

Einführung in die Zustandsüberwachung von Maschinen mittels Vibrations- und Schallmessungen anhand von praktischen Beispielen

Prof. Dr. Georg Eggers

Hochschule München, Fakultät für angewandte Naturwissenschaften



Überblick

- Rahmenbedingungen in Lehrveranstaltungen Signalverarbeitung / Sensorik
- Ausrüstung: NI myDAQ
- Messprojekte:
 - Projekt 1: DFT akustischer Signale
 - Projekt 2: Einfache Modalanalyse
 - Projekt 3: Unwucht
 - Projekt 4: Verschleißerkennung
 - Projekt 5: Betriebsstromanalyse
 - Projekt 6: Kolbenmotoren
- Präsentation and LabVIEW-Programme zum Download:
www.georg-eggers.de/dozententag

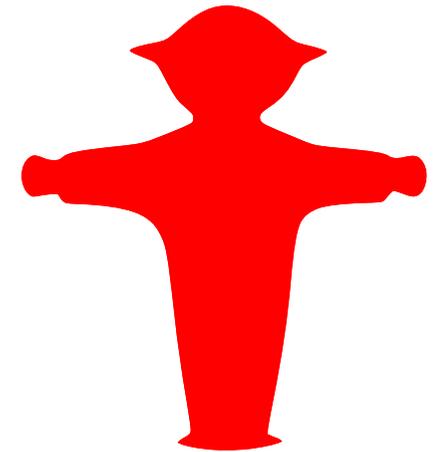
Rahmenbedingungen im Lehreinsatz



Rahmenbedingungen Lehreinsatz

- **Module „Messtechnik“, „Sensorik“, „Signalverarbeitung“**
 - Erfordern unbedingt praktische Erfahrungen
 - Sollen selbständige Projektumsetzung vermitteln
 - Besitzen i.d.R. > 40 Teilnehmer
 - Sollen moderne, digitale Messtechnik behandeln
 - Sollen Anwendung von LabVIEW mit realer Datenaufnahme erlauben

 - **Vorhandene klassische Laborpraktikums-Versuche**
 - Sind aufgrund Kosten und Raumaufwand nur einzeln vorhanden
 - Bieten wenig Raum für freie Gestaltung
 - Sind oft technisch überholt
- ➔ Lernziele mit vorhandenen Konzepten und Ressourcen nicht erreichbar



Lösungsansatz Lehreinsatz

▪ Konzept „Freies Praktikum“

- Arbeit in **Kleingruppen** ca. 2-3 Teilnehmer
- Verwendung mit **eigenen PCs/Notebooks**
- Nach angeleiteter Einarbeitung
freie Umsetzung von Messtechnik-Projekten



▪ Anforderungen

- Aufbauten kompakt → transportabel
- Preiswert → größere Anzahl beschaffbar
- Steuerung mit LabVIEW Studentenlizenz → mit eigenen PCs nutzbar
- Robust → zuverlässige Erfolgserlebnisse
- Vielseitig → kreative Experimente möglich

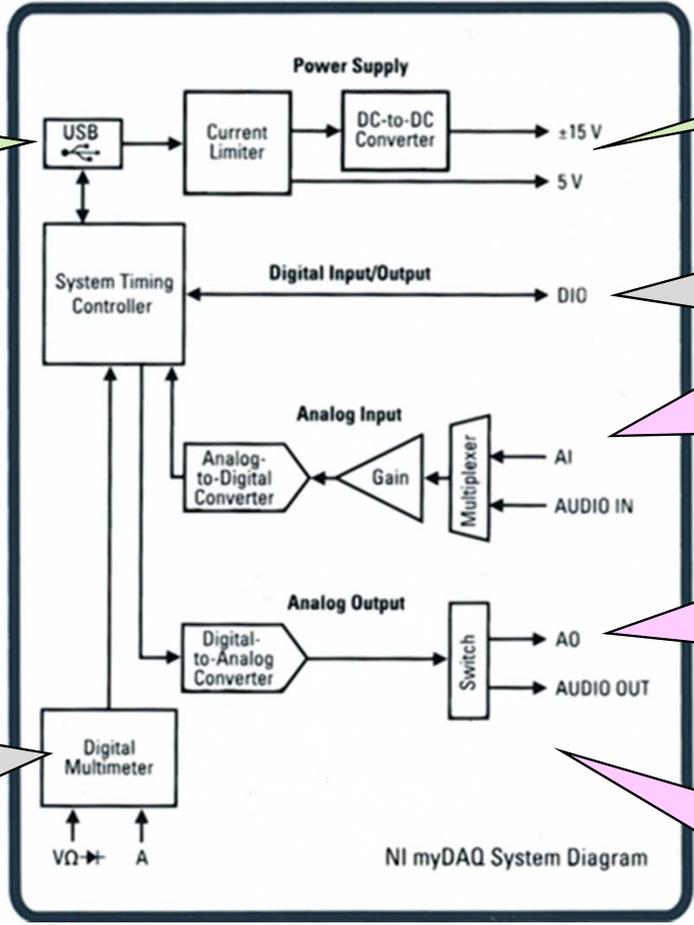
Ausrüstung für den Lehreinsatz



Der NI myDAQ



USB
(bus powered)



±15 V: Opamps
+5 V: Sensoren

8 DIO / Counter
Frequenzmessung möglich

2 ADC 16 Bit @ 200 kHz
±2 V / ±10 V differential inputs

2 DAC 16 Bit @ 200 kHz
±10 V @ 2mA

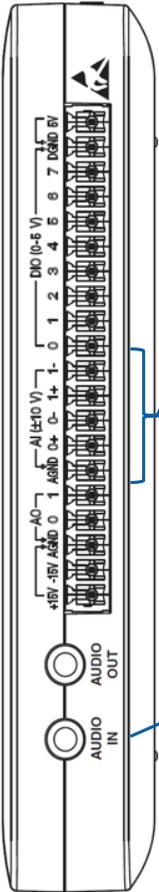
Stereo Audio in/out
w supply circuit for electrete mics

Multimeter
I/U/R

NI myDAQ System Diagram



Anschlüsse NI myDAQ



■ ADC-Eingänge AI0±, AI1±

- Galvanisch gekoppelt, differentiell
- Max. 200 kHz Sampling-Rate
- 0..400 kHz analoge Bandbreite (Alias-Effekt!)
- Messbereich $\pm 2V$, $\pm 10V$
- 16 Bit $\rightarrow LSB = 0,06 \text{ mV}$ (bei $\pm 2V$ Messber.)
- Fehler ca. 5 mV (typ.), 9 mV (max.)

■ Audio In (Stereo)

- Kapazitiv gekoppelt, gemeinsame Masse, $\pm 2V$
- 1,5 .. 400 kHz analoge Bandbreite
- Speiseschaltung für Electret-Mikrofone

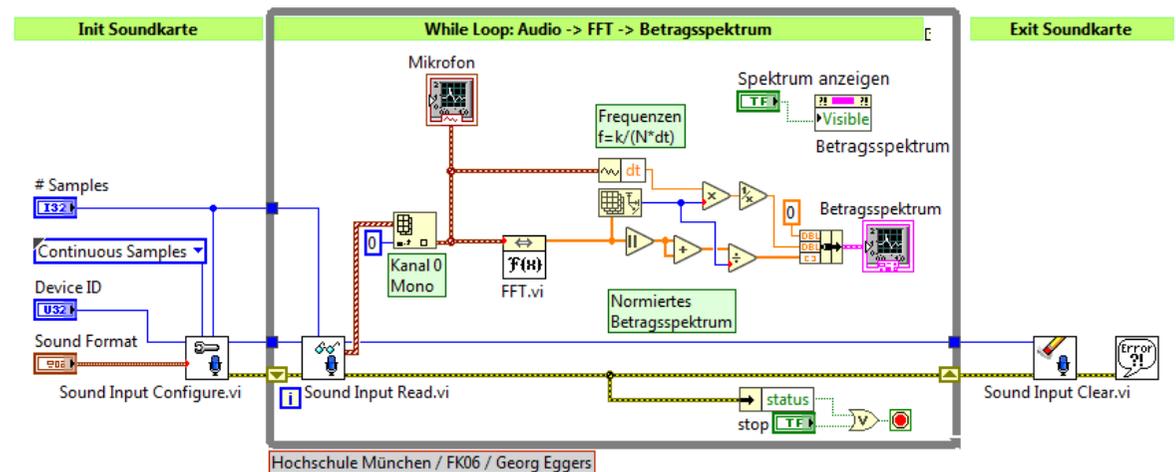
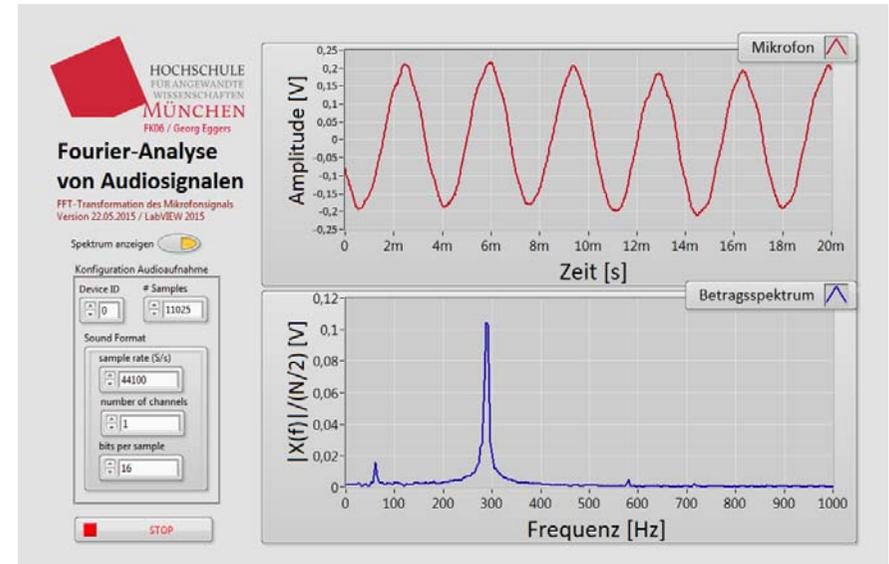


Projekt 1: DFT akustischer Signale



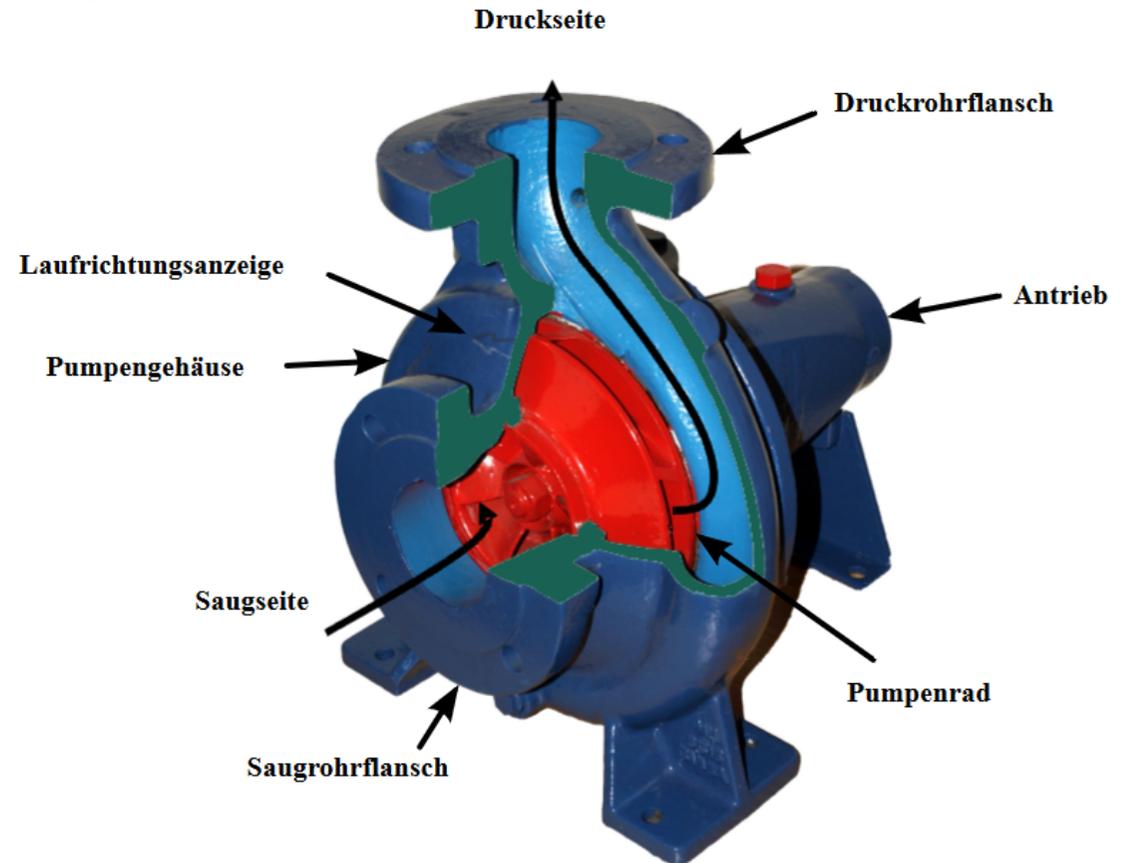
DFT von akustischen Signalen

- Signalquelle
 - PC-Soundkarte
 - myDAQ-Audio-Eingang
 - WAV-Soundfiles
- Verarbeitung
 - Berechnung Spektrum per Fast-Fourier-Transformation



Beispiel: Kavitation Kreiselpumpe

- Kavitation:
 - Dampfgefüllte Blasen in Flüssigkeit
 - Bildung bei Unterschreitung des Dampfdrucks des Mediums
 - Implosion der Blasen kann Pumpenteile verschleifen
 - Hörbar als rasselndes Geräusch



Beispiel: Kavitation Kreiselpumpe

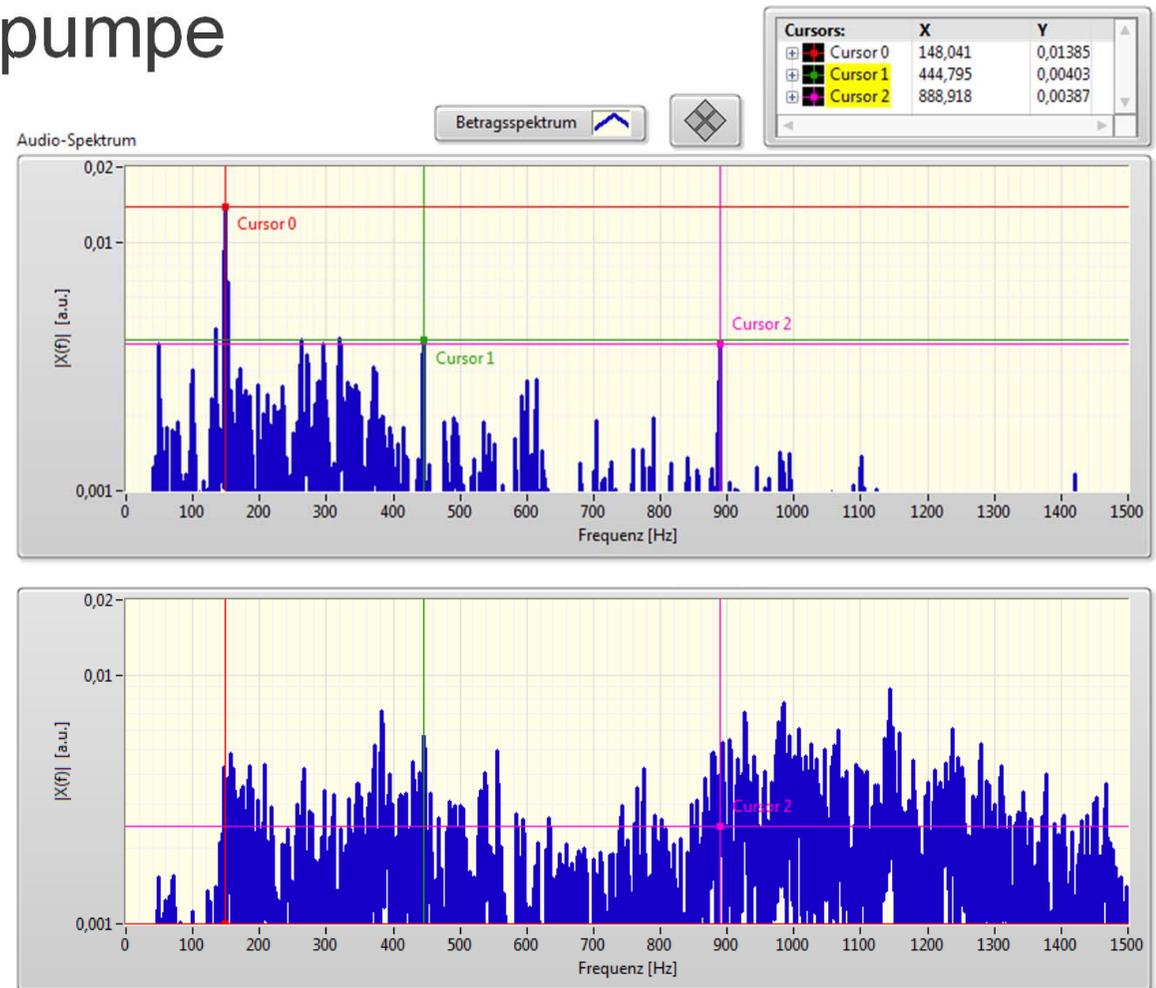
- Regulärer Betrieb
 - Feste Rotationsfrequenz und Oberwellen



- Kavitation
 - Nichtdeterministisches Rauschen

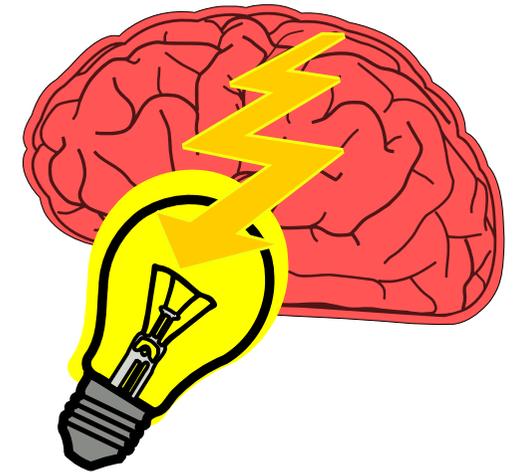


- Aufgabe:
 - Automatisierung der Unterscheidung



DFT von akustischen Signalen: Lernziele

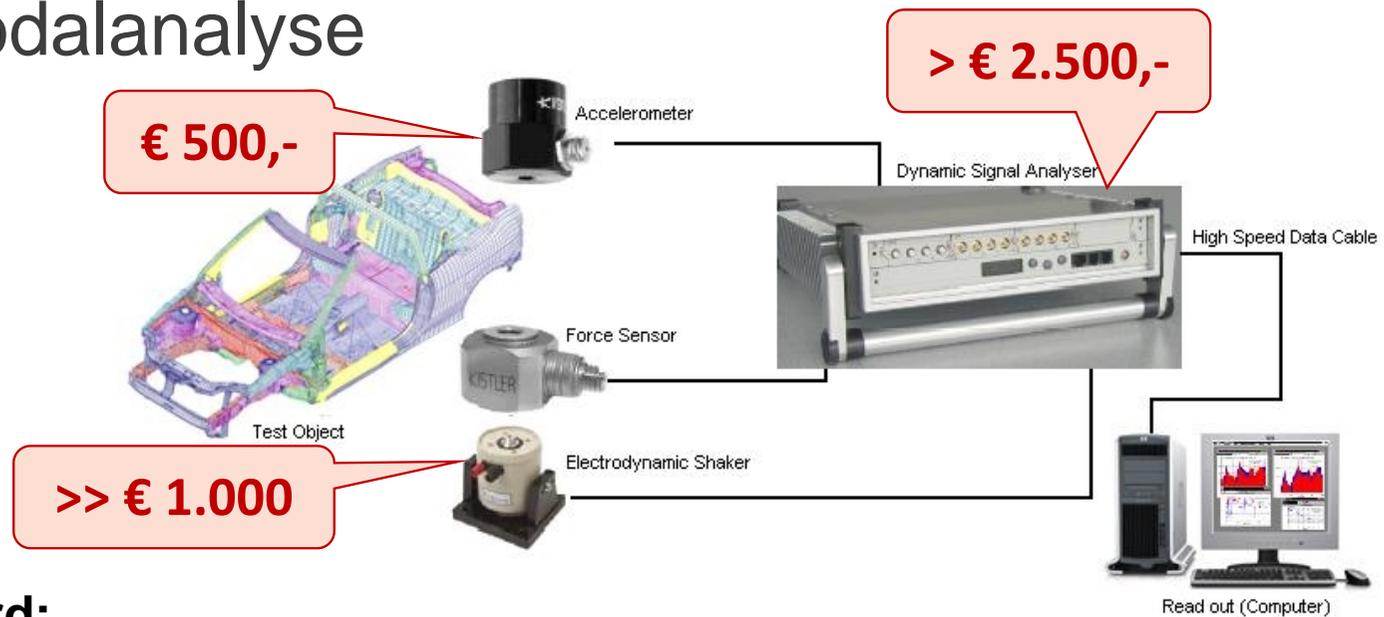
- Form des DFT-Spektrums
 - Zuordnung Spektralindizes k zu Frequenzen: $f(k) = k \frac{f_s}{N}$
 - Auswirkung von Samplingfrequenz f_s , Messwertzahl N
 - Umrechnung der komplexen Spektren in Amplitude, Leistung
- Typische Spektren verschiedener Geräusche
 - Sinusschwingung: Holzpfeife, Stimmgabel
 - Oberwellen: Metallpfeife, Stimme
 - Nichtdeterministische Signale: Rauschen
- Anwendung zur Maschinenüberwachung
 - Automatisierte Auswertung von Spektren



Projekt 2: Einfache Modalanalyse



Industrielle Modalanalyse

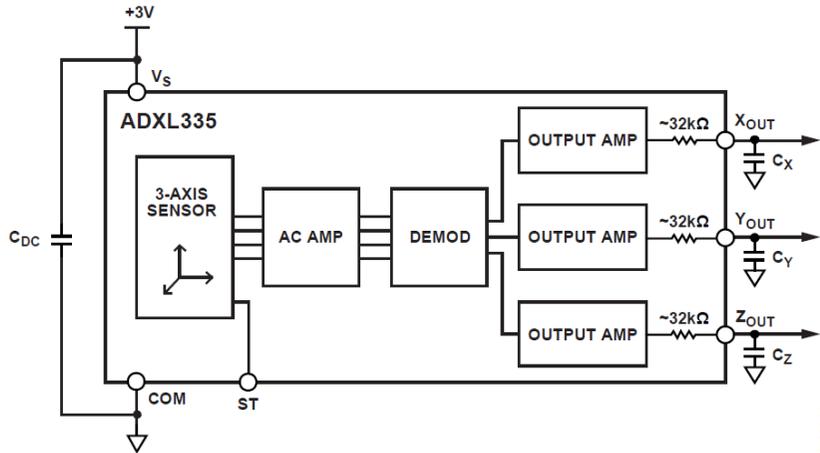


Industriestandard:

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

Industrie-Messtechnik zur Modalanalyse ist kostspielig!

Mikromechanische a-Sensoren: Low End



Ca. € 2,-
Incl. MWSt.

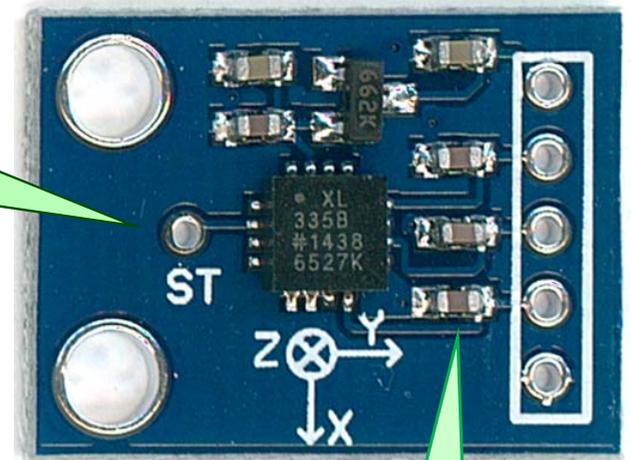


Abb: Analog Devices Inc.

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 $1,6 \text{ kHz (x,y) / } 0,5 \text{ kHz (z)}$
- mit Spannungsregler \rightarrow 5V-Versorgung myDAQ



Kondensatoren entfernen für volle Bandbreite

Mikromechanische a-Sensoren: High End

- Analog Devices produziert a-Sensor-ICs mit
 - hoher Bandbreite
 - großem a -Messbereich

Typ	a-max	Bandbreite	Preis 1000+
ADXL 1005	100 g	24 kHz	\$ 40
ADXL 1004	500 g	24 kHz	\$ 36
ADXL 1001	100 g	11 kHz	\$ 30
Evalboard ADXL 1001	100 g	11 kHz	\$ 80 (1)

<https://www.analog.com/en/parametricsearch/11175>

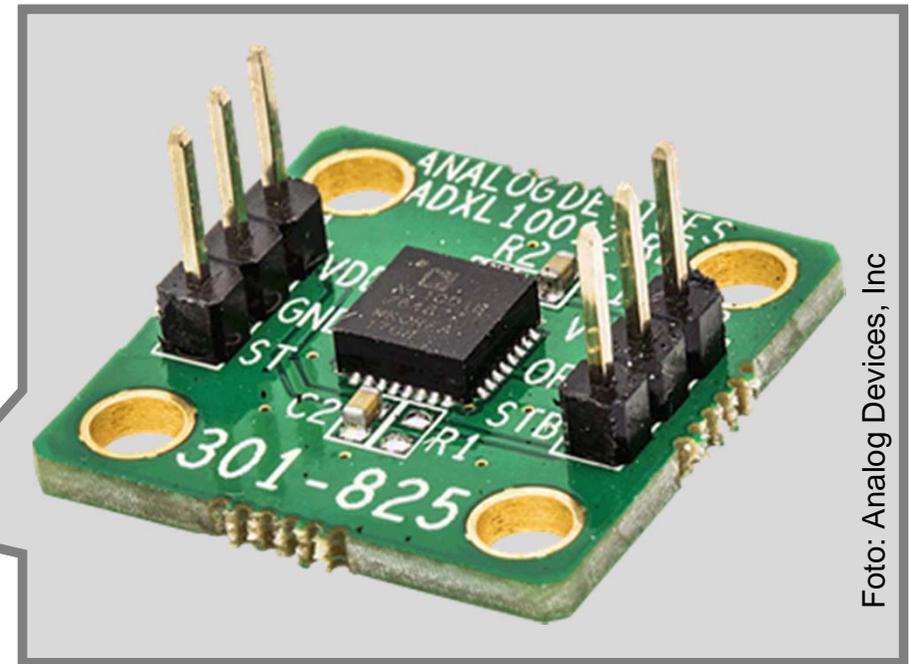
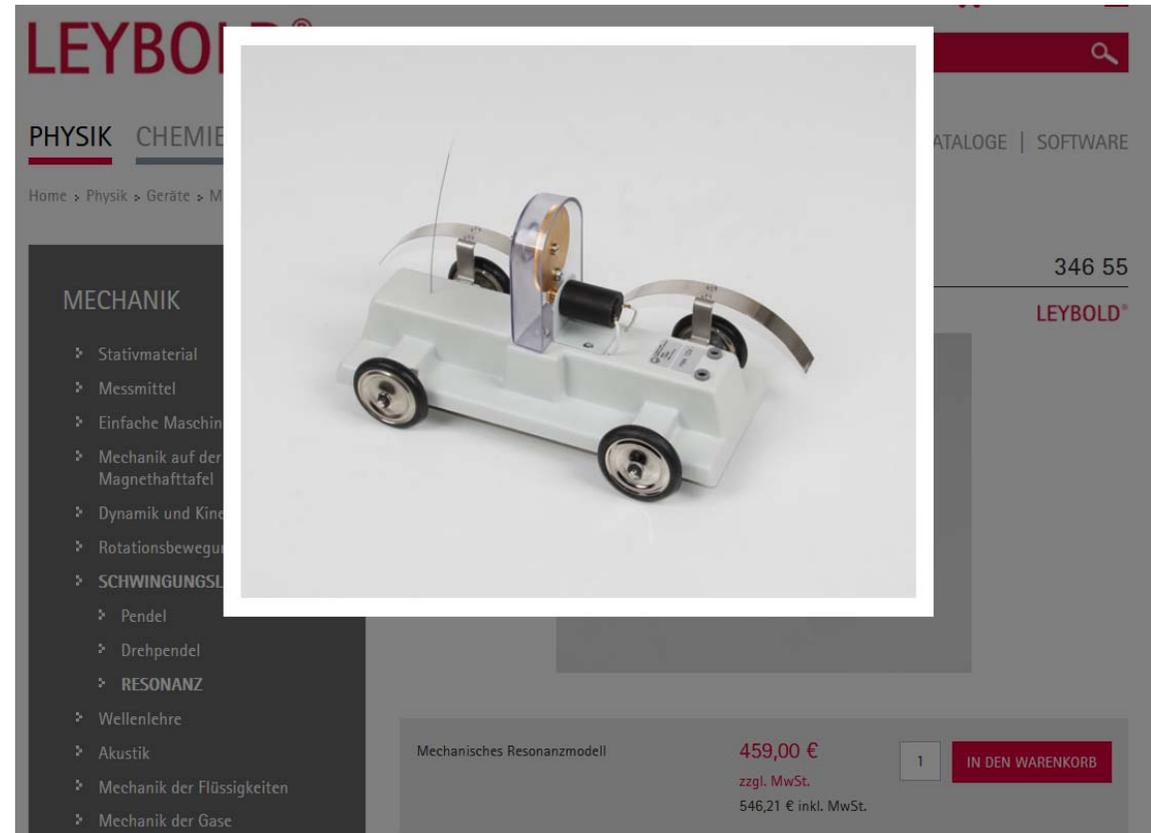


Foto: Analog Devices, Inc

Low-Budget Modalanalyse: Leybold „Resonanzauto“

- „Mechanisches Resonanzmodell“
 - „Anschauliche Demonstration von Resonanzerscheinungen“
 - Federndes Chassis mit elastischen Kotflügeln und Antenne
 - DC-Motor mit Unwuchtscheibe
 - Beobachtung der Resonanzfrequenzen einzelner Fahrzeugteile
 - **Keine Sensorik**
 - **Teuer**



<https://www.leybold-shop.de/physik/geraete/mechanik/schwingungslehre/resonanz/mechanisches-resonanzmodell-34655.html>

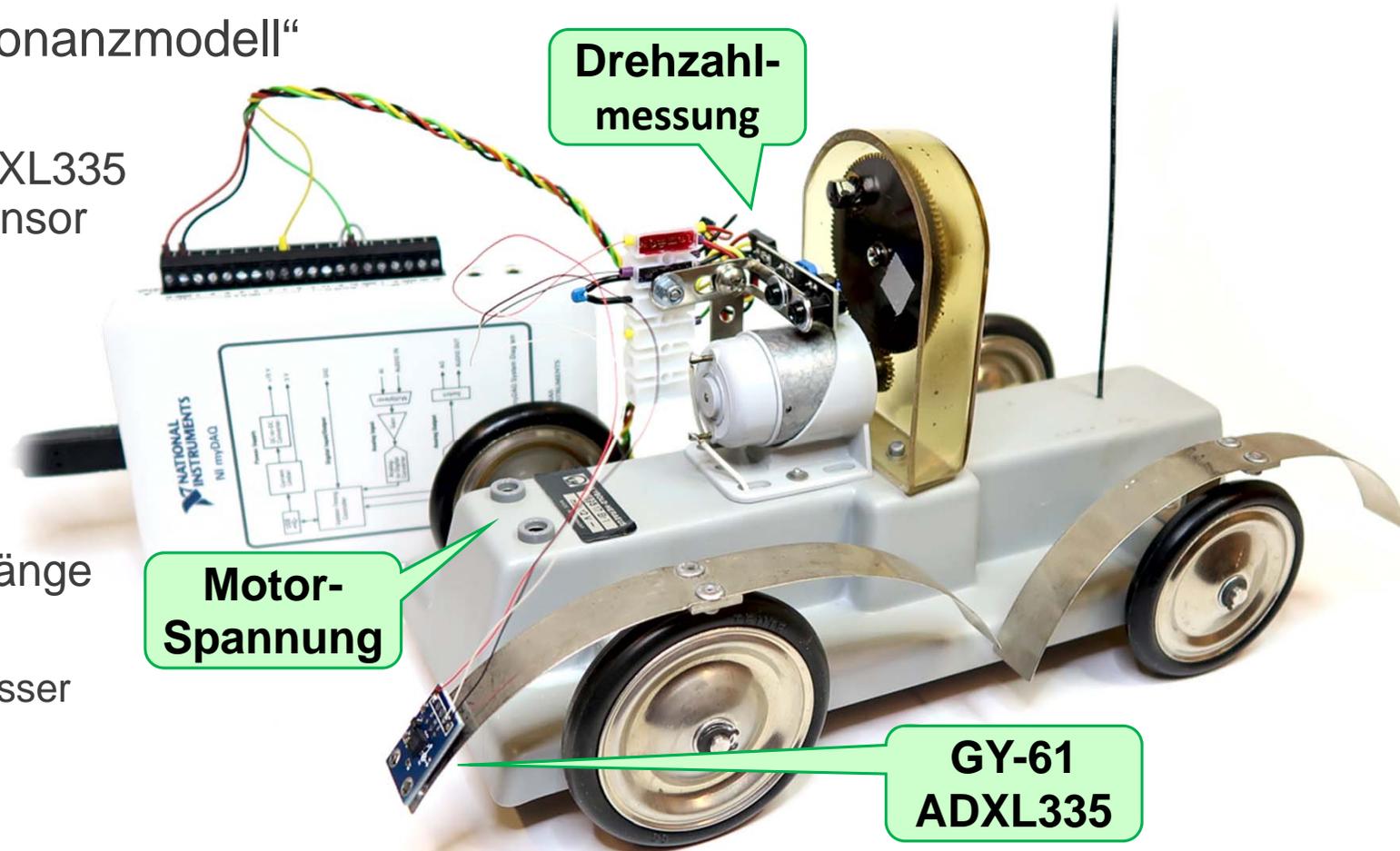
Low-Budget Modalanalyse: „Resonanzauto 4.0“

- „Mechanisches Resonanzmodell“

- Montage GY-61 ADXL335 Beschleunigungssensor am „Kotflügel“

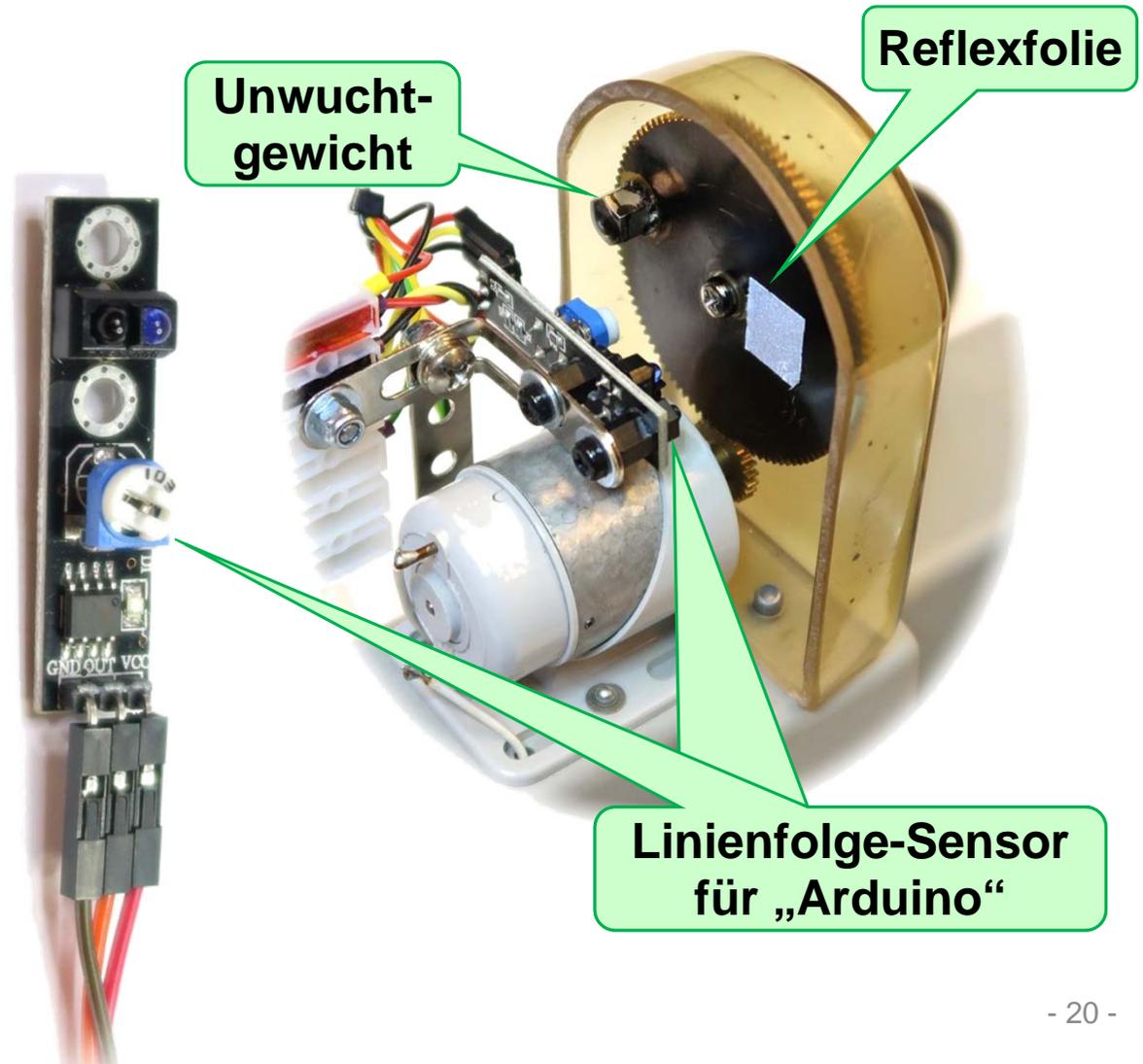
- Drehzahlmesser an Unwuchtscheibe

- myDAQ-Signaleingänge
 - AI0: A-Sensor
 - DIO1: Drehzahlmesser



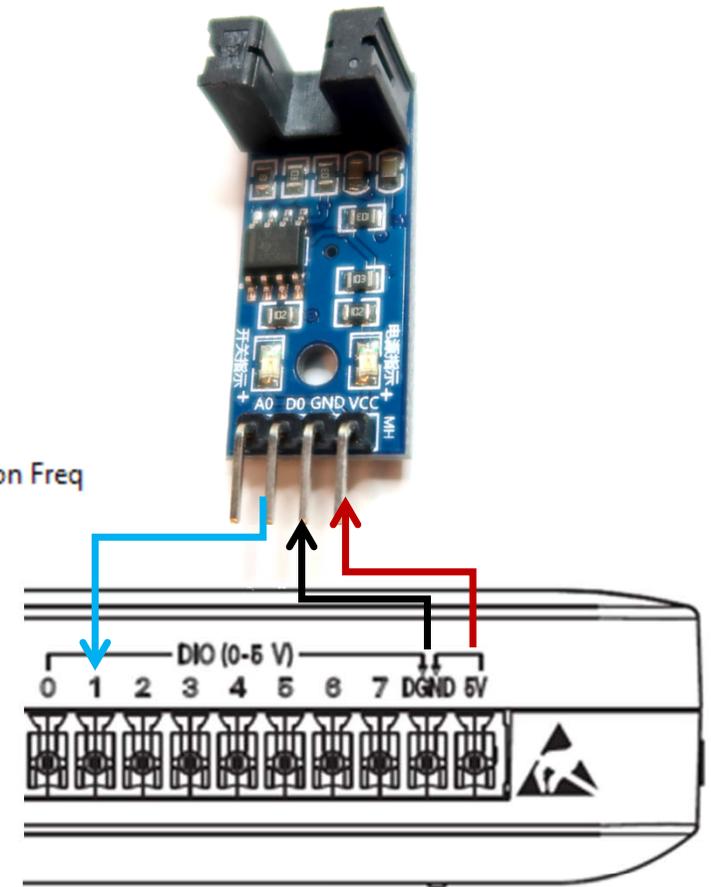
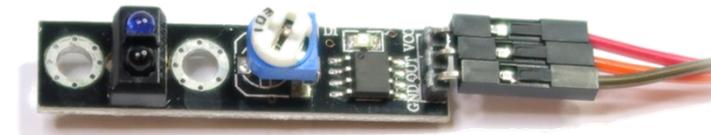
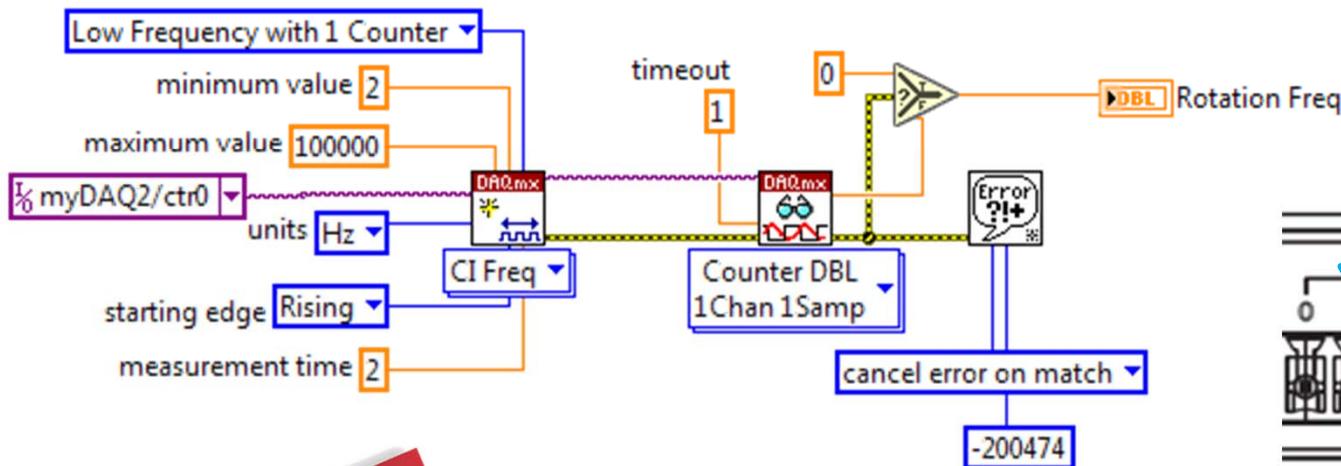
Low-Budget Modalanalyse: „Resonanzauto 4.0“

- Drehzahlmessung:
 - Montage GY-61 ADXL335 Beschleunigungssensor am „Kotflügel“
 - Drehzahlmesser an Unwuchtscheibe mit „Linienfolger“
 - myDAQ-Signaleingänge
 - AI0: A-Sensor
 - DIO1: Drehzahlmesser



Frequenzmessung mit DIOs des myDAQ

- DIO1-Eingang (ctr0) als Counter
 - Direkt anschließbar an „Line-Tracker“, Gabellichtschranken, digitale Hall-Sensoren, etc.
 - Direkte Messung der Frequenz in Hz
 - Error-Handling für $f = 0$ erforderlich

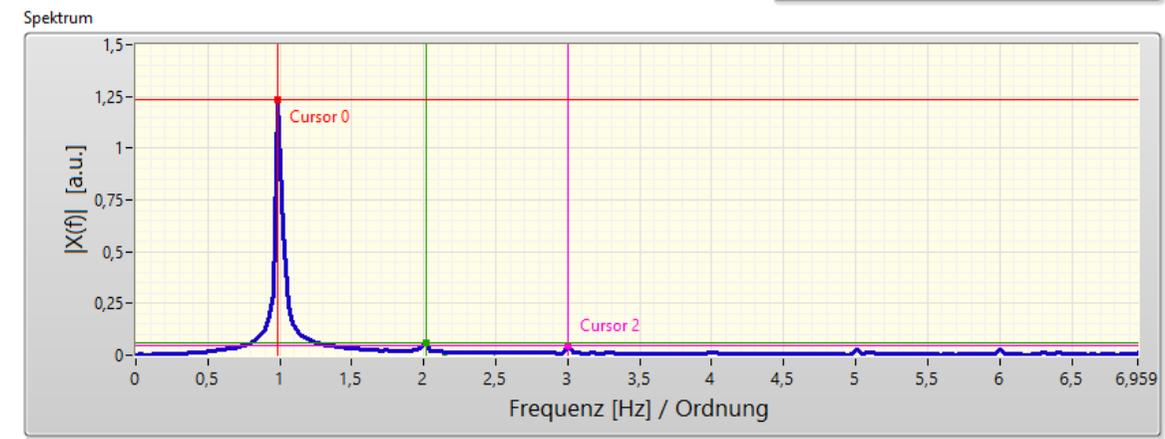
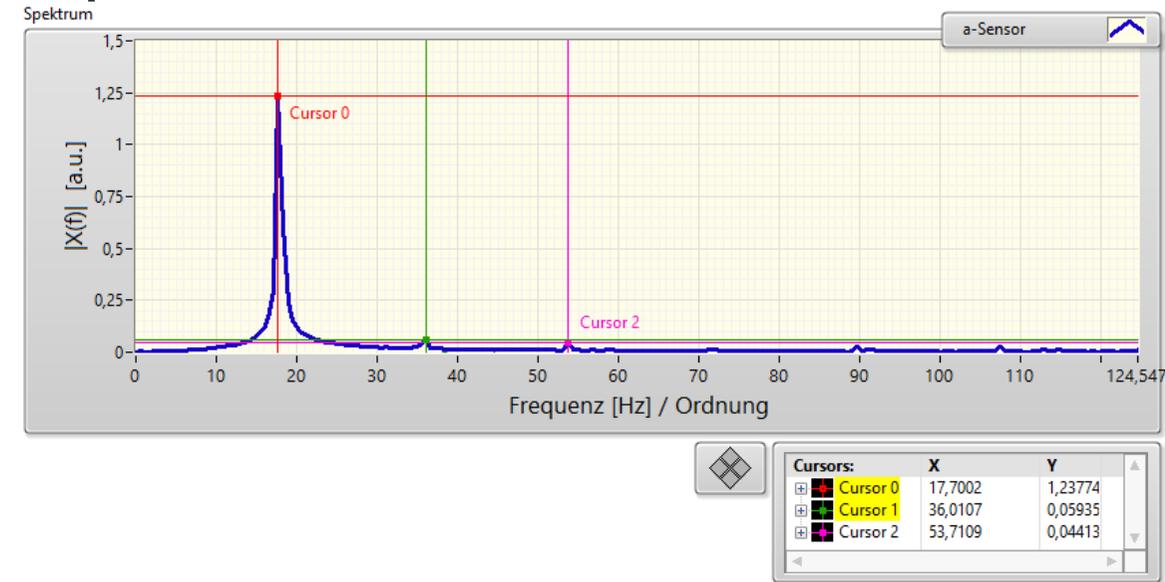
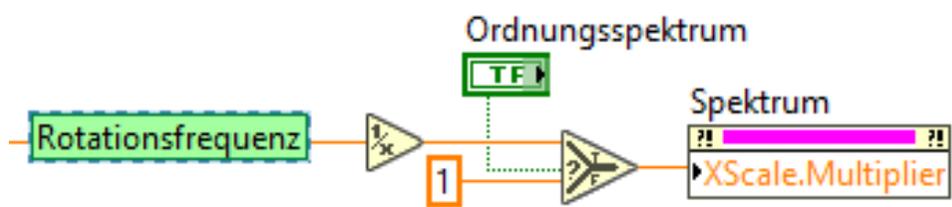


Modalanalyse: Interpretation Spektren

- Frequenzinterpretation
 - Alle Schwingungen durch Rotation der Unwuchtscheibe mit f_{Motor}
 - Umrechnung der Frequenzen in Ordnungsfrequenzen

$$f_{\text{Ordnung}} = \frac{f}{f_{\text{Motor}}}$$

- Darstellung als Ordnungsspektrum per „Scale Multiplier“



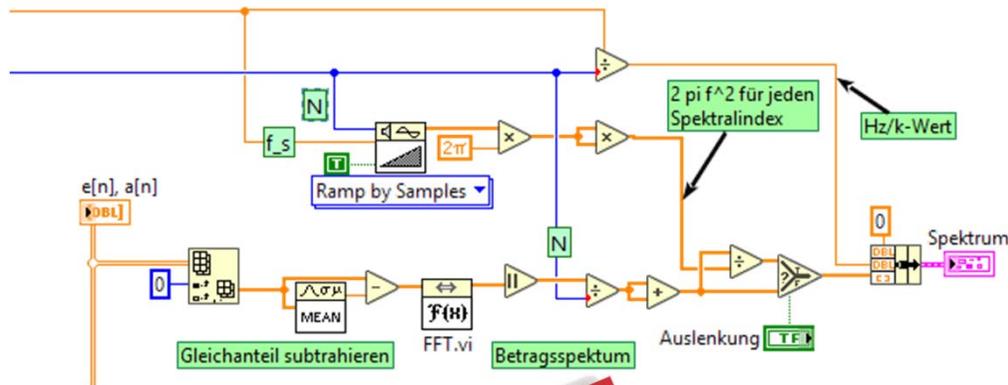
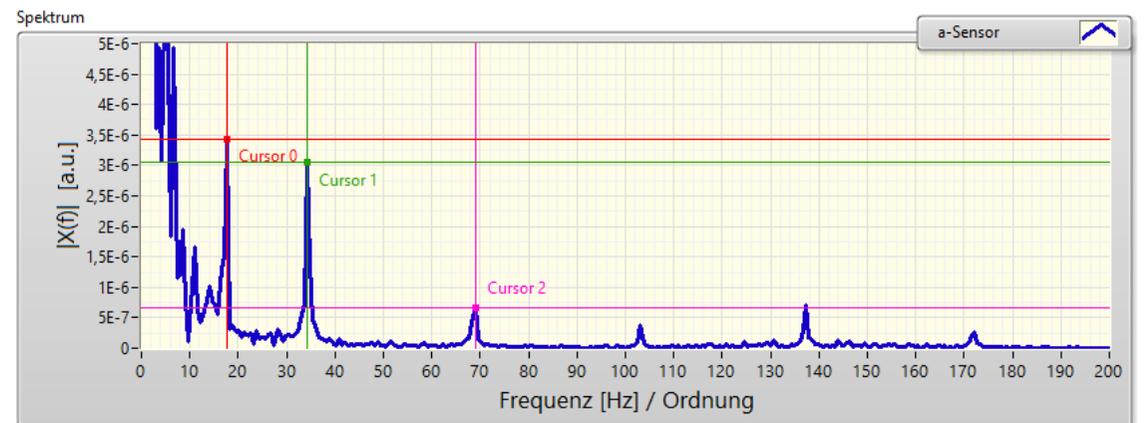
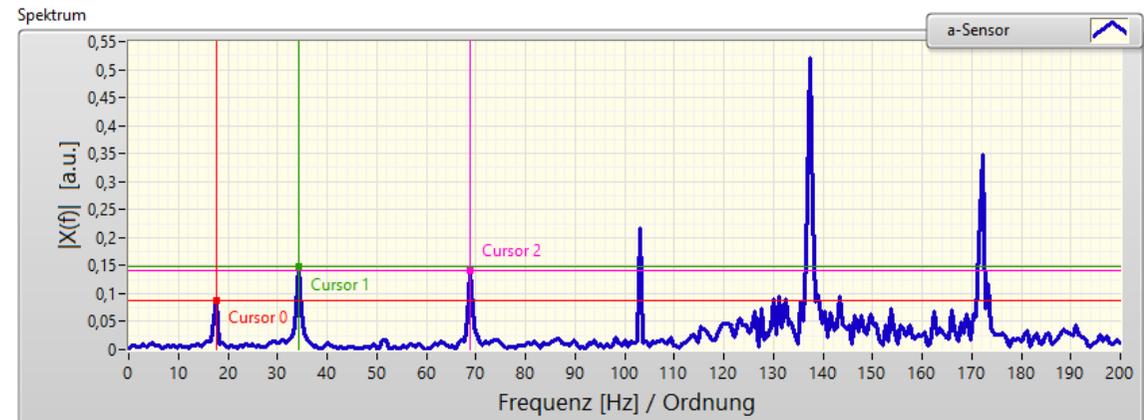
Modalanalyse: Interpretation Spektren

Amplitudeninterpretation

- Auslenkung: $x(t) = \hat{x} \sin(\omega t)$
- Geschwindigkeit:

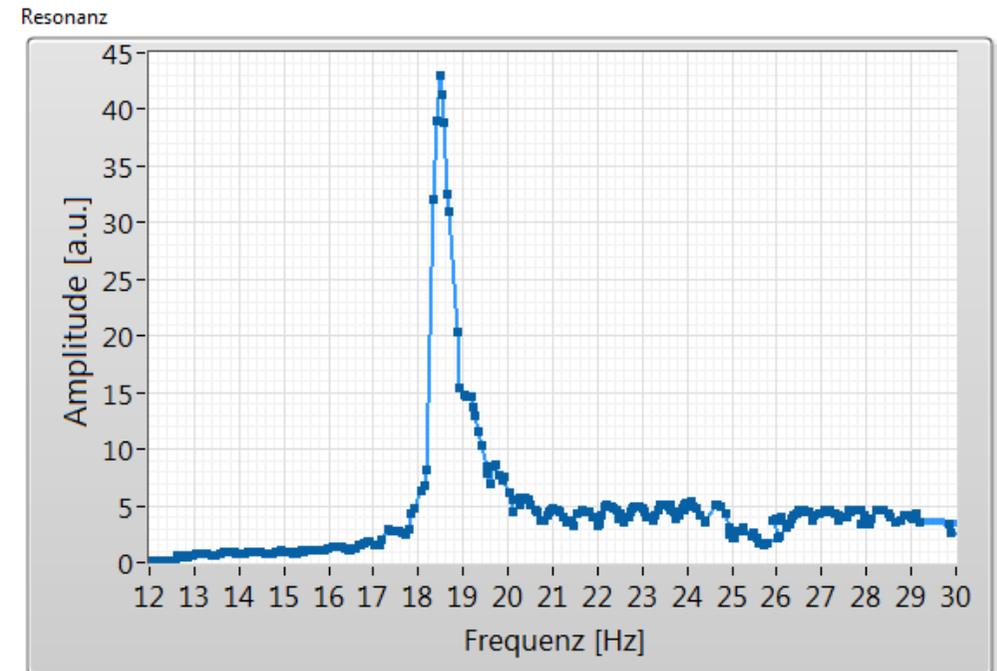
$$v(t) = \frac{d}{dt} x(t) = \omega \hat{x} \cos(\omega t)$$
- Beschleunigung:

$$a(t) = \frac{d}{dt} v(t) = -\omega^2 \hat{x} \sin(\omega t)$$
- Gemessen: $\hat{a} = \omega^2 \hat{x}$
- $\rightarrow \hat{x} = \frac{\hat{a}}{\omega^2} = \frac{\hat{a}}{(2\pi f)^2}$



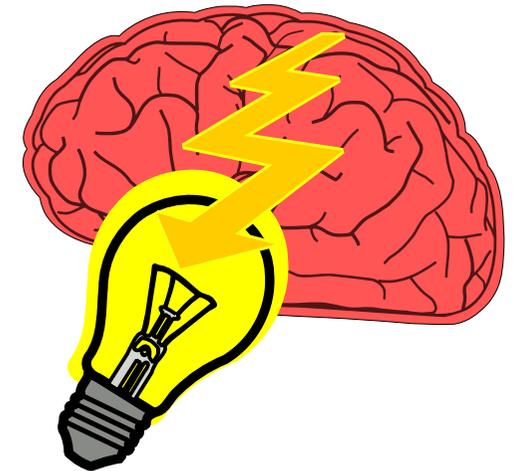
Modalanalyse: Automatisierte Resonanzmessung

- Automatisierte Messung
 - Steuerung der Motorspannung U_{Motor} durch programmierbares Netzteil
 - Programmierung eines einfachen Mitlauffilters (Bandpass mit Mittenfrequenz f_{Motor})
 - Auftragung $\hat{a}(f_{Motor})$



Modalanalyse: Lernziele

- Aufbau und Messparameter
 - Berührungslose Messung der Drehfrequenz
 - Wirkung von Sensormasse und Kabelsteifigkeit
 - Einschwingzeit und Q-Faktor
 - Programmierung Spannungsquelle
- Signalverarbeitung und Auswertung
 - Subtraktion des Signalmittelwerts
 - Umrechnung des Frequenzspektrums ins Ordnungsspektrum
 - Umrechnung Beschleunigung → Geschwindigkeit → Auslenkung
- Anwendung zur Maschinenüberwachung
 - Identifikation von Resonanzen



Projekt 3: Unwucht



Low-Budget „Drehbank“

- „Drehbank“ für 33 €
 - DC-Motor mit Bohrfutter
 - Lünette
 - 6 Holz-Schneideisen
 - Netzteil, Netzkabel

- **Sicherheit?**



100W Mini Drehmaschine Drehbank Drechselbank

Artikelzustand: **Neu**

Stückzahl:

Mehr als 10 verfügbar
12 verkauft / [Bewertung anzeigen](#)

EUR 32,97

[Weiteren Artikel kaufen](#)

[In den Warenkorb](#)

[Auf die Beobachtungsliste](#)

100%
Käuferzufriedenheit

Inlandsversand und
Rücksendung
kostenlos

21 Beobachte

Versand: **KOSTENLOS** Expressversand | [Weitere Details](#)

Artikelstandort: Leipzig, Deutschland

Versand nach: Europa [Ausschlussliste anzeigen](#)

Lieferung: Zwischen **Mi, 24. Okt. und Do, 25. Okt.** bei heutigem
Zahlungseingang

Wählen Sie **Expressversand** und bezahlen Sie noch
heute mit PayPal, um den Artikel bis zum 23. Okt. zu
erhalten.

<https://www.ebay.de/itm/100W-Mini-Drehmaschine-Drehbank-Drechselbank-Drehmei%C3%9Fel-f%C3%BCr-Holz-SchleiferPolier/292474341242>

Low-Budget „Drehbank“: Sicherheit

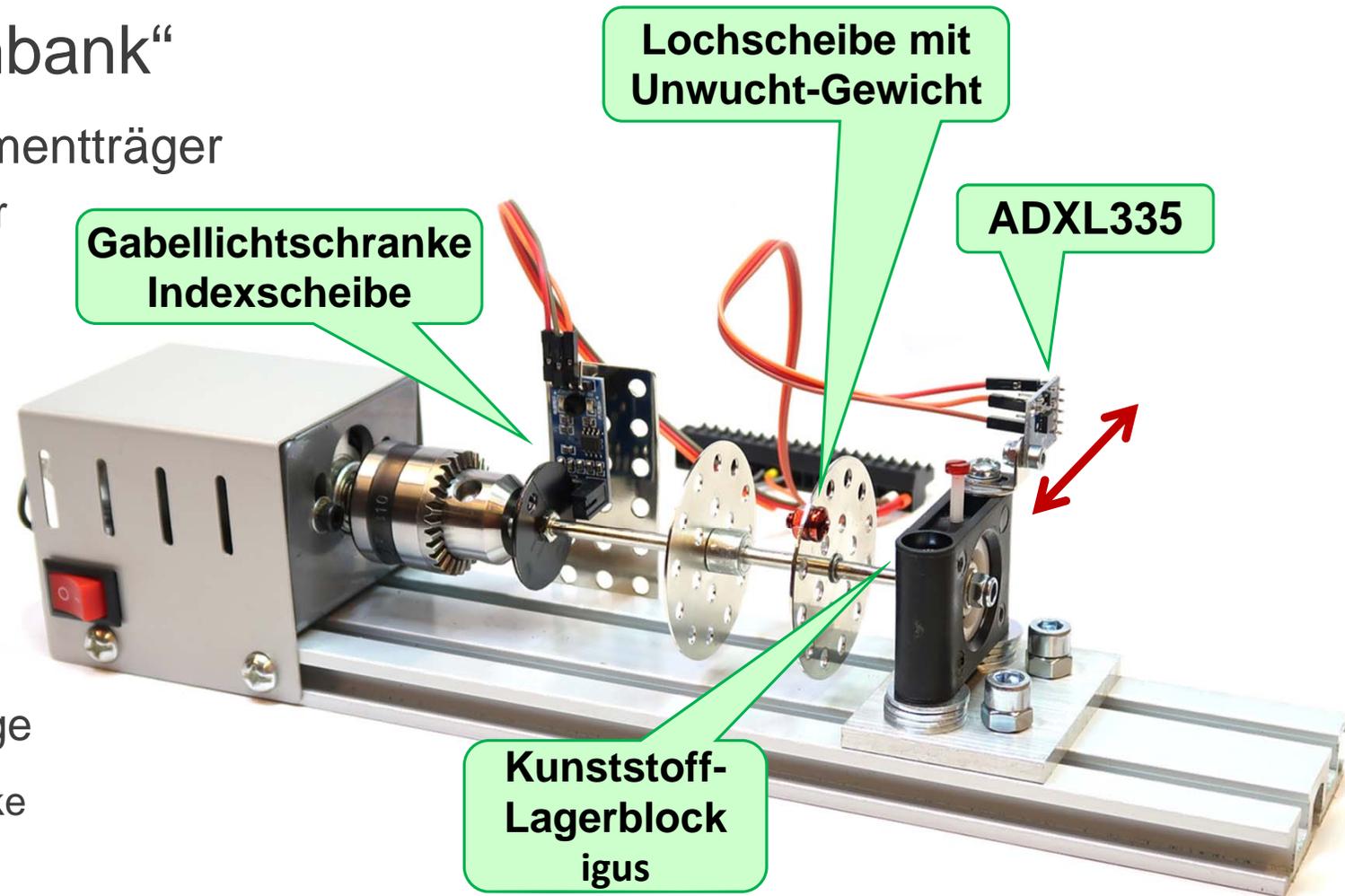
- „Drahtlose Schutz Erde“
 - 2-pol Eurostecker auf 3-pol Kaltgerätestecker
 - Erhebliches Risiko bei Geräten mit Metallgehäuse
 - Bei Verwendung an PC mit Peripherie vermutlich Totalschaden



<https://www.ebay.de/itm/100W-Mini-Drehmaschine-Drehbank-Drechselbank-Drehmei%C3%9Fel-f%C3%BCr-Holz-SchleiferPolier/292474341242>

Low-Budget „Drehbank“

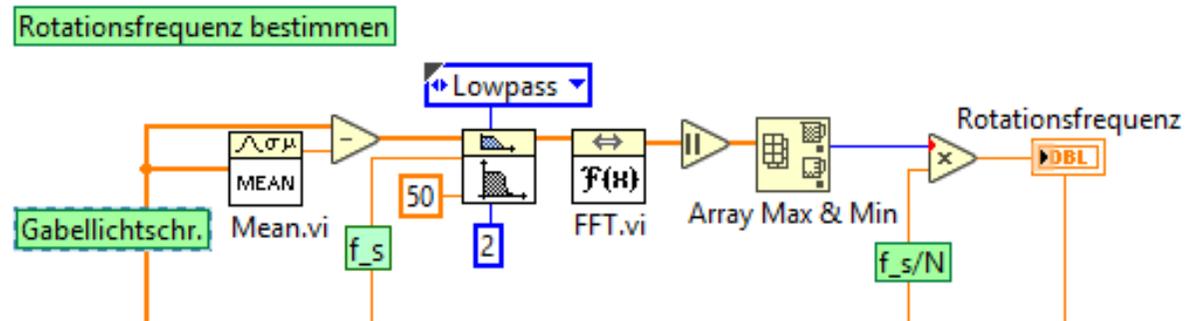
- „Drehbank“ als Experimentträger
 - Gabellichtschranke zur Drehzahlmessung und zur Synchronisierung
 - Kunststoff-Lagerblock
 - ADXL335 a-Sensor
Messung in Querrichtung
 - Unwucht-Scheiben
 - myDAQ-Signaleingänge
 - AI0: Gabellichtschranke
 - AI1: a-Sensor



Low-Budget: „Drehbank“

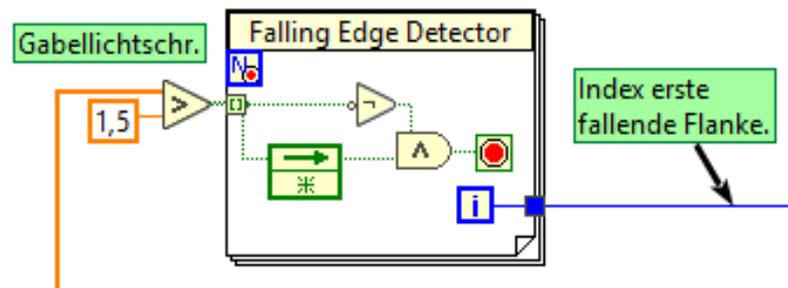
▪ Drehzahlmessung

- Auswertung des Signals der Gabellichtschranke
 - Subtraktion Gleichanteil
 - Tiefpass-Filterung
 - Index k_{max} des Maximalwerts des Betragsspektrums bestimmen
 - $f_{Rot} = k_{max} \frac{f_s}{N}$



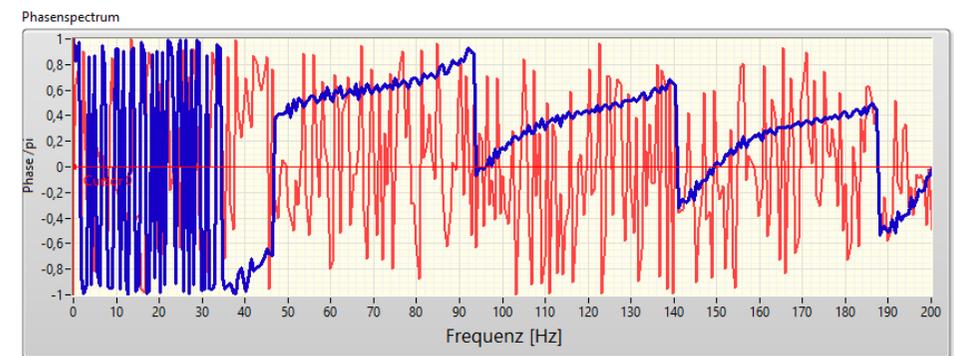
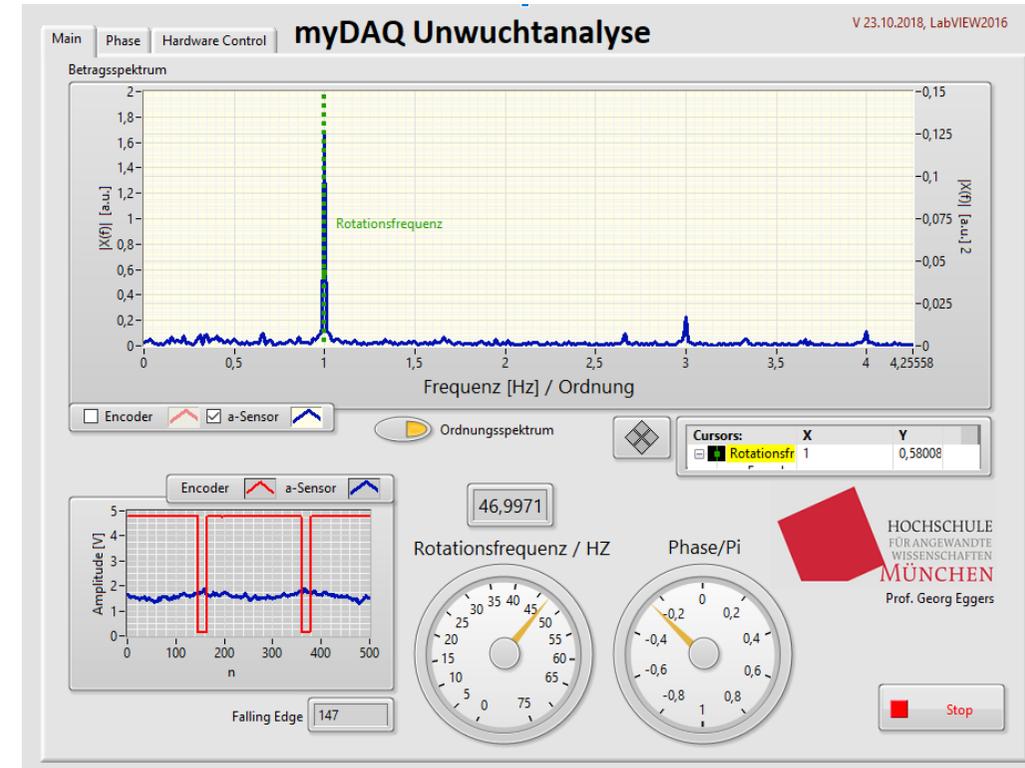
▪ Synchronisierung

- Flankensuche im Signal der Gabellichtschranke;
- Verwurf des a-Sensor-Signals vor Flanke



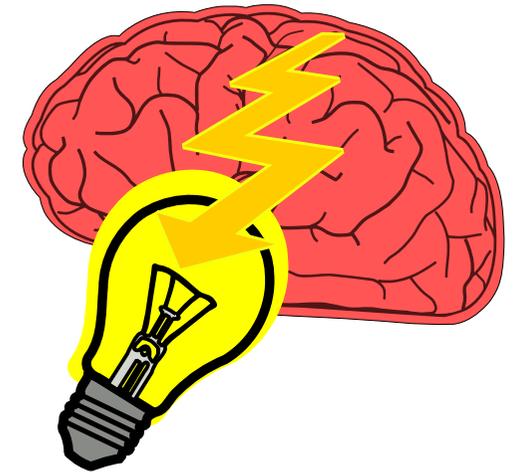
Unwuchtmessung

- Drehzahlmessung
 - Auswertung des Signals der Gabellichtschranke
 - Markierung im Spektrum
- Phasenmessung
 - Bestimmung Phasenwert bei Rotationsfrequenz
 - Abhängigkeit von
 - Relativer Orientierung Unwuchtgewicht zu Indexscheibe
 - Drehzahl



Unwucht-Messung: Lernziele

- Aufbau und Messparameter
 - Geeignete Wahl von Sensorort und Ausrichtung
- Signalverarbeitung und Auswertung
 - Bestimmung der Rotationsfrequenz
 - Synchronisierung der Signalaufnahme mit der Rotation
 - Berechnung des Winkels im Phasenspektrum für die Rotationsfrequenz
 - Beobachtung des Phasenwinkels für verschiedene Positionen des Unwuchtgewichts und verschiedene Drehzahlen
- Erweiterungsmöglichkeiten:
 - Unwuchten 2. Ordnung

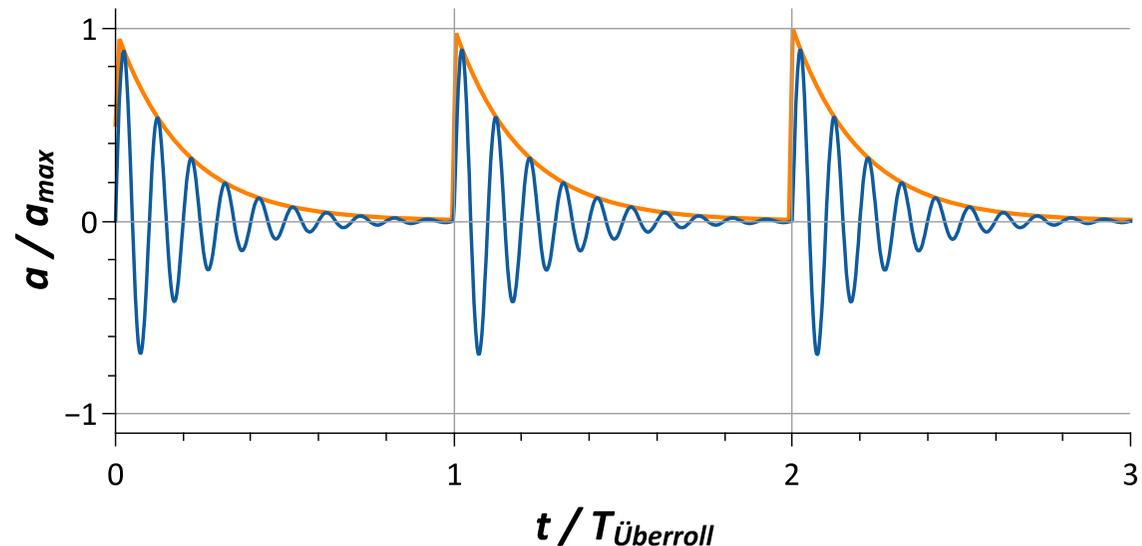
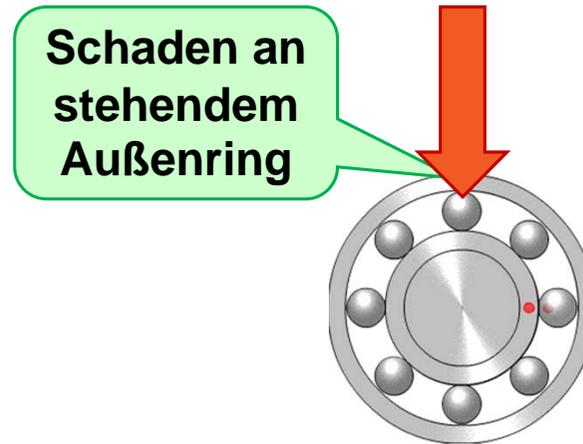


Projekt 4: Verschleißerkennung



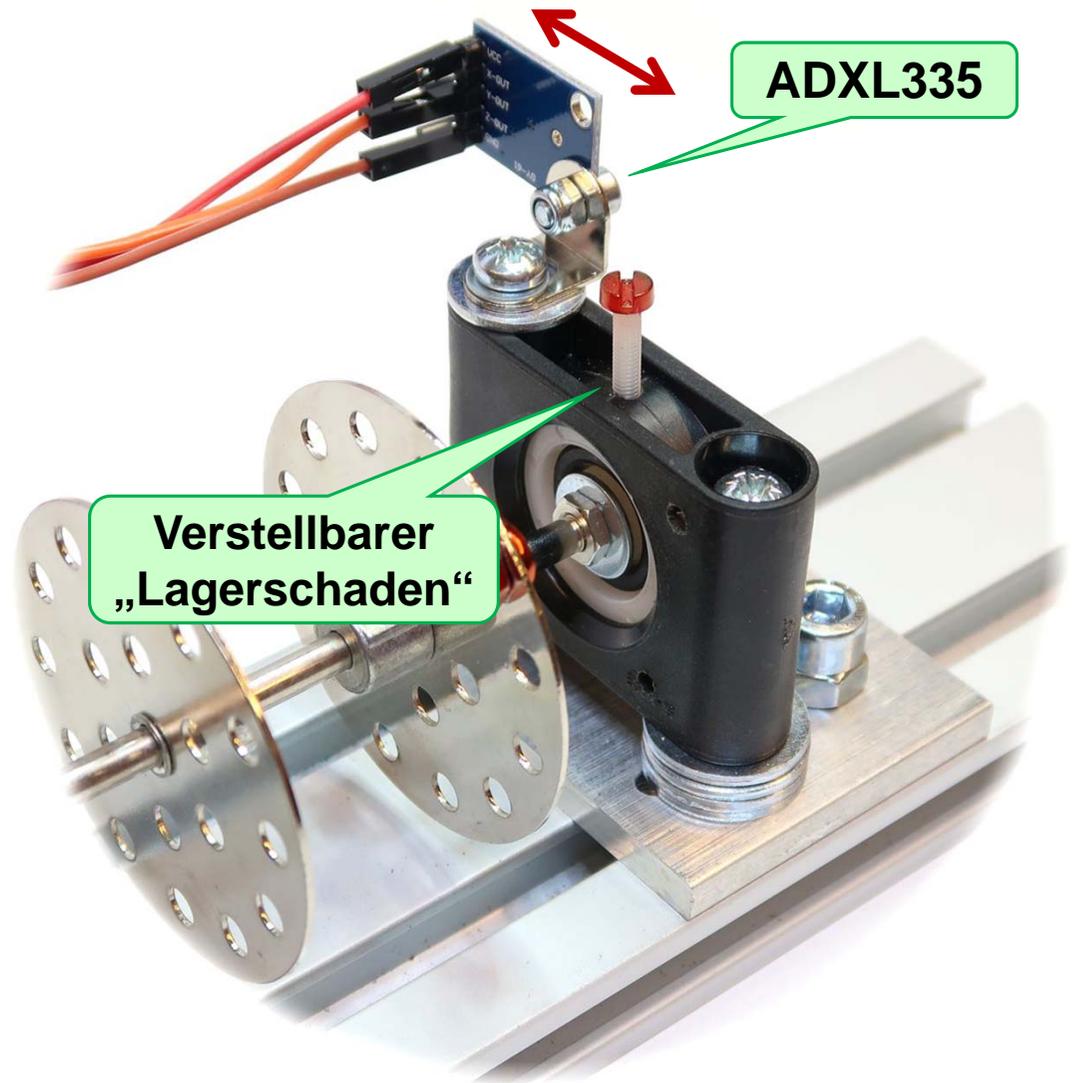
Lagerverschleiß

- Typischer Verschleiß an Kugellagern
 - Beschädigungen der Lagerflächen führen zu Stoßfolgen im Rhythmus des Überrollintervalls $T_{\text{Überroll}}$
 - Überrollfrequenz berechenbar; Beispiel Außenring:
$$f_A = \frac{1}{T_{\text{Überroll}}} = \frac{1}{2} f_{\text{Rot}} \cdot N_K \cdot \left[1 - \frac{d}{D} \cos \Phi \right]$$
 - Parameter oft unbekannt
→ Abzählen der Kugelpassagen bei Drehen von Hand
 - Stöße regen Resonanzen des Aufbaus an



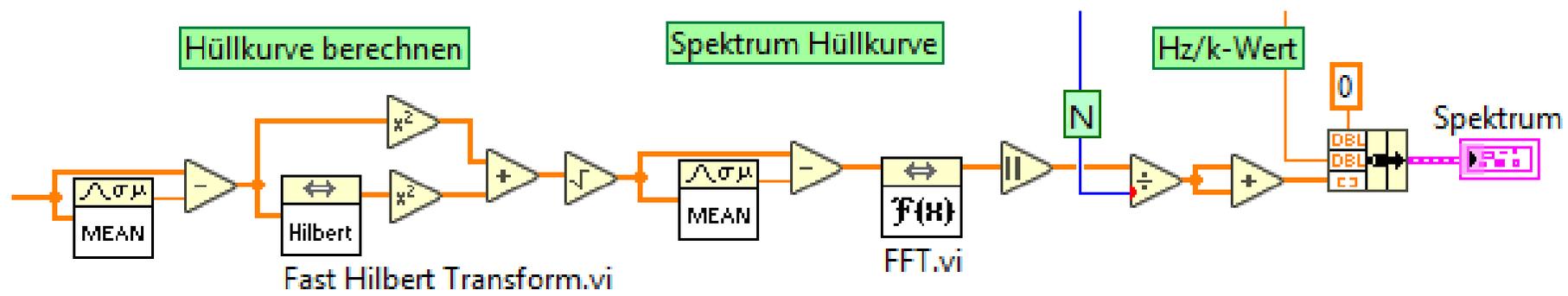
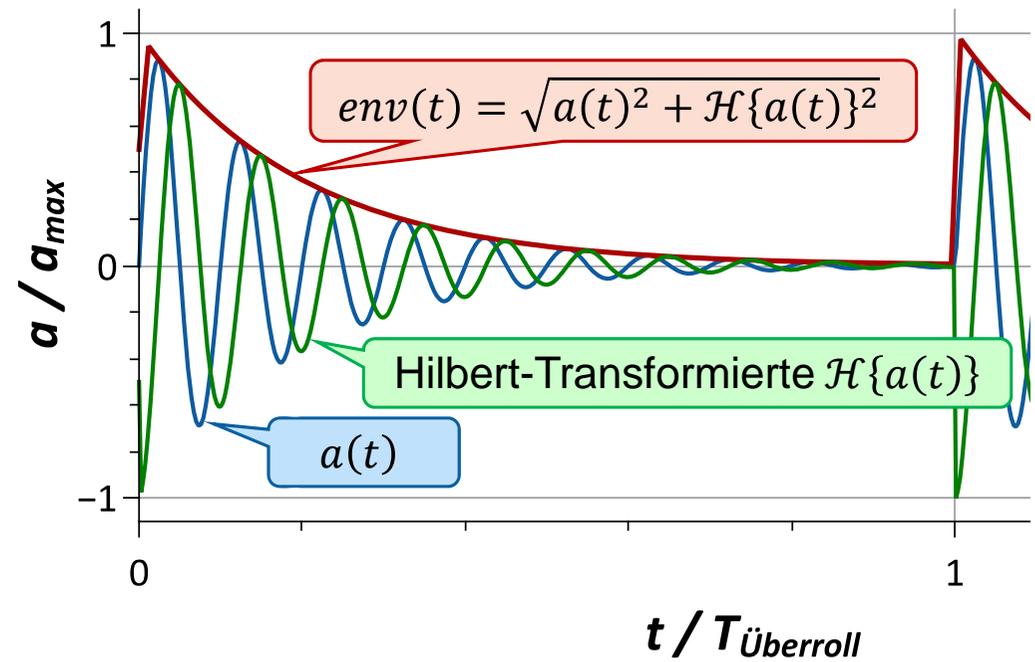
Teststand Lagerverschleiß

- Beschädigung Außen-Laufläche
 - Bei Metall-Lagern schwierig, bei Kunststoff-Lagern sehr einfach herstellbar
- Gewindebohrung durch Laufläche und Halter des zerlegten Lagers
- Verstellbarer „Lagerschaden“ durch Eindrehen einer Kunststoffschraube



Lagerverschleiß

- Auswertung der Einhüllenden
 - Direktes Spektrum $A(f)$ bildet vor allem Moden des Aufbaus ab; besser: Auswertung der Hüllkurve.
 - Berechnung der Einhüllenden $env(t) = \sqrt{a(t)^2 + \mathcal{H}\{a(t)\}^2}$
 - Berechnung des Spektrums $ENV(f) = \mathcal{F}\{env(t)\}$



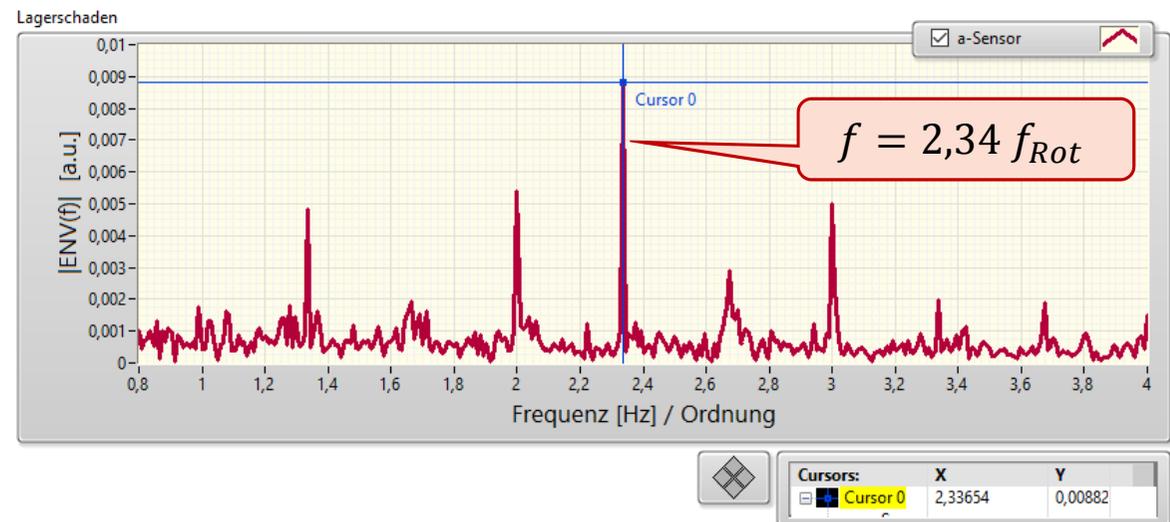
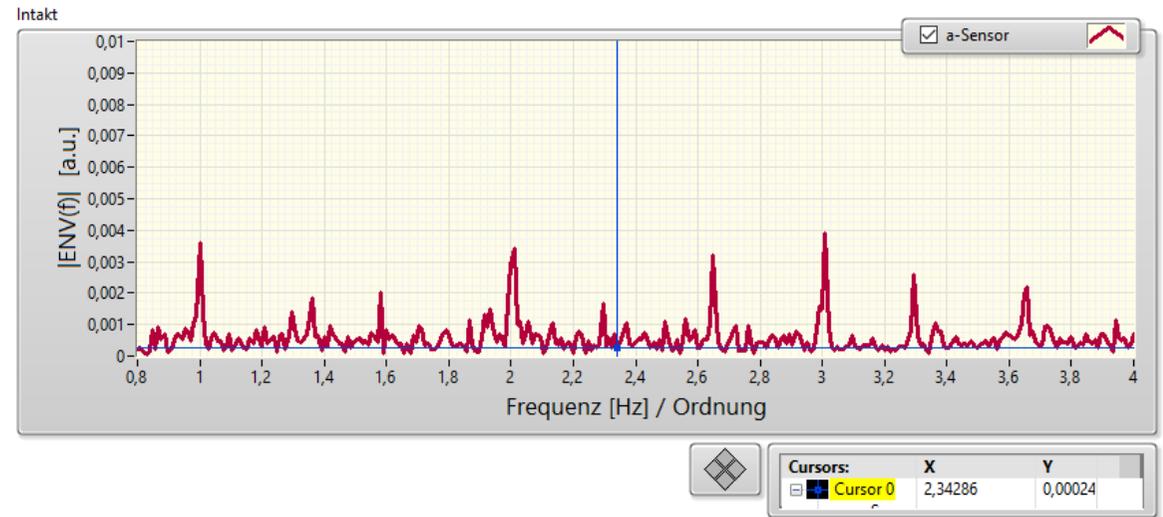
Lagerverschleiß

- Auswertung der Einhüllenden
 - Berechnung der Einhüllenden

$$env(t) = \sqrt{a(t)^2 + \mathcal{H}\{a(t)\}^2}$$
 - Berechnung des Spektrums

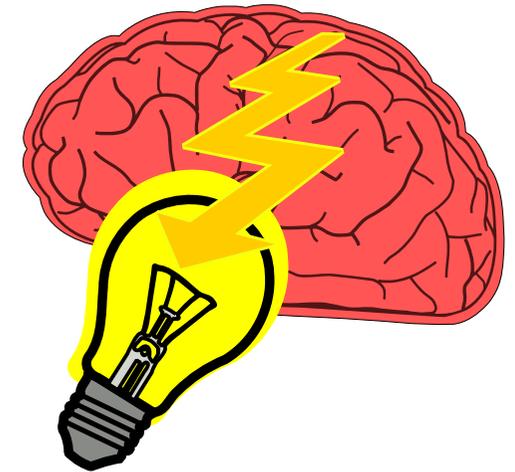
$$ENV(f) = \mathcal{F}\{env(t)\}$$
- Auszählen per Hand: 38 Kugelpassagen / 16 Umdreh.

$$f_A = 2,375 f_{Rot}$$
- Spektrenaufnahme:
 - „Intakt“ (ohne Schraube), oben
 - „Schadhaft“ (mit Schraube), unten



Lagerverschleiß: Lernziele

- Aufbau und Messparameter
 - Geeignete Wahl von Sensorort und Ausrichtung
- Signalverarbeitung und Auswertung
 - Errechnung einer Hüllkurve
 - Bestimmung der zu Erwartenden Kugel-Passierfrequenz
 - Vergleich mit Frequenzlinien im Spektrum

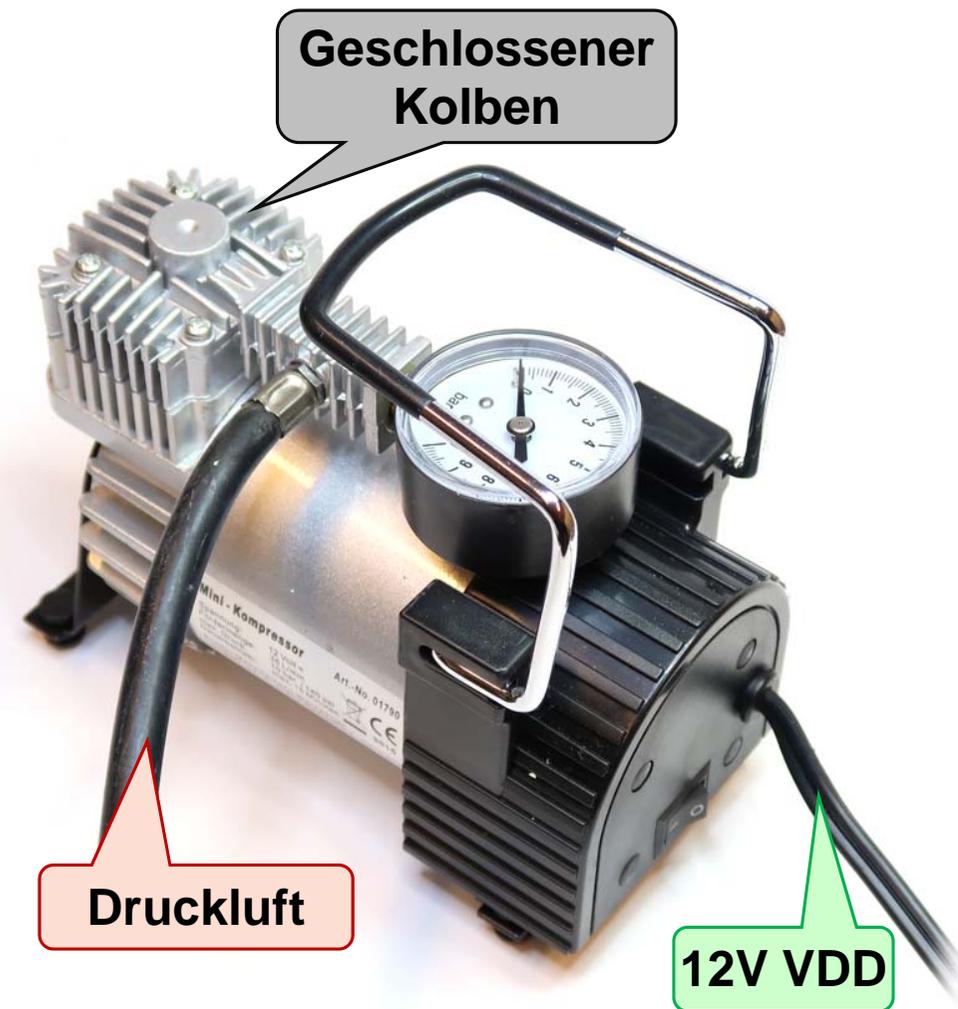


Projekt 5: Betriebsstromanalyse



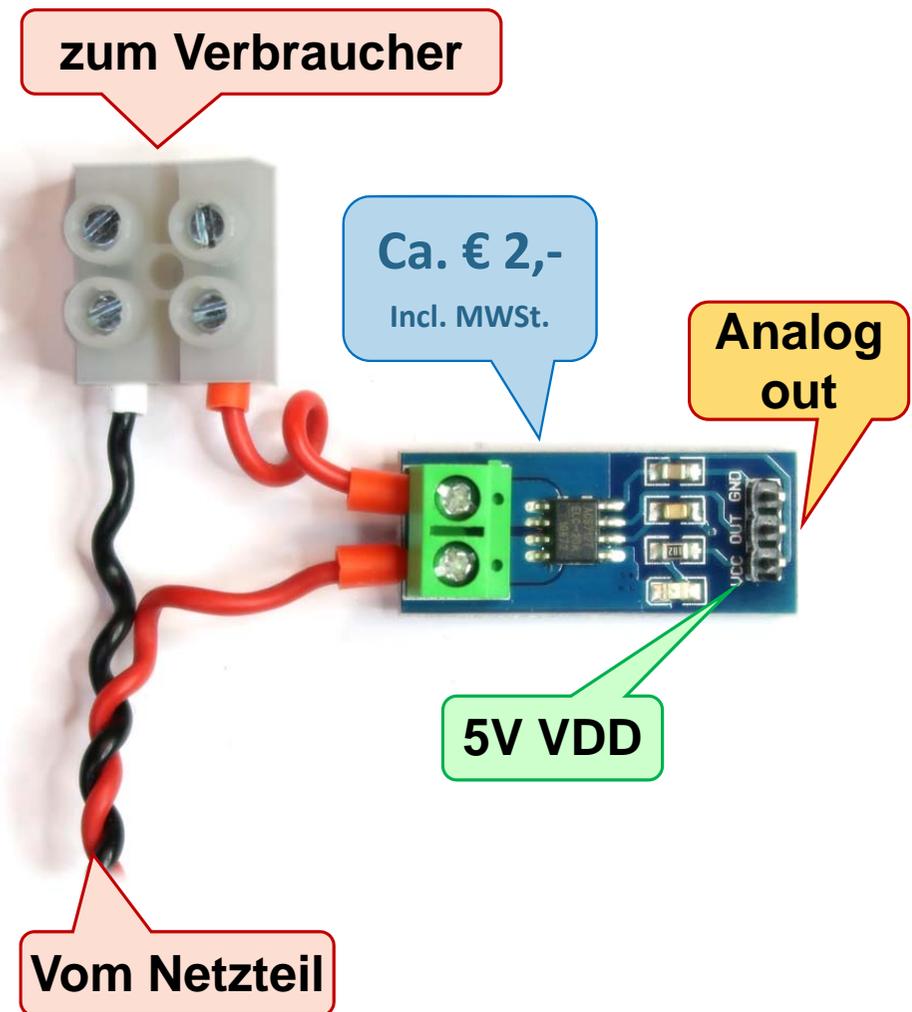
Kompressor mit 12V-DC-Motor

- Schwer zugänglich
 - Geschlossenes Gehäuse
→ keine sichtbaren rotierenden Teile
 - Transportabel → Stöße von außen
 - Motor über Getriebe an Zylinder gekoppelt
- Überwachung des Betriebsstroms
 - $i(t)$ erlaubt Rückschlüsse auf Motorrotation
 - Drucklast erzeugt bei 1-Zylinder-Kompressor zyklische Lastwechsel des DC-Motors
→ sichtbar im Betriebsstrom



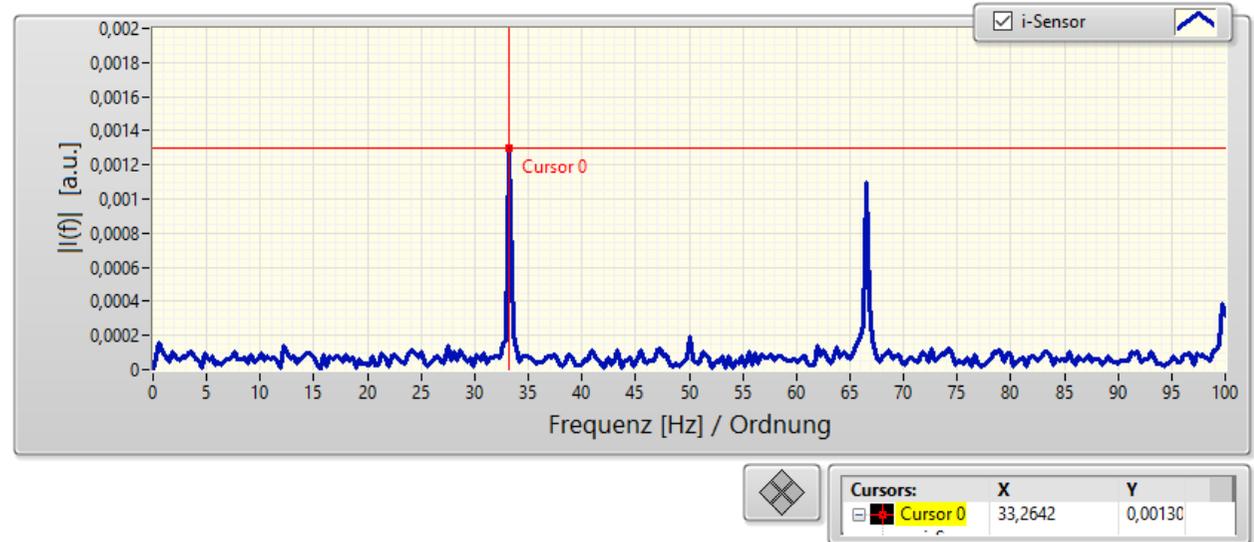
Hall-Effekt-Stromsensoren

- Klassische Strommessung per Shunt:
 - Differentieller ADC-Eingang erforderlich
 - Risiko durch Potentialdifferenzen
- Strommessung mit IC ACS712
 - Messung per Hall-Effekt-Sensor
 - Analoger Ausgang $U(I)$, bis 80 kHz Bandbreite
 - 1,2 m Ω Durchgangswiderstand Strompfad
 - Mindestens 2,1 kV_{RMS} Durchschlagfestigkeit zwischen Strompfad und Signalausgängen
 - Messbereiche ± 5 A, ± 20 A, ± 30 A
 - Als Breakout-Board für „Arduino“ erhältlich
 - Direkter Anschluss an AI des myDAQ



Kompressor mit 12V-DC-Motor

- Sichtbar werden
 - Kolbenfrequenz, vor allem bei Druckbelastung
 - Rotationsfrequenz Motor

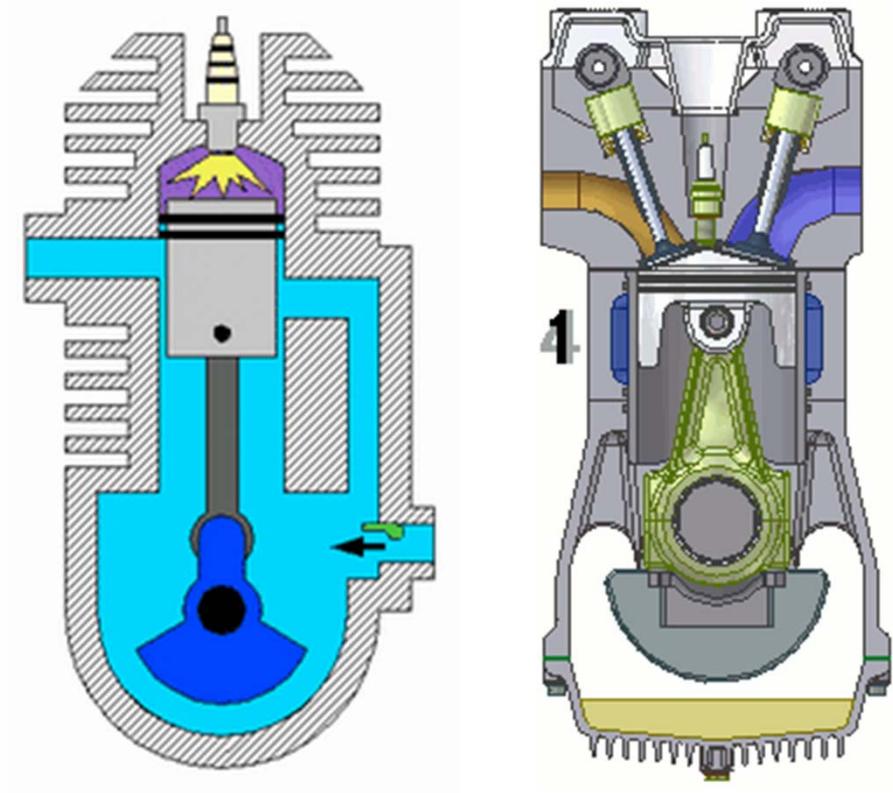


Projekt 6: Kolbenmotoren



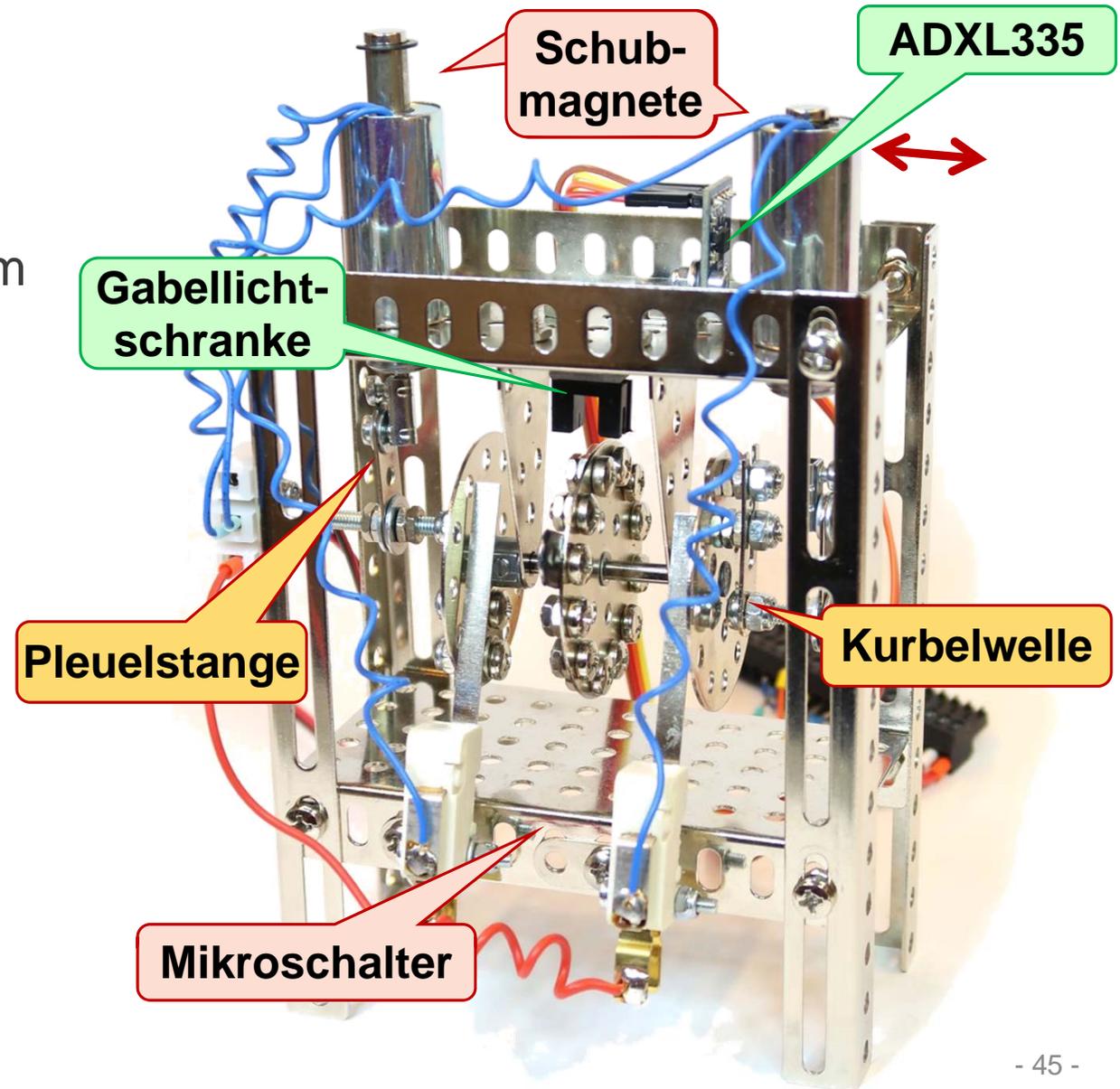
Kolbenmotoren

- Interessant zur Ordnungsanalyse:
 - 4-Takt-Motor:
1 Zyklus = 2 Umdrehungen
 - 2-Takt-Motor:
1 Zyklus = 1 Umdrehung
- Schwierig im Labor Betreibbar
 - Abgas, Treibstoff, Lärm ...
- Ausweg ...



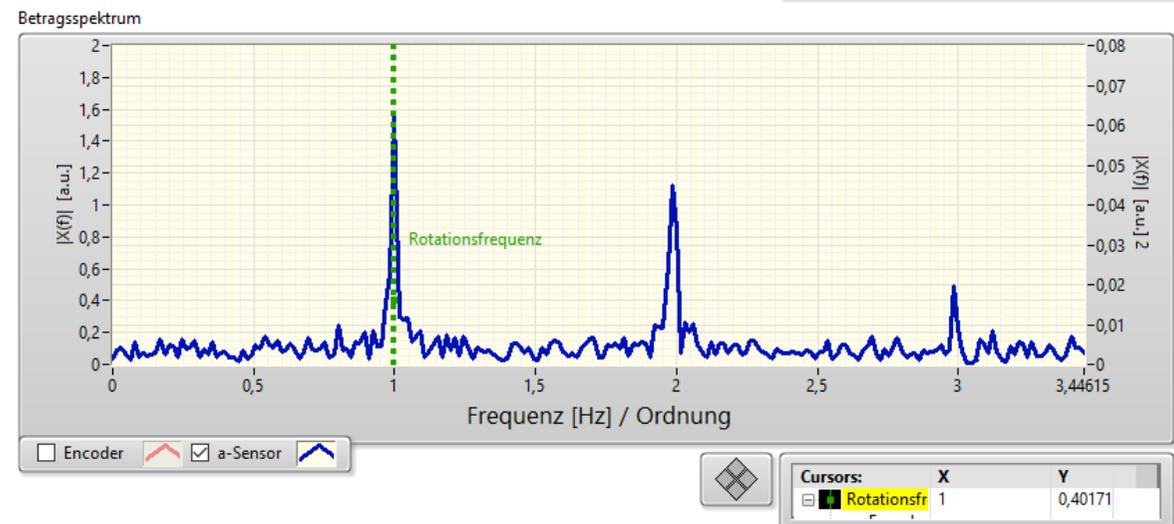
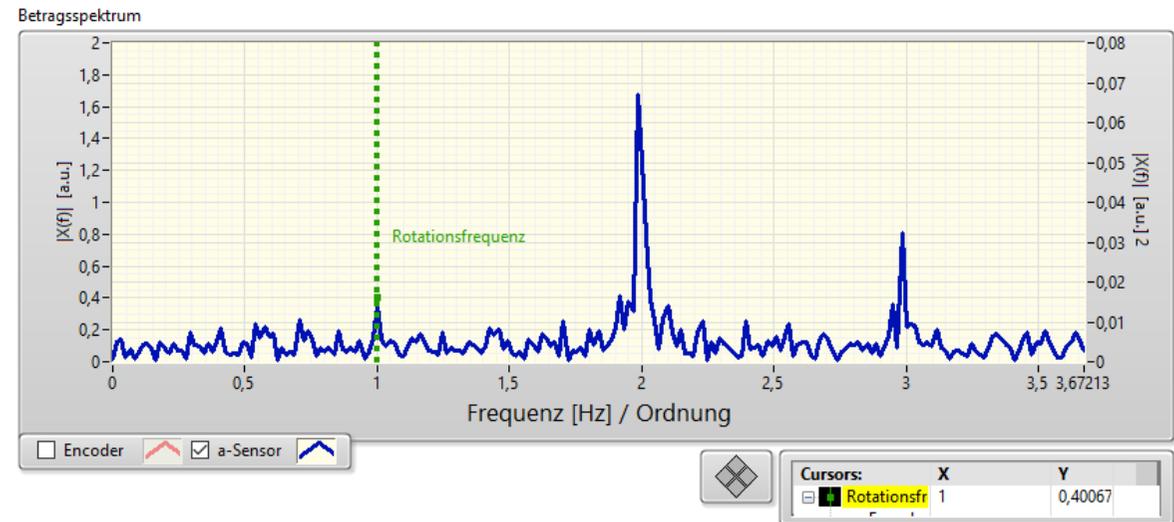
Magnetmotor

- Darstellung Explosionskräfte im Zylinder durch Schubmagnete
- Betrieb im 4-Takt oder 2-Takt Modus möglich
- Realisierter Versuchsaufbau:
 - 2-Zylinder 2-Takt-Reihenmotor (Entspricht „Trabant 601“)



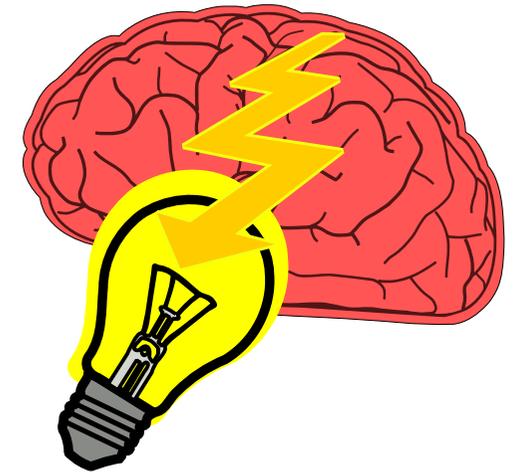
Magnetmotor

- Hauptordnung = Anzahl aktiver Zylinder
- Abbildung oben: Beide „Zylinder“ aktiv → Ordnung 2 Dominant
- Abbildung unten: Ein Zylinder ausgefallen → Ordnung 1 Dominant



Magnetmotor: Lernziele

- Aufbau und Messparameter
 - Geeignete Wahl von Sensorort und Ausrichtung
- Signalverarbeitung und Auswertung
 - Berechnung Ordnungsspektrum
 - Identifikation von Motorschäden
 - Zylinderausfall
 - Zündaussetzer
 - Fehlzündungen



Fazit

- **Konzept „Freies Praktikum“**
- **Anforderungen**
 - Kompakt → transportabel
 - Preiswert → größere Anzahl beschaffbar
 - LabVIEW Student / myDAQ
→ mit eigenen PCs nutzbar
 - Robust → zuverlässige Erfolgserlebnisse
 - Vielseitig → kreative Eigenprojekte
mit Einsatz von LabVIEW möglich



Dank und Literatur

- Vielen Dank:
 - HM-Studierende Mechatronik als Beta-Tester
 - Jan Kniewasser (NI Germany Academic Field Sales)
 - Firma Häny AG, Jona (CH) für Pumpengeräusche
 - Firma igus GmbH, Köln für Musterteile Kunststofflager
 - Das Publikum des Academic Forums

- Weblinks

- Präsentation and LabVIEW-Programme:
www.georg-eggers.de/dozententag

- Literatur

K.W. Bonfig, Zhondong Liu:

Virtuelle Instrumente und Signalverarbeitung: Zustandsüberwachung und Diagnose an Maschinen mit LabView; VDE-Verlag

Josef Kolerus , Johann Wassermann:

Zustandsüberwachung von Maschinen: Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker, expert verlag

