

Verteilte Sensornetzwerke

Mit Datenaggregation und Sensorfusion

PD Stefan Bosse

Universität Bremen - FB Mathematik und Informatik

Sensoren (Teil 1)

Ziele

- Verständnins der Definition und Klassifikation von Sensoren, Fokus mechanische Sensoren
- Rolle im Material-integrierten Sensorsystem erkennen
- Fähigkeit zur Abgrenzung: Material- vs. Struktureffekte
- Sensormaterialien und direkt materialbasierte Sensoren
- Mikrosystemtechnische Sensoren (Struktureffekte)
- Anwendung von Optischen Sensoren

Definition Sensor

Was ist ein Sensor? [D]



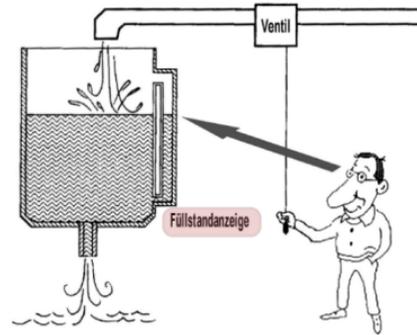
Ein Sensor ist eine Einheit, die ein Signal oder einen Stimulus empfängt und darauf reagiert.



Ein physikalischer Sensor ist eine Einheit, die ein Signal oder einen Stimulus empfängt und darauf mit einem elektrischen Signal reagiert.

"Natürlicher Sensor"

Der Sensor besteht aus zwei Teilen: (1) Füllstandanzeige (2) Menschliches Auge, das ein Signal an das Gehirn sendet.



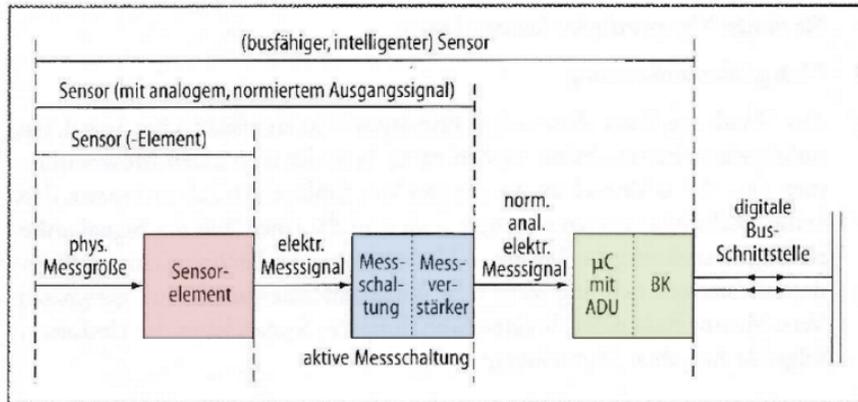
[D]

Definition Sensor



Elemente, die eine im Allgemeinen nichtelektrische Messgröße in ein elektrisches Ausgangssignal umwandeln, heißen Sensoren. Dabei kann eine aktive nachgeschaltete analoge und digitale Sensorsignalverarbeitung erfolgen.

[Weinrich, Grundlagen und Messprinzipien der Sensorik, Universität Hamburg]



Definition Sensor

- Veränderung und Unschärfe des Sensorbegriffs: Im ursprünglichen Sinne ist der Sensor nur der Meßfühler/Aufnehmer, heute oft alles, was im Gehäuse der "Sensoreinheit" mit verpackt ist.

Stimulus

- Ein Stimulus ist eine Größe, Eigenschaft oder Beschaffenheit, die wahrgenommen und in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Ein- und Ausgangssignal

Eingangssignal

Ein Sensor wandelt ein (generell) nicht-elektrisches Signal in ein elektrisches um.

Ausgangssignal

Das Ausgangssignal kann eine elektrische Spannung (Ladungen), ein Strom, ein Lichtfeld, ein Magnetfeld sein.

Messgrößen

Dass Messsignal kann weiter unterscheidbar sein durch

- Amplitude,
- Frequenz,
- Phase,
- Energiedichte (Integral).



Welcher Sensor liefert direkt ein Spannungssignal (aktiver Sensor)?

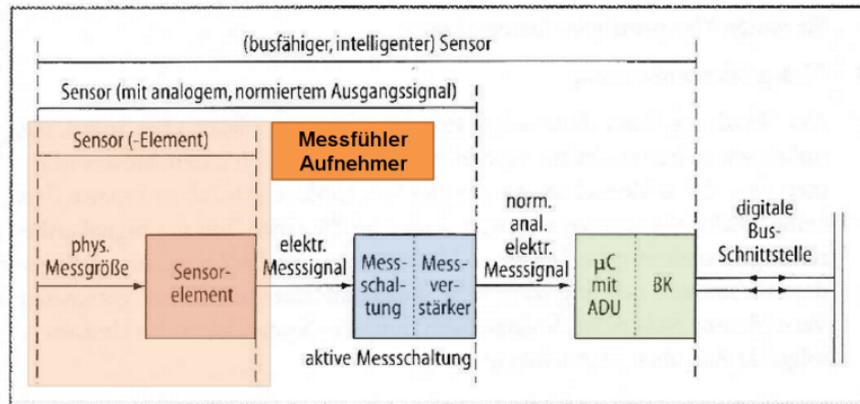


???

Definition Sensor

Sensorelement

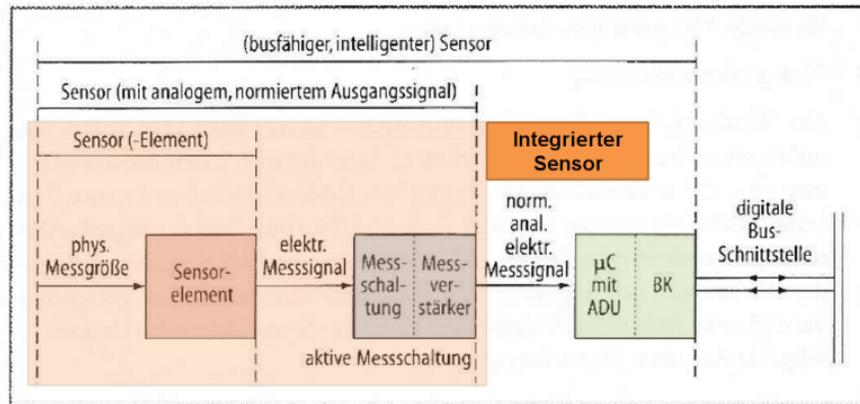
- Ein Sensorelement (einfacher Sensor) oder Messfühler wandelt die Messgröße in eine primäre elektrische Größe um.



Definition Sensor

Integrierter Sensor

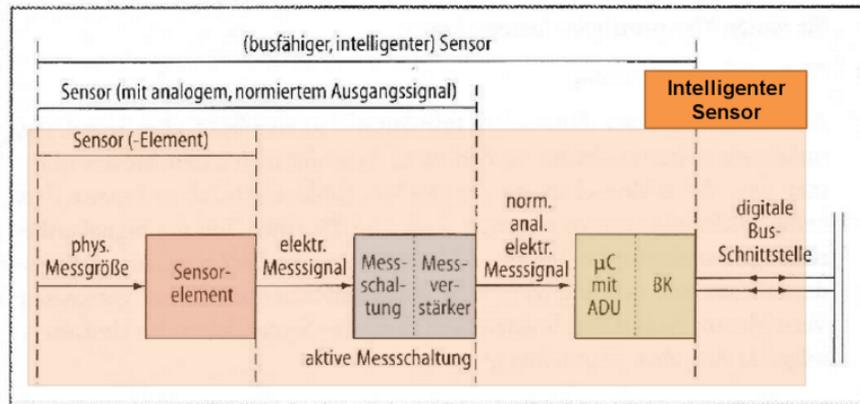
- Ein integrierter Sensor setzt die Messgröße in ein standardisiertes Signal um.



Definition Sensor

Intelligenter Sensor

- Ein intelligenter Sensor ist ein integrierter Sensor mit rechnergesteuerter Auswertung und digitalisierter Ausgabe.



Definition Sensor

Sensormodell

Der Sensor als "Black Box": Fasst man den Sensor als "Black Box" auf, kann er unabhängig von Prinzip und Aufbau u. a. über folgende Merkmale beschrieben werden:

- Transferfunktion
- Messbereichsumfang
- Ausgabebereich
- Genauigkeit
- Kalibrierungsfehler

- Hysterese
- Sättigung
- Wiederholgenauigkeit
- Verlässlichkeit
- dynamische Eigenschaften

Sensormetrik

Metrikklassen

Einteilung nach

- Art der Messgröße/des Stimulus
- Art der Erfassung der Messgröße/Messprinzip
- Art der Umwandlung von der Messgröße zum Ausgangssignal
- Material des Sensors
- Einsatzgebiet des Sensors
- Eigenschaften, Spezifikationen, Parametern (Empfindlichkeit etc.)

Sensormetrik

Einteilung nach Messgröße

- Wegsensoren
- Dehnungssensoren
- Beschleunigungssensoren
- Kraftsensoren
- Gassensoren
- Feuchtesensoren
- Temperatursensoren
- Lichtsensoren
- Magnet(feld)sensoren
- etc.

Sensormetrik

Einteilung nach Messprinzip

- resistive Sensoren (primäre elektrische Größe: Widerstand)
- induktive Sensoren (Induktivität)
- kapazitive Sensoren (Kapazität)
- piezoelektrische Sensoren (Ladung)
- thermoelektrische Sensoren (Spannung)
- optische Sensoren (z. B. Lichtintensität, weitere Wandlung erf.)
- etc.

Sensormetrik

Sensortypen

Ein System kann verschiedene Sensortypen beinhalten:

Extrinsisch

Ermitteln von Informationen über die Systemumgebung

Intrinsisch

Ermitteln von Informationen über den internen Systemzustand



Teilweise ist der Übergang fließend. Liefert der Beschleunigungssensor eines Smartphone eine intrinsische oder extrinsische Wahrnehmung?

Weiterhin Unterteilung in:

Aktive Sensoren

Erzeugen aufgrund des Messprinzips ein elektrisches Signal (z.B. Thermoelement, Lichtsensor), d.h. variieren elektrisches Signal bei Veränderung des Stimulus

Passive Sensoren

Enthalten passive Bauteile, deren Parameter durch die Messgröße verändert werden, d.h. bei Veränderung des Stimulus (z.B. resistive Thermometer oder Dehnungsmessstreifen)

Sensormetrik

Erfassungsverfahren

Die Differenzierung nach aktiven und passiven Sensoren kann nach dem **Energiebedarf** der Sensoren erfolgen:

- Passive Sensoren modulieren ein Signal unter dem Einfluss der Messgröße und benötigen daher Hilfsenergie.
- Aktive Sensoren erzeugen aufgrund des Messprinzips direkt ein elektrisches Signal.
- Aktive Sensoren können häufig in Umkehrung des Messeffektes auch als Aktoren genutzt werden. Sie liefern dafür häufig lediglich bei einer Änderung der Messgröße ein Signal (Ausnahme u. a. Thermoelem.).
- Teilweise wird die Perspektive auch umgekehrt - Sensorelemente, die keine Energiezufuhr benötigen, werden dann als "passiv" bezeichnet.

Messverfahren

Neben der Sensorerfassung kann auch das Messverfahren mit dem Sensor unterteilt werden:

Aktives Messverfahren

Es wird ein Aktuator benötigt der einen Stimulus erzeugt der dann vom Sensor gemessen wird (Beispiel Ultraschallmesstechnik)

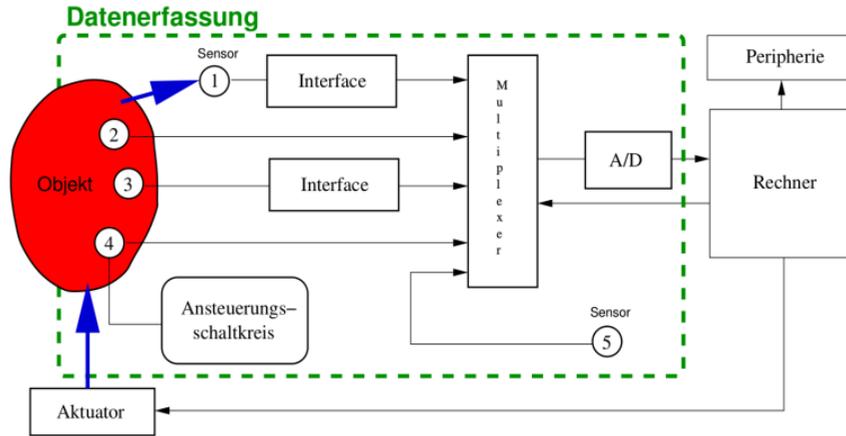
Passives Messverfahren

Der Sensor erfasst direkt einen in der Umgebung vorhandenen Stimulus (Beispiel: Temperatur, Dehnung)

Beispiele:

	Aktiver Sensor	Passiver Sensor
Aktives Messverfahren	Piezoelektrisch, Anregung von Wellen	Kapazitiv, Anregung von Wellen
Passives Messverfahren	Piezoelektrisch, Körperschall	Kapazitiv, Körperschall

Sensormetrik



[D]

Sensortypen:

1.: extrinsisch, passiv

2. und 3.: intrinsisch, passiv

4.: intrinsisch, aktiv

5.: intrinsisch (in der Datenerfassung), passiv

Abb. 1. Aktive, passive, intrinsische, und extrinsische Sensoren in einem Messsystem

Sensormodell

Eigenschaften von Sensoren

- Ein Eingangssignal muss eventuell mehrmals konvertiert werden, bis der Sensor ein elektrisches Ausgangssignal ausgibt.
- Im folgenden Abschnitt wird der Sensor als 'Black Box' betrachtet.
- Es interessiert uns im Folgenden nur die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal.

Transferfunktion

- Jeder Sensor besitzt eine ideale bzw. theoretische Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal.
- Das Ausgangssignal S repräsentiert dabei den wahren Wert des Eingangssignals s .
- Die ideale Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal eines Sensors wird beschrieben durch die Transferfunktion $S = f(s)$.

Sensormodell

Transferfunktion

- Lineare Transferfunktion: $S = a + bs$
- Logarithmische Transferfunktion: $S = a + k \ln s$
- Exponentiale Transferfunktion: $S = a \cdot e^{ks}$
- beliebige Polynome höherer Ordnung: $S = a_0 + a_1 s^1 + a_2 s^2 \dots$

mit

- k ist eine Konstante
- a ist das Ausgangssignal bei einem Eingangssignal von 0
- b ist die Steigung
- b wird in diesem Zusammenhang oft als **Sensitivität** bezeichnet.

Sensormodell

Sensitivität

Für nicht-lineare Transferfunktionen ist die Sensitivität für jeden Eingangswert s_i wie folgt definiert:

$$b = \frac{dS(s_i)}{ds}$$

Approximation einer Transferfunktion

- Einige nicht-lineare Transferfunktionen sind linear in einem eingeschränkten Bereich.
- Nicht-lineare Transferfunktionen können durch mehrere lineare Funktionen approximiert werden.
- Die Differenz zwischen wahren und linear approximiertem Ausgangssignal sollte unter einem zu spezifizierenden Limit liegen.

Sensormodell

Mehrdimensionale Transferfunktionen

- Die Transferfunktion kann von mehr als einem Stimulus abhängen.

Beispiel: Infrarot-Wärmestrahlungssensor (Stefan-Boltzmann Gesetz)

$$U = G(T_b^4 - T_s^4)$$

mit

- G : Konstante
- T_b : absolute Temperatur des gemessenen Objektes
- T_s : absolute Temperatur der Sensoroberfläche
- U : Ausgangsspannung

- Sensitivität in Bezug auf die Temperatur des gemessenen Objektes:

$$b = \frac{dU}{dT_b} = 4GT_b^3$$

Beispiel: Dehnungsmessstreifen (Metallstreifen)

$$R(D, T) \approx R_0 + k(T)\epsilon + mT \approx R_0(T) + k(T)\epsilon$$

mit:

- ϵ : Dehnung
- T : Temperatur
- k, m : Material- und Strukturkonstanten

Sensormodell

Messbereichsumfang

- Der dynamische Bereich eines Stimulus, der von einem Sensor erfasst wird, wird Messbereichsumfang (engl. Span oder Full Scale Input) genannt.
 - beziffert den kleinsten und höchsten für einen Sensor zulässigen Stimuluswert
 - größere Stimuli können den Sensor beschädigen
 - kleiner oder größere Stimuli können zu einer Sättigung des Ausgangssignals führen

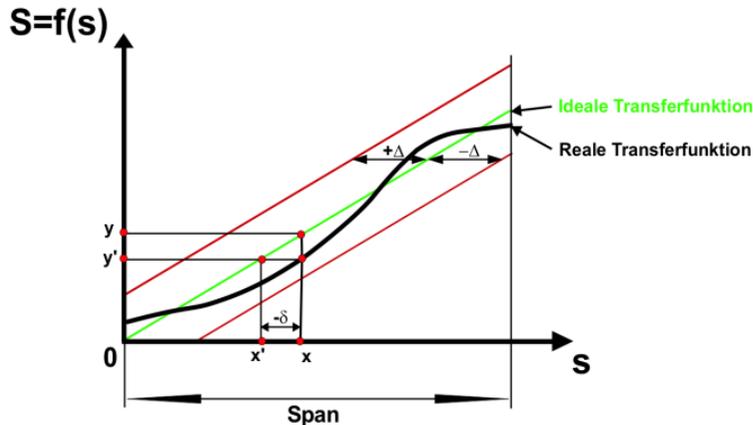
Ausgabebereich

- Der Ausgabebereich (endl. Full Scale Output) eines Sensors ist das Intervall zwischen dem Ausgangssignal bei kleinstem und größtem angelegten Stimulus.

Sensormodell

Reale Transferfunktion

- Im Vergleich zur idealen Transferfunktion sind reale Sensoren immer ungenau.
- Die Transferfunktion eines realen Sensors heißt daher: reale Transferfunktion.



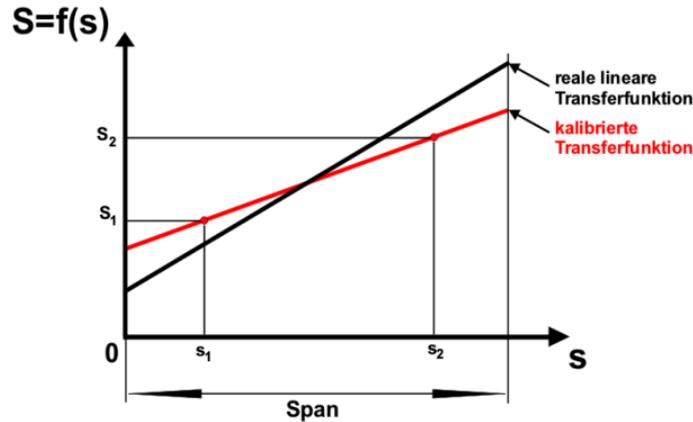
[D]

Abb. 2. Abweichung der realen Transferfunktion von der idealisierten Modellfunktion innerhalb von Ober- und Untergrenzen

Sensormodell

Kalibration

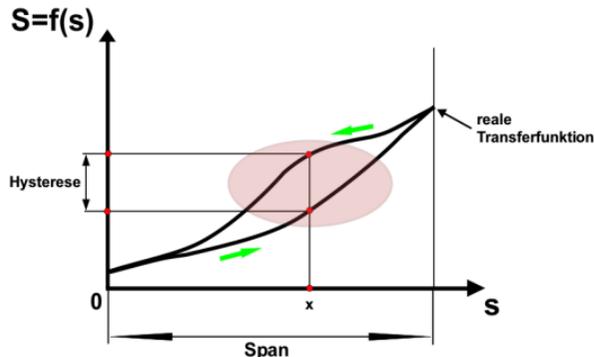
- Kalibration ist eine Korrektur der Transferfunktion (Anpassung der Parametrisierung)
- Kalibration soll die reale Transferfunktion der idealen Transferfunktion anpassen



Sensormodell

Hysterese

- Hysterese beschreibt ein zeit- und historienabhängiges Verhalten der Transferfunktion.
- D.h. der Stimulus wird erst in eine Richtung verändert (vergrößert) und dann wieder in die andere Richtung auf den ursprünglichen Wert geändert (verkleinert). Dabei ist das Ausgangssignal des Sensors aber nicht mehr gleich.



[D]

Abb. 4. Hysteresverhalten der
Sensortransferfunktion

Sensormodell

Sättigung

- Fast jeder Sensor hat Arbeitsbereichsgrenzen.
- Viele Sensoren haben eine lineare Transferfunktion, . . .
 - aber: Ab einem bestimmten Stimuluswert wird nicht mehr die gewünschten Ausgabe erzeugt.
 - Es tritt eine Sättigung der realen Transferfunktion ein.

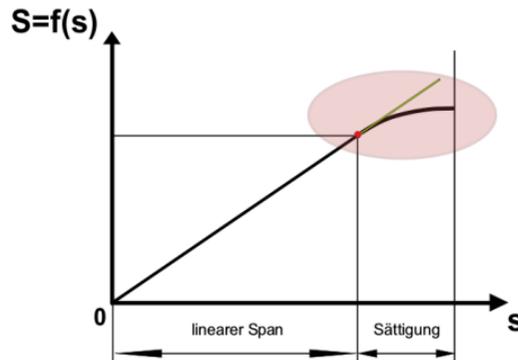


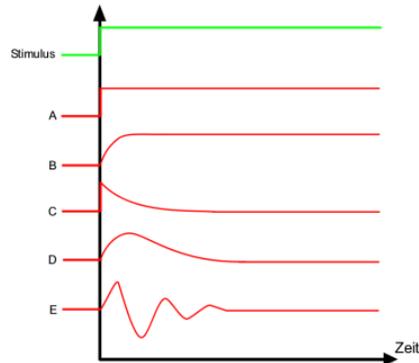
Abb. 5. Sättigung der Transferfunktion

Sensormodell

Antwortverhalten

→ Zeitliches Verhalten

- Es kann eine verzögerte Stimulusantwort auftreten
- Es kann zeitliches Über- und Unterschwingen auftreten
- Es kann Oszillation auftreten



Sensormodell

Umwelteinflüsse

- minimal und maximal zulässige Umgebungstemperatur
- minimal und maximal zulässige Luftfeuchtigkeit
- Kurz- und Langzeitstabilität (Drift) (Hilfe bei Langzeitdrift: Pre-aging erhöht Stabilität)
- statische und dynamische Änderungen von elektromagnetischen Feldern, Gravitationskräften, Vibrationen, Strahlung , etc.
- Selbsterwärmung z.B. durch Stromfluss
- Mechanischer Stress im Material durch Integration!
- Energieversorgung

Sensoren in mobilen Geräten

Mobile Geräte stellen häufig low-cost Sensorik zur Verfügung mit der sich Sensornetzwerke (Umgebung und Umwelt) aufbauen lassen

Mögliche Messaufgaben:

- Longitudinale Flächendeckende Seismische Erfassung (bei Erdbeben)
- Longitudinale Flächendeckende Aufnahme von Umweltdaten wie Lufttemperatur (Smart City)
- Mobile Longitudinale Flächendeckende Lärmerfassung (Lärmkartierung)
- Bewegungsprofile (Verkehrsflüsse und Verkehrsmanagement)
- Raum- und zeitaufgelöste Strukturüberwachung von Flugzeugen über Smartphones der Passagiere

Smartphone

Sensor	Art	Technologie	Messgröße	Messbereich	Einheit	Genauigkeit
Temperatur 1	Intrinsisch	Halbleiter PN	Gerätetemperatur (CPU/Gehäuse)	0-150°C	°C	±3°C
Temperatur 2	Extrinsisch	Halbleiter PN	Lufttemperatur	-20-100°C	°C	±1°C
Beschleunigung	Extrinsisch	MEMS	Dreiachsige Beschleunigung	0-40m/s ²	m/s ²	1m/s ²
Lage	Extrinsisch	MEMS	Dreiachsige Lage (Winkel)	-180..180 °	° / Grad	± 10 °
Position	Extrinsisch	Radio, Synch. Uhren und TOF	Geometrische Raumposition, Winkel	-180..180°, -90..90°	°	1m
Licht 1	Extrinsisch	Halbleiter PN	Lichtintensität Umgebung	1-1000 Lux	Lux	10 (rand.) 100 (syst.) Lux
Mikrofon	Extrinsisch	Kondensator/Piezo	Umgebungsschallamplitude (zeitaufgelöst)	0-60 dB	arb. units	1dB random, 10dB system.
Geräteerkennung	In- und Extrinsisch	IP	MAC/IMEI, Öffentliche IP	-	Nummer	± 500km Geoposition (IP), ID weltweit eindeutig

Experimente

Schall

<https://mascil.ph-freiburg.de/aufgabensammlung/experimente-mit-dem-smartphone/gruppe-1-experimente-mit-dem-schallsensor-mikrofon>

Beschleunigung

<https://mascil.ph-freiburg.de/aufgabensammlung/experimente-mit-dem-smartphone/gruppe-2-experimente-mit-dem-beschleunigungssensor>

Zusammenfassung