

Kennlinienaufnahme mit dem NI myDAQ als Live-Experiment im Unterricht

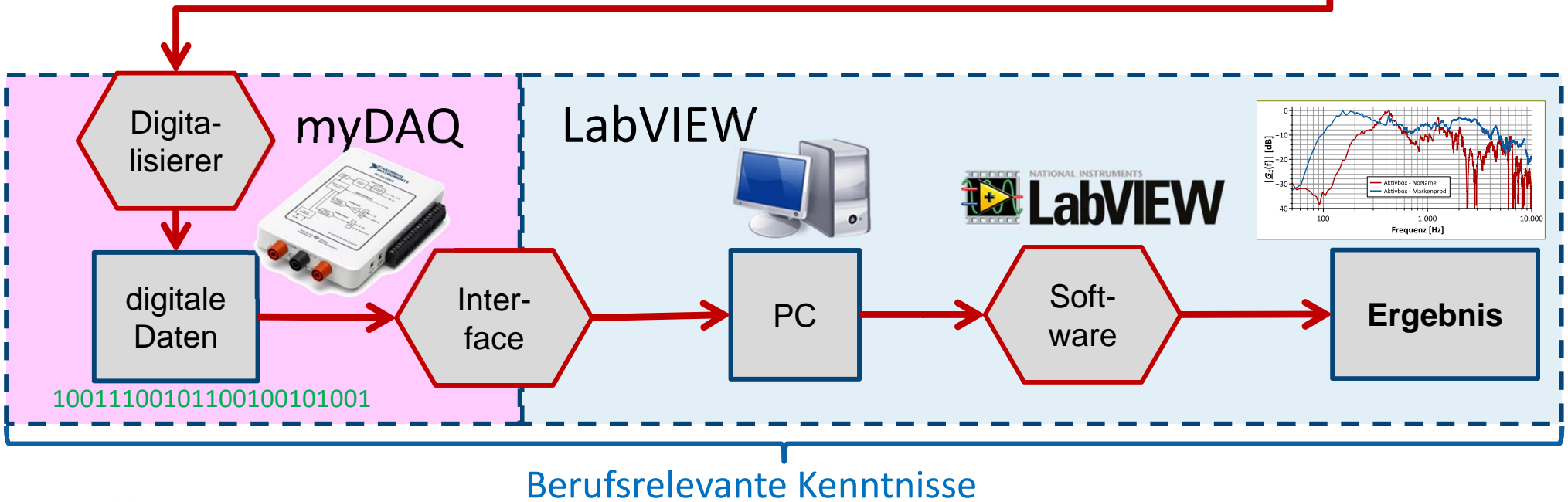
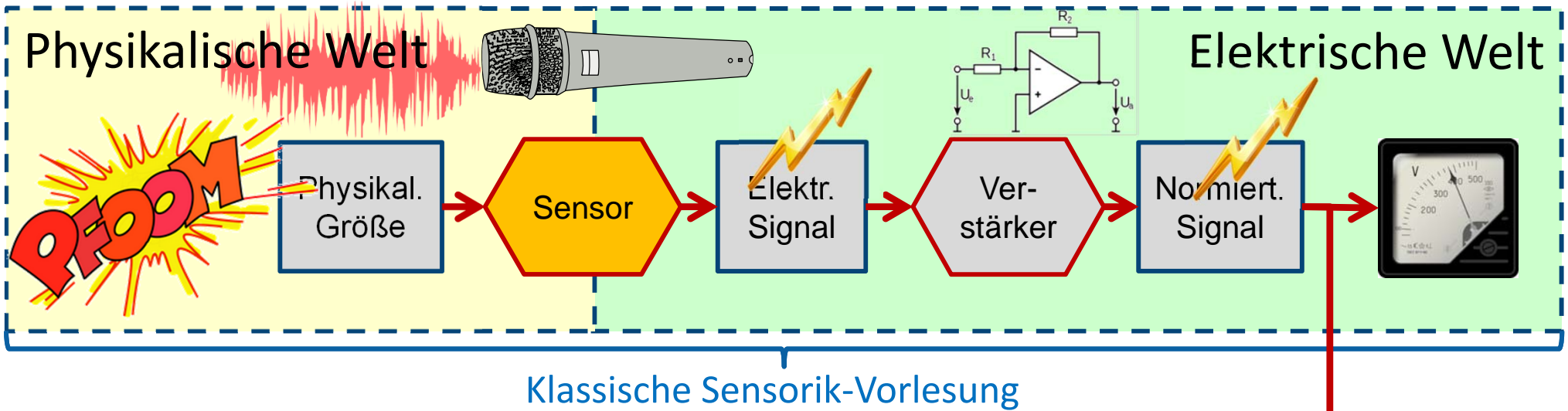
Prof. Georg Eggers
Hochschule München, Fakultät 06

Kennlinienaufnahme mit dem NI myDAQ

als Live-Experiment im Unterricht

- Durch kompaktes Design und USB-Energieversorgung ist der NI myDAQ für den mobilen Einsatz in Hörsaal und Klassenraum prädestiniert
- Mit geringem Schaltungs- und Programmieraufwand lassen sich unterschiedlichste Kennlinien live vermessen.
- Im Vortrag werden gezeigt:
 1. Leistungskennlinie von Solarzellen
 2. Bode-Diagramme von elektrischen Vierpolen
 3. Frequenzgang von Lautsprechern
 4. Modalanalyse: Vermessung mechanischer Resonanz
- Kontakt: Prof. Dr. Georg Eggers, georg.eggerts@hm.edu
- Programme aus dem Vortrag abrufbar: <http://www.georg-eggerts.de/dozententag>

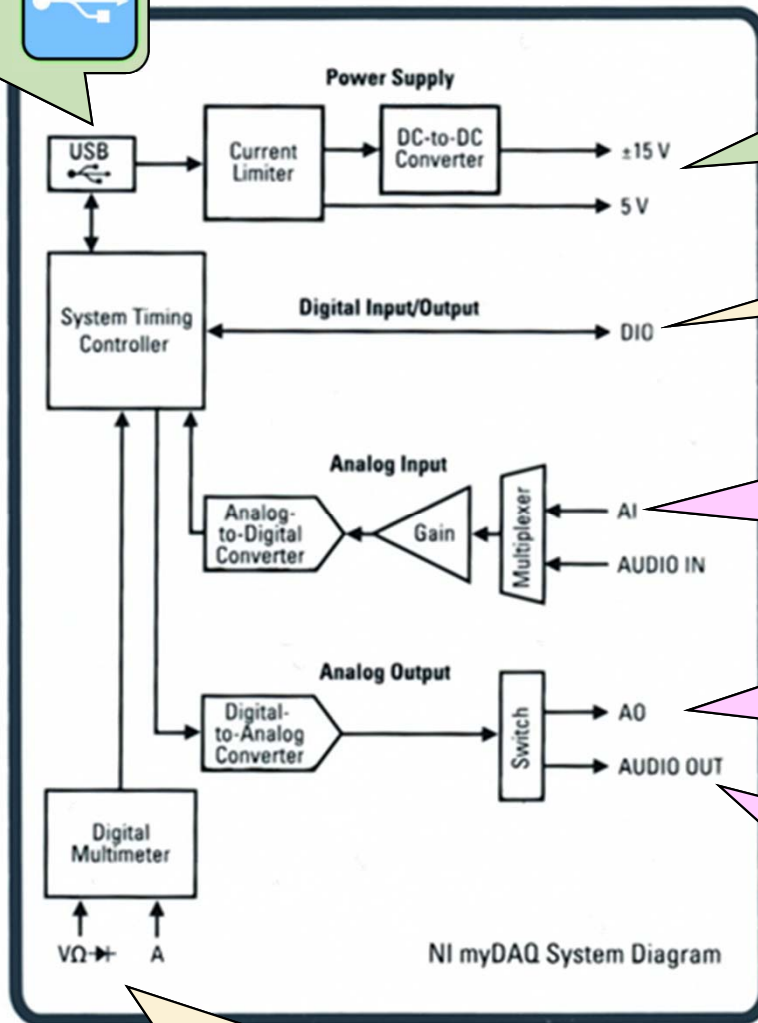
Sensorkette: Von der Messgröße zum Ergebnis



Der NI myDAQ im Überblick



USB
(bus powered)



**$\pm 15\text{ V}$ für OPVs
 $+5\text{ V}$**

8 DIO

**2 ADC 16 Bit @ 200 kHz
 $\pm 2\text{ V}$ / $\pm 10\text{ V}$ differentiell**

**2 DAC 16 Bit @ 200 kHz
 $\pm 10\text{ V}$ @ 2mA**

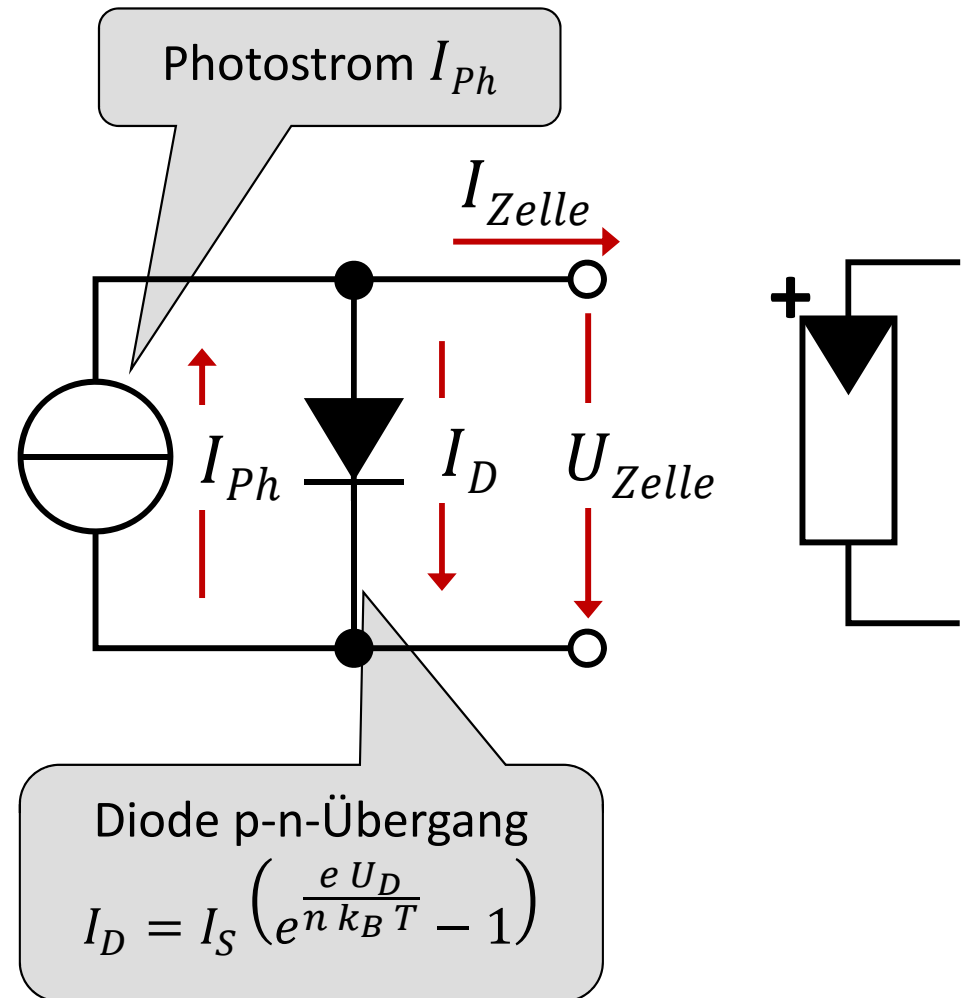
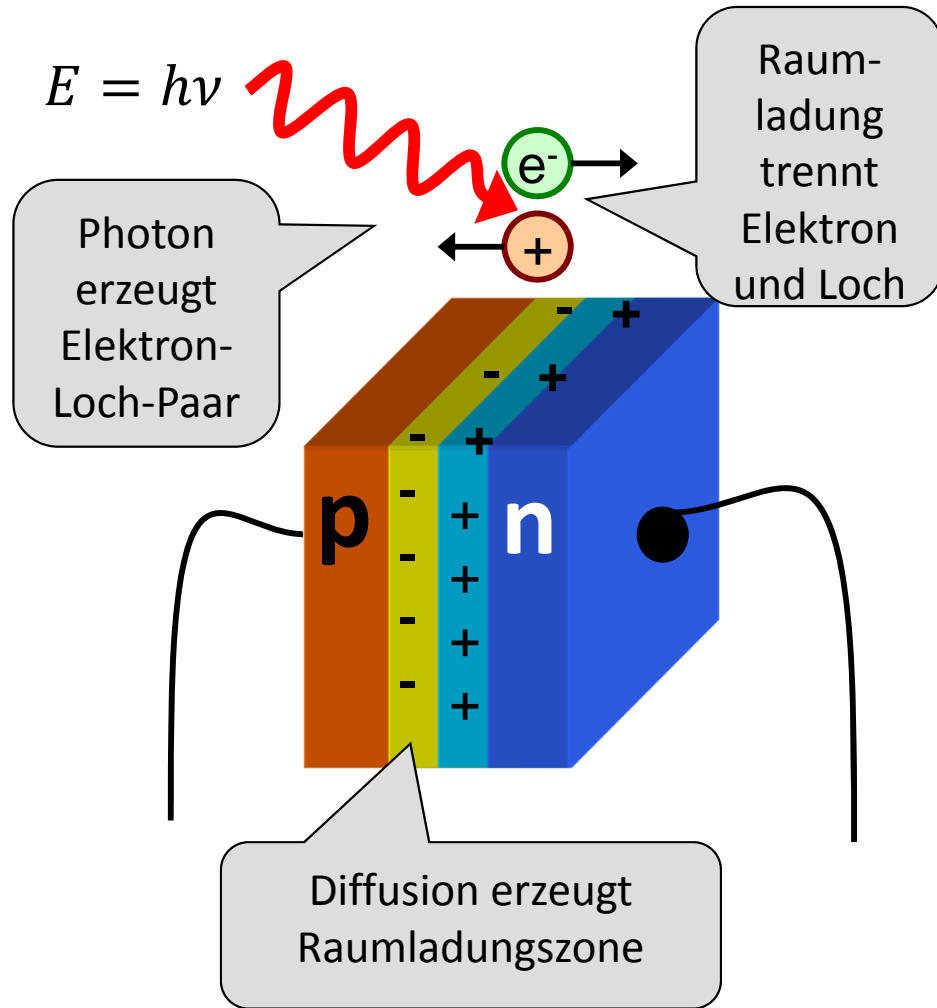
**Stereo Audio in/out
Mit Speisung für Mikrofone**

Multimeter I/U/R

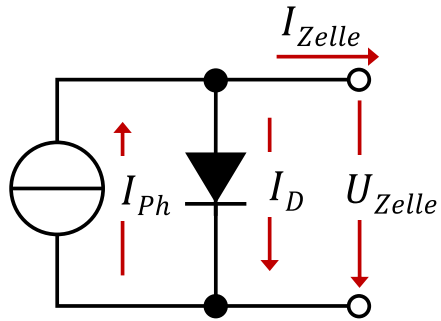
Bilder: National Instruments Deutschland AG

1. Leistungskennlinie einer Solarzelle

1. Ideale Solarzelle (Kurzfassung)



1 Dioden- und Solarzellen-Kennlinie (Verbrauchersystem)

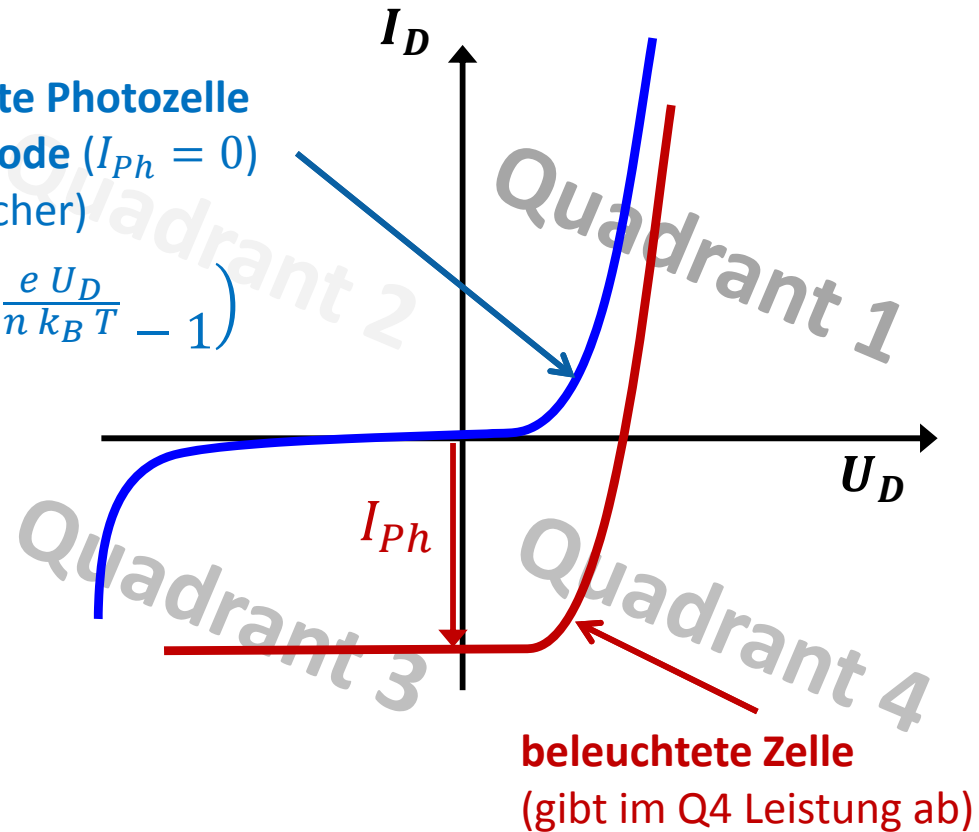


Unbeleuchtete Photozelle
entspricht Diode ($I_{Ph} = 0$)
(nur Verbraucher)

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{e U_D}{n k_B T}} - 1 \right)$$

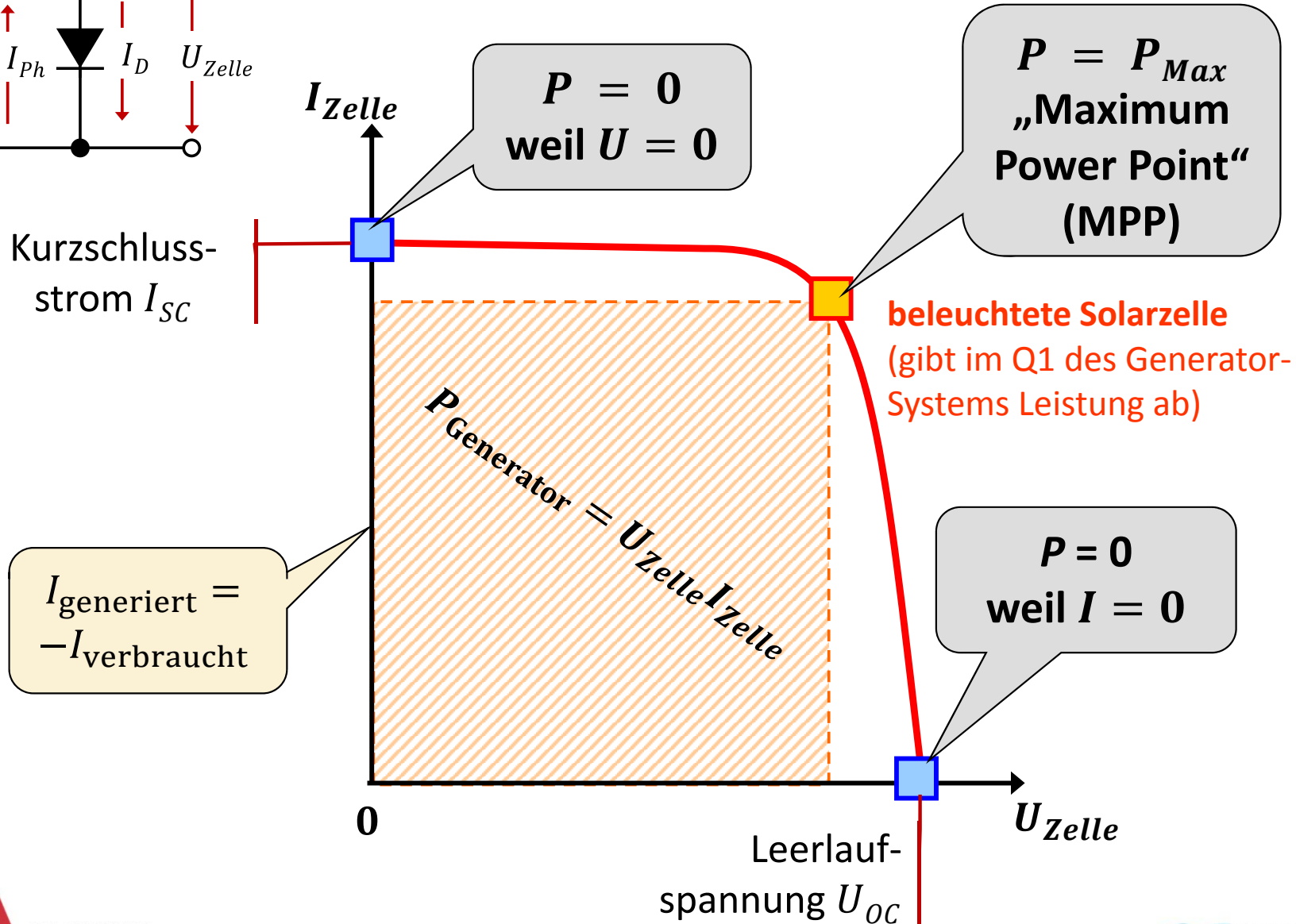
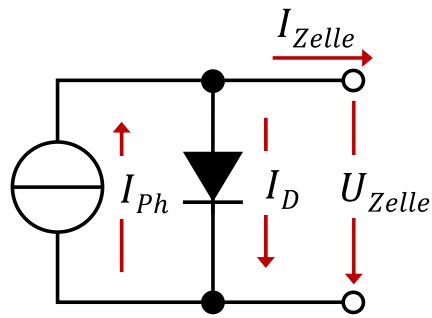
$$P_{\text{Verbrauch}} = U_D I_D$$

$$P_{\text{Verbrauch}}: \begin{cases} > 0 \text{ in } Q1, Q3 \\ < 0 \text{ in } Q2, Q4 \end{cases}$$

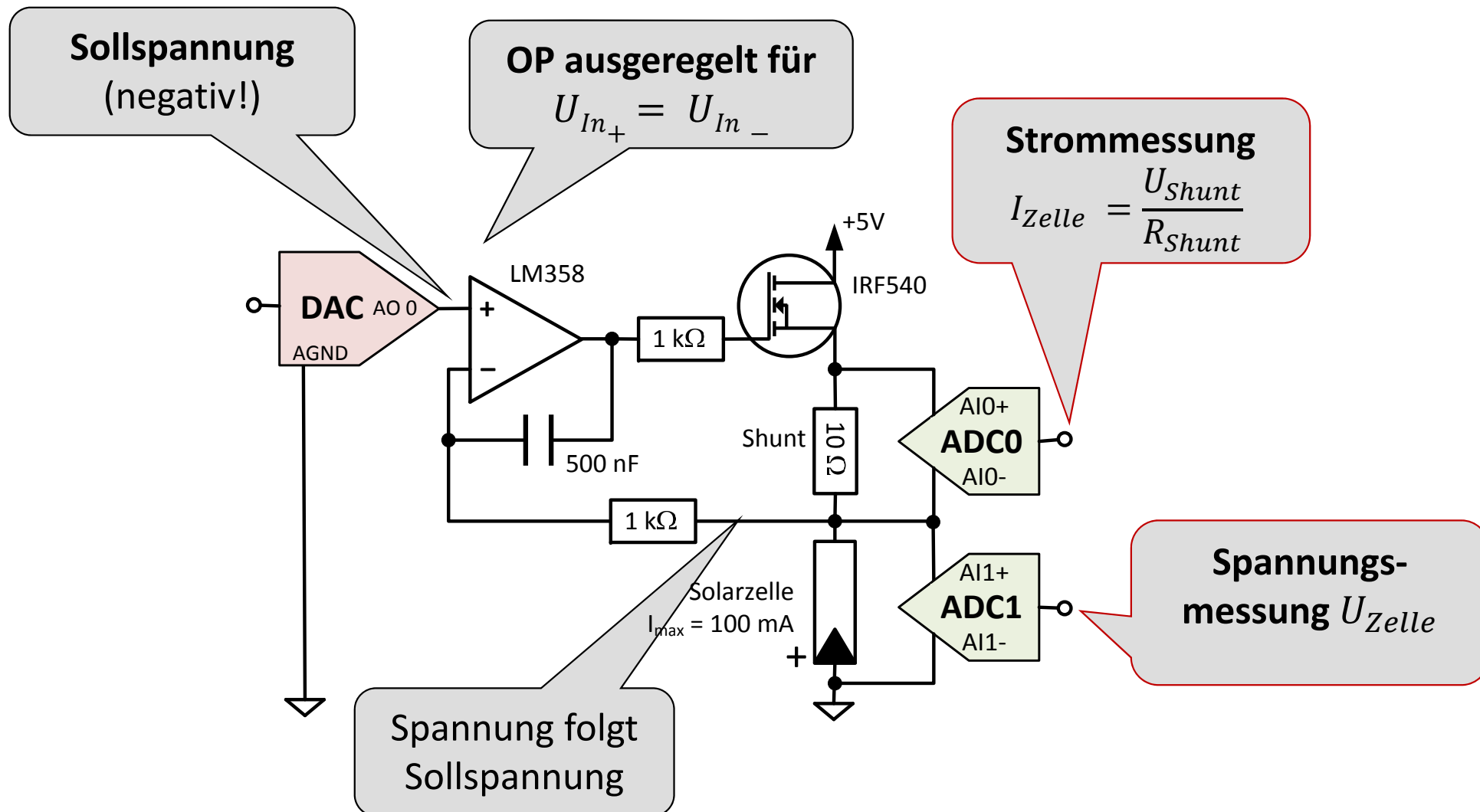


- Bei Lichteinstrahlung entsteht Photostrom $I_{Ph} \propto E_V$
 E_V : Beleuchtungsstärke
- Im 4. Quadranten wird $P_{\text{Verbrauch}} < 0 \rightarrow$ Leistungsabgabe
- Ziel: Maximale Leistungsabgabe

1. Solarzellen-Kennlinie (Generatorsystem)

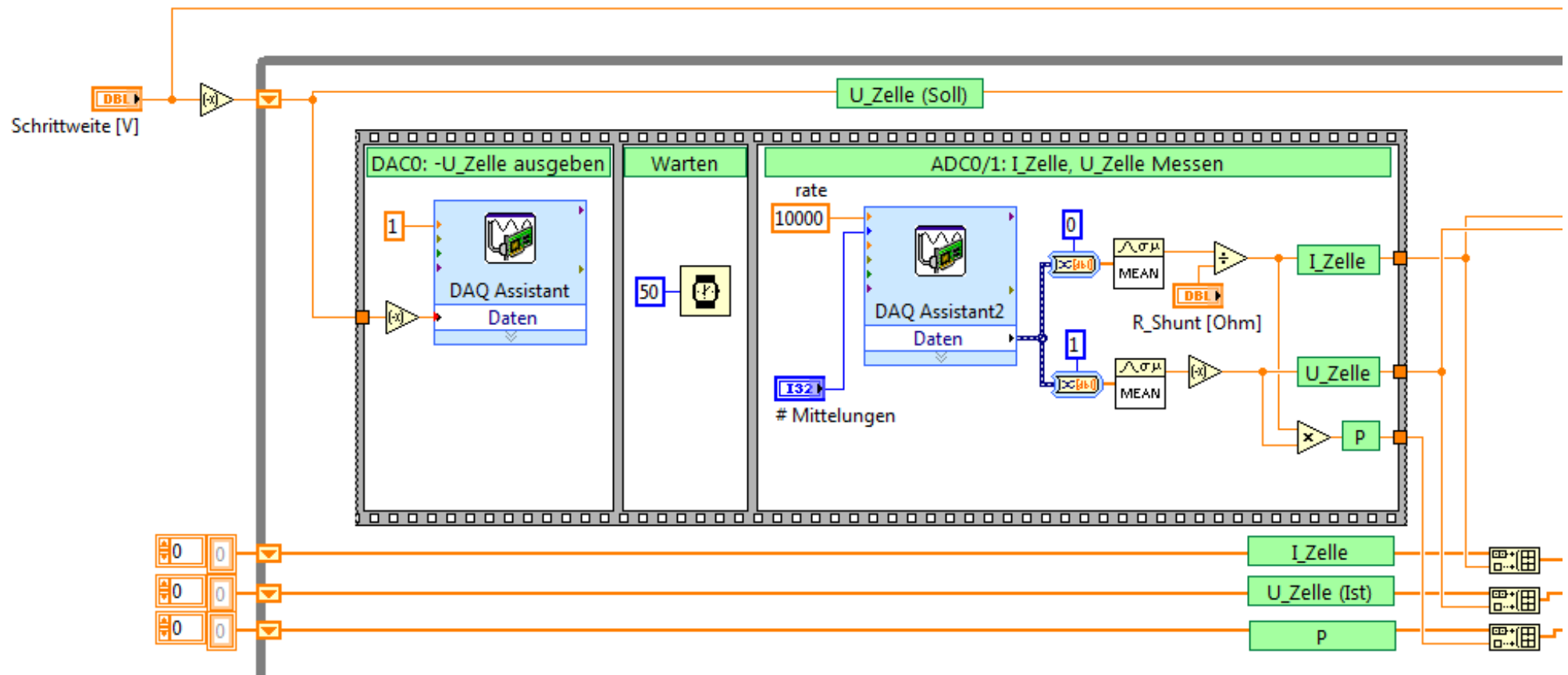


1. Solarzellen-Kennlinie: Messschaltung

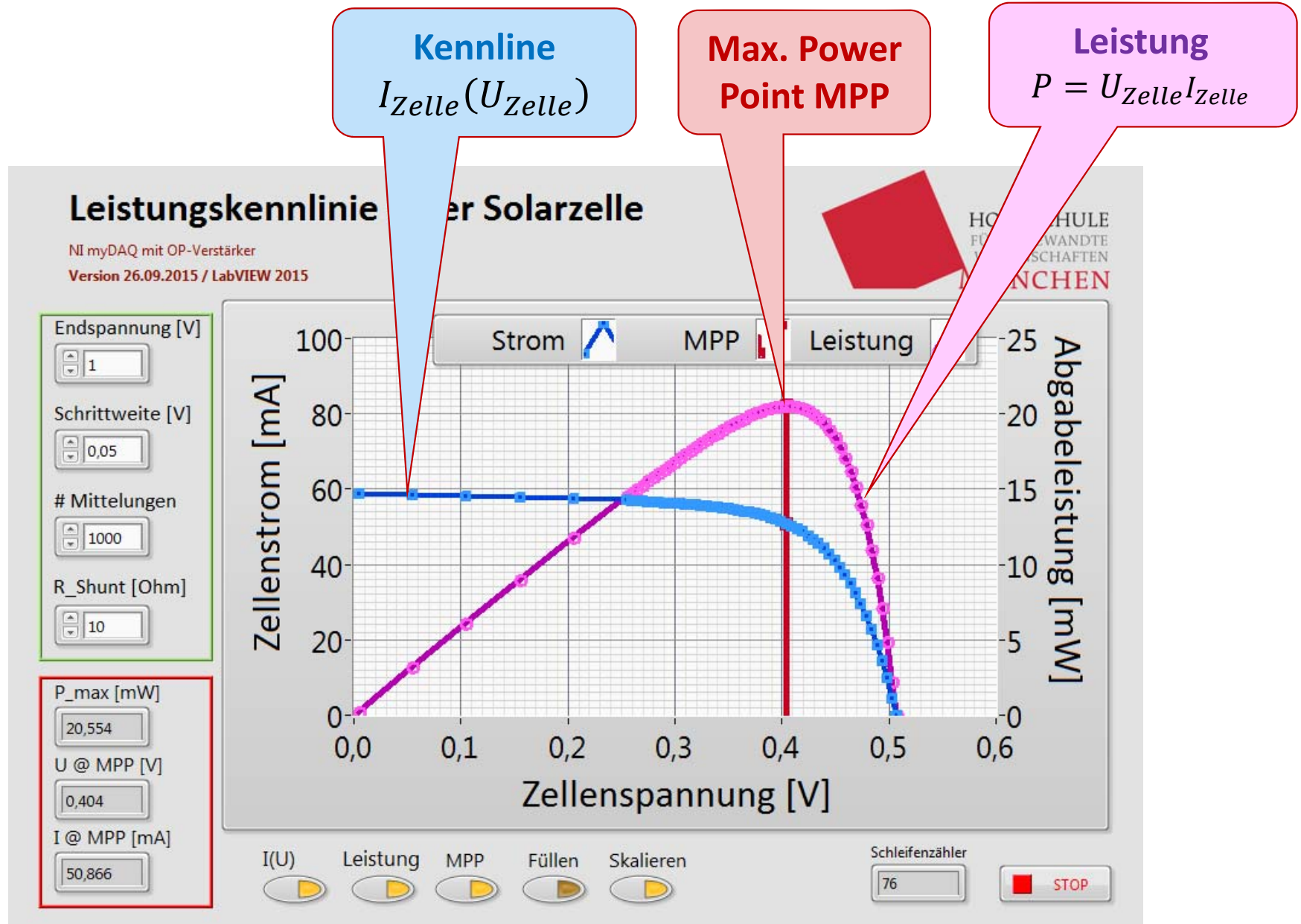


Schaltung nach Wagemann, H.-G.; Eschrich, H.: Photovoltaik, Teubner-Verlag, 2007

1. Solarzellen-Kennlinie: Blockdiagramm

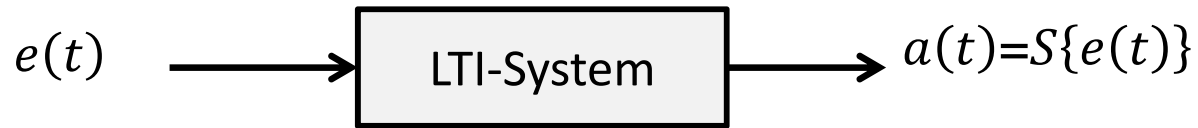


1. Solarzellen-Kennlinie: Frontpanel und Ergebnis



2. Bode-Diagramme von elektrischen Vierpolen

2. Bode-Diagramme von Vierpolen



- LTI-Systeme reagieren auf harmonisches Eingangssignal mit harmonischem Ausgangssignal gleicher Frequenz. Beispiel:

$$e(t) = \hat{e} \cdot \sin[2\pi f t] \rightarrow a(t) = \hat{a}(f) \cdot \sin[2\pi f t + \varphi(f)]$$

frequenzabhängige
Amplitude $\hat{a} \neq \hat{e}$

Frequenzabhängige
Phasenverschiebung

- **Frequenzgang** beschreibt :

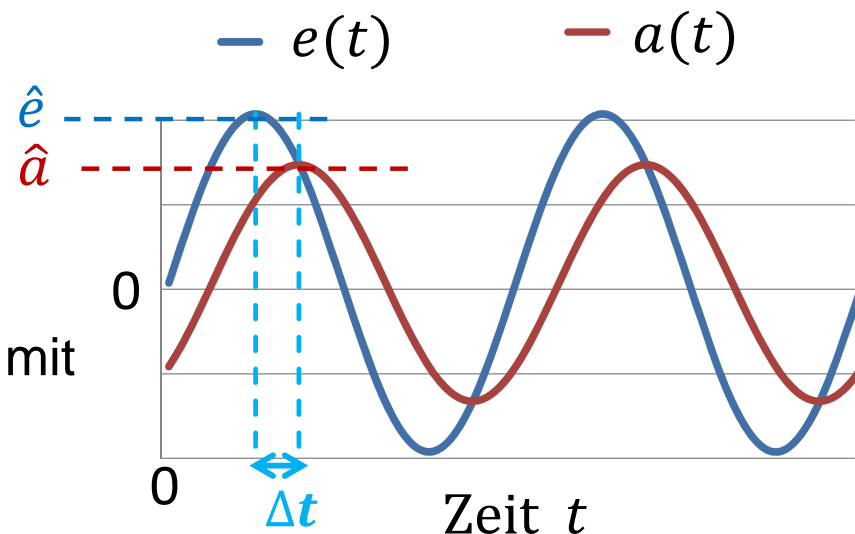
a. **Amplitudengang** $\frac{\hat{a}(f)}{\hat{e}}$

b. **Phasengang** $\varphi(f) = 2\pi \Delta t f$

- Darstellung als **komplexwertiges** $\underline{G}(f)$ mit

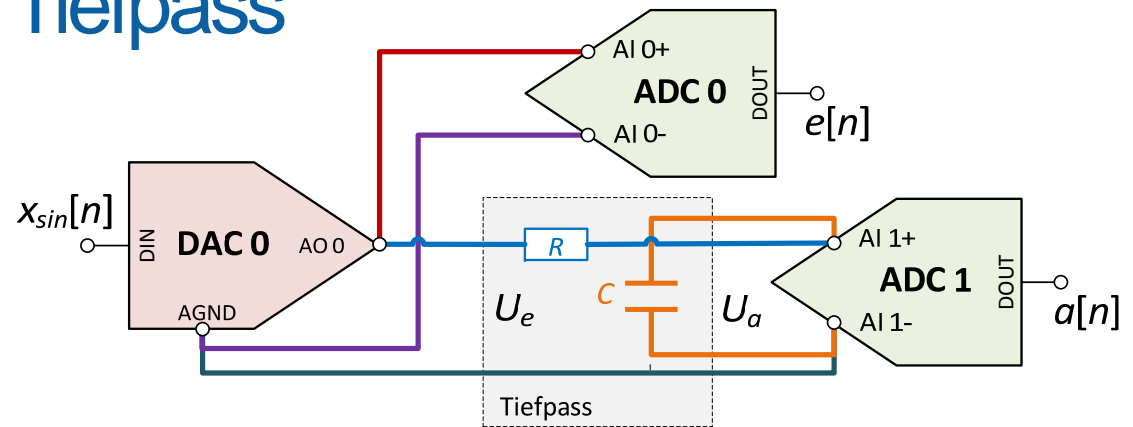
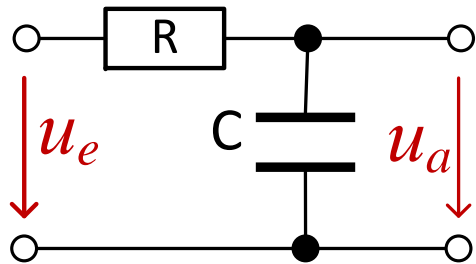
- $|\underline{G}(f)| = \frac{\hat{a}(f)}{\hat{e}}$

- $\arg(\underline{G}(f)) = \varphi(f)$



$\underline{G}(f)$ in der Literatur oft auch als $\underline{H}(f)$, $\underline{H}(\omega)$, $\underline{H}(i\omega)$

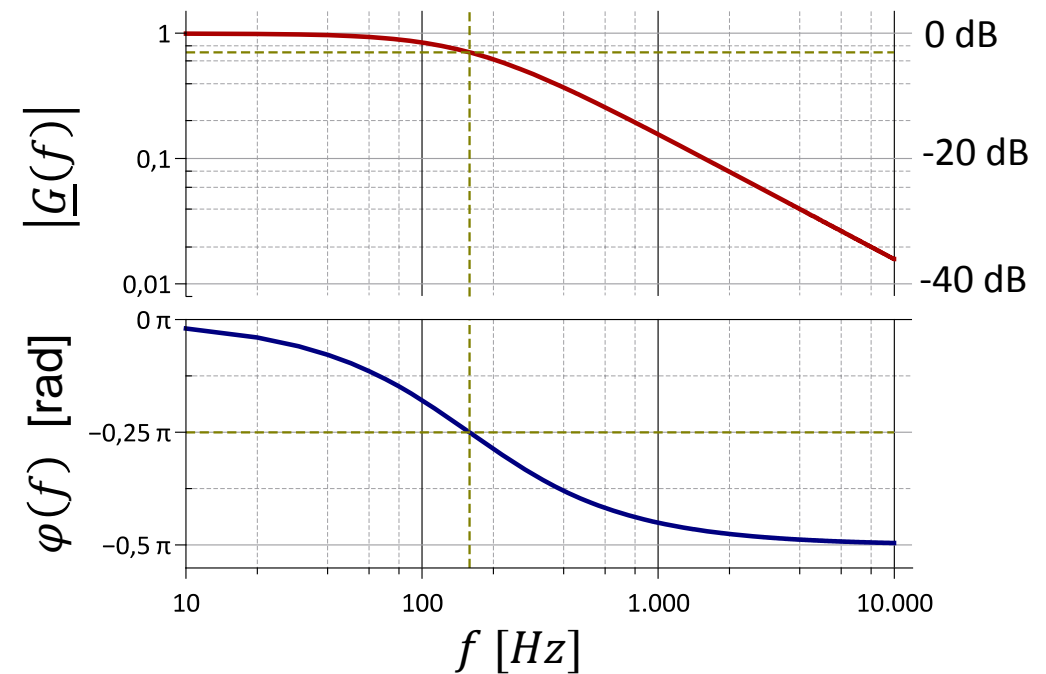
2. Bode-Diagramme am Tiefpass



Bode-Diagramm:

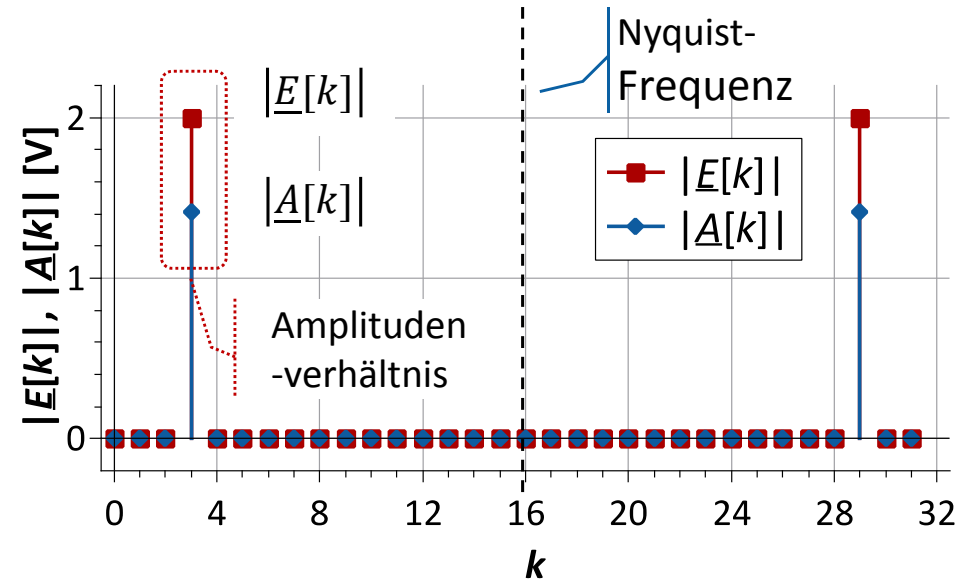
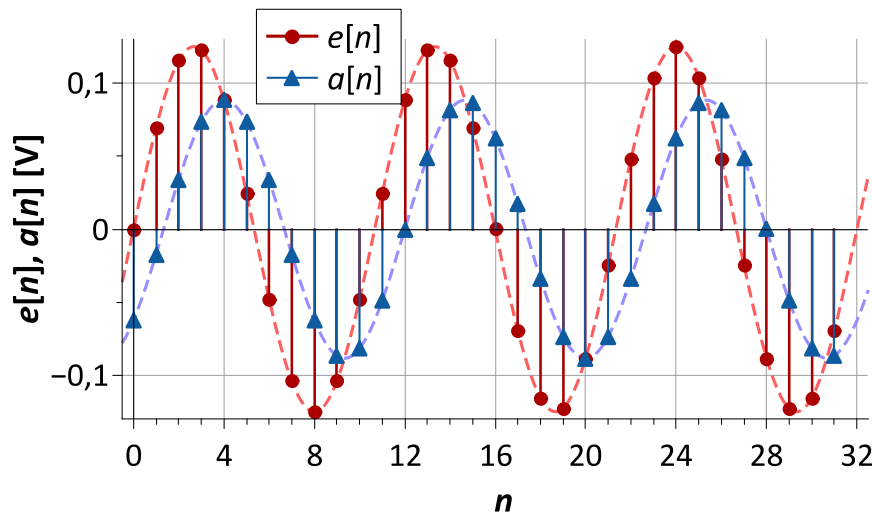
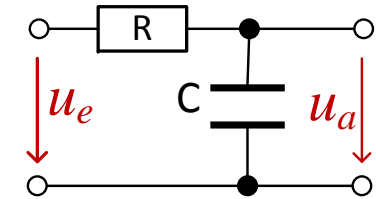
- (Halb-) Logarithmische Darstellung von Amplituden- und Phasengang
- Amplitudengang oft in dB

$$= 20 \log_{10}(|\underline{G}(f)|)$$
- Bestimmung in Praktika oft durch Ablesung der Amplituden vom Oszillografenschirm
- „Bode Analyzer“ aus NI ELVISmx Instruments erlaubt Vermessung
 \rightarrow eigene Programmierung ist leicht und lehrreich.



2. Bode-Diagramme: Mathematik

- Aufnahme von $u_e \equiv e[n]$, $u_a \equiv a[n]$
- Berechnung der Spektren $\underline{E}[k]$, $\underline{A}[k]$ per DFT

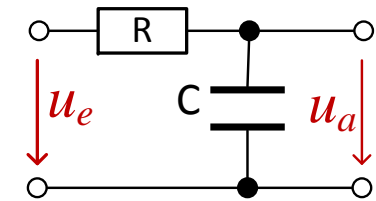


- Spektren $\underline{E}[k]$, $\underline{A}[k]$ sind (ohne Rauschen) nur bei Anregungsfrequenz $\neq 0$
- DFT-Spektren: k = Anzahl Sinusperioden im Messintervall
- Amplitudengang:

$$|\underline{G}[k]| = \frac{|\underline{A}[k]|}{|\underline{E}[k]|} \equiv \left| \underline{G} \left(f_n = k \frac{f_S}{N} \right) \right|$$

$$\text{Hier: } |\underline{G}[3]| = \frac{1,41 \text{ V}}{2 \text{ V}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

2. Bode-Diagramme: Mathematik



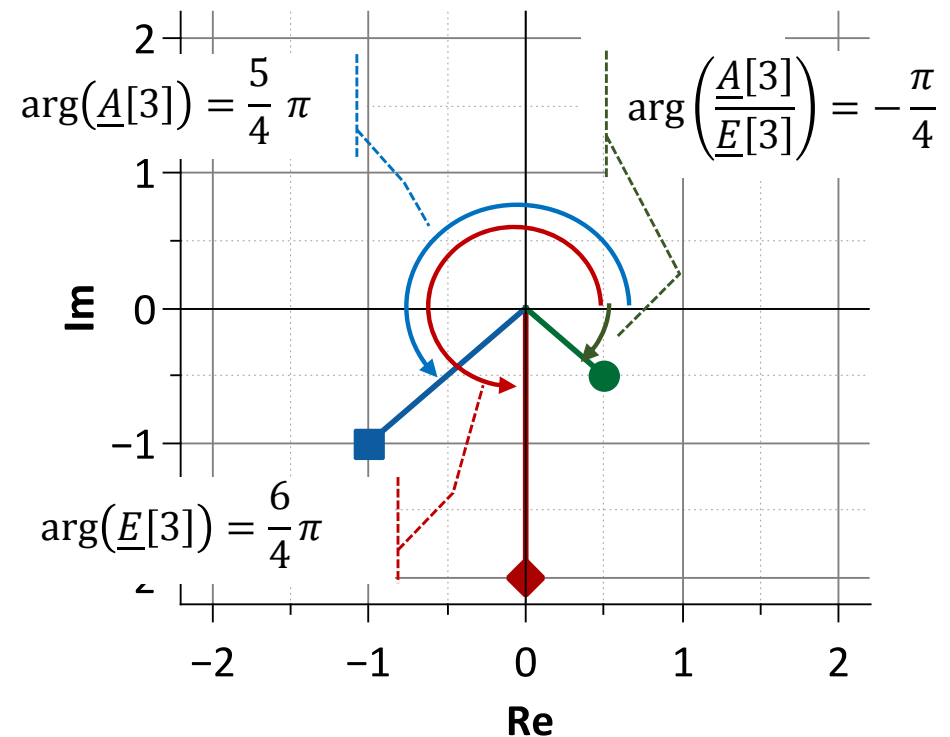
- Berechnung Phasenverschiebung aus $\underline{A}[m]$, $\underline{E}[m]$

k	0	1	2	3	4...28	29	30	31
$\underline{E}[k]$	0	0	0	$-2i$	0	$+2i$	0	0
$\underline{A}[k]$	0	0	0	$-1 - i$	0	$-1 + i$	0	0

- $\underline{G}[k] = \frac{\underline{A}[k]}{\underline{E}[k]}$
- Division mit komplexen Operanden
 - Division der Beträge
 - Subtraktion der Phasenwinkel
- Phasengang:

$$\varphi[k] = \arg(\underline{G}[k]) = \arg\left(\frac{\underline{A}[k]}{\underline{E}[k]}\right)$$

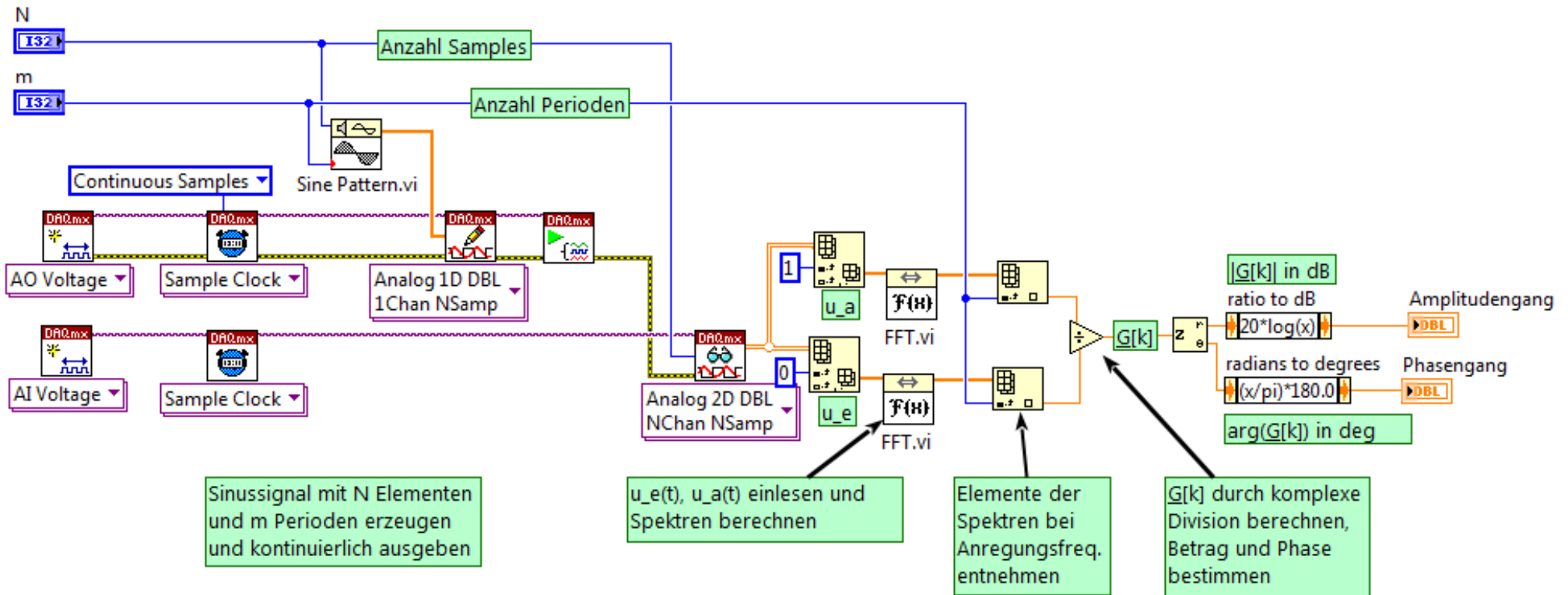
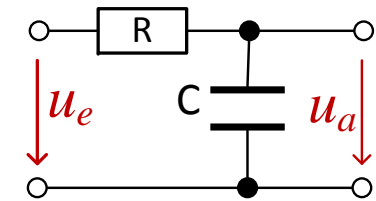
- Hier: $\varphi = \arg(\underline{G}[3]) = \frac{5}{4}\pi - \frac{6}{4}\pi = -\frac{\pi}{4}$



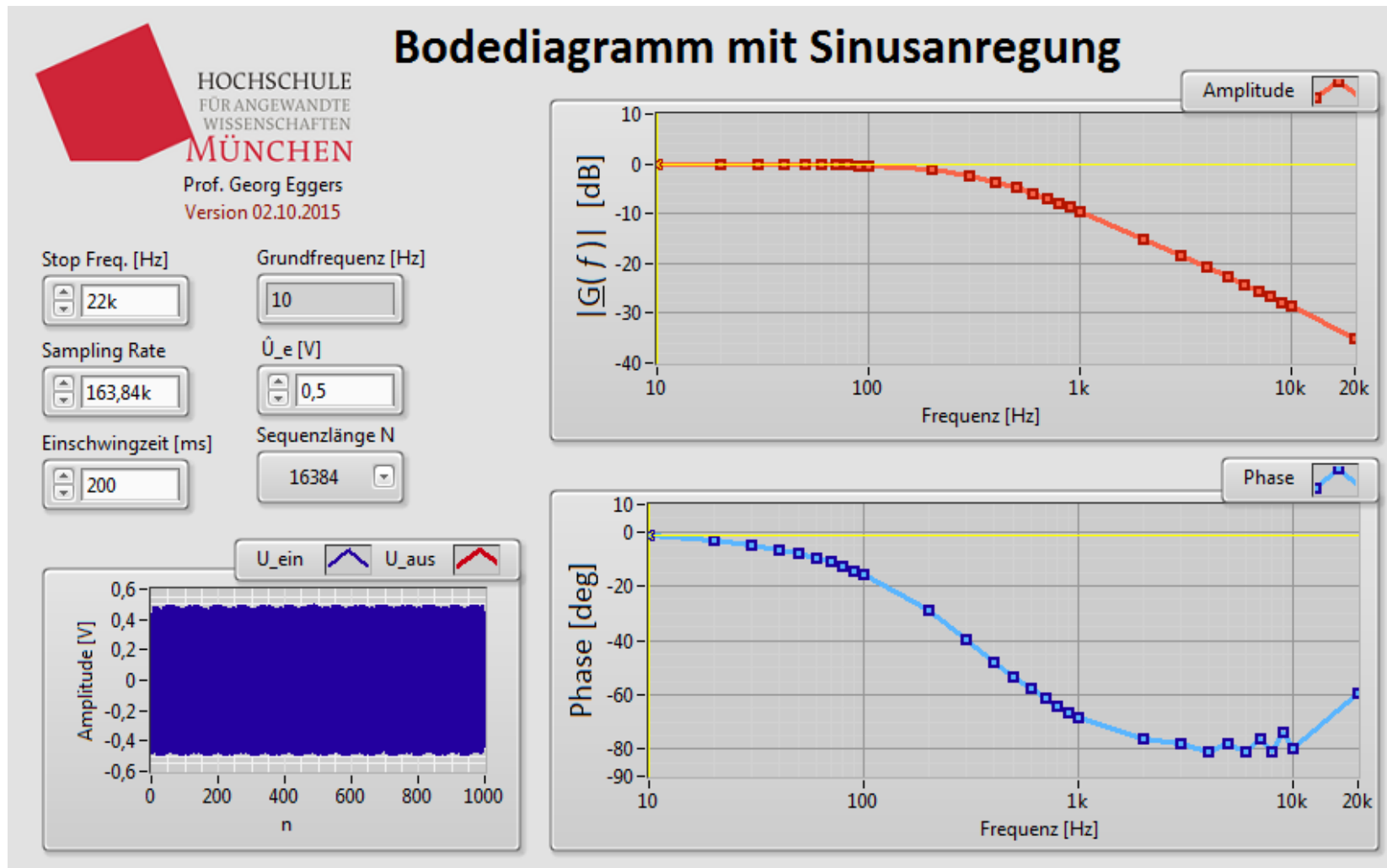
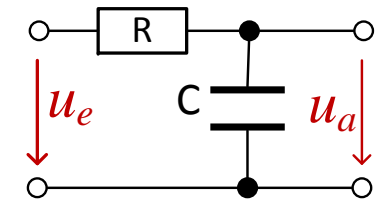
◆ $\underline{E}[3]$
 ■ $\underline{A}[3]$

● $\underline{G}[3] = \frac{\underline{A}[3]}{\underline{E}[3]}$

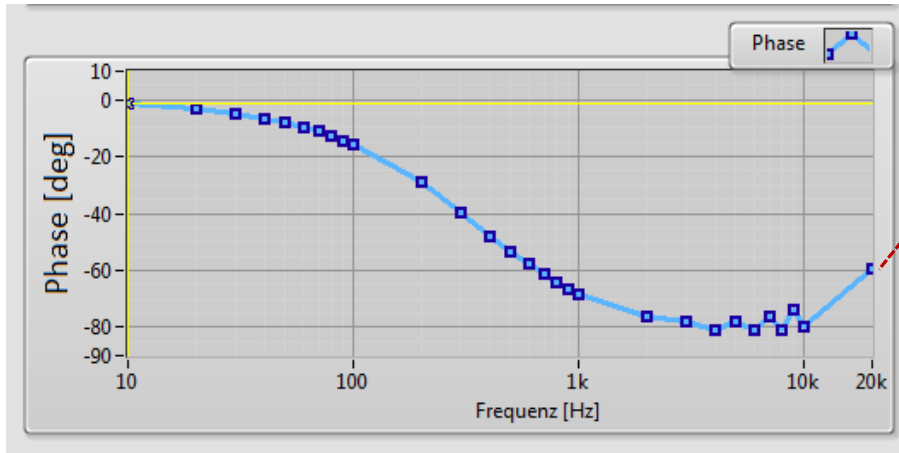
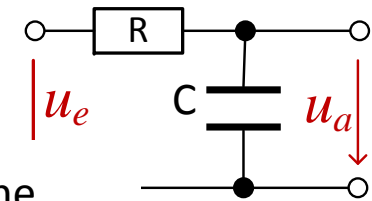
2. Bode-Diagramme: Umsetzung in LabVIEW



2. Bode-Diagramme: Umsetzung in LabVIEW

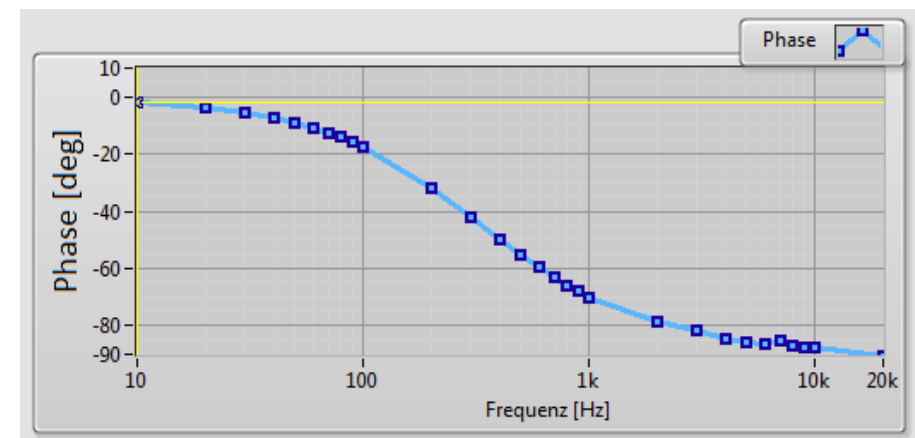
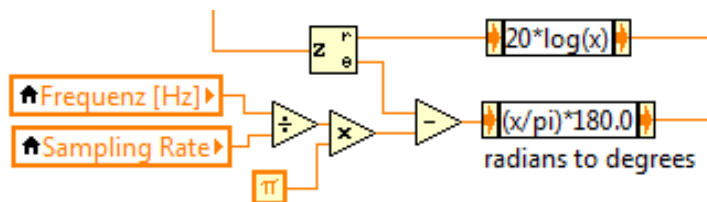
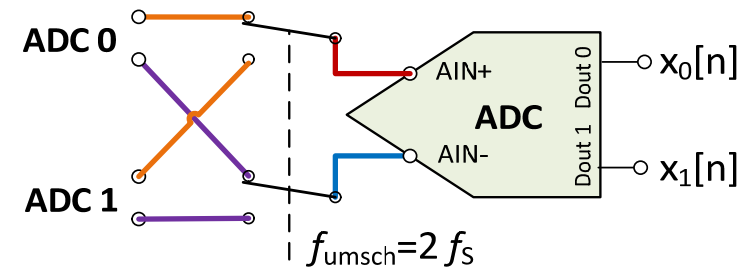


2. Bode-Diagramme: Korrektur Phase



Phasengang steigt für hohe Frequenzen wieder an???

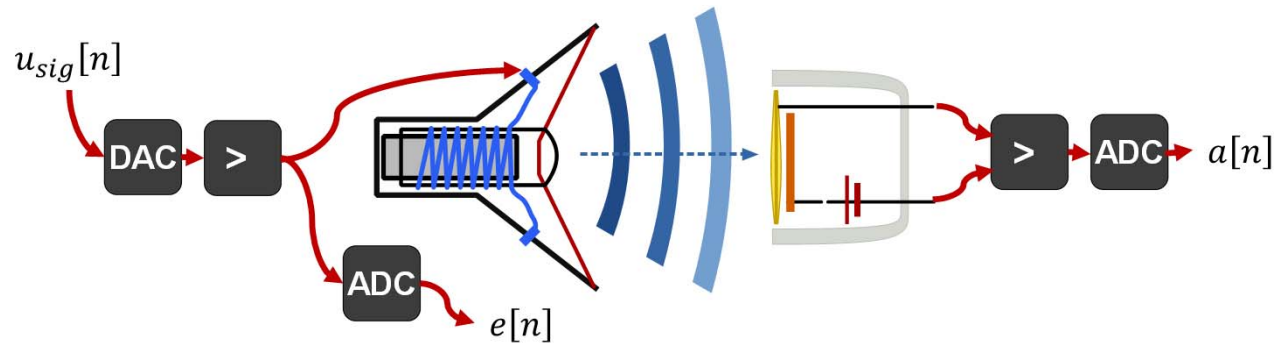
- **ADC des myDAQ benutzt Multiplexer:**
- Umschaltung mit doppelter Sampling-Frequenz: $\Delta t_{ADC} = \frac{1}{2f_s}$
- Führt zu Phasenverschiebung
- $\Delta\varphi_{ADC}(f) = 2\pi \frac{\Delta t_{ADC}}{1/f} = 2\pi \frac{f}{2f_s} = \pi \frac{f}{f_s}$
→ erst bei hohen Messfrequenzen sichtbar
- Korrektur möglich



3. Frequenzgang von Lautsprechern

3. Frequenzgang von Lautsprechern

- **Anwendung** Lautsprecher-Kennlinie



$$\underline{G}[k] = \frac{\mathcal{F}\{a[n]\}}{\mathcal{F}\{e[n]\}} = \frac{\underline{A}[k]}{\underline{E}[k]} \dots \text{aber nur definiert f\u00fcr Frequenzen mit } \underline{E}[k] \neq 0$$

- **Anregung durch wei\u00dfes Rauschen (Mischung aller Frequenzen)**
- Zu kl\u00e4ren ist
 - Sind im Eingangssignal alle Frequenzen vorhanden?
 - Gibt es \u00e4u\u00dfere St\u00f6rungen der Signale?
- **Fehlende Spektralkomponenten im Eingangssignal k\u00f6nnen nicht durch einfache Mittelung mehrerer Spektren ausgeglichen werden**
- **Qualit\u00e4tskriterium** f\u00fcr $\underline{G}[k]$ f\u00fcr alle einzelnen k erforderlich

3. Frequenzgang von Lautsprechern: Kohärenz

- **Kohärenz** bedeutet **feste Phasenbeziehung** zwischen den Spektralkomponenten des Eingangs- und Ausgangsspektrums bei Wiederholung der Messung
- **Kohärenz als Qualitätskriterium für Frequenzgangmessung:**
 - **Feste Phasenbeziehung** zwischen Eingangs- und Ausgangsspektrum bei wiederholten Messungen → Ausgangssignal ist echte Reaktion auf Eingangssignal
 - **Keine feste Phasenbeziehung** bei wiederholten Messungen → Ausgangssignal durch Rauschen etc. entstanden
- **Praktische Umsetzung**
 - M -fache Wiederholung der Messung, Berechnung der Spektren $\underline{E}_m, \underline{A}_m$

- **Kohärenzgewichteter Frequenzgang $\underline{G}_1[k]$:**

$$\underline{G}[k] = \frac{\underline{A}[k]}{\underline{E}[k]} \quad \Rightarrow \quad \underline{G}_1[k] = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} (\underline{A}_m[k] \cdot \underline{E}_m^*[k])}{\sum_{m=0}^{M-1} (\underline{E}_m[k] \cdot \underline{E}_m^*[k])}$$

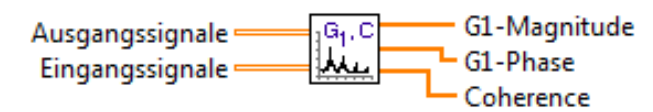
- **Kohärenzfunktion $\gamma^2[k]$ mit $0 \leq \gamma^2[k] \leq 1$:**

$$\gamma^2[k] = \frac{\left| \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} (\underline{A}_m[k] \cdot \underline{E}_m^*[k]) \right|^2}{\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} (\underline{E}_m[k] \cdot \underline{E}_m^*[k]) \cdot \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} (\underline{A}_m[k] \cdot \underline{A}_m^*[k])}$$

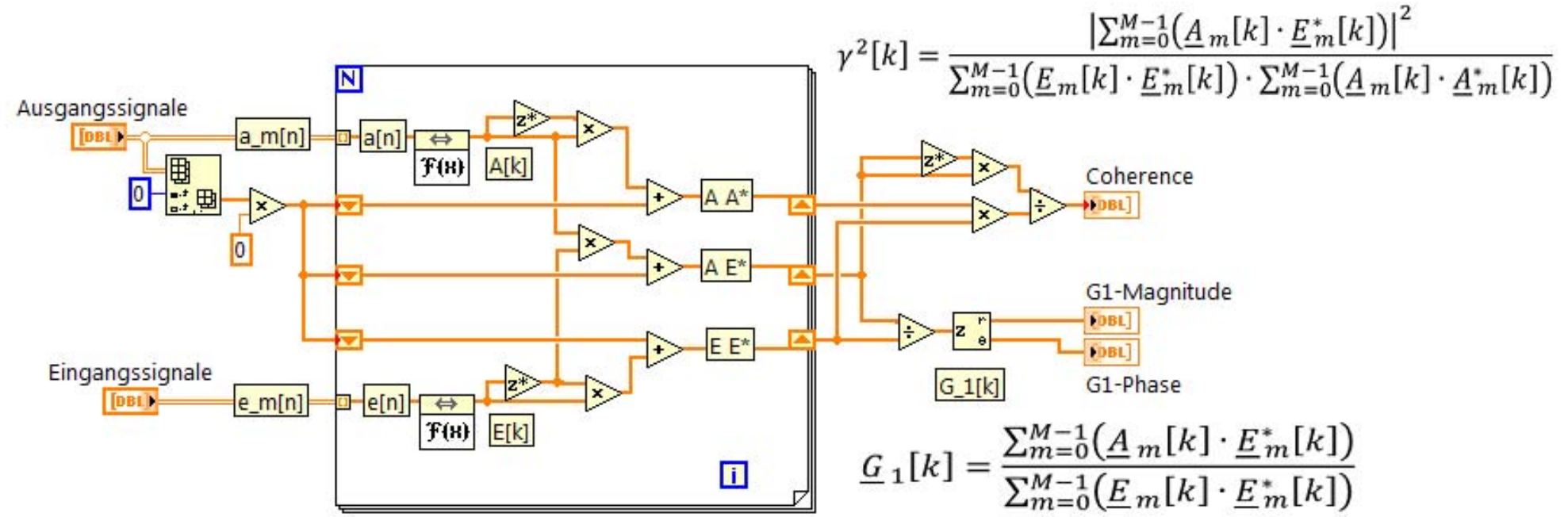
3. Frequenzgang von Lautsprechern

- Kohärenzgewichteter Frequenzgang $\underline{G}_1[k]$:**
 Nicht kohärente Spektralelemente werden gedämpft
- Kohärenzfunktion $\gamma^2[k]$ mit $0 \leq \gamma^2[k] \leq 1$:**
 Qualitätsmaßstab: $\gamma^2[k] = 1 \rightarrow$ echte Reaktion; $\gamma^2[k] = 0 \rightarrow$ Rauschen

G1-Coherence.vi



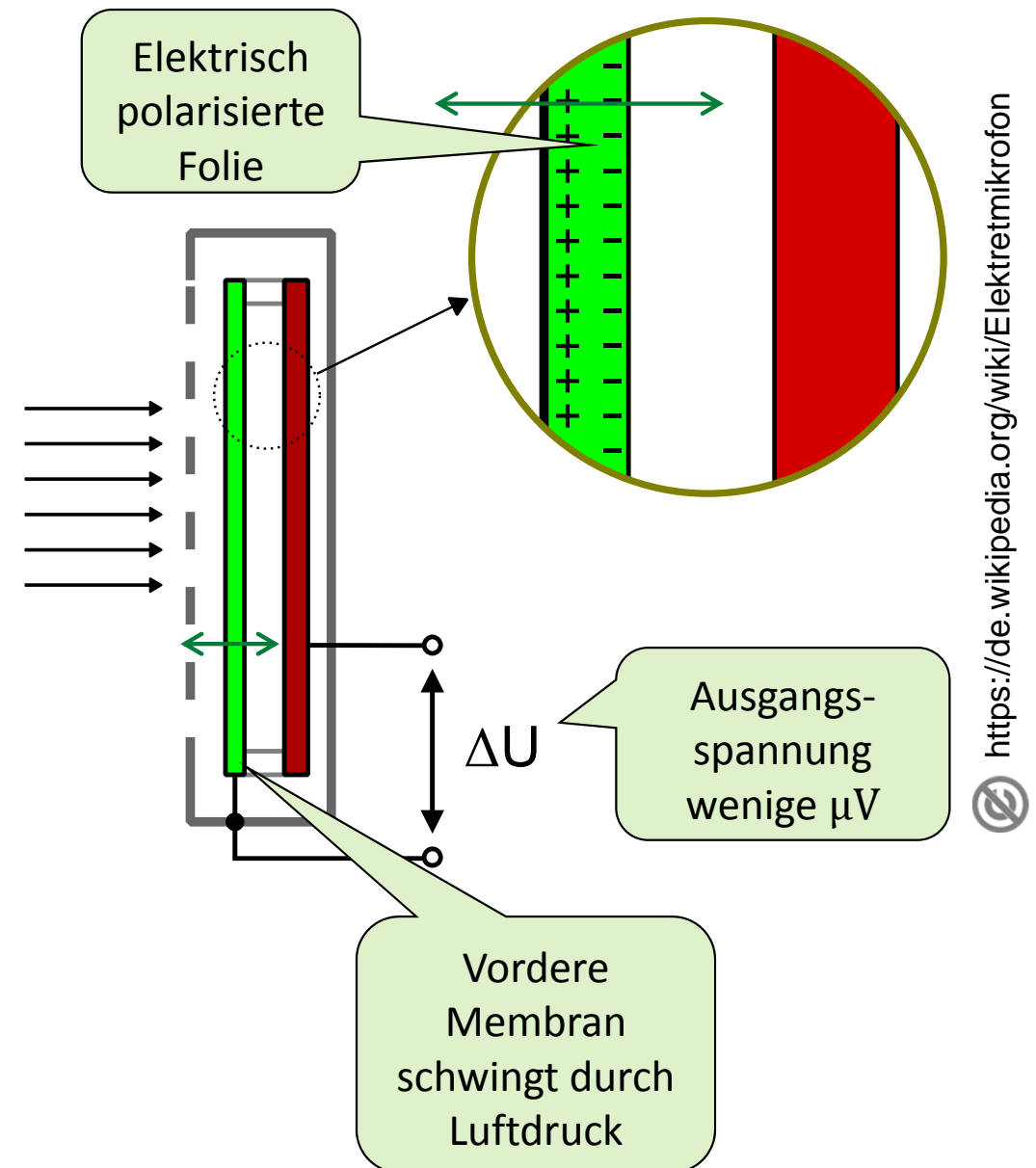
Berechnet die Frequenzgangsfunktion G_1 in Betrag und Phase sowie die Kohärenzfunktion.



3. Frequenzgang von Lautsprechern: Mikrofone

Elektret-Kondensatormikrofone

- Vordere Membran (grün) ist bewegliche Folie aus elektrisch polarisiertem Material
- Membran schwingt durch Luftdruckschwankungen von Schallwellen
- Abstandsänderung zwischen Membran und Rückseite erzeugt Spannung im μV -Bereich
- Ca. 90% aller eingesetzten Mikrofone sind Elektret-Mikrofone.
- Stückpreise < 1 Euro



<https://de.wikipedia.org/wiki/Elektretmikrofon>

3. Frequenzgang von Lautsprechern: Mikrofone

Elektret-Kondensatormikrofone

- Besitzen fast immer einen eingebauten FET-Vorverstärker
- Speisung mit 1 .. 10V über Widerstand
- Erreichbare Signalpegel im mV-Bereich



MCE-4000

Best.-Nr.: 23.3680

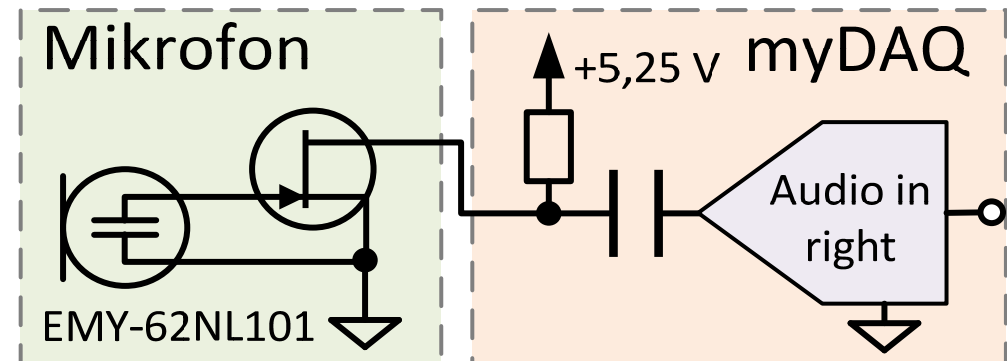
Frequenzbereich	20-20000 Hz
Empfindlichkeit	5 mV/Pa/1 kHz, ± 3 dB
Ausgangsimpedanz	2,2 kΩ
Signal/Rauschabstand	> 58 dB
Koppelkondensator	0,1-4,7 μF
Zul. Einsatztemperatur	0-40 °C
Stromversorgung	1,5-10 V=0,5 mA

Preis in € **1,89***

<http://www.monacor.de/>

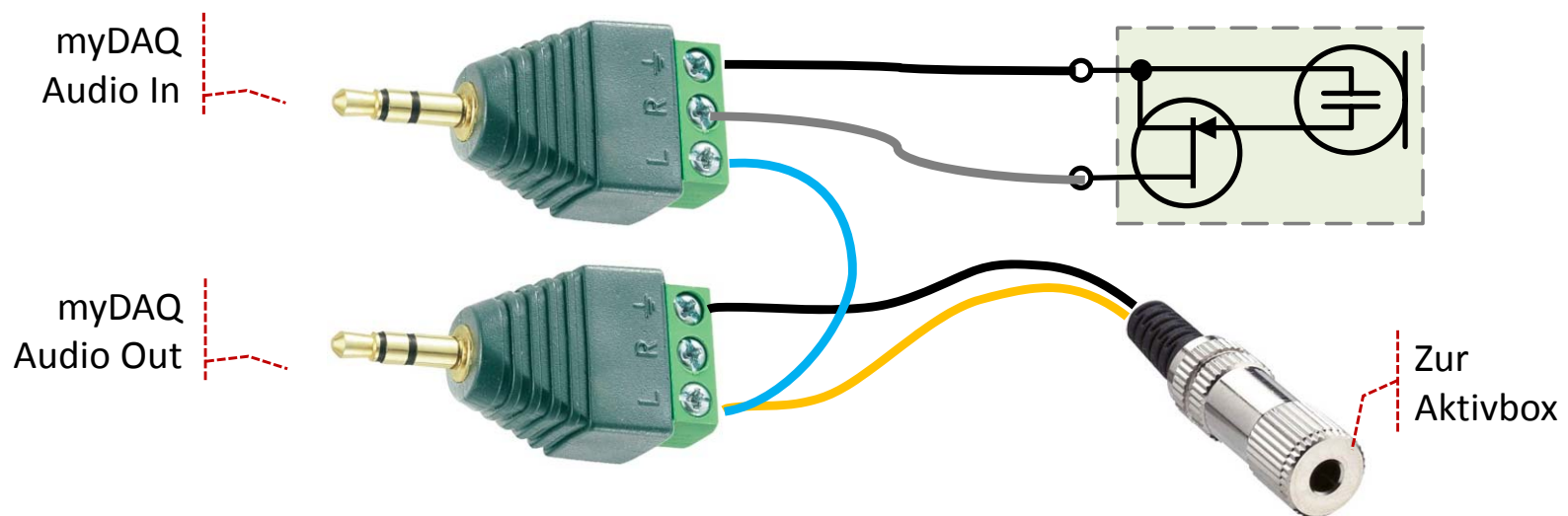
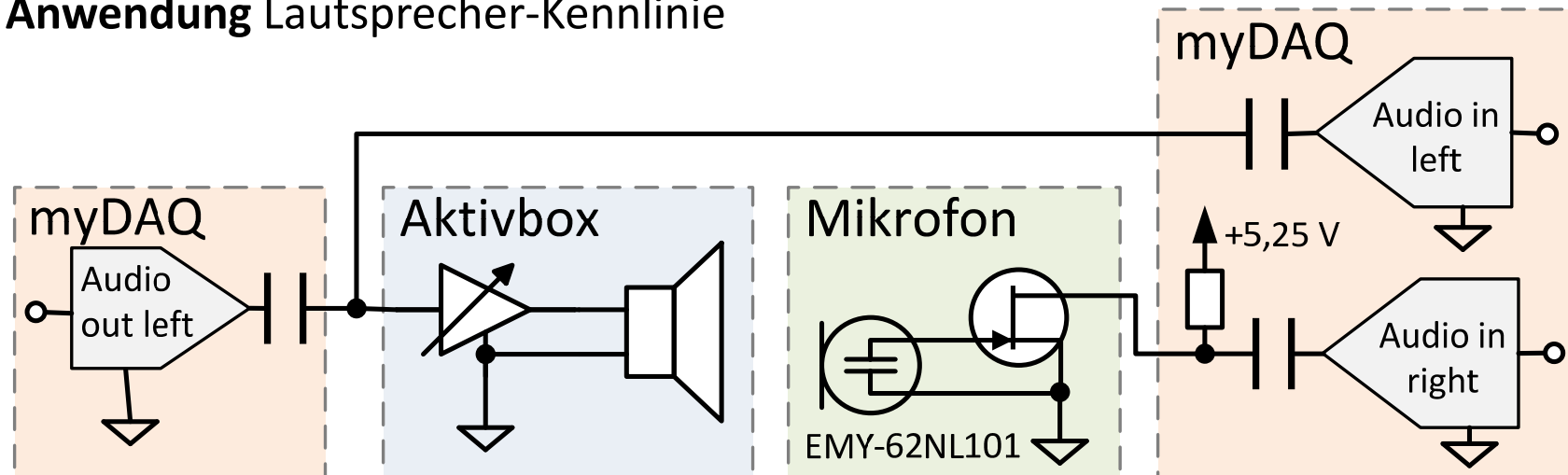
Audio-Eingang des NI myDAQ

- Besitzt Speiseschaltung, Elektretmikrofone können direkt angeschlossen werden

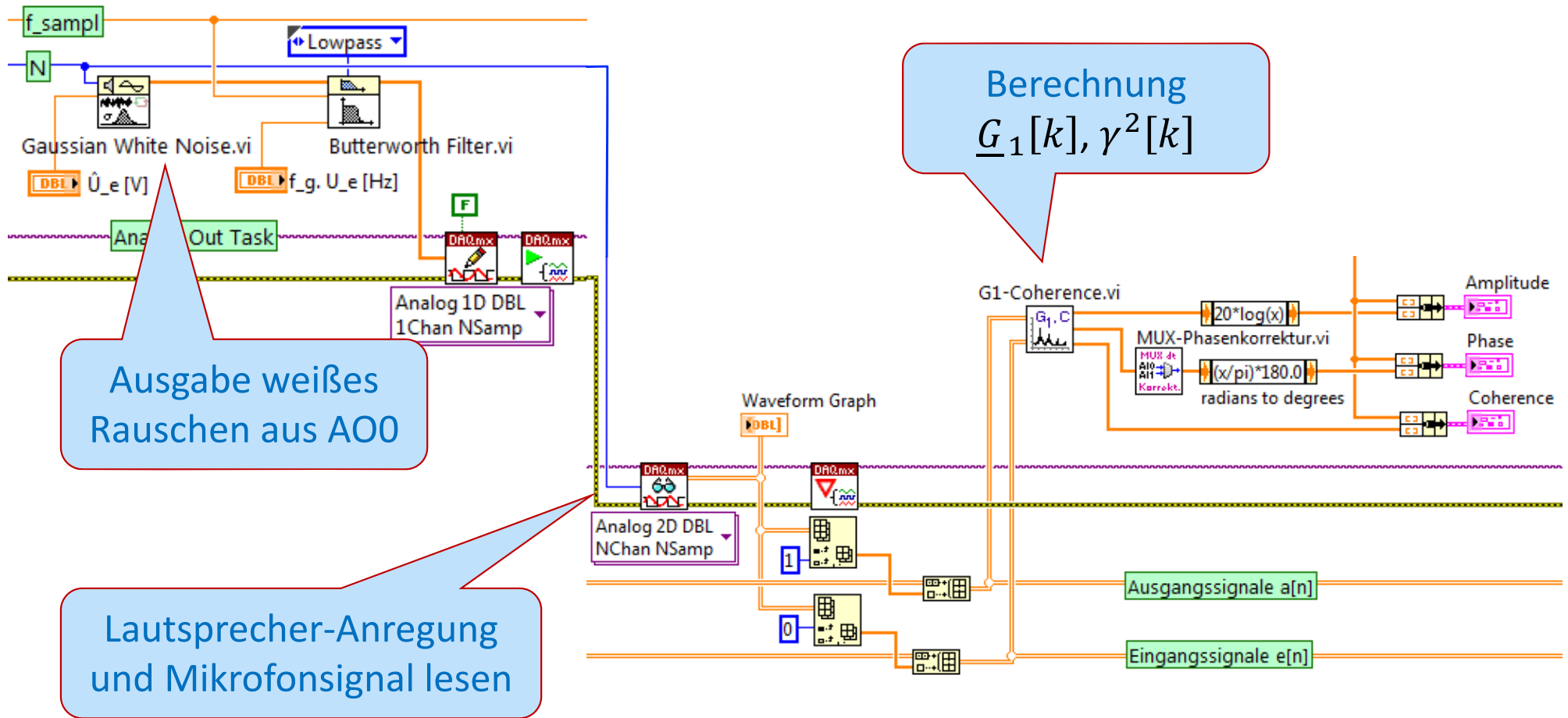


3. Frequenzgang von Lautsprechern: Schaltung

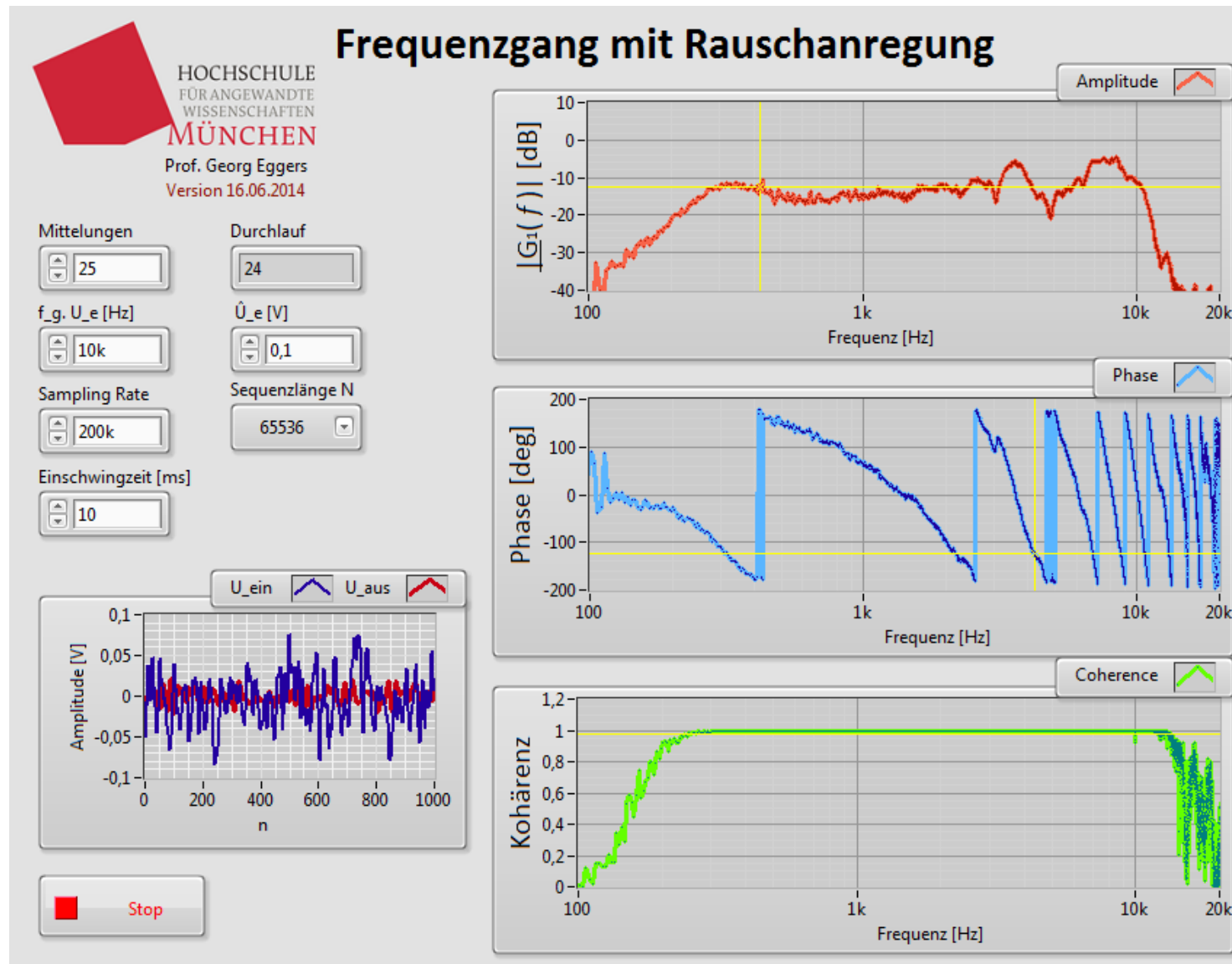
- Anwendung Lautsprecher-Kennlinie



3. Frequenzgang von Lautsprechern: Blockdiagramm

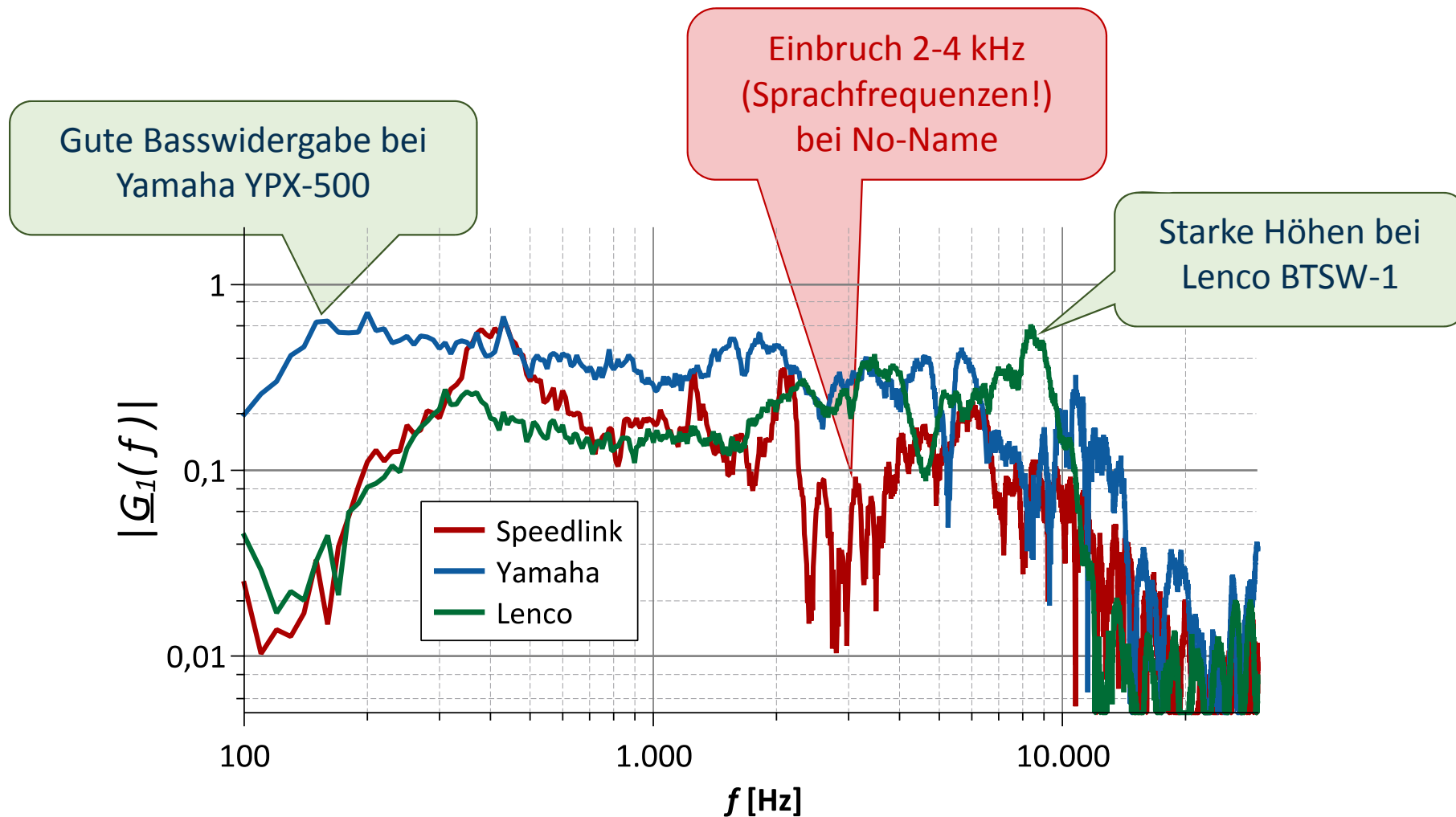


3. Frequenzgang von Lautsprechern: Frontpanel



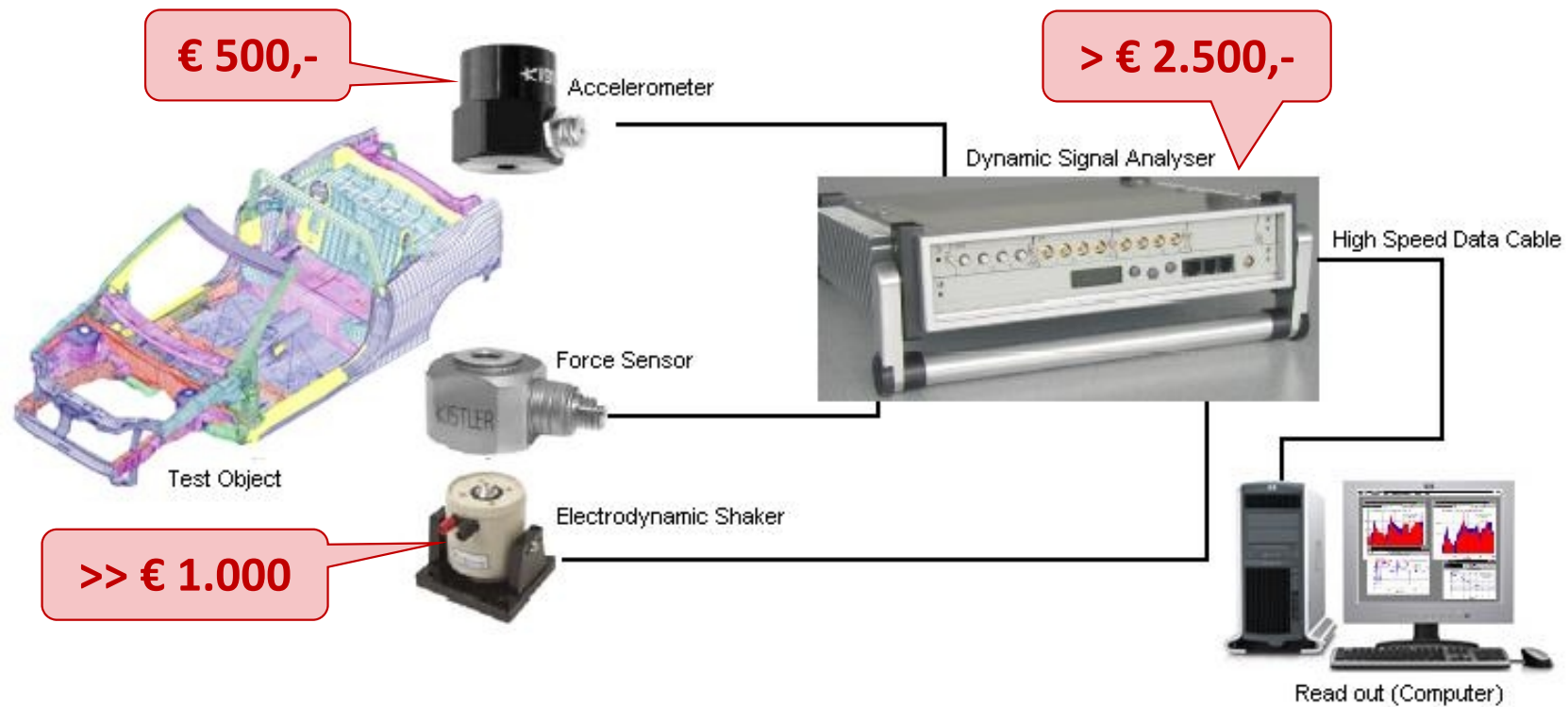
3. Frequenzgang von Lautsprechern: Ergebnisse

- **Anwendung:** Vergleich verschiedene Aktivbox-Kennlinien



4. Modalanalyse: Vermessung mechanischer Resonanz

4. Modalanalyse: Klassischer Ansatz



Industriestandard:

- Anregung des Prüfobjekts mit elektrodynamischem „Shaker“
- Aufnahme der lokalen Vibrationen durch Piezo-Beschleunigungssensoren
- Ladungsverstärker zur Signalauswertung erforderlich

Industrie-Messtechnik zur Modalanalyse ist sehr kostspielig!

4. Modalanalyse: Low-Cost-Anregung



€ 16,99
Incl. MwSt.



Erregerspule
selbstklebend

Verstärker
mit Batteriebetrieb

Fotos: Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG

Spielwaren-Fachhandel: Kosmos „Sound Booster“

- Selbstklebender Körperschallerreger
- Batteriebetriebenes Verstärkermodul mit 3,5 mm Stereo-Klinke
- Zum Selbstbau von „Lautsprechern“

4. Modalanalyse: Low-Cost-Sensor

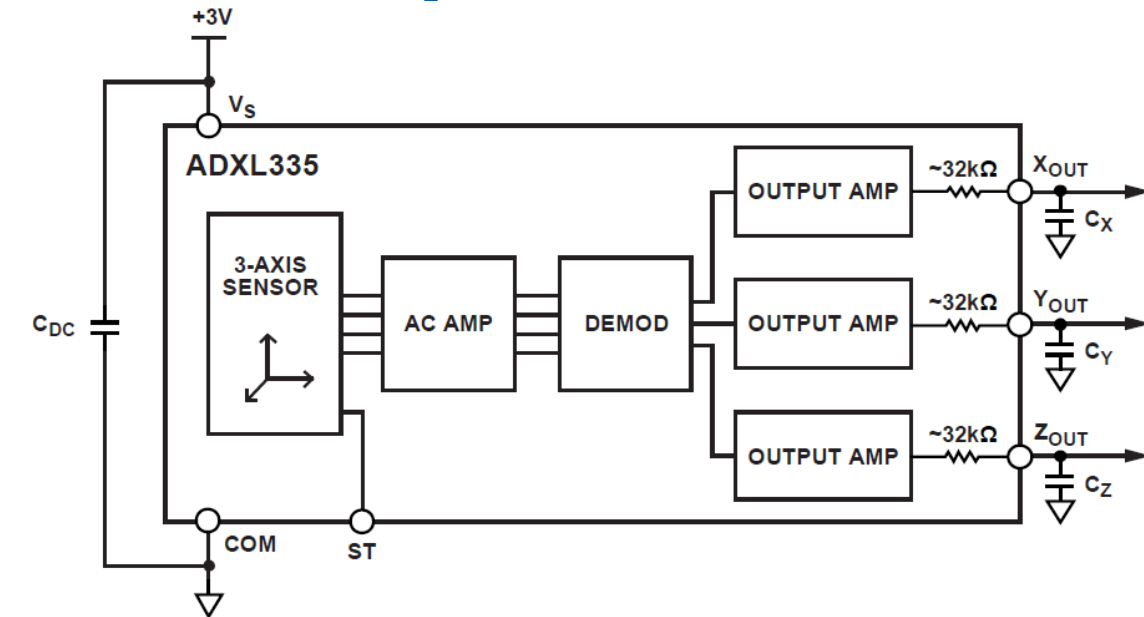


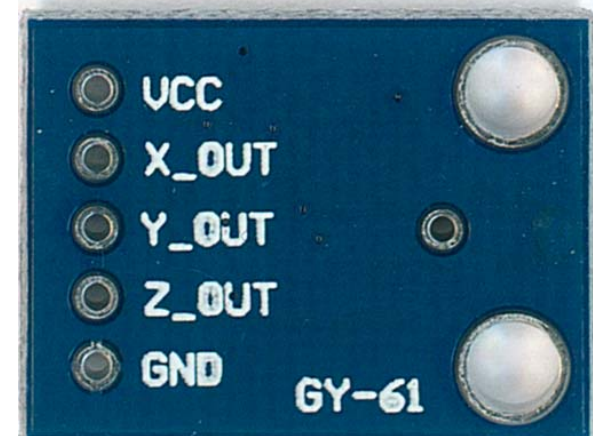
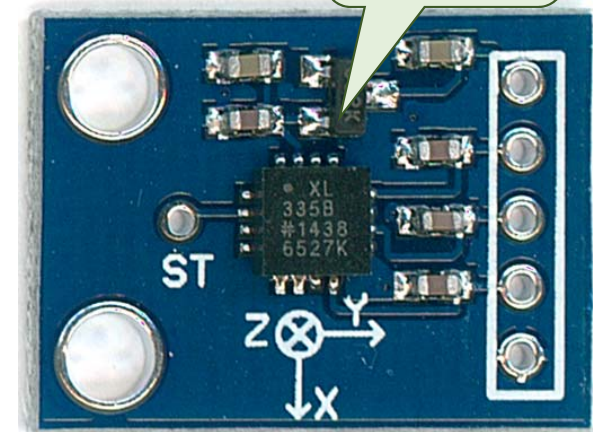
Abb: Analog Devices Inc.

07808-001

GY-61 ADXL335 3 Axis Accelerometer

- 3-Achsen-Beschleunigungssensor-Modul auf Basis ADXL335 für „Arduino“
- Drei Analoge Signalausgänge $0,6 \dots 2,4 \text{ V} \equiv -3g \dots +3g$
- Bandbreite bis $1,6 \text{ kHz}$ (x,y) / $0,5 \text{ kHz}$ (z)
- Modul mit Spannungsregler \rightarrow an 5V-Versorgung myDAQ anschließbar

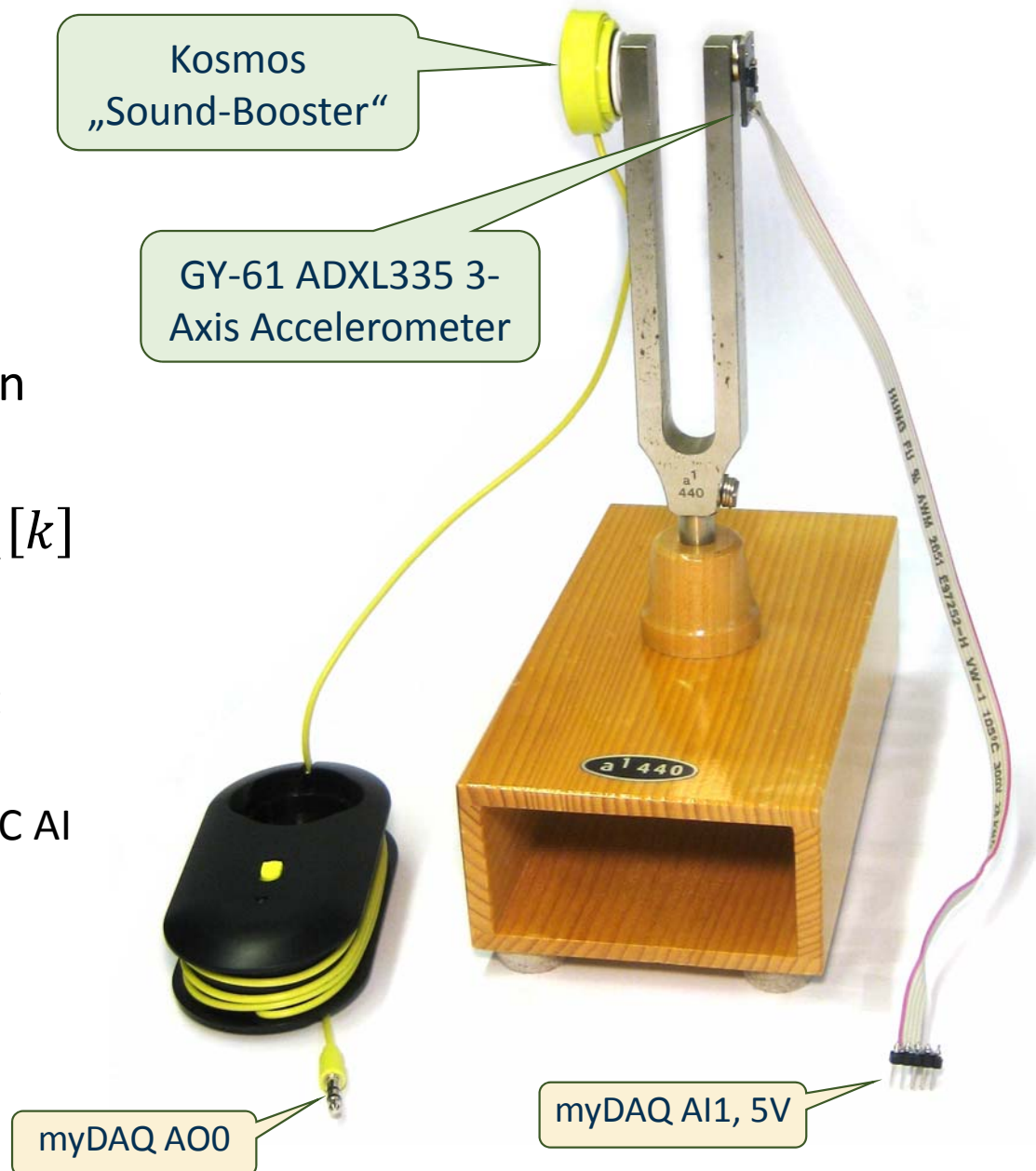
Ca. € 2,-
Incl. MWSt.



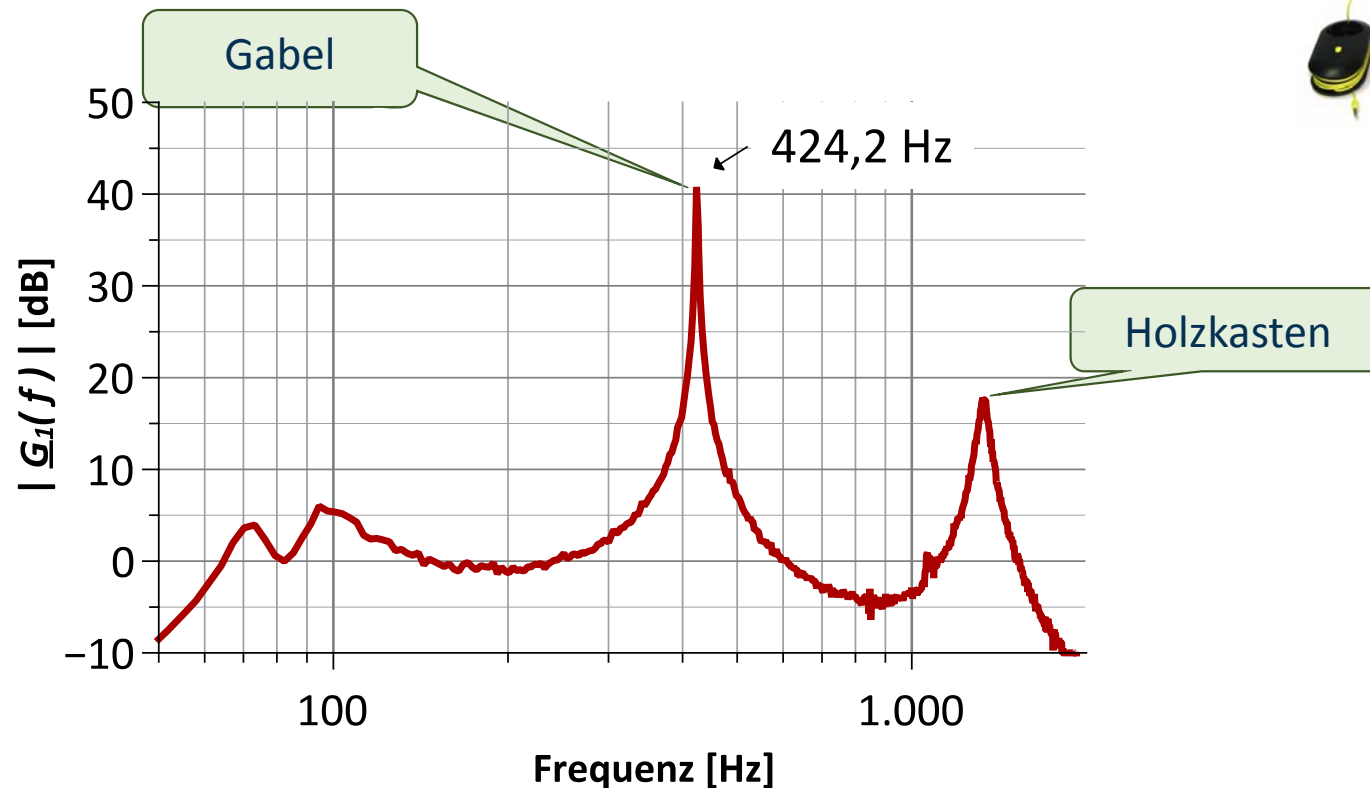
4. Modalanalyse: Aufbau

Software weitgehend identisch mit Lautsprecher-Frequenzgangsmessung

- Anregung mit weißem Rauschen
- Berechnung des kohärenzgewichteten Frequenzgangs $\underline{G}_1[k]$
- Anpassung Signalein/ausgänge:
 - Beschleunigungssensor muss aufgrund der Signalpegel an ADC AI betrieben werden und benötigt 5V-Versorgung
 - „Sound Booster“ an DAC A00



4. Modalanalyse: Ergebnisse



- Resonanzen von Gabel und Holzkasten deutlich sichtbar
- Verschiebung der Gabelresonanz von 440 \rightarrow 424 Hz durch Masse des Anregers und des Sensors

Dank / Quellen

Herzlichen Dank an:

- Studierende im Fach Mechatronik/Feinwerktechnik der HM (Betatester)
- Stephan Diecke (Lehrbeauftragter LabVIEW HM)
- Jan Kniewasser (NI Academic Field Sales)



Weblinks

- LabVIEW-Code des Vortrags und Präsentationsdatei:
<http://www.georg-eggert.de/dozententag>

Literatur

- Wagemann, H.-G.; Eschrich, H.: Photovoltaik, Teubner-Verlag, 2007
- Rennert, Ines; Bundschuh, Bernhard (2013): Signale und Systeme. München: Hanser.
- Brigham, Elbert Oran (1997): FFT-Anwendungen. München u.a: Oldenbourg.
- Randall, R. B. (1987): Frequency analysis. Naerum: Brüel & Kjaer.

Bildquellen

- NI myDAQ: <http://www.ni.com/mydaq/d/>
- Kosmos „Sound Booster“: http://www.kosmos.de/produktdetail-1-1/sound_booster-7683/
- ADXL335: <http://www.analog.com/en/products/mems/mems-accelerometers/adxl335.html>
- Monacor MCE 4000: <http://www.monacor.de/produkte/energie-messen-und-selbstbau/selbstbau/mikrofonkapseln/mce-4000/>