. (2015). *Die Physik des Alltags mit dem Smartphone erkunden*.

In: UNIVERSUM Physik, Kopiervorlagen 3/3, Cornelsen Verlag

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Der schwingende Fehrle-Steg in Schwäbisch Gmünd



(Foto: L. Kasper)

Bestimmung der Beschleunigungen und Resonanzfrequenz mit dem Smartphone

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

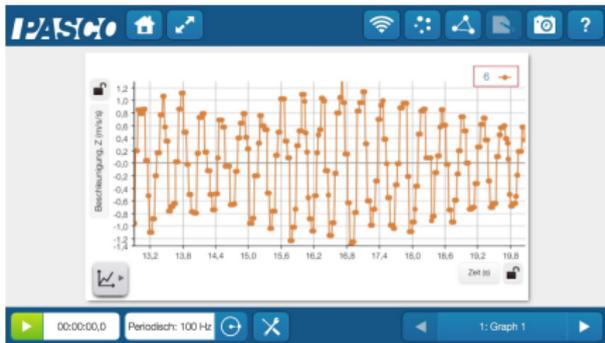
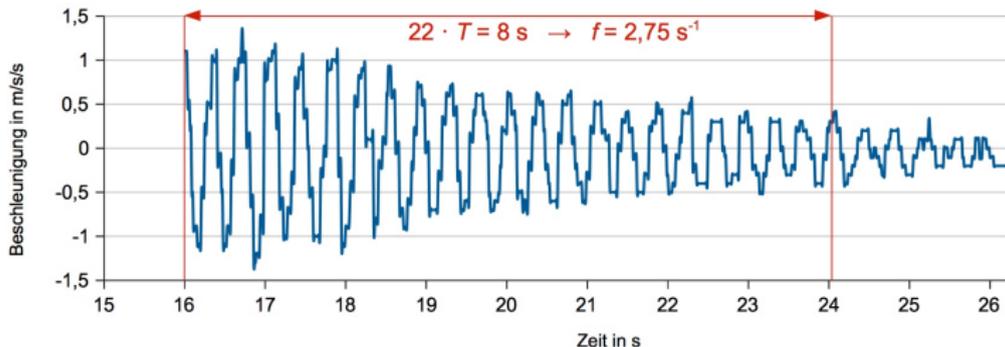
Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Resonanzphänomene an Brücken

Vertikale Beschleunigungen am Fehrle-Steg (Schwäbisch Gmünd)

(App: SPARKvue; in Tabellenkalkulation bearbeitet)



links:
Screenshot der App
SPARKvue

Akustische Analysen im Alltag: Kirchenglocken

Physics2Go!

L. Kasper

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und
Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und
Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Glockengießer – Hüter akustischer Geheimnisse ?!

Physics2Go!

L. Kasper



Glockengießerhandwerk im Glockenmuseum Laucha, Sachsen-Anhalt

(Fotos: L. Kasper)

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

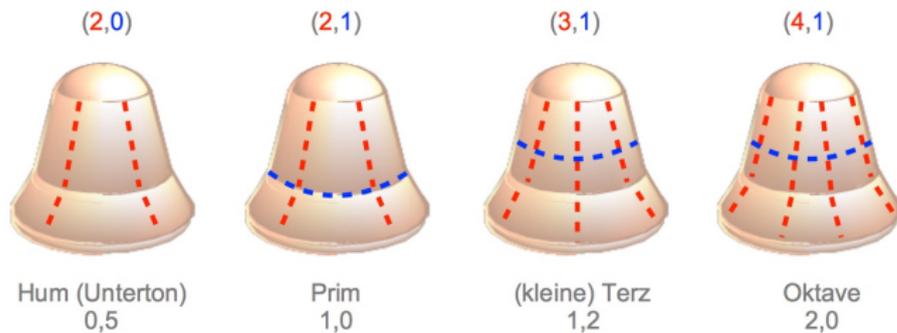
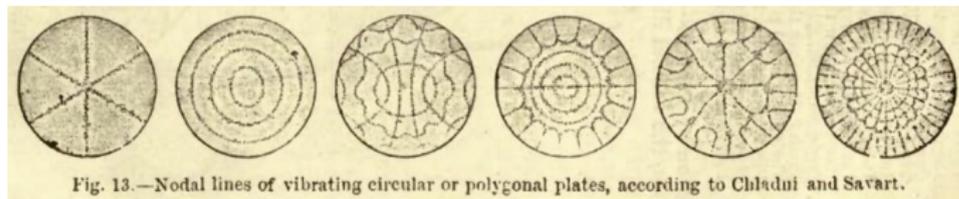
Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Von Chladni-Figuren zur Glocken-Schwingung



Vogt, P./ Kasper, L. (2015): *Der Klang von Kirchenglocken: Experimentelle und empirische Untersuchung eines wohlbehüteten Geheimnisses* In: PdN/Physik in der Schule, Heft 7/64, S. 23-27

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

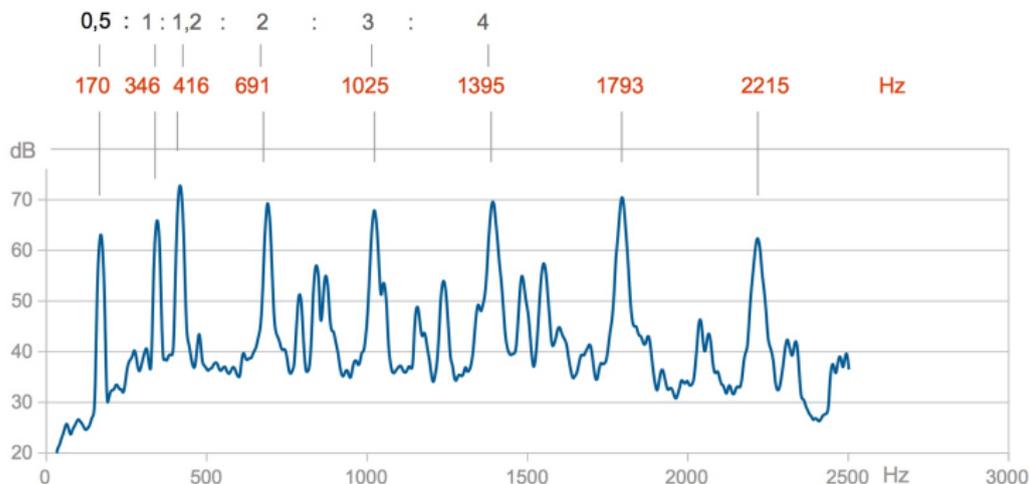
Zusammenfassung, Literatur

Akustische Analysen im Alltag: Kirchenglocken

Mittagsgeläut Heilig-Kreuz-Münster, Schwäbisch Gmünd (Liebfraueglocke im Glockenturm)

Aufnahme: Smartphone-Mikrofon, FFT: iOS-App Spektroskop

Frequenzverhältnisse der ersten Oberschwingungen ausgehend vom Grundton „Prime“ (346 Hz):

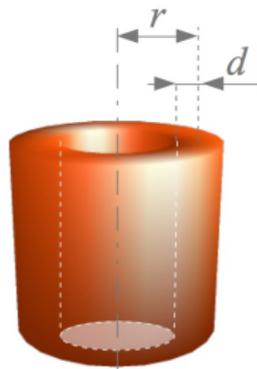
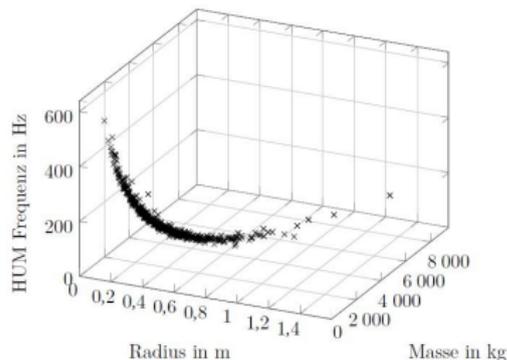


Vogt, P./ Kasper, L. (2015): *Der Klang von Kirchenglocken: Experimentelle und empirische Untersuchung eines wohlbehüteten Geheimnisses* In: PdN/Physik in der Schule, Heft 7/64, S. 23-27

Vogt, P./ Kasper, L./ Burde, J.-P. (2015) *The sound of church bells: Tracking down the secret of a traditional arts and crafts trade.* In: The Physics Teacher 53 / 438-439

Vogt, P./ Kasper, L./ Burde, J.-P. (2016) *More sound of church bells: Authors' correction.* In: The Physics Teacher 54 / 52-53

Akustische Analysen im Alltag: Kirchenglocken



Annäherung der Glocke durch einen Hohlzylinder:

$$f_0 = \frac{c_{\text{Bronze}} \cdot d}{\sqrt{3\pi} \cdot r^2}$$

vgl. Apfel, R. E. (1985) American Journal of Physics 53, 1070-1073

Zusammenhang von Frequenz,
Glockenradius und Glockenmasse
($n = 685$; Glockendatensatz des
Erzbistums Köln)

Vogt, P./ Kasper, L./ Burde, J.-P. (2015) *The sound of church bells: Tracking down the secret of a traditional arts and crafts trade*. In: The Physics Teacher 53 / 438-439

Vogt, P./ Kasper, L./ Burde, J.-P. (2016) *More sound of church bells: Authors' correction*. In: The Physics Teacher 54 / 52-53

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Akustische Analysen im Alltag: Kirchenglocken

Hohlzylinder-Ansatz:

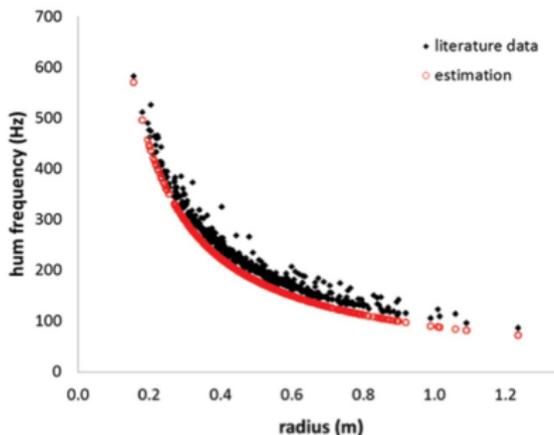
$$f_{hum} = \frac{c_{Bronze} \cdot d}{\sqrt{3} \pi \cdot r^2}$$

$$c_{Bronze} \approx 3400 \frac{\text{m}}{\text{s}}; \quad \frac{d}{r} \approx \frac{1}{7}$$

Mit einem empirisch ermitteltem Korrekturfaktor ergibt sich:

$$f_{hum} = 0,092 \cdot \frac{c_{Bronze}}{\pi r}$$

$$\rightarrow \text{Faustformel: } r \approx \frac{100 \text{ Hz}}{f_{hum}} \text{ m}$$



Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

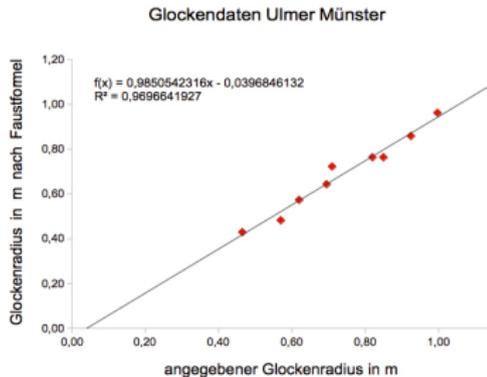
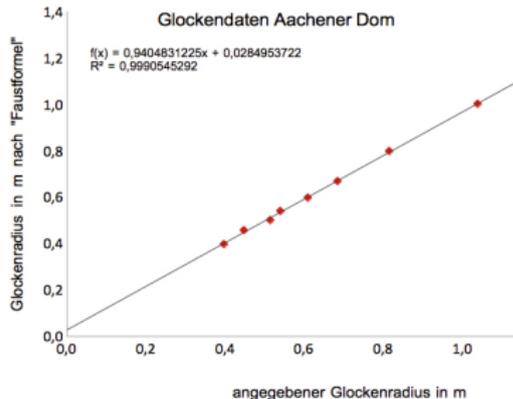
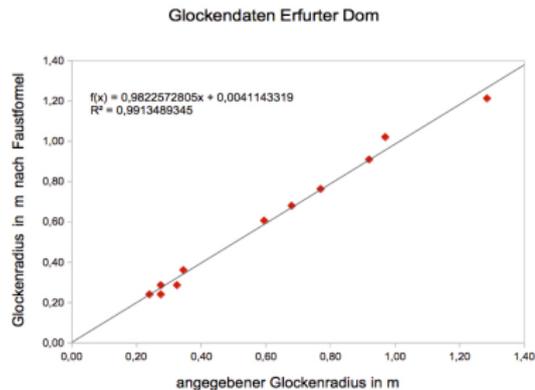
Vogt, P./ Kasper, L./ Burde, J.-P. (2015) *The sound of church bells: Tracking down the secret of a traditional arts and crafts trade*. In: *The Physics Teacher* 53 / 438-439

Vogt, P./ Kasper, L./ Burde, J.-P. (2016) *More sound of church bells: Authors' correction*. In: *The Physics Teacher* 54 / 52-53

Akustische Analysen im Alltag: Kirchenglocken

Prüfung der Güte der einfachen Faustformel an Datensätzen verschiedener Glockengeläute:

Mittleres Bestimmtheitsmaß (R^2): 0,986 (!)



Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Insektenflug
Klopfspechte

Elastizitätsmodul – Klang- oder Stativstäbe



Idee: Messung von $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ zur Materialbestimmung

$$f_k = \frac{s_k^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I_A}{\rho \cdot A}}$$

$$s_k = \frac{2k+1}{2} \pi$$

$$I_A = \frac{\pi}{4} \cdot r^4$$

Für $k = 1$ gilt dann

$$\sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{16 \cdot f \cdot L^2}{9 \cdot \pi \cdot r}$$

I_A : axiales Trägheitsmoment

L : Länge des Stabes

A : Querschnitt des Stabes

Elastizitätsmodul – Klang- oder Stativstäbe

Schlagwerk-Klangstab ($l = 11,2 \text{ cm}$; $r = 0,6 \text{ cm}$):

Frequenzmessung $f = 4240 \text{ Hz}$

$$\rightarrow \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{16 \cdot f \cdot l^2}{9 \cdot \pi \cdot r} = 5040 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Beispielwerte zum Vergleich:

Material	E in Pa	ρ in kg/m^3	$\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ in $\sqrt{\frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg}}}$
Aluminium	$6,85 \cdot 10^{10}$	2710	5028
Kupfer	$2,00 \cdot 10^{11}$	8940	4730
Messing	$7,80 \cdot 10^{10}$	8400	3047

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schwingungen und
Wellen

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

**Biologie und
Bionik**

Insektenflug

Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Akustische Untersuchung des Insektenfluges

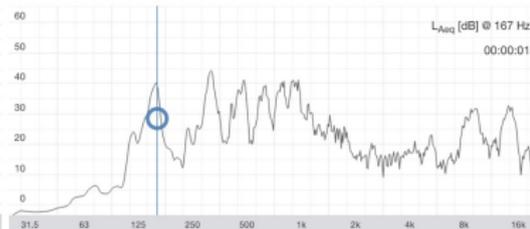
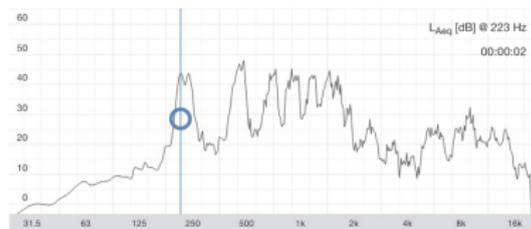
Flügelschlag einer Biene



Flügelschlag einer Wespe



Oszillogramme aufgenommen mit der App Oscilloskop (iOS)



Spektrogramme aufgenommen mit der App Spektroskop (iOS)

Kasper, L. (2013): *Der Insektenflug als authentischer Kontext für den Physikunterricht*.
In: PhyDid B – Tagungsband der Frühjahrstagung des Fachverbandes der DPG in Jena 2013

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Spechtklopfen – einfache Analysen

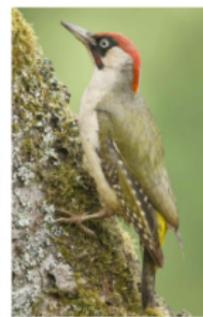


Buntspecht
(*Dendrocopos major*)

Länge des Wirbels: 0,7 s

Schlagfrequenz: $f = 18,6$ Hz

(Bild: www.spechte.net)



Grünspecht
(*Picus virides*)

Länge des Wirbels: 1,2 s

Schlagfrequenz: $f = 24,4$ Hz

(Bild: www.lbv.net)

Wirbellänge und Schlagfrequenz sind artspezifisch.

→ Akustische Art-Bestimmung mit dem Smartphone!

→ Weitergehende Fragen aus Physik, Bionik, ...

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

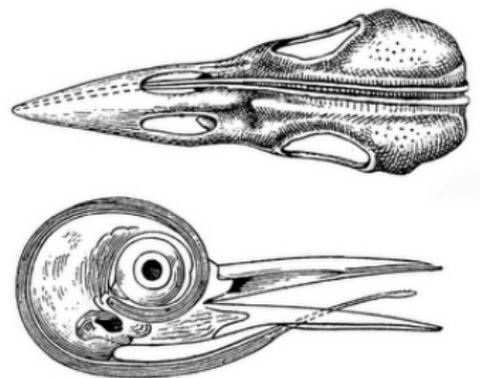
Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

Spechtklopfen – physikalisch gesehen (gehört)



(Bild: sciencebasedlive.wordpress.com)

Zungenbein des Spechts als Teil
des “Stoßdämpfersystems”

Beispielangaben zum Buntspecht

(vgl: doi:10.1371/journal.pone.0026490.t002)

- ▶ lineare
Maximalgeschwindigkeit:
 $\approx 7,5 \text{ m/s}$
- ▶ maximale
Winkelgeschwindigkeit:
 $\approx 160 \text{ rad/s}$
- ▶ maximale
(Brems-)Beschleunigung:
 $\approx 9800 \text{ m/s}^2$ (!)

Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und
Wellen

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

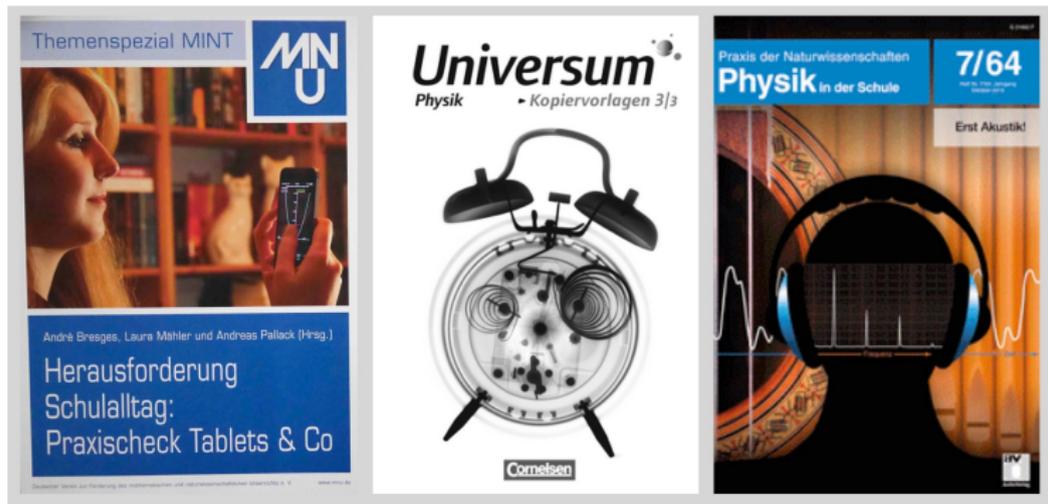
Biologie und
Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung,
Literatur

- ▶ Smartphone als vollwertiges Messwerteerfassungssystem;
- ▶ niedrighschwelliger Zugang zu physikalischen Messverfahren;
- ▶ starke Verbreitung, große Vertrautheit, intuitive Bedienbarkeit, hohe Mobilität, spontan einsetzbar;
- ▶ Auslagerung/Vertiefung experimenteller Inhalte in Hausaufgaben möglich;
- ▶ experimentelle Untersuchung von Alltagskontexten außerhalb der Schule;
- ▶ quantitative Analysen von z.T. schwer zugänglichen Größen (z. B. Widerstandsbeiwert oder Schallgeschwindigkeit in Eisen);
- ▶ Empirische Studien in Schule und Hochschule weisen auf positive Lernwirkungen hin.

Literaturhinweise (Auswahl aus 2015)



Mobile Labore

Sport und Verkehr

Beschleunigungen
cw-Wert
Ballgeschwindigkeit
Laufen und Energie

Schwingungen und Wellen

Schallgeschwindigkeit
Schwingende Brücken
Kirchenglocken
Elastizitätsmodul

Biologie und Bionik

Insektenflug
Klopfspechte

Zusammenfassung, Literatur

- ▶ MNU-Themenspezial MINT: *Herausforderung Schulalltag: Praxisccheck Tablets & Co.*
- ▶ Kopiervorlagen 3/3 zum Lehrwerk *Universum Physik* (Cornelsen Verlag): *Physik mit dem Smartphone* (Arbeitsblätter, Hinweise, Lösungen, S. 31-59)
- ▶ PdN / PhiS Heft-Nr. 7/64 *Erst Akustik!* (S. 23-28)

Beschleunigungen

cw-Wert

Ballgeschwindigkeit

Laufen und Energie

Schallgeschwindigkeit

Schwingende Brücken

Kirchenglocken

Elastizitätsmodul

Insektenflug

Klopfspechte

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

lutz.kasper@ph-gmuend.de