



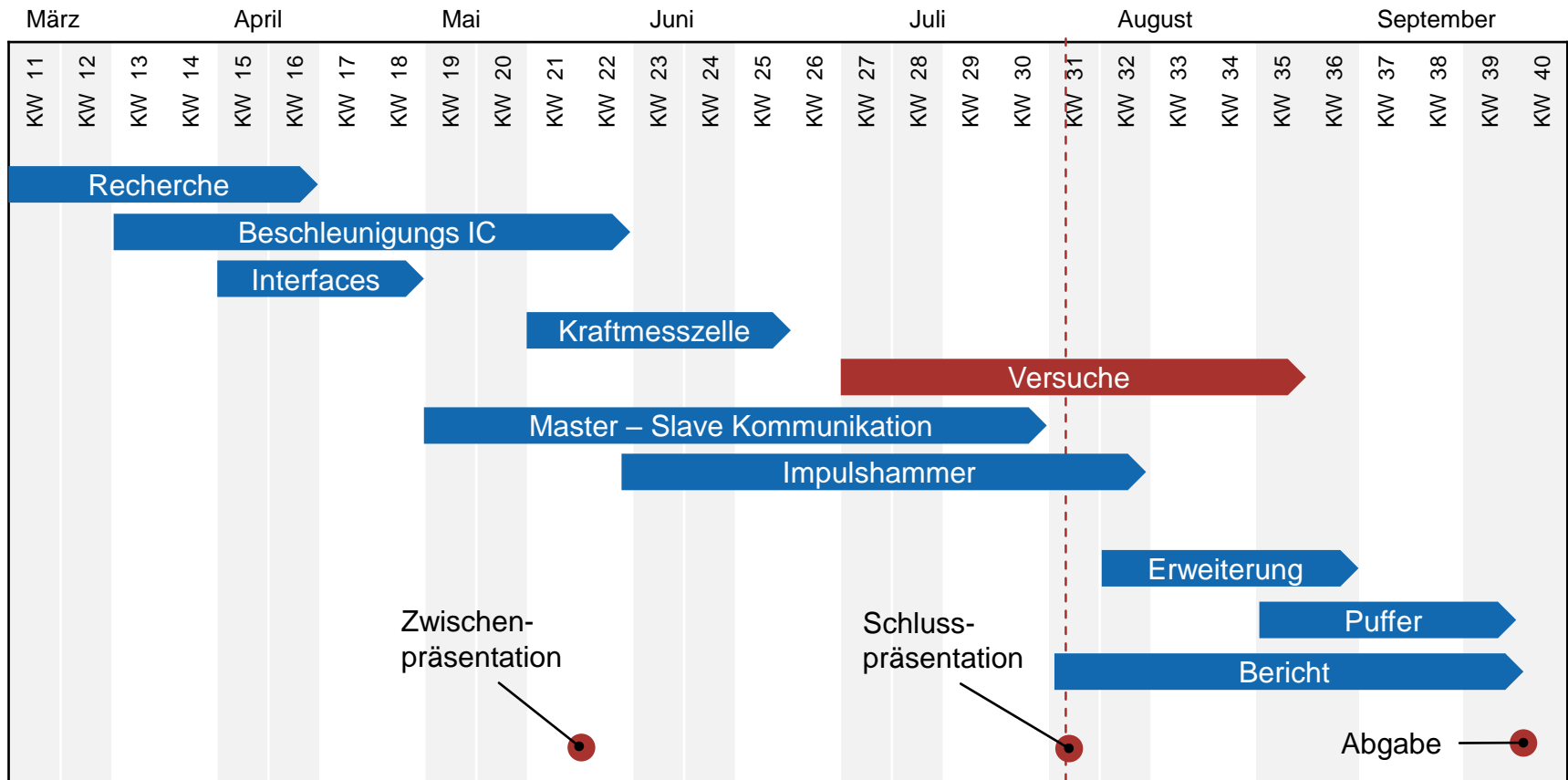
Entwicklung eines kostengünstigen, experimentellen Modalanalyse-Systems

Masterarbeit – Schlusspräsentation

Roman Rüttimann

Betreuung: Nino Ceresa

Zeitplanung



Motivation

- Die experimentelle Modalanalyse (EMA) ist ein mächtiges Werkzeug zur Validierung von Simulationsmethoden für Werkzeugmaschinen (WZM).
- Kommerzielle EMA-Systeme sind zu teuer und erfordern erfahrene Bediener. Sie werden daher oft nicht eingesetzt.
- Fortschritte in mikromechanischen Sensoren (MEMS) eröffnen einer neue Sparte an Sensoren den Einsatz in EMA-Systemen.

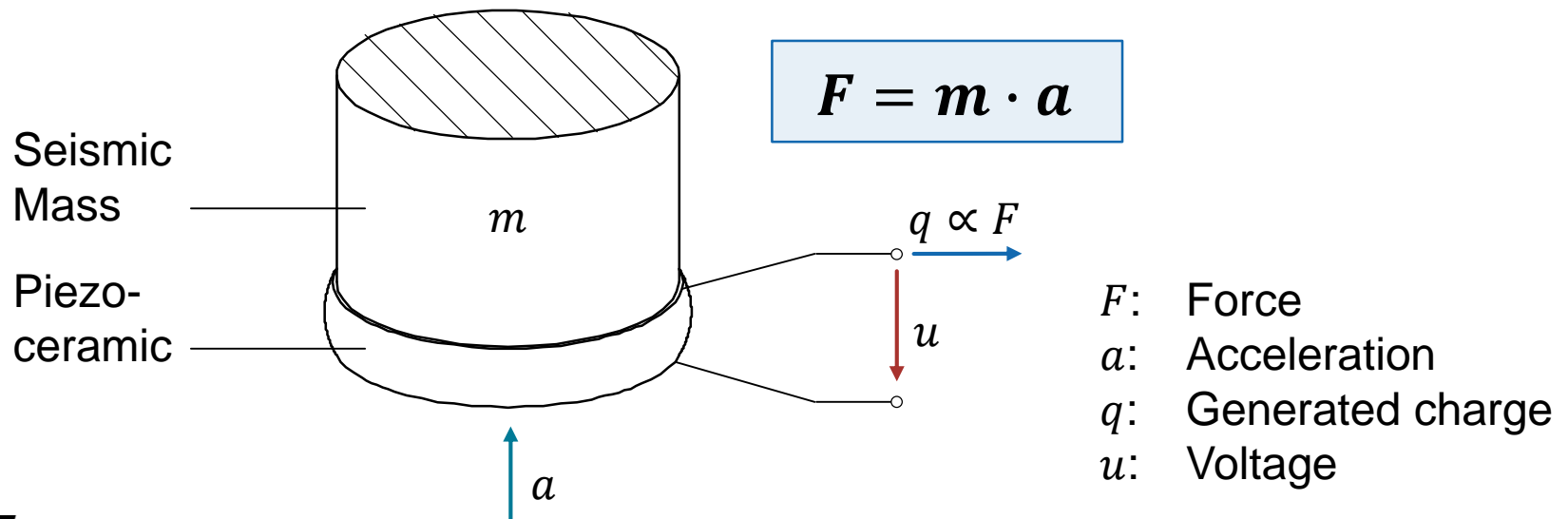
Aufgabenstellung

- Auf Basis von günstigen Sensoren und Mikrokontrollern, sowie freier open-source Software, soll ein preiswertes Messsystem zur Erfassung von Eingangs- und Antwort Signal in einer EMA (EMA-System) entwickelt werden.
- Das EMA-System soll eine Bandbreite von mindestens 300 Hz abbilden können.

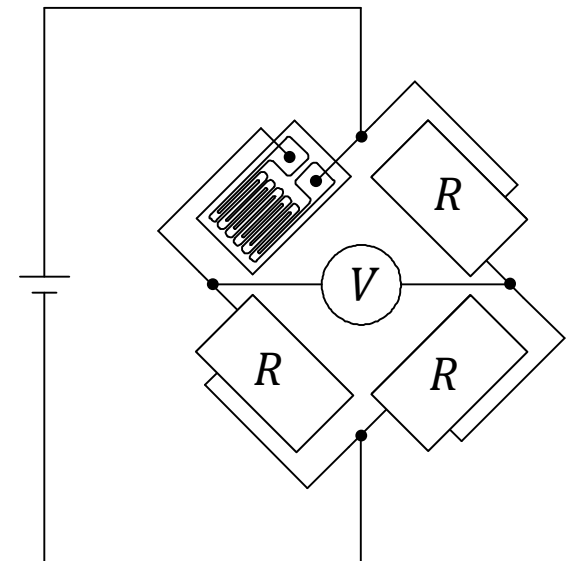
Impulshammer



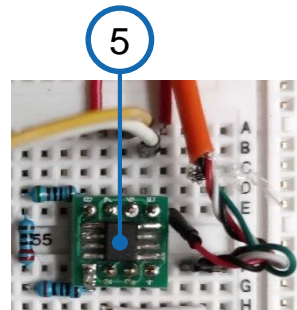
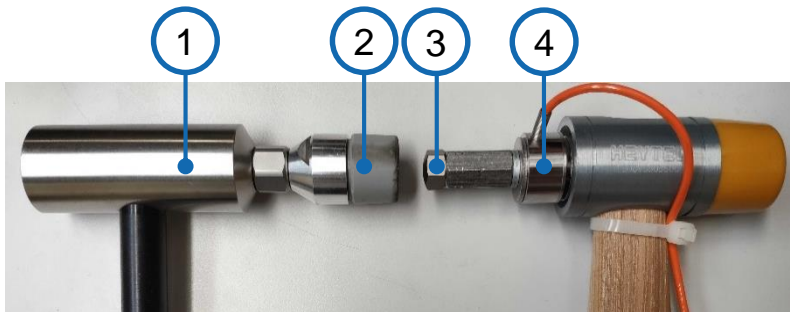
Piezoelectric Sensors



Dehnungsmesstreifen (DMS)

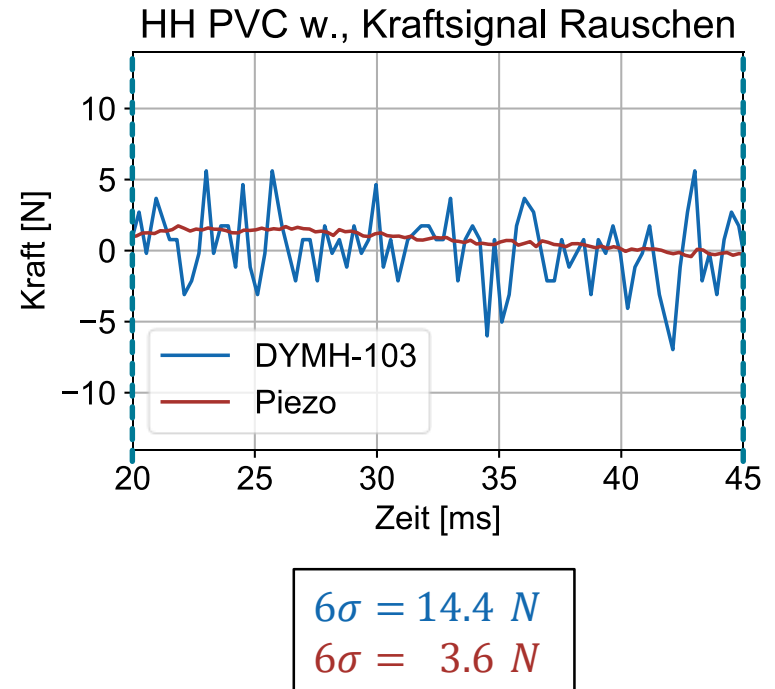
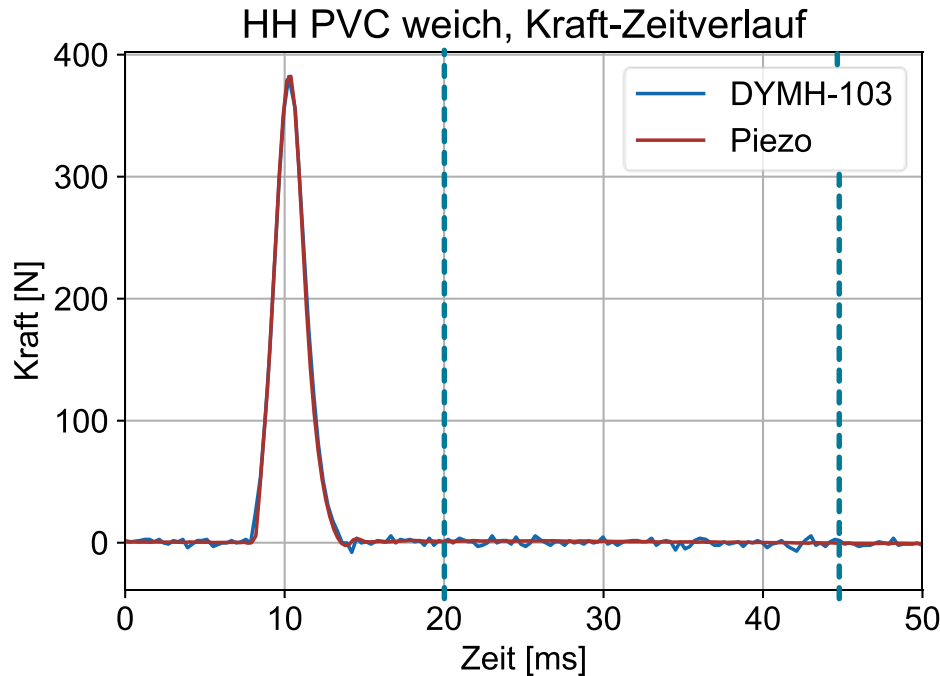


Hammer-Hammer-Test (HH)



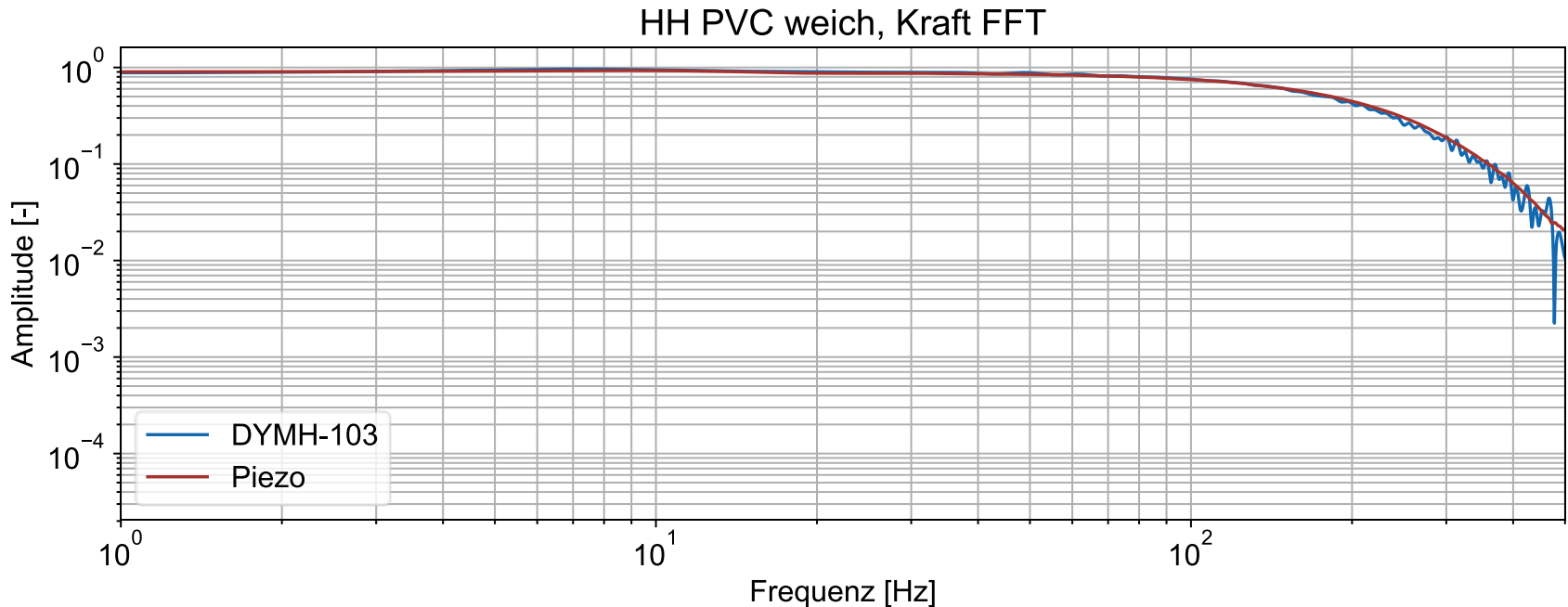
- 1 Piezo + Verstärker
- 2 Spitze PVC weich
- 3 Spitze 34CrMo4
- 4 Kraftmesszelle DYMH-103
- 5 Verstärker AD627

HH Signalauswertung



- Die Signalamplitude der DMS-Kraftmesszelle wurde anhand der Amplitude des Piezo skaliert (0.97 N/int12).
- Auflösung Piezo (1.2mN/int24)

HH Signalauswertung



- Schnelle Fourier-Transformation (FFT)
- Frequenzen $> 300\text{Hz}$ werden mit weicher Hammerspitze nicht angeregt

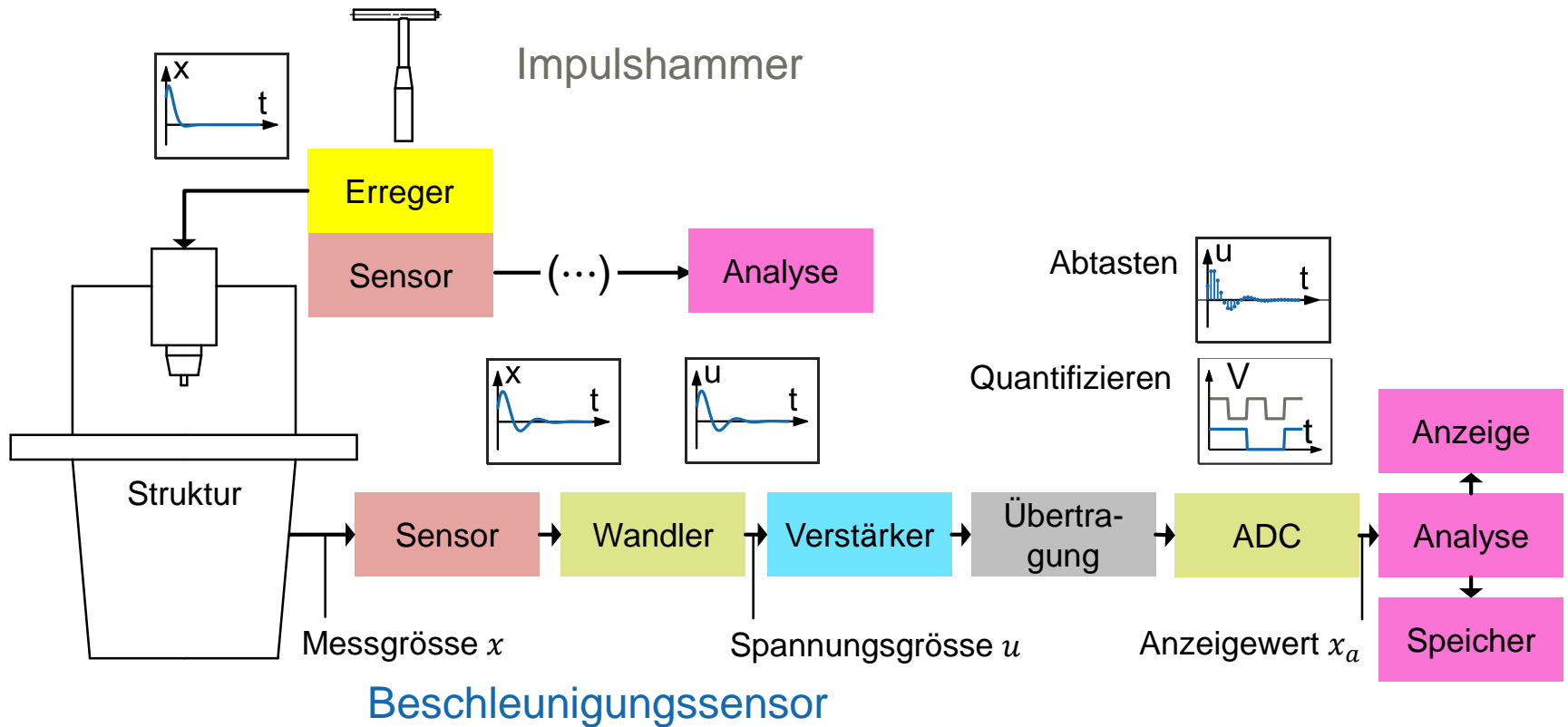
Hammer-Hammer Erkenntnis und weiteres Vorgehen

- Mit einer weichen PVC Hammerspitze kann der Prototyp mit DMS Kraftmesszelle die Anregungsbandbreite von 100 ... 250Hz abbilden.
- Für weitere Anregungsfrequenzen müssen Tests mit anderen Hammerspitzen durchgeführt werden.
- Für eine bessere Signalauflösung muss ein dezidierte Analog-Digital-Wandler (ADC) eingesetzt werden.

Inhalt

- Einleitung
- Komponenten eines experimentellen Modalanalysesystems
- Impulshammer
- Beschleunigungssensor
- Schnittstellen und Software
- Fazit, weiteres Vorgehen

Komponenten eines EMA-Systems



Beschleunigungssensoren

Sensor:

Kommerziell, Piezo

LIS3DSH

- Messprinzip:
- Dynamikbereich:
- Bandbreite:
- Spektrale Rauschleistungsdichte:
- Rausch-Level:

Piezoelektrisch

Kapazitiv

$\pm 50g$

$\pm 2 / 4 / 6 / 8 / 16g$

$5000Hz$

$800Hz$ (Nyquist)

$1.2\mu g / \sqrt{Hz}$ (bei $100Hz$)

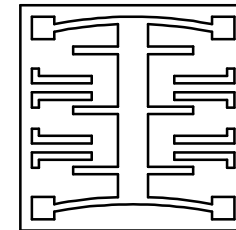
$150\mu g / \sqrt{Hz}$ (bei $\pm 2g$ und $100Hz$)

$85\mu g$ (bei $100Hz$)

$4.25mg$ (bei $\pm 2g$ und $100Hz$)



Bild von der PCB-Webseite



Hammer-Beschleunigungssensor-Test (HA)

Beschreibung:

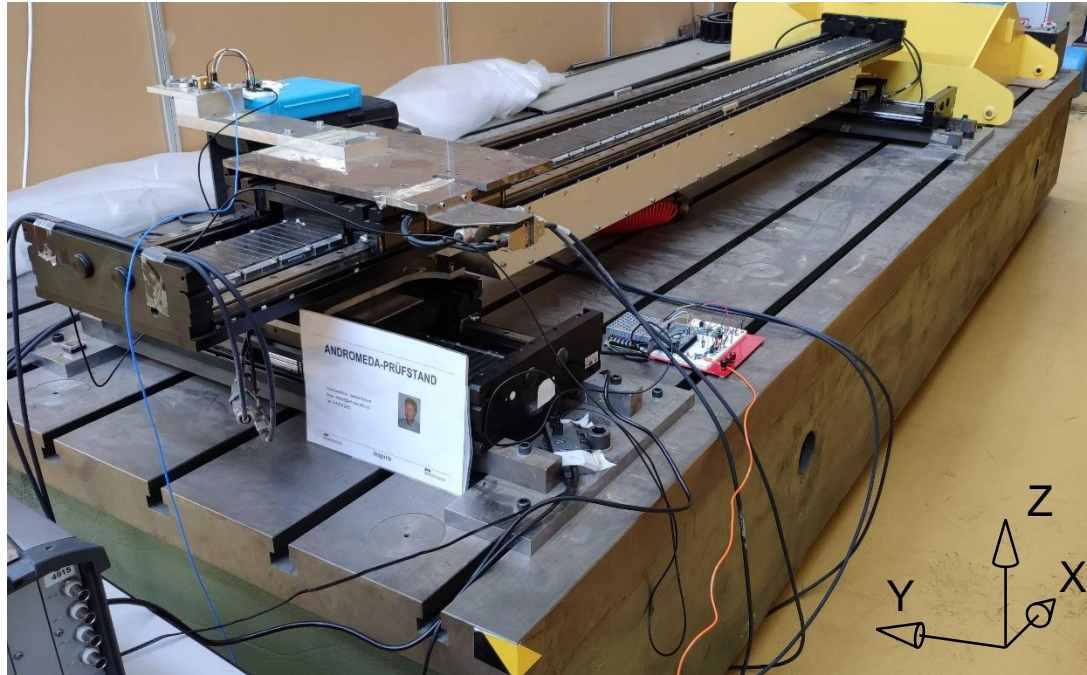
- Kommerzieller Piezo Beschleunigungssensor und MEMS Beschleunigungssensor werden nahe beieinander auf Testaufbau Positioniert.
- Testaufbau wird durch Impulshammer angeregt
- Sensorparameter:

	Piezo	LIS3DHS
■ Abtastrate:	1600Hz	1600Hz
■ Dynamikbereich:	$\pm 5g$	$\pm 4g$
■ Quantisierung	24-bit	16-bit

Ziel:

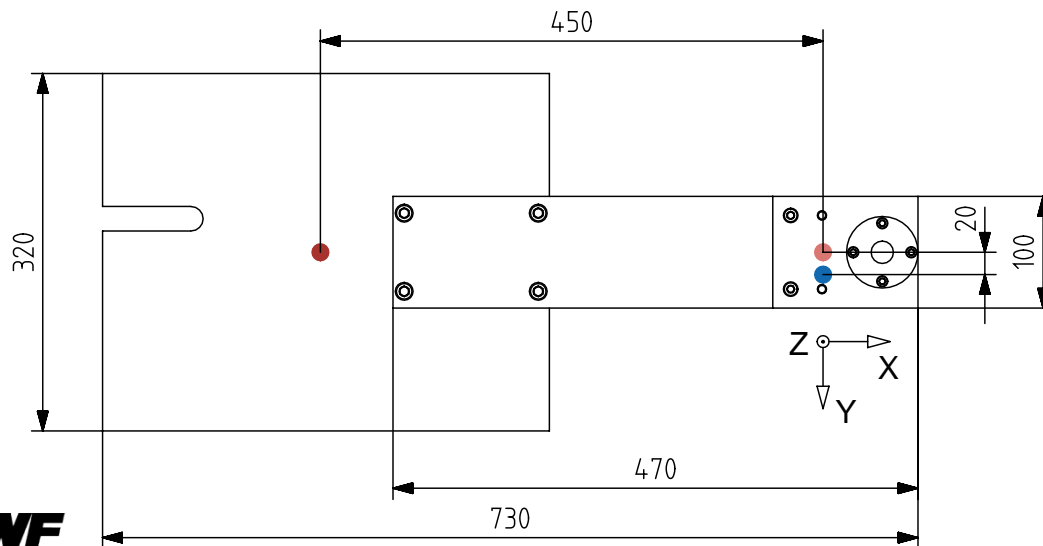
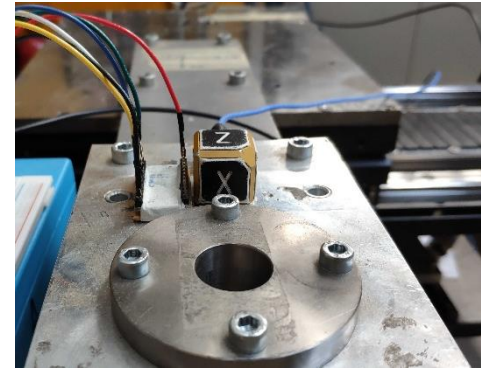
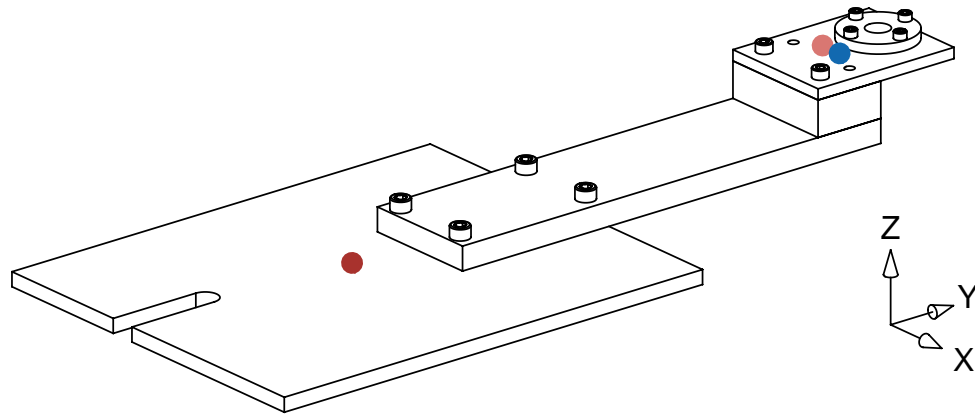
- Evaluierung Signalqualität des MEMS-Beschleunigungssensors

HA Testaufbau (Andromeda)



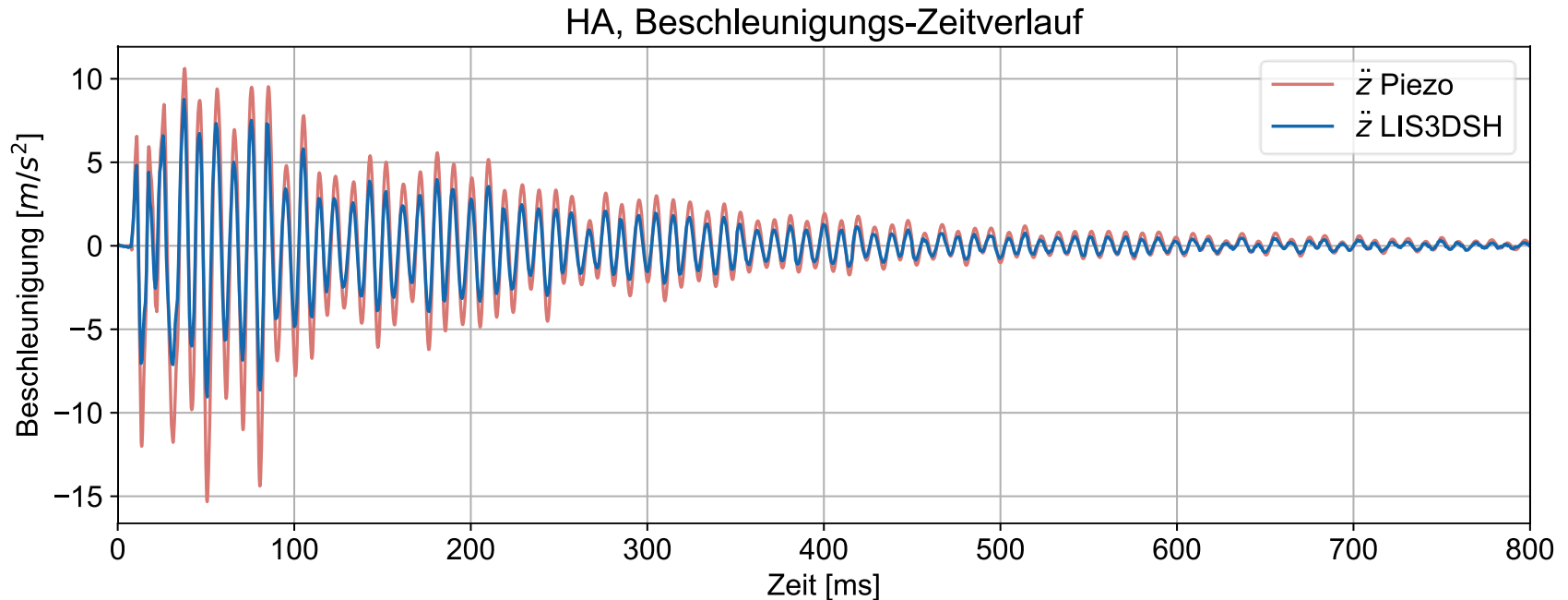
- Testaufbau für Linearantriebe
- Kinematische Kette: $V[b \ [Y1 \ Y2] \ X]$

HA Testaufbau (Andromeda)



- Hammer-Anregung
- Piezo
- Beschleunigungssensor

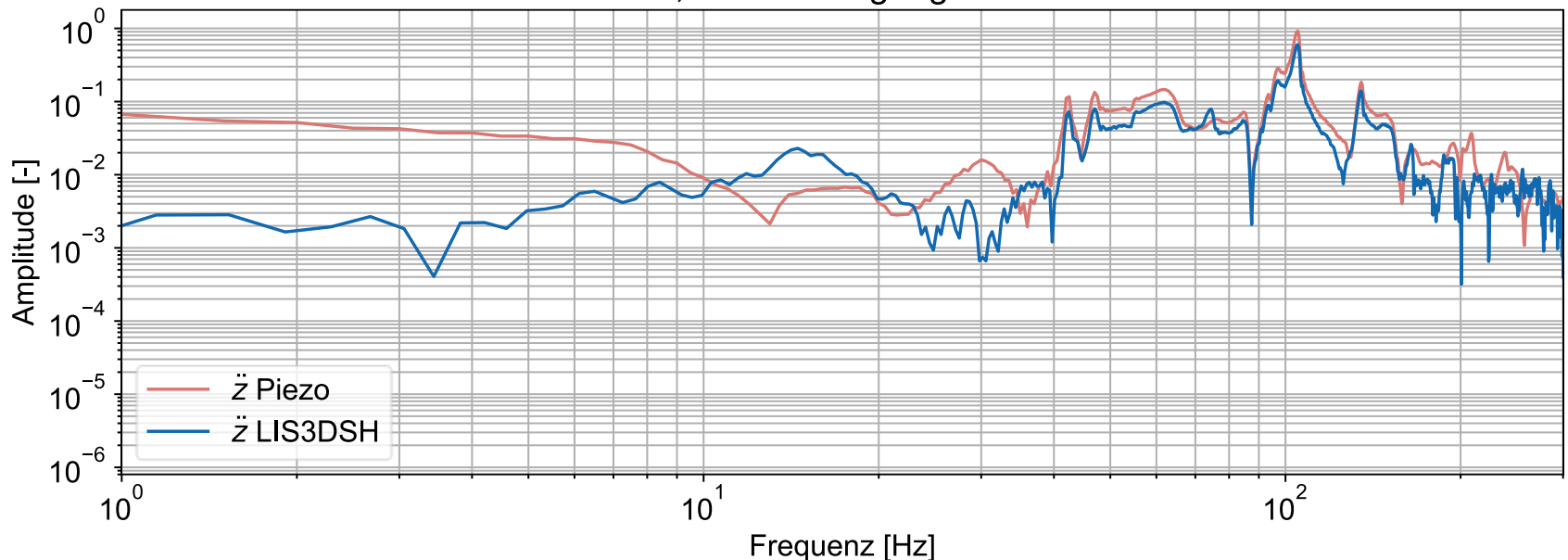
HA Signalauswertung



- Signal von Sensor LIS3DSH auf 0 gemittelt
- Auch Amplituden in \ddot{x} und \ddot{y} vom LIS3DSH sind kleiner als diese vom Piezo
- Höhere Amplituden vom Piezo in negativer z-Richtung

HA Signalauswertung

HA, Beschleunigungs FFTs



- Dominante Frequenz bei etwas über 100Hz auf beiden Sensoren ersichtlich
- Frequenzbereich von 20Hz bis 30Hz muss weiter untersucht werden
- Frequenzen über 250Hz werden nicht mehr angeregt, Tests mit anderen Hammerspitzen nötig

Hammer-Beschleunigungssensor Erkenntnisse und weiteres Vorgehen

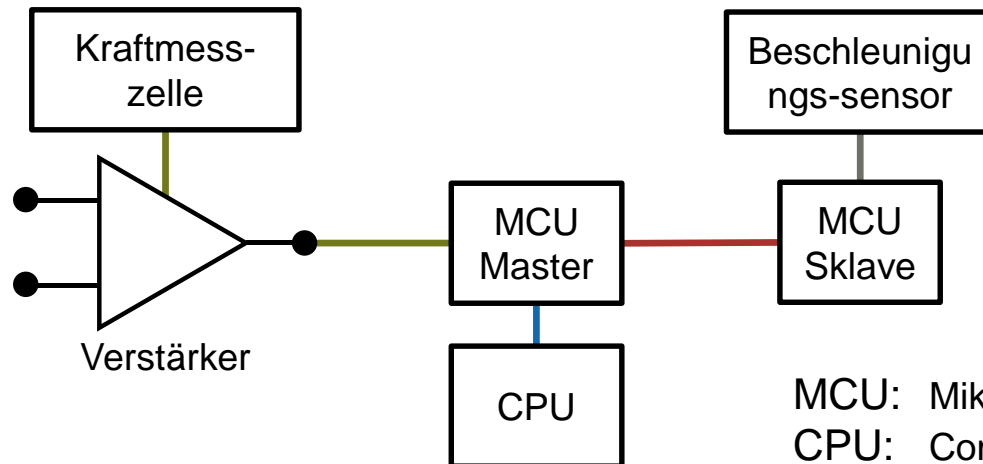
- Dominante Frequenz wird auch beim MEMS Sensor angeregt
- Frequenzen im Bereich zwischen $20Hz$ bis $30Hz$ müssen weiter untersucht werden
- Der MEMS Sensor muss kalibriert werden
 - Bekannte Masse, frei schwingend

Inhalt

- Einleitung
- Komponenten eines experimentellen Modalanalysesystems
- Impulshammer
- Beschleunigungssensor
- Schnittstellen und Software
- Fazit, weiteres Vorgehen

Schnittstellen

- Schnittstellen zur Datenübertragung sind begrenzt durch unterschiedliche Kabellängen.
- Aus diesem Grund können nicht alle Sensoren direkt von einem Zentralen Mikrokontroller (MCU) ausgelesen werden.
- Verwendete Schnittstellen: **USB** **SPI** **RS-485** **Analog**
- System:



MCU: Mikrokontroller
CPU: Computer Prozessor

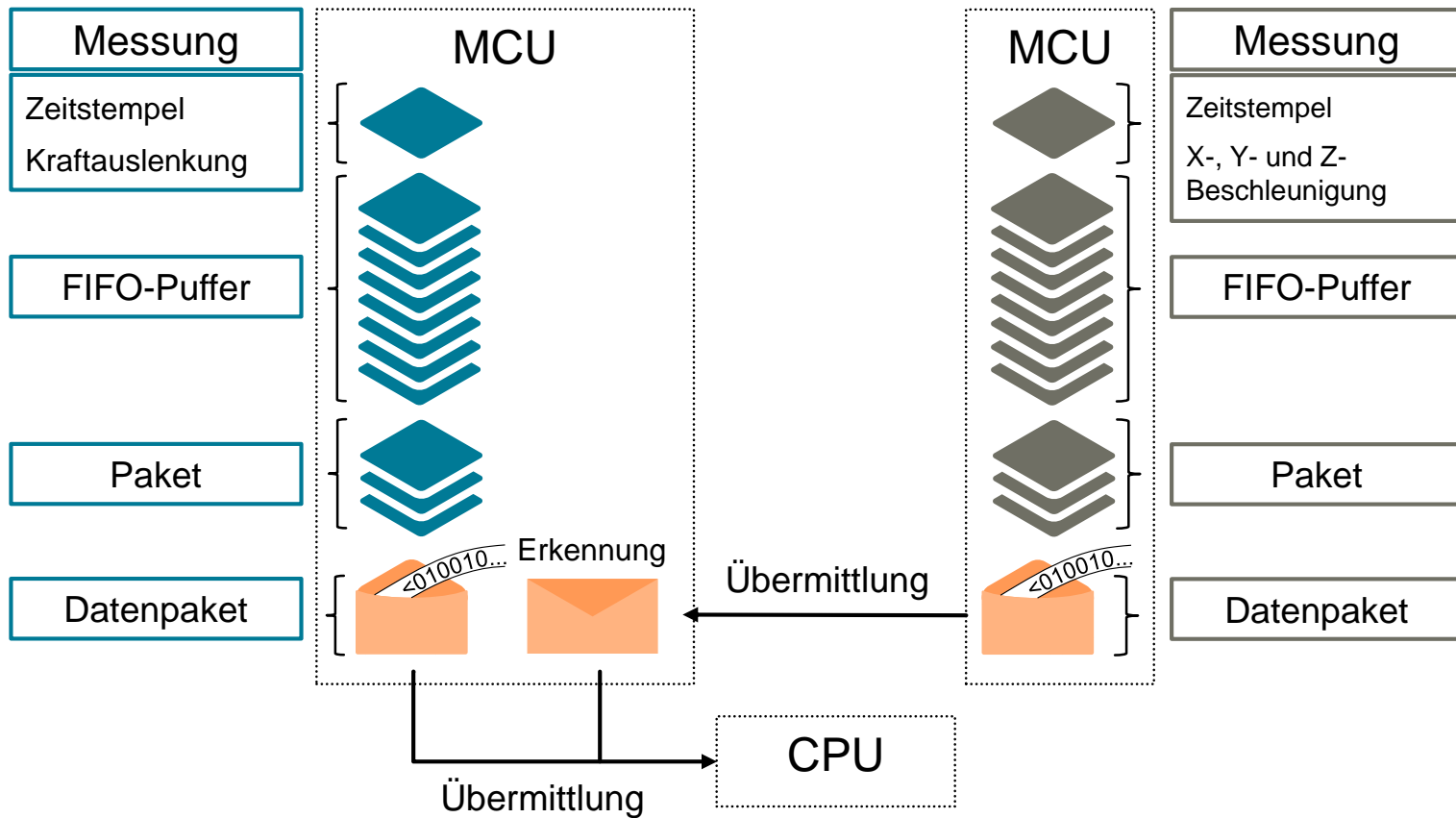
Mikrokontroller Software

- Anforderungen:
 - Echtzeitauslesen von Daten
 - Sensor Parameter und Auslesefrequenz müssen über einen CPU-Befehl einstellbar sein

- Umsetzung:
 - Jeder MCU sammelt Daten mit zugehörigem Zeitstempel in einem «First In – First Out»-Puffer (FIFO-Puffer)
 - Wenn keine Messung durchgeführt wird, können Daten vom Puffer and den CPU übermittelt werden

MCU: Mikrokontroller
CPU: Computer Prozessor

Datenfluss



Standardisierte Kommunikation

<[(reg) (#Bytes) (Daten)]>

- <[/]> Start- und Endbytes (hier in Ascii)
- (reg) Register / Adresse der Nachricht
- (#Bytes) Grösse der Daten in Bytes
- (Daten) Informationsbytes

Software Herausforderungen

- Synchronisation
 - Die MCUs müssen ihre Zeitstempel vor jeder Messung synchronisieren können
 - Frequenzdrift in Oszillatoren wird aufgrund von kurzen Messzeiten ($< 10s$) vernachlässigt
- Geschwindigkeit
 - Wird der Rechenaufwand der Software für die MCUs zu teuer, so kann das die Abtastfrequenz der Sensoren begrenzen.

Inhalt

- Einleitung
- Komponenten eines experimentellen Modalanalysesystems
- Impulshammer
- Beschleunigungssensor
- Schnittstellen und Software
- Fazit, weiteres Vorgehen

Fazit

Weiteres Vorgehen

- Arbeitspakete
 - Impulshammer:
 - Weitere Tests müssen durchgeführt werden
 - Beschleunigungssensor:
 - Weitere Tests müssen durchgeführt werden
 - Software:
 - Zeit-Synchronisation muss implementiert werden
 - Laufzeit muss geprüft werden
 - Schnittstellen:
 - Falls Software zum limitierenden Faktor wird müssen dezidierte Komponenten zwischengeschaltet werden
 - z.B. einen Analog zu Digital Konverter (ADC) für Ausgangssignal der Kraftmesszelle
 - Komplet-System-Tests:
 - Vereinen und Überprüfen aller Arbeitspakete

Ausblick

- Industrialisierung des EMA-Systems
 - Miniaturisierung mit Leiterplatten mit Pick-and-Place
Automatisierung auch für kleine Stückzahlen erschwinglich

Ende



Zusatz-Slides

Experimentelle Modalanalyse

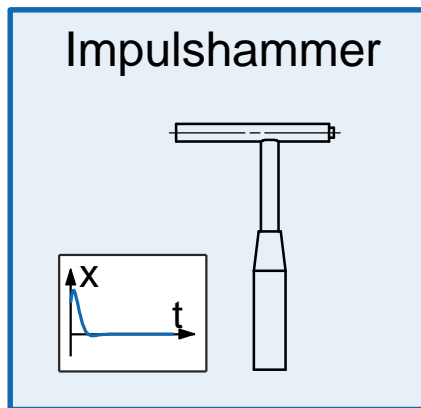
- Bei einer Experimentellen Modalanalyse (EMA) wird eine Werkzeugmaschine (WZM) mit einer dynamischen Kraft angeregt
- An vorher definierten Positionen wird ein Antwortsignal in Form von Position, Geschwindigkeit oder Beschleunigung gemessen
- Eine Eigenwertzerlegung von der Matrix aller Übertragungsfunktionen von Krafteingangssignal zu Antwortsignal ermöglicht die Bestimmung der dynamischen Charakteristika
 - Eigenfrequenzen
 - Eigenmodes und
 - Dämpfungen
- Ein EMA-System dient zur Erfassung von Messdaten für die EMA.

Experimentelle Modalanalyse (EMA)

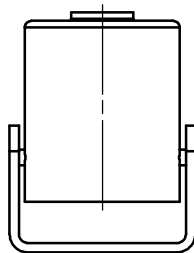
- Finde die modalen Parameter um das dynamische Verhalten einer Struktur zu beschreiben
- 1. Vorversuche
- 2. Messpunkte wählen
- 3. Messdaten aufzeichnen
- 4. Modes identifizieren
- 5. Geometrie modellieren
- 6. Schwingformen

Erreger

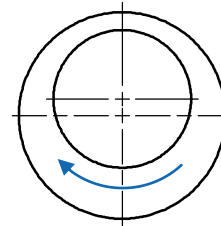
- Verschiedene Mittel Schwingungen in die Struktur zu bringen



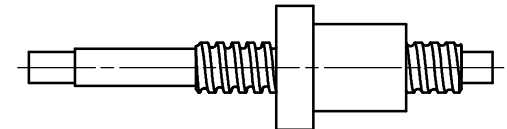
Shaker



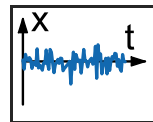
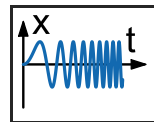
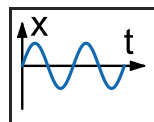
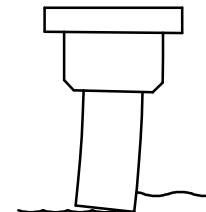
Umwucht



Maschinenachsen

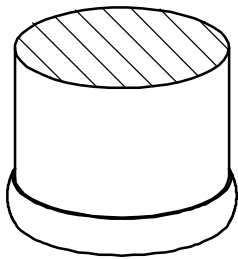


Prozesskräfte

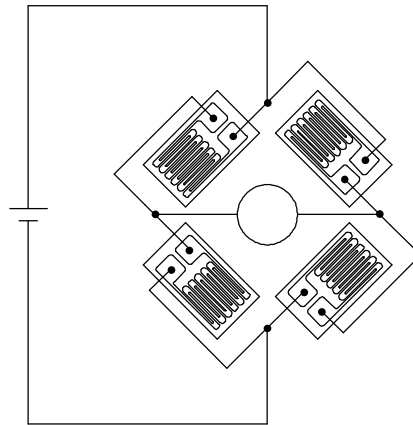


Sensor

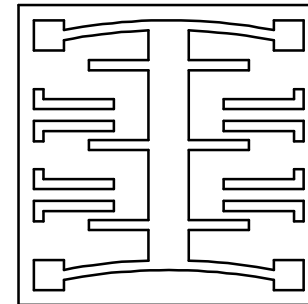
- Messprinzipien zur Erfassung von Schwingungen



Piezoelektrisch



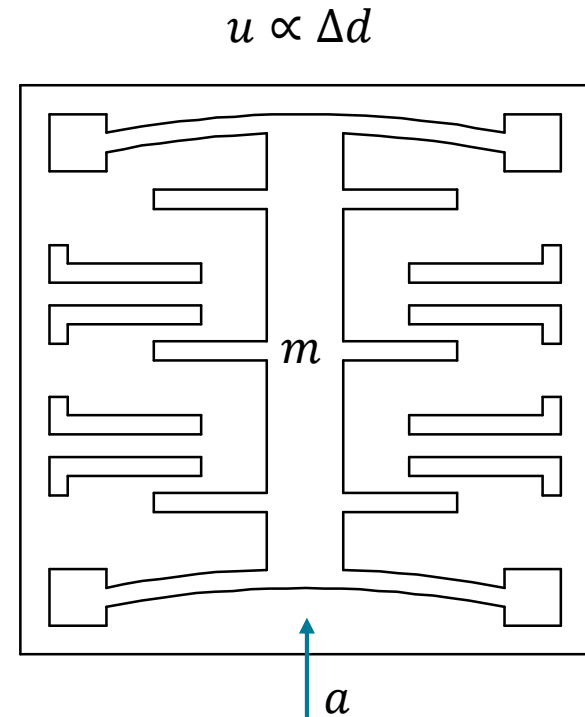
DMS



Kapazitiv

Kapazitive Sensoren

- Kleinste Baugrößen möglich
- Kapazitätsänderungen im Bereich von $[fF]$
- ADC muss im integrierten Schaltkreis erfolgen
- Kostengünstig durch Miniatürisierung



Beschleunigungssensoren (Formeln)

$$u_{a,rms} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |u_{a,ASD}|^2 df}$$

$$u_{a,rms} = u_{a,ASD} \cdot \sqrt{\Delta f}$$

Annahme: $u_{a,ASD} = const.$

$$f_{max} = \frac{1}{2} f_s \quad \left(\begin{array}{l} \text{Nyquist-} \\ \text{Shannon} \end{array} \right)$$

$u_{a,rms}$: Rausch-Level

$u_{a,ASD}$: Spektrale Rauschleistungs-
dichte

f : Frequenz

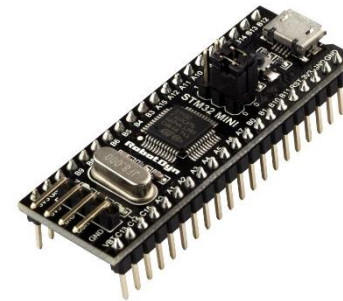
Δf : Bandbreite

f_{max} : Höchste Frequenz

f_s : Abtastfrequenz

Kostengünstiges EMA-System

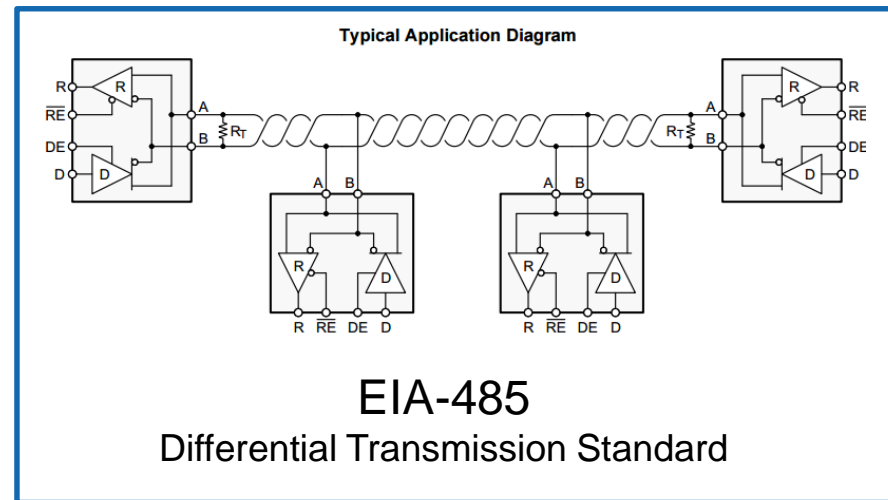
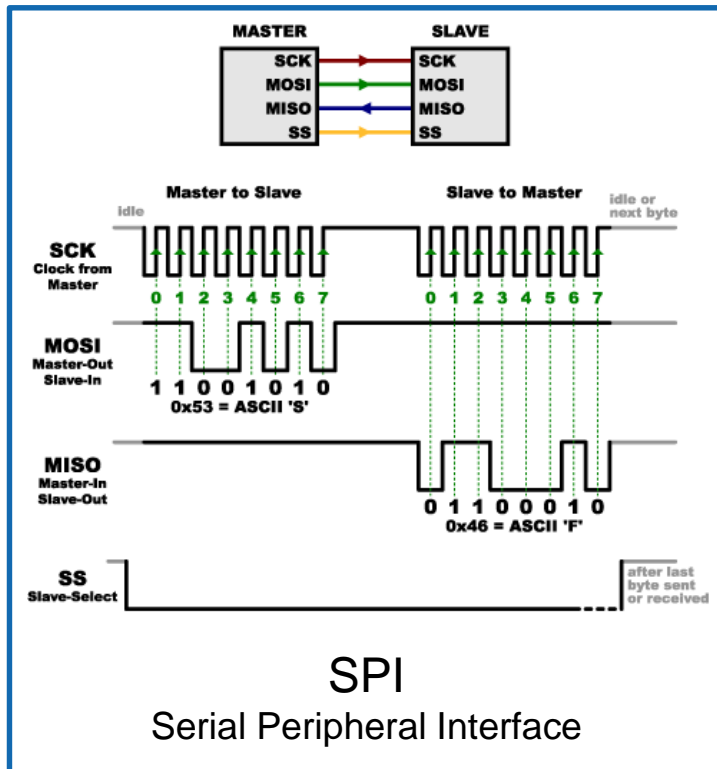
- Einsatz kosteneffektiver Sensoren wo möglich
 - DMS-Kraftmesszelle zur Messung des Eingangssignals
 - Kapazitive MEMS zur Messung der Antwort
- Datenakquisition mittels lizenzfreier Arduino-Software auf Mikrokontrollern
- Bewertung in Vergleichstest zu einem herkömmlichen EMA-System
- Erweiterung auf mehrere Sensoren



Bilder von der Arduino resp. der Robotdyn-Webseite



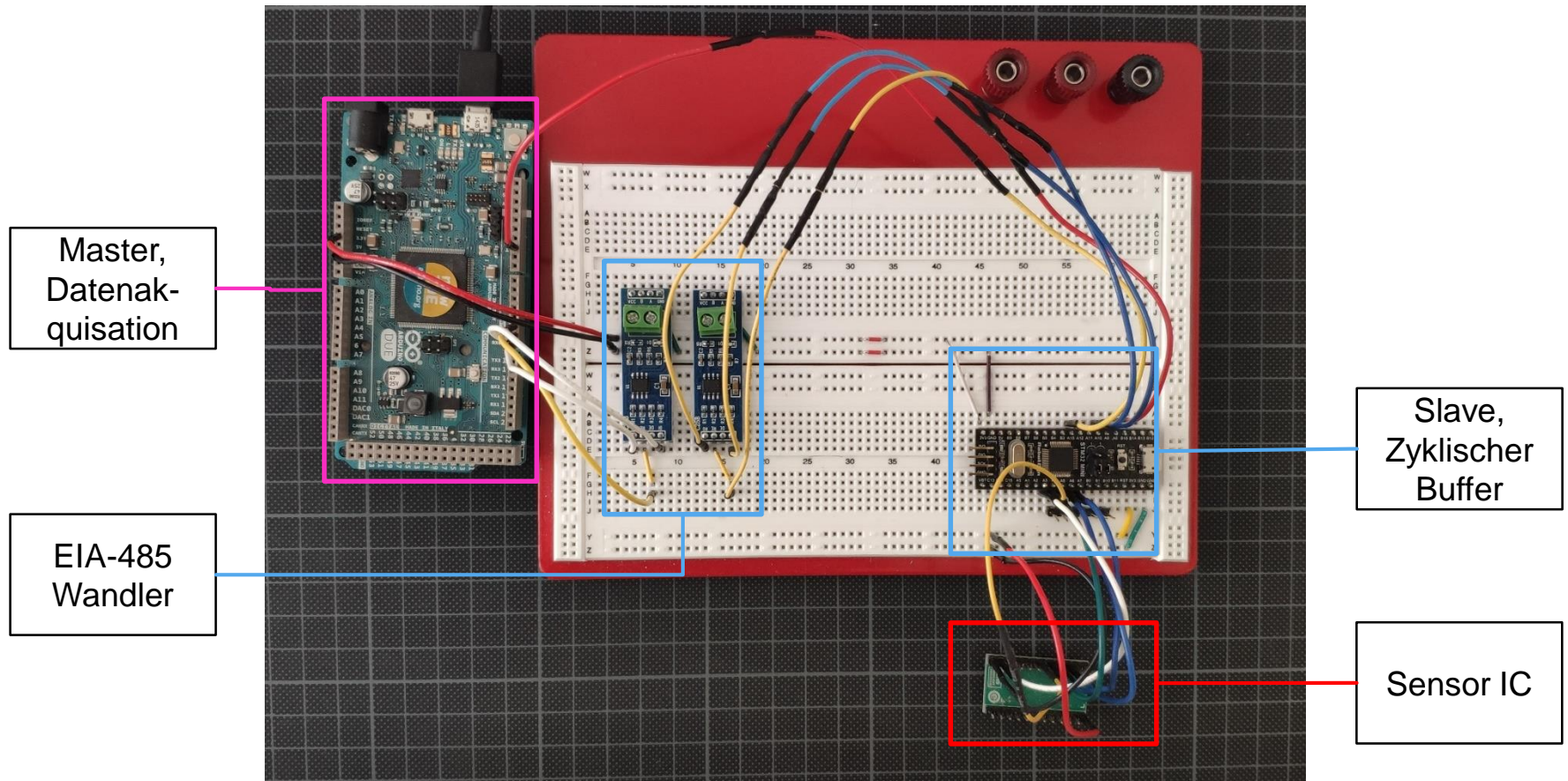
Schnittstellen Protokolle



USB
Universal Serial Bus

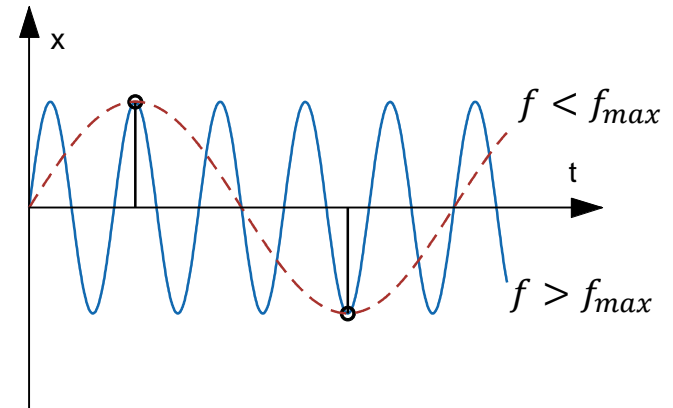
Bilder von der Sparkfun- resp. der mbedded-Webseite

Breadboard Configuration



Aliasing Fehler

- Enthält ein Signal höherfrequente Anteile als nach Shannon zulässig, so erscheinen diese Anteile nach der Fouriertransformation bei tieferen Frequenzen



- Theorem von Shannon:

$$f_{max} = \frac{1}{2} f_s = \frac{N}{2} \Delta f$$

- ▶ Signale müssen vor der Fouriertransformation tiefpassgefiltert werden

Schnelle Fourier Transformation (FFT)

- Diskrete Fouriertransformation:

$$X(m\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-i2\pi m \frac{n}{N}}$$

- Symmetrien der diskreten Fouriertransformation werden genutzt um den Rechenaufwand von N^2 auf $N \cdot \log_2 N$ zu kürzen

N : Anzahl Messpunkte

Bilden der Frequenzgänge

- Diskreter Frequenzgang:

$$H_{ij}(m\Delta f) = \frac{X_i(m\Delta f)}{F_j(m\Delta f)}$$

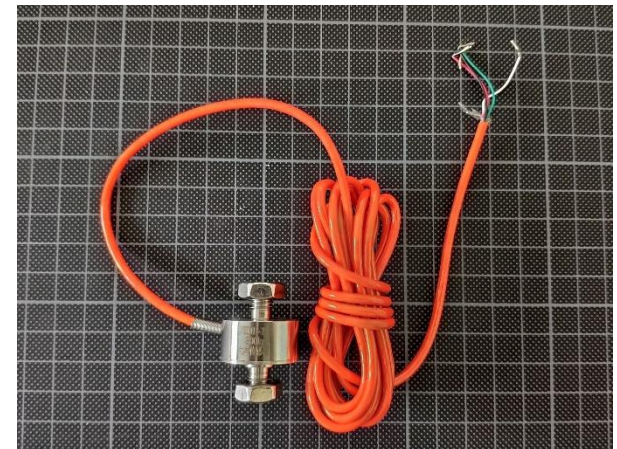
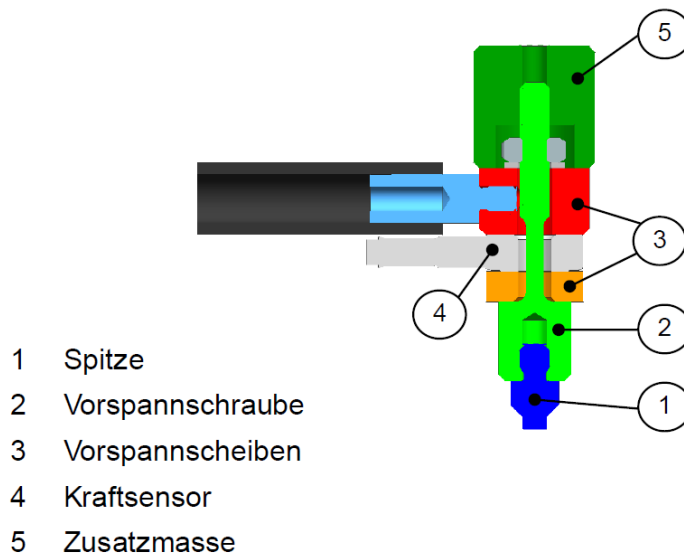
X_i : FFT des Eingangs
 F_j : FFT des Ausgangs

- Der Frequenzgang der Kraft zur Verlagerung entspricht der dynamischen Nachgiebigkeit
- Diese ist in mechanischen Systemen symmetrisch:

$$H_{ij} = H_{ji}$$

Aufbau - Impulshammer

- Entwicklung eines Impulshammers auf Basis einer DMS-Kraftmesszelle oder eines Kapazitiven Beschleunigungssensors



Querschnitt: Auszug aus Qualität von WZM von Dr. Daniel Spescha

Multi Rigid Body Modal Analysis

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx &= Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$

Mass M

- Symmetric
- Positive Definite

Damping D

- Symmetric
- Positive Semidefinite

Stiffness K

- Symmetric
- Positive Semidefinite

Input B

Output C

$x(t)$: Statevector

$u(t)$: Inputvector

$y(t)$: Outputvector