



Versuch 2: Piezoelektrischer Beschleunigungssensor, **Kalibrierung und Signalverarbeitung**

Beschleunigungssensoren werden im Automotive-Bereich auf vielfältige Weise eingesetzt, z.B. im Fahrzeug für Assistenzsysteme (ESP) und Motorsteuerungen (Klopfgelung) oder bei der Fahrzeugentwicklung für Vibrationsmessungen. Die Sensoren lassen sich auf der Basis unterschiedlicher physikalischer Effekte realisieren, unter anderem als mikromechanische, Piezo- oder DMS-Sensoren. In diesem Versuch wird ein größerer Piezosensor (Klopfsensor) genutzt, da dieses Sensorelement im Gegensatz zu mikromechanischen Sensoren einer einfachen Untersuchung zugänglich ist.

Ziele dieses Versuchs:

Teil A: Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines unbekannten Piezo-Beschleunigungssensors (Klopfsensor) durch vergleichende Messungen mit einem bekannten Referenz-Messsensor (Beschleunigungssensor von Brüel & Kjaer).

Teil B: Analyse der elektronischen Verarbeitungsstufen einer Messkette zur Auswertung einer Beschleunigungsmessung.



1. Ablauf:

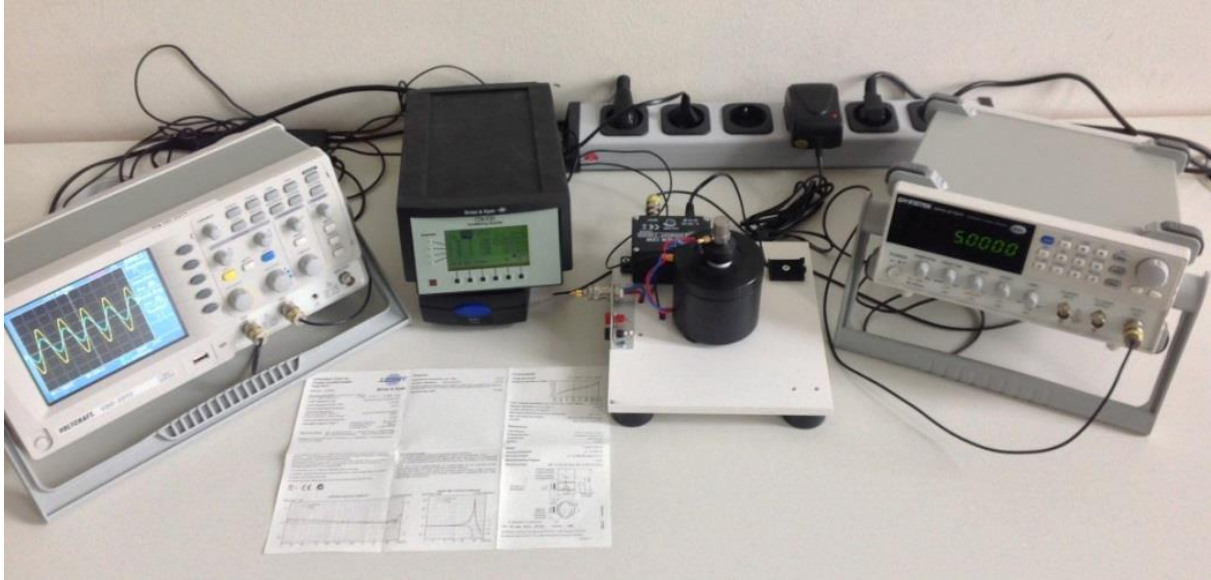
- Bilden Sie 2er Gruppen.
- Bereiten Sie den Versuch zu Hause vor, verschaffen Sie sich einen Überblick!
- Falls Hausaufgaben zur Vorbereitung gegeben sind: Bearbeiten Sie diese vorab zu Hause (so weit möglich). Diese Ausarbeitung müssen Sie namentlich kennzeichnen und abgeben (jeder Teilnehmer)!
- Bringen Sie ggf. einen eigenen, leeren USB-Stick zum Abspeichern notwendiger Oszilloskopbilder mit, alternativ eine gute Digitalkamera zum Abfotografieren des Bildschirms.
- Führen Sie die Versuche während der Laborveranstaltung durch.
- **WICHTIG 1: Vor jeder Inbetriebnahme einer Schaltung den Aufbau durch den Laborbetreuer abnehmen lassen! Nach jeder Messung den Betreuer gegenzeichnen lassen.**
- **WICHTIG 2: Das Netzgerät (und auch das Oszilloskop) bleibt während der Versuche eingeschaltet. Beim Umbauen wird die Spannung auf 0 Volt eingestellt. GRUND: Ständiges EIN- und Ausschalten schadet den Geräten.**
- Schreiben Sie im Nachgang einen Versuchsbericht, in dem Sie die geforderten Aufgaben bearbeiten. Abgabe spätestens eine Woche nach Durchführung des Laborversuchs. Die von Ihnen ermittelten Messwerte (Tabellen aus diesem Skript) sind als Anhang mit abzugeben.

Zu beachten: Diagramme, Maßeinheiten, physikalische Größen, Zahlenwerte z.B. in Tabellen sind normgerecht anzugeben. Siehe gegebene Unterlagen.



Teil A: Kalibrieren und Beurteilen eines Piezo- Beschleunigungssensors

Aufbau Teil A





A.1 Grundlagen für den Teil A

- Funktionsweise von Beschleunigungssensoren, piezoelektrischer Effekt, Aufbau eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors mit seismischer Masse. → siehe Vorlesung.
- Bei elektronischen Systemen im Automobil werden möglichst kostengünstige Sensortypen verwendet. Ein spezieller Typ muss vom Hersteller geprüft und dann beurteilt werden, ob er für den geplanten Einsatzzweck geeignet ist. Bei Beschleunigungssensoren ist der abzudeckende Frequenzbereich von besonderer Bedeutung. Zur Beurteilung kann eine Kalibrierungsmessung dienen.

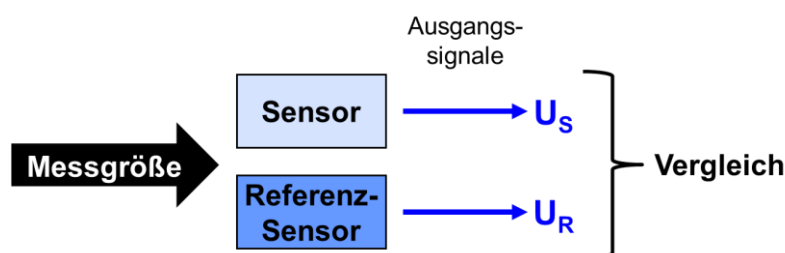


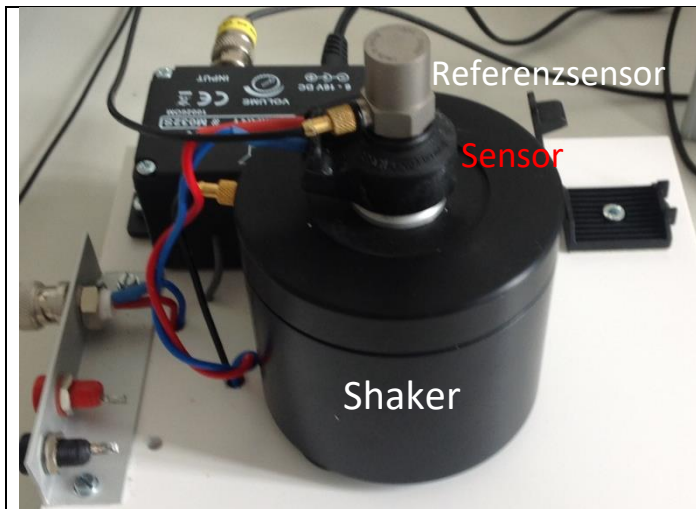
Bild 1: Kalibrierung eines Sensors mit Spannungsausgang

- **Kalibrierung** bedeutet in der Messtechnik: Ein Messprozess zur zuverlässig reproduzierbaren Feststellung und Dokumentation der Abweichung eines Messgerätes (in unserem Fall der untersuchte Sensor) gegenüber einem Referenzgerät (bei uns ein Referenzsensor, der ebenfalls vorab mit einem Normal verglichen wurde). Siehe Bild 1.
- Die ermittelten Messwerte werden verglichen. Zur Beschreibung dient im allgemeinen eine Abweichung und ggf. weitere statistische Größen (Unsicherheit, Vertrauensbereich etc.).
- Es sei folgender Fall gegeben: Die Sensoren liefern periodische variierende Spannungen, deren Amplituden in einem großen Bereich voneinander abweichen können. Dann kann zum Vergleich der Ausgangssignale bzw. zur Darstellung der Abweichung das logarithmische Amplitudenverhältnis **X** in Dezibel (dB) verwendet werden:

$$\frac{X}{dB} = 20 \cdot \log \frac{\hat{u}_S}{\hat{u}_R} \quad (\log = \text{Zehnerlogarithmus, } \hat{u}_S \text{ und } \hat{u}_R: \text{Signalamplituden})$$



A.2 Geräte- und Material:



Versuchsträger:

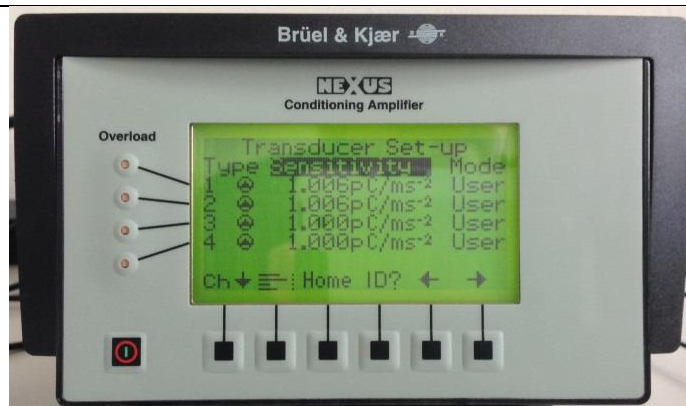
Oben: Referenz-Beschleunigungssensor von Brüel & Kjaer

Mitte: Zu untersuchender piezoelektrischer Beschleunigungssensor (Klopfsensor)

Unten: elektrodynamischer Schwingungserreger (Shaker) von Brüel & Kjaer

Der bewegliche Teil des Shakers, Klopfsensor und Beschleunigungssensor sind starr miteinander verbunden.

Hinten: Leistungsverstärker zur Ansteuerung des Shakers

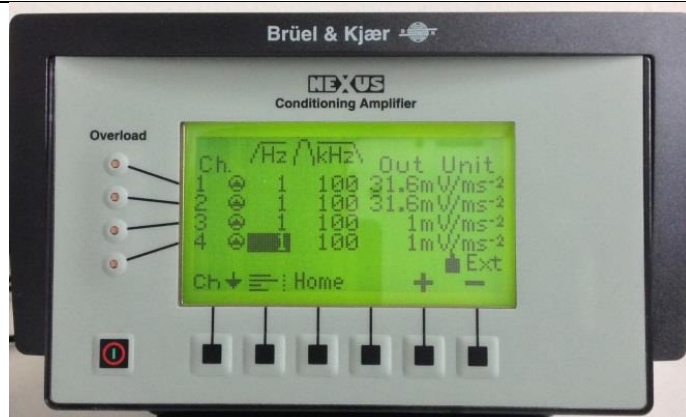


Nexus Messverstärker (Brüel & Kjaer):

Menü: Transducer Setup, Eingangsempfindlichkeit

Kanal 1: Beschleunigungssensor
 $\times \text{pC} / 1\text{m/s}^2$ aus dem Kalibrierprotokoll

Kanal 2: Klopfsensor mit unbekannter Empfindlichkeit, Einstellung identisch zum Beschleunigungssensor

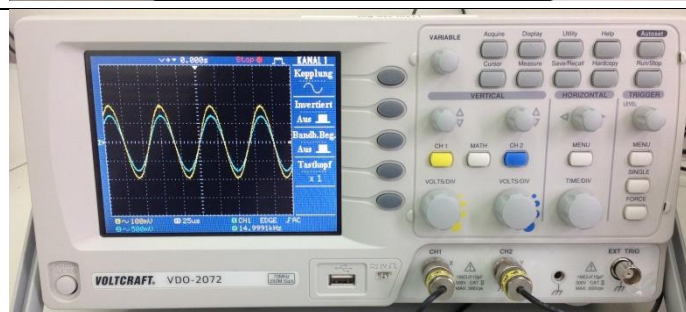


Nexus Messverstärker (Brüel & Kjaer):

Menü: Amplifier Setup, Ausgangsempfindlichkeit

Kanal 1: (Beschleunigungssensor): $31,6\text{mV} / 1\text{m/s}^2$

Kanal 2: (Klopfsensor): $31,6\text{mV} / 1\text{m/s}^2$, Einstellung identisch zum Beschleunigungssensor



Digitales Speicheroszilloskop:

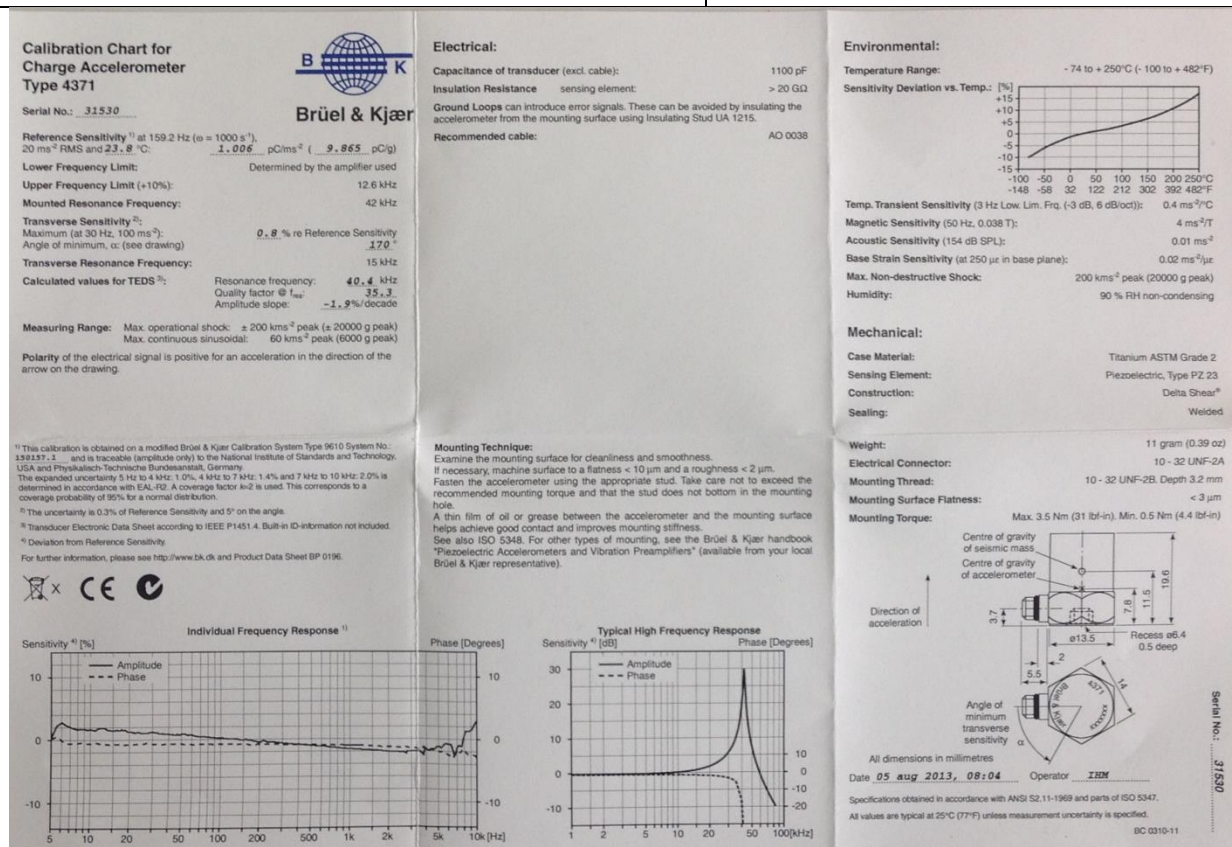
Kanal 1 (gelb):
Signal des Referenzsensors

Kanal 2 (blau):
Signal des untersuchten Sensors



Funktionsgenerator zur Ansteuerung des Shakers

Kurvenform: Sinus
Frequenz: $f=5\ldots 18\text{kHz}$
Ausgangsamplitude: $\hat{U}=200\text{mV}$
(Einstellung über das Signal des Referenzsensors für alle Frequenzen)



Kalibrierprotokoll des Brüel & Kjaer Referenzsensors (Beispiel)



Name	Matrikelnr.

A.3. Aufgaben

Vorbereitung (**Hausaufgabe**) zum logarithmischen Amplitudenverhältnis X (in dB) zweier Signale (\hat{u}_s , \hat{u}_R).

- Was bedeutet 0 dB?
- Wie sind negative dB Werte zu interpretieren?

Überprüfung des Messaufbaus und der Einstellungen:

- Überprüfen Sie die eingestellte Eingangsempfindlichkeit des Messverstärkers (Kanal 1: Referenzsensor, Kanal 2: Klopfsensor) mit dem Kalibrierprotokoll.
- Überprüfen Sie die eingestellte Ausgangsspannung des Messverstärkers der Kanäle 1 und 2 mit der Vorgabe $U_{\text{aus}} = 31,6 \text{ mV} / 1\text{m/s}^2$. Lassen Sie ggf. die Einstellungen vom Laborbetreuer einstellen.
- Überprüfen Sie, ob die Ausgänge von Kanal 1 mit Kanal 1 des Oszilloskops und Kanal 2 mit Kanal 2 des Oszilloskops verbunden sind.

Aufgabe: Bestimmen Sie die Amplituden vom Referenzsensor (\hat{u}_R) und Messobjekt (\hat{u}_s) im Frequenzbereich von 5kHz bis 18kHz.

Frequenzgenerator: Signalform: Sinus, Ausgangsamplitude: -20dB, Amplitude auf 0 V (linker Anschlag).

Einstellen der Frequenz

- Einstellen der Amplitude des Referenzsensors auf $\hat{u}_R=100\text{mV}$
 - Messen der Amplitude \hat{u}_s des Klopfensorsignals
 - Ausgangsamplitude des Funktionsgenerators auf 0 V (linker Anschlag).
- Einstellen der nächsten Frequenz... bis 18kHz...(Ablauf wie unter a. bis c.)



Messwert Nr.	Frequenz f in kHz	\hat{u}_R (Referenz- Sensor) in mV	\hat{u}_S (untersuchter Sensor) in mV	X in dB
1	5,0	100		
2		100		
3		100		
4		100		
5		100		
6		100		
7		100		
8		100		
9		100		
10		100		
11		100		
12		100		
13		100		
14		100		
15		100		
16		100		
17		100		
18		100		
19		100		
20		100		
21		100		
22		100		
23		100		
24		100		
25		100		
26		100		
27		100		
28		100		
29		100		
30		100		

Tabelle 1

Betreuer:



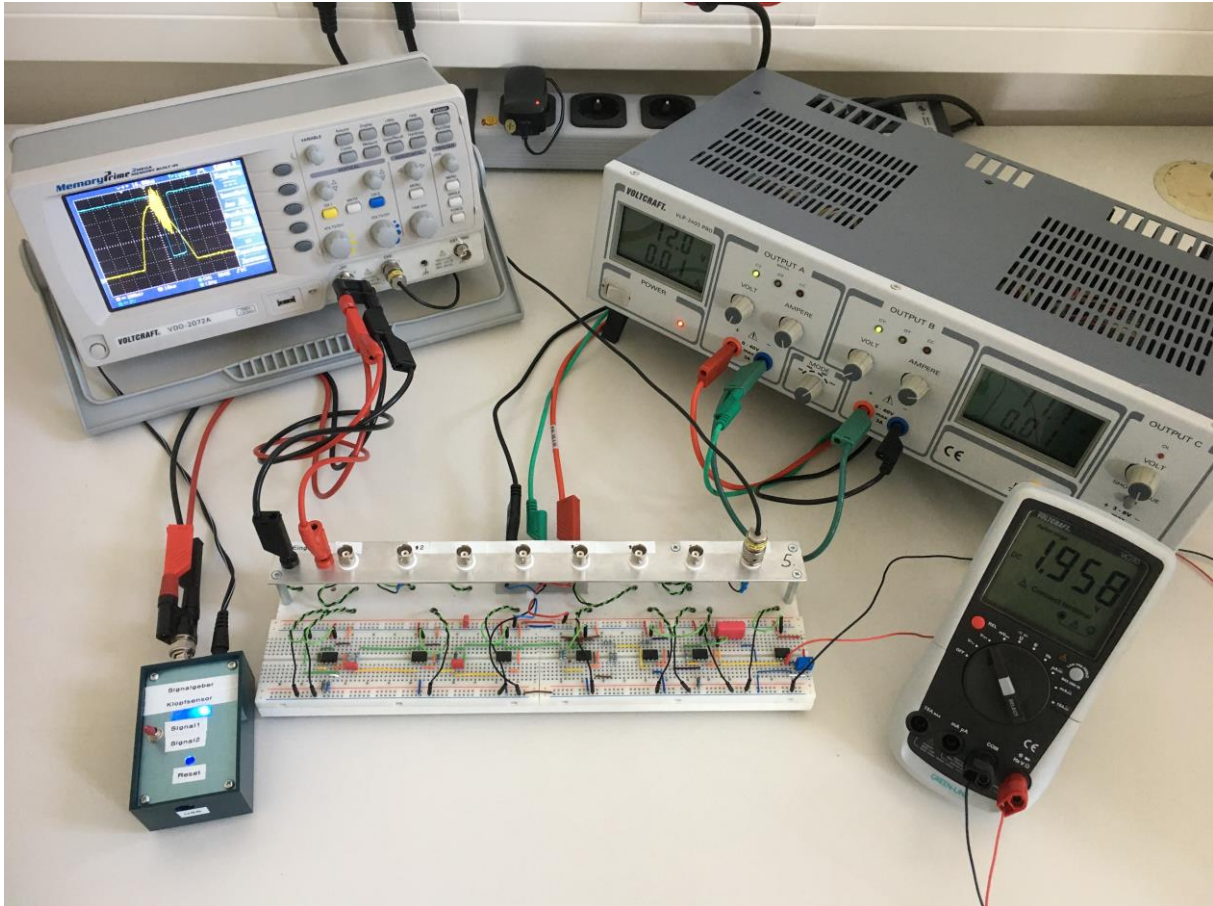
Auswertung:

- Tragen Sie alle Werte aus Tabelle 1 in ein Diagramm ein mit **X** als Funktion der Frequenz.
- Interpretieren Sie (**kurz!**) das Ergebnis unter Berücksichtigung des geplanten Einsatzbereiches des Sensors („klopfende“ Verbrennung).



Teil B: Analyse der Signalverarbeitungsstufen eines Beschleunigungssensors:

Aufbau Teil B:





B.1 Grundlagen für den Teil B

Beschleunigungssensoren werden häufig verwendet, um das Eintreten eines Ereignisses zu beobachten bzw. zu überwachen, beispielsweise:

- Ein Fahrzeugcrash bei einer Unfallsituation.
 - Das Auftreten großer, für die Fahrzeuginsassen unangenehmer Beschleunigungswerte bei komfortorientierten Fahrdynamik-Regelsystemen.
 - Das Auftreten von Schwingungen in mechanischen Systemen (z.B. Antrieben), die eine Zerstörung nach sich ziehen können.
 - Zu letzterem gehört auch das Auftreten hochfrequenter Schwingungen aufgrund von Selbstzündungsprozessen in Verbrennungsmotoren, das so genannte „Motorklopfen“.
- Dieses äußert sich durch hochfrequente Vibrationen im Frequenzbereich von ca. 5 - 20 KHz.

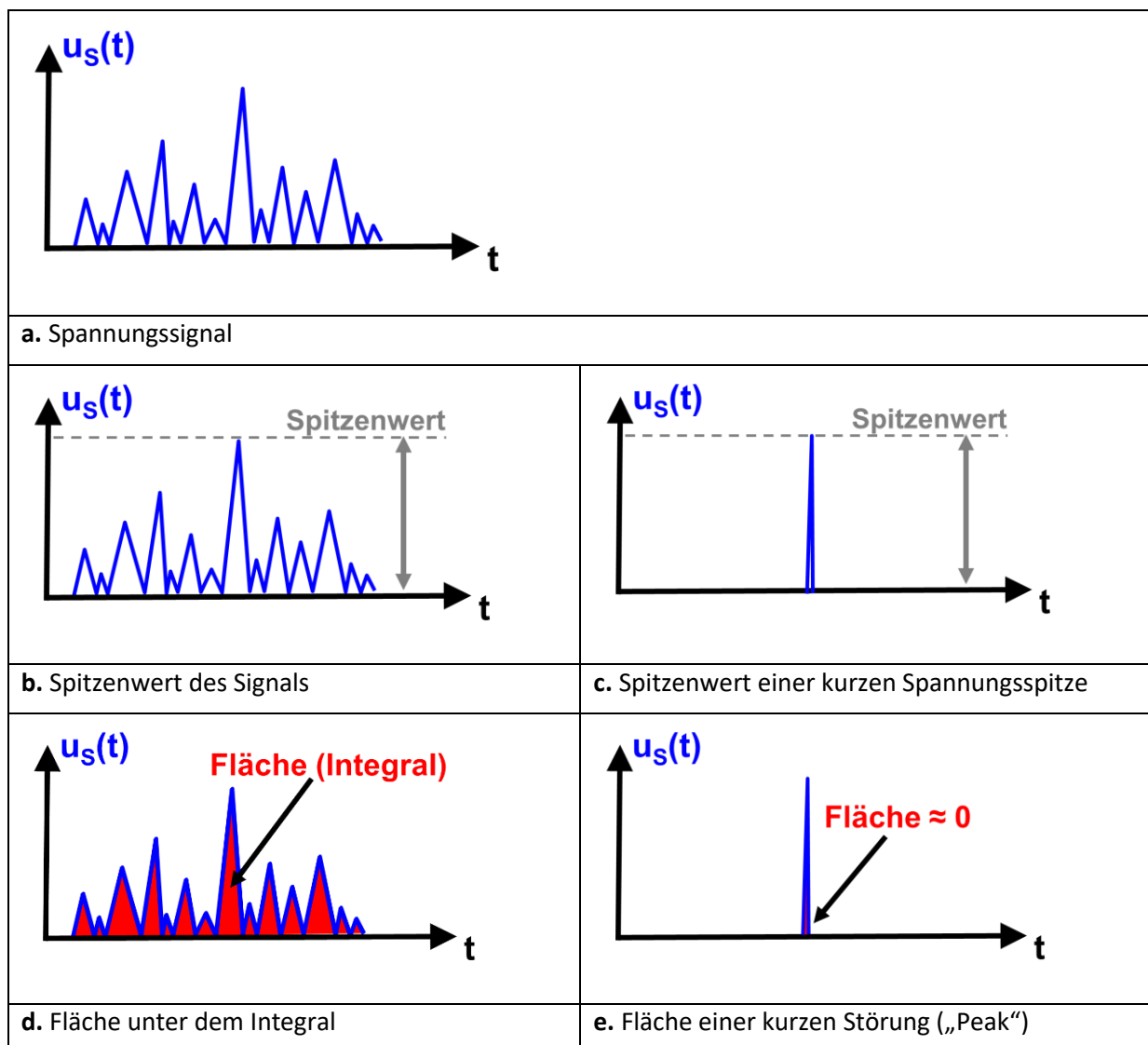


Bild 2: Zur Auswertung von Spannungssignalen



Zur Auswertung des Sensorsignals (Beispiel: Bild **2a**) können unterschiedlich Kriterien verwendet werden. Die einfache Nutzung des Spitzenwertes (Bild **2b**) zum Erkennen eines Ereignisses ist dabei oft nicht geeignet. Zum Beispiel aufgrund von Störungen auftretende kurze Spannungsspitzen („Peaks“) können hohe Spitzenwerte zeigen (Bild **2c**), wodurch ein Ereignis vorgetäuscht wird.

Besser kann z.B. die Nutzung der Fläche (Integral) unter einem Signal sein (Bild **2d**), da dann einzelne Spannungsspitzen aufgrund der geringen Signalfläche (Bild **2e**) nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus könnte man zusätzlich den Verlauf des Signals berücksichtigen.

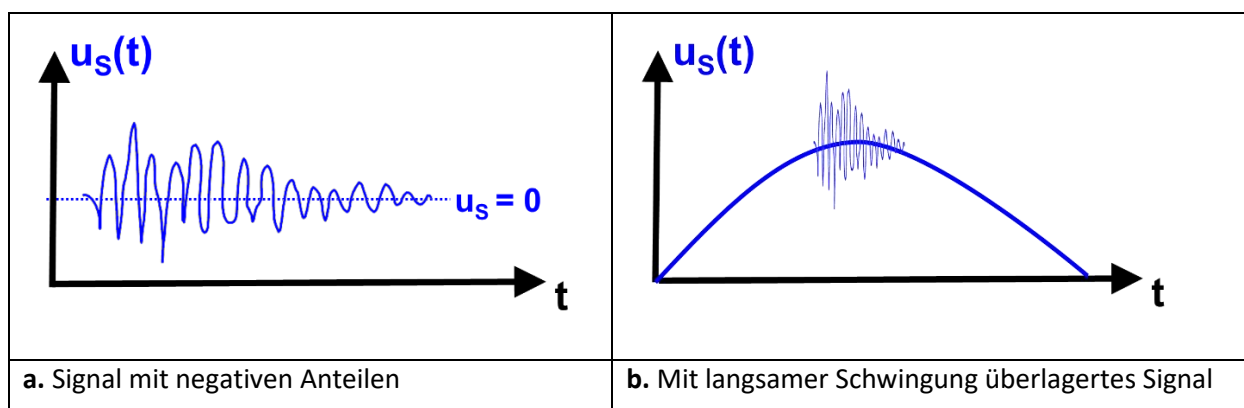


Bild 3: Weitere Signaleigenschaften

Darüber hinaus müssen noch weitere Eigenschaften des zu messenden Systems berücksichtigt werden, zum Beispiel:

- Signale enthalten häufig auch noch negative Anteile, die zur Flächenauswertung entfernt bzw. berücksichtigt werden müssen (Bild **3a**).
- Oft werden die interessierenden Signale noch von tiefer- oder höherfrequenten Anteilen überlagert. Diese müssen ausgefiltert werden. Höherfrequente Anteile resultieren häufig aus elektromagnetischen Störungen. Bei der Schwingungsmessung in Antriebssystemen ergeben sich niederfrequente Anteile aus der Bewegung der mechanischen Einheiten, z.B. Wellen bei E-Motoren oder Kolben beim Verbrennungsmotor.

Die Sensorsignale werden mit Hilfe einer geeigneten Messkette ausgewertet. Diese besteht aus mehreren Auswertungsstufen und enthält oft einen digitalen Signalprozessor (DSP).



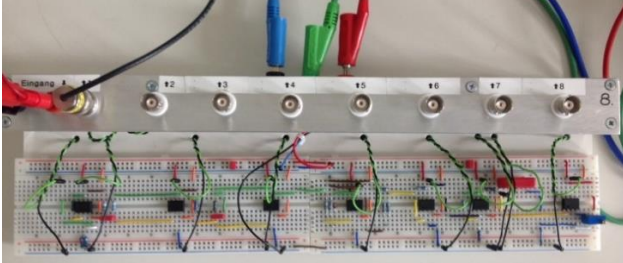
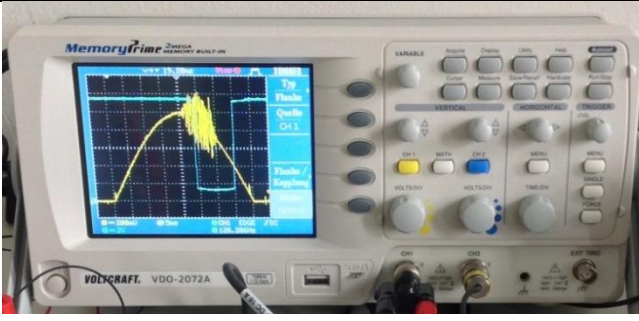

Schaltungen zur analogen Signalverarbeitung:

- Mit Operationsverstärkern: Nicht invertierender Verstärker, Komparator, ...
- Passive Schaltungen, z.B. passiver Integrator:

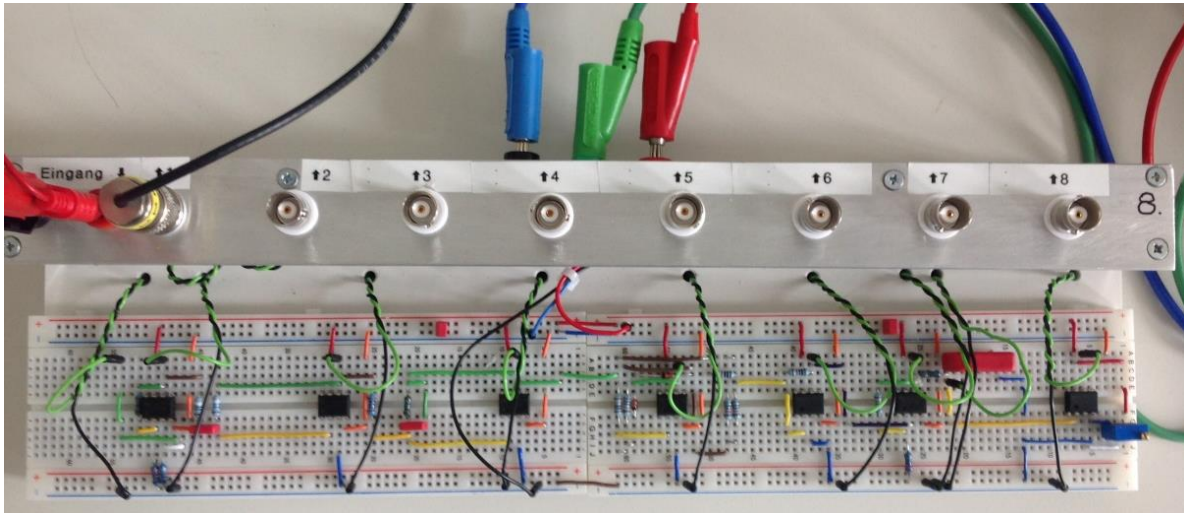
Siehe diverse Quellen, z.B. andere Vorlesungen bzw. Wikipedia.



B.2 Geräte- und Material:

	<p>Digitale Signalgeneratorbox zur Bereitstellung (synthetischer) Beschleunigungssignale.</p> <p>Ausgabe zweier verschiedener Signalformen.</p> <p>Das Signal mit der größeren Grundfläche soll ein mit einem speziellen Ereignis zusammenhängen (z.B. Crash, Motorklopfen etc.), beim anderen Signal soll kein entsprechendes Ereignis eintreten.</p>
	<p>Spannungsversorgung für den Versuchsträger:</p> <p>OUTPUT A Positive Betriebsspannung: $U_+ = +12V$ (ROTE Buchse) OUTPUT B Negative Betriebsspannung: $U_- = -12V$ (BLAUE Buchse) 0 Volt Bezugspotenzial: BLAUE Buchse OUTPUT A verbunden mit ROTE Buchse OUTPUT B</p>
	<p>Versuchsträger mit Messkette zur Signalbearbeitung</p> <p>Beschreibung siehe unten</p>
	<p>Digitales Speicheroszilloskop:</p> <p>Kanal 1 (gelb): Signal der Generatorbox</p> <p>Kanal 2: Signal aus der Signalverarbeitungs-Messkette (Stufe x)</p>
	<p>Multimeter</p> <p>zur Messung der Referenzspannung am Versuchsträger</p>

Versuchsträger mit Messkette zur Signalbearbeitung



Der Versuchsträger enthält diverse Stufen einer Messkette zur Signalauswertung. Einige dieser Stufen werden üblicherweise digital mit Hilfe z.B. eines digitalen Signalprozessors (DSP) umgesetzt. Um die einzelnen Elemente der Messkette einer Messung zugänglich zu machen, sind diese hier mit analogen Schaltungen (teils „aktiv“ mit Operationsverstärkern) aufgebaut. Die Operationsverstärker werden mit $\pm 12V$ versorgt.

Der Zugriff auf die verschiedenen Signalbearbeitungsstufen erfolgt über herausgeführte BNC-Buchsen zur Darstellung auf dem Oszilloskop. Wichtig für unseren Versuch sind die Ausgänge:

- ↑1 : Signal nach Entkopplung von der Generatorbox
und nach erstem („nicht invertierendem“) **Verstärker**
- ↑3 : Signal nach **Bandpassfilter** (bestehend aus Hoch- und Tiefpassfilter)
- ↑5 : Signal nach **Gleichrichter**
- ↑6 : Signal nach Entkopplung vom Gleichrichter
und weiterem („nicht invertierendem“) **Verstärker**
- ↑7 : Signal nach passivem **Integrator**
- ↑8 : Signal nach verstellbarem **Komparator**

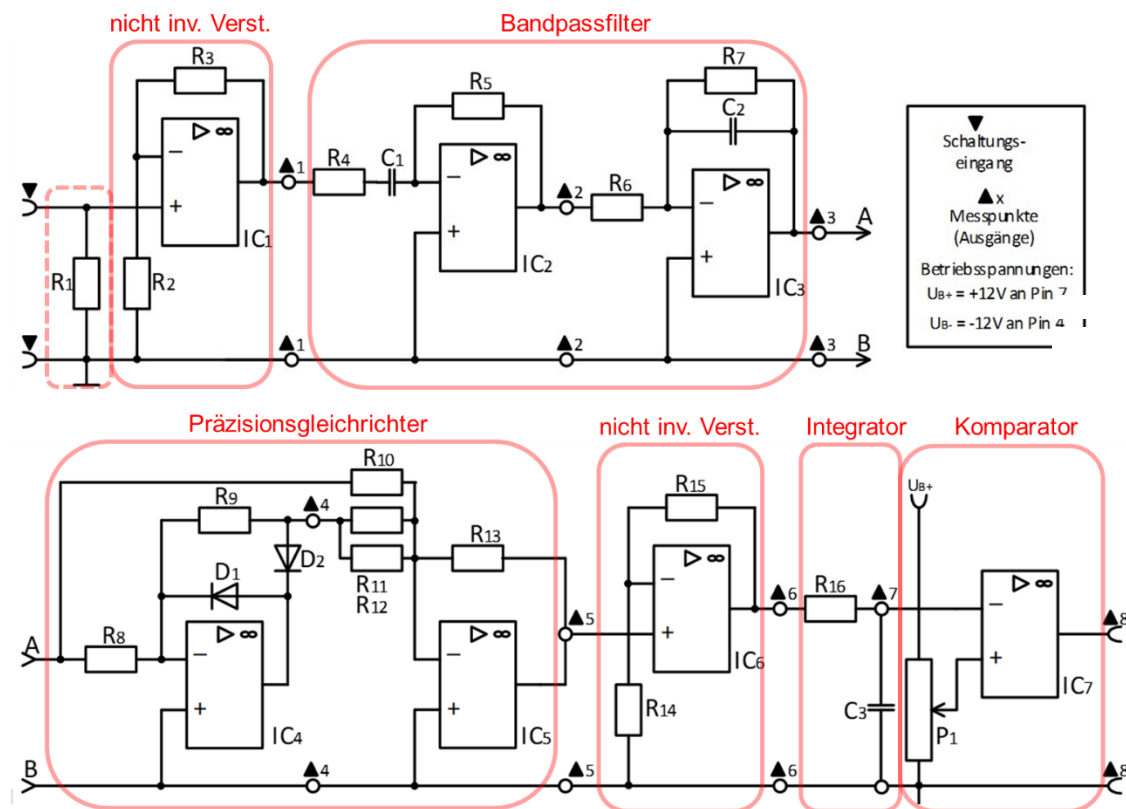
Hinweis: (↑2 und ↑4 repräsentieren Zwischenschritte, die hier nicht betrachtet werden)

Siehe dazu auch den Schaltplan auf der nächsten Seite!

Der Komparator ist das letzte Glied der Messkette. Er lässt sich über seine Referenzspannung U_{ref} (mit einem Potentiometer) so verstellen, dass zwischen „Ereignis tritt ein“ und „Ereignis tritt nicht ein“ unterschieden werden kann.



Schaltplan des Versuchsträgers



Informationen zu den Bauteilen:

Vor Ausgang 1:

R1=100kΩ
R2=2,2kΩ
R3=18kΩ
IC1=TL071

Vor Ausgang 3:

R4,R5=390Ω
R6,R7=100Ω
C1,C2=100nF
IC2,IC3=TL071

Vor Ausgang 5:

R8...R13=10kΩ
D1,D2=1N4148
IC1,IC2=TL071

Weitere:

R14=2,2kΩ
R15=10kΩ
R16=4,7kΩ
P1=10kΩ
IC6,IC7=TL071

Hinweis: Der Widerstand R1 dient unter anderem dem Einstellen der Eingangsimpedanz des ersten Operationsverstärkers (IC1), er hat keinen Einfluss auf den Verstärkungsfaktor der nichtinvertierenden Verstärkerschaltung.



B.3 Aufgaben

Vorbereitung (Hausaufgabe)

Überlegen Sie sich vorab, wie Sie den Versuch durchführen (darstellen mit Bild und/oder Zeichnung und/oder Text).

Welche Funktionen werden im Stromlaufplan (weiter unten) in den Stufen 1 bis 4 realisiert?

Vorbereitende Maßnahmen

Überprüfung der symmetrischen Betriebsspannung für die OPV-Schaltung ($U = \pm 12V$) an der Spannungsquelle.

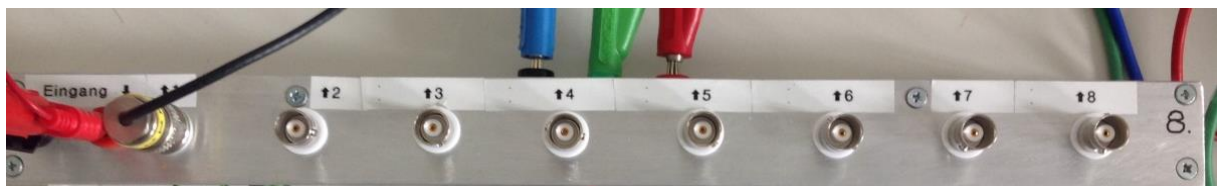
OUTPUT A Positive Betriebsspannung: $U_+ = +12V$ (ROTE Buchse, rotes Kabel)

OUTPUT B Negative Betriebsspannung: $U_- = -12V$ (BLAUE Buchse, blaues Kabel)

0 Volt Bezugspotenzial: 0 Volt (BLAUE Buchse **OUTPUT A** verbunden mit ROTER Buchse

OUTPUT B, grünes Kabel)

Verbinden Sie noch nicht die Spannungsversorgung mit dem Versuchsträger!



- Überprüfen Sie die Verbindung des USB Messsystems mit dem Eingang des Versuchsträgers (links, Signal: Rotes Kabel, Masse: Schwarzes Kabel).
- Verbinden Sie den Eingang des Versuchsträgers mit Kanal 1 des Oszilloskops.
- Verbinden Sie für die erste Messung **Ausgang 1** des Versuchsträgers mit Kanal 2 des Oszilloskops (BNC-Kabel).

Lassen Sie Ihren Aufbau vom Laborbetreuer überprüfen und nehmen Sie **danach** den Versuchsaufbau in Betrieb.

