

Versuchsprotokoll Labor Maschinendynamik

Gruppe 4

Anna Wiering, Jonas Höhnel, Alexander König, 19.11.2019, Wolfenbüttel

1 Messen der Eigenfrequenzen durch Anregung

Tabelle 1.1: Anforderungen an die Messtechnik

Technischer Aufbau	Auswahl eines Verfahrens anhand
<ul style="list-style-type: none"> • Sensoren: Hohe Empfindlichkeit • Sensoren: Messbereich muss zu messenden Frequenzbereich abdecken • ADC-Wandler: Abtastrate muss Nyquist-Kriterium der zu messenden maximalen Frequenz erfüllen • Lagerung/Aufhängung: darf Eigenfrequenzbereich der zu messenden Bauteile nicht beeinflussen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zugänglichkeit der Mess-, bzw. Anregungspunkte • Anforderungen an Unversehrtheit der Messstellenoberflächen (entgegen Anbringung von Sensoren) • Kosten (viele oder schwer zugängliche Messstellen) • Durchführungsgeschwindigkeit

Tabelle 1.2: Gegenüberstellung der Anregungsarten

Shakeranregung	Impulshammeranregung
<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Kosten + Hohe Reproduzierbarkeit, da Anregung identisch - Mechanische Verbindung des Shakers beeinflusst das Frequenzverhalten (Masse) • Nur nutzbar, wenn Eigenfrequenz der Aufhängung (Gummibänder $f \approx 4\text{Hz}$) nicht im Bereich der zu messenden Eigenfrequenzen liegt • Mit Shakern kann Fahrversuch auf unebener Fahrbahn simuliert werden 	<ul style="list-style-type: none"> + Geringe Kosten - Geringere Reproduzierbarkeit, da Anregungsort und -kraft variabel + Keine zusätzliche Massenbringung an zu messendes Bauteil durch Schwingungsanregung • Möglichkeit der Inverse: X Messpunkte und 1 Anregungspunkt oder 1 Messpunkt und X Anregungspunkte (spart Zeit, da Messstellen nicht angebracht werden müssen; Anregung an Stellen möglich wo Messstelle schwer anbringbar ist)

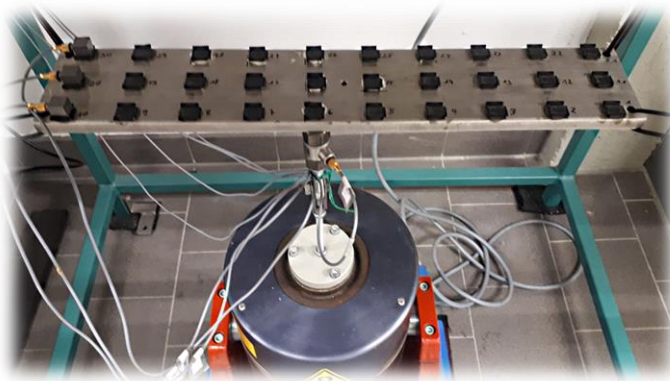


Abbildung 1.1: Aufbau Shakeranregung

Beschleunigungssensoren	Brüel & Kjær, Typ 4507-B $f_{\text{Mess}} = 0,3 - 6000\text{Hz}$
Kraftsensor	Brüel & Kjær, Typ 8230-002 $f_{\text{Mess}} = 0 - 7000\text{Hz}$
Shaker	RMS, Typ SEW 122/3

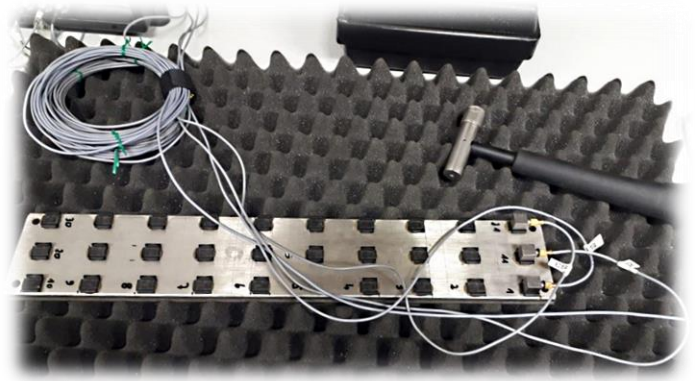


Abbildung 1.2: Aufbau Hammeranregung

Beschleunigungssensoren	Brüel & Kjær, Typ 4507-B $f_{\text{Mess}} = 0,3 - 6000\text{Hz}$
Impulshammer	Brüel & Kjær, Typ 8206

1.1 Versuch Shakeranregung

1.1.1 Aufbau

Ein Balken aus Edelstahl (siehe Abbildung 1.1) ist am Messpunkt 6 (siehe Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3) fest mit dem Shaker Verbunden. Die Aufhängung erfolgt an 4 elastischen Seilen an den äußeren Bohrungen (siehe Abbildung 1.1). Auf der Oberfläche des Balkens befinden sich an den eingezeichneten Stellen 30 Messpunkte mit Vorrichtungen zum Befestigen von Beschleunigungssensoren (seismische Massen, die mit piezoelektrischen Elementen mechanisch verbunden sind). In der Verbindung zwischen Shaker und Balken befindet sich ein Kraftsensor (piezoresistiv), welcher die wirkende Kraft misst.

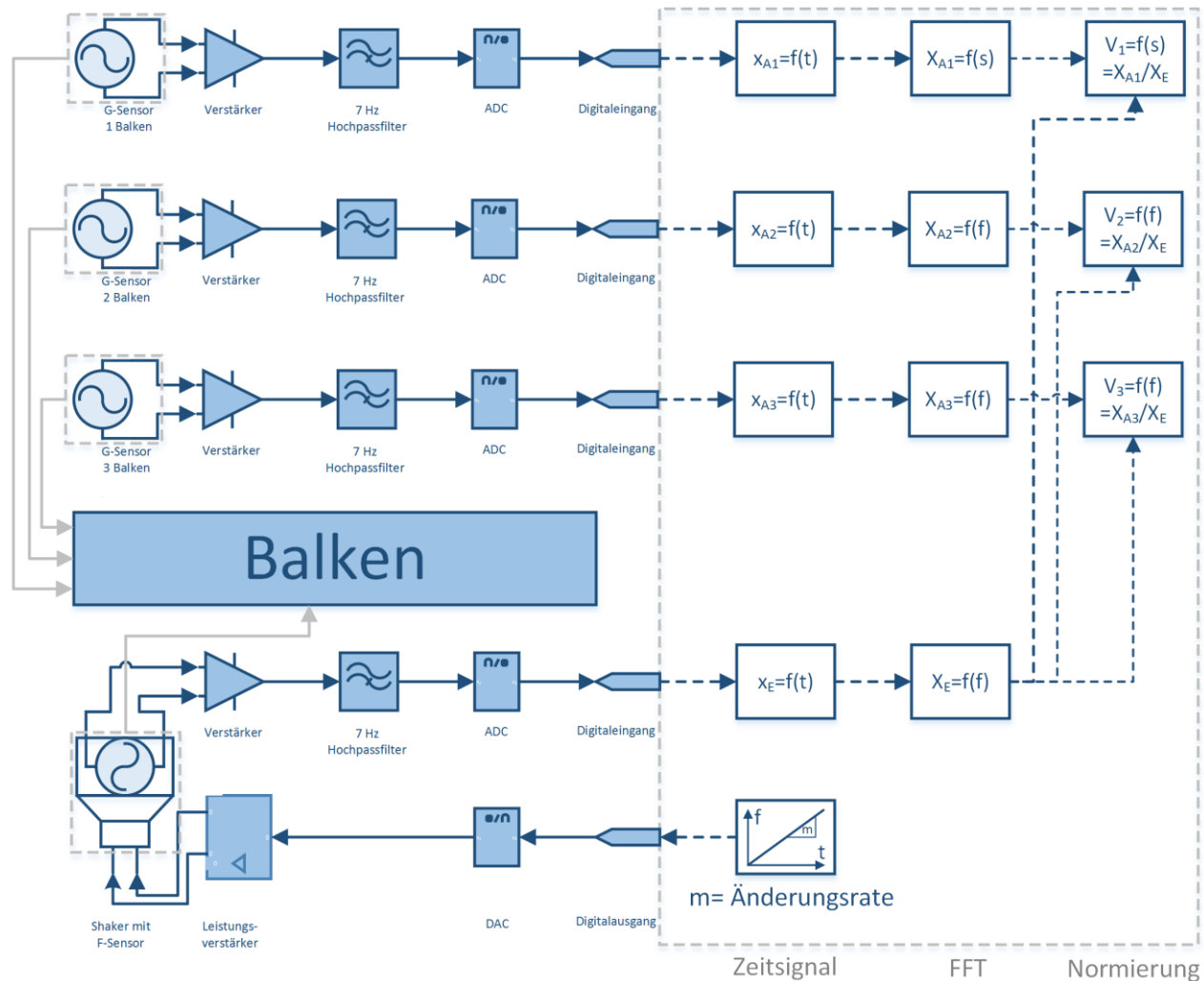


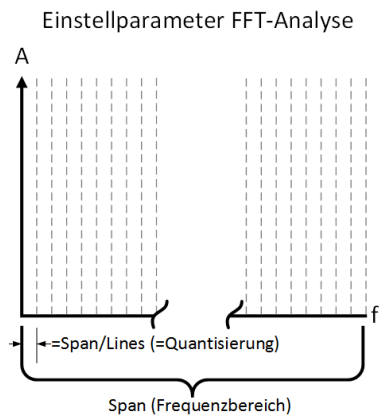
Abbildung 1.3: Signalfluss des Shakeraufbaus

1.1.2 Durchführung

Der Shaker regt den Balken 2-mal nacheinander mit einer Frequenz von 4-6000 Hz (siehe Messbereich Sensoren Tabelle 1.2) an. Pro Messung wird die Beschleunigung an drei Messpunkten gemessen. Dabei handelt es sich immer um drei in einer Reihe liegender Messpunkte (1, 11, 21; 2, 12, 22 usw.). In Summe werden 10x3 Messungen durchgeführt. Diese werden mittels Fouriertransformation aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert. Anschließend erfolgt die Bildung der Übertragungsfunktion: jedes Messsignal (Beschleunigung) wird durch das anregende Signal (Kraft) dividiert, um das Antwortsignal zu normieren, da das anregende Signal nicht konstant ist. Es resultiert das Autospektrum. Anschließend werden alle Messdaten am Computer übereinandergelegt (Y-Achse Amplitude, X-Achse Frequenz) und die einzelnen Peaks untersucht.

Tabelle 1.3: Einstellung des FFT-Ansalyators

Der FFT-Analyser des Messprogrammes bietet 3 Einstellbereiche an:



Lines:

- Bestimmt die Anzahl der aufgelösten Amplituden im Frequenzbereich (siehe Quantisierung in Abbildung 1.4)

Span:

- Legt den darzustellenden Frequenzbereich, startend von 0Hz, fest (siehe Abbildung 1.4)

Overlap:

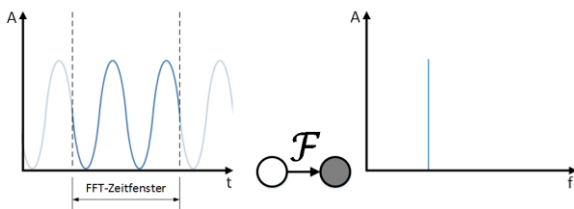
- Korrigiert den Wandlungs-Fehler der Fouriertransformation aus sprungartigen Signaländerungen (siehe folgenden Absatz)

Abbildung 1.4: Einstellparameter FFT-Analyse

Tabelle 1.4: Exkurs in den Mechanismus der Fouriertransformation

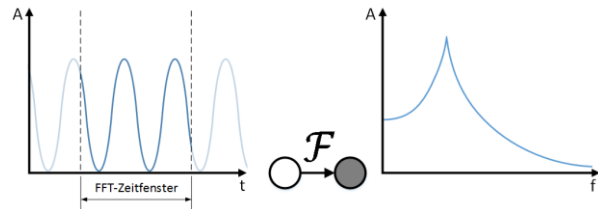
Die Fourieranalyse bedient sich an einem Ausschnitt des Zeitsignals (Zeitfenster) und reiht dieses unendlich mal hintereinander, um eine stationäre Schwingung zu erzeugen.

Ergebnis der FFT – Sinusnulldurchgänge am Zeitfenster



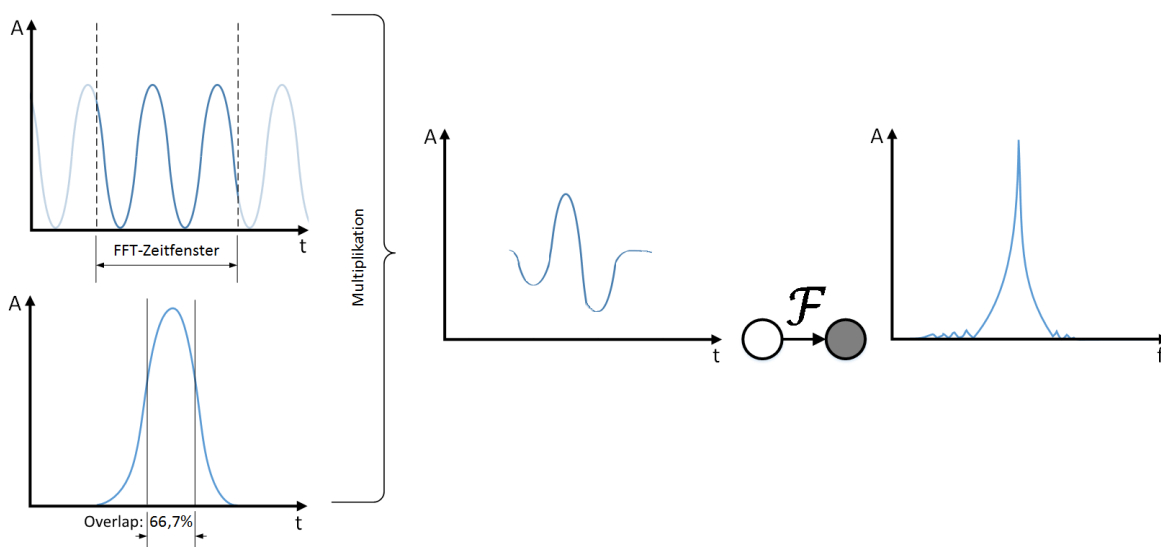
- Weisen die Sinusanteile einer Schwingung Nulldurchgänge direkt an den Grenzen des Zeitfensters auf, so lässt sich mit der Fourieranalyse direkt die Frequenz zuordnen.

Ergebnis der FFT – Sinusnulldurchgänge außerhalb Zeitfenster



- In der Regel weisen die Sinusanteile einer Schwingung keine Nulldurchgänge an den Grenzen des Zeitfensters auf.
- An den Grenzen der Aneinanderreihung entstehen so Sprünge, die zu (fehlerhaften/ ungewollten) dargestellten Frequenzschaubild führen.

Ergebnis der FFT – Nach Absenkung der Sinusenden durch Multiplikation des Zeitsignals mit einem Hanning-Fenster



Um den Fehler aus der Fourieranalyse zu reduzieren, wird das Zeitsignal mit dem sogenannten Hanning-Fenster multipliziert. Die Multiplikation sorgt für eine sukzessive Abschwächung der Amplitude in Richtung der Grenzen des FFT-Zeitfensters. Das führt dazu, dass nach der Aneinanderreihung der modifizierten Zeitfenster keine Sprünge mehr zu registrieren sind. Nebeneffekt stellt die Reduzierung der mittleren Amplitude dar.

1.1.3 Ergebnisse

	Biegung	Torsion
1. Eigenform	378 Hz	1200 Hz
2. Eigenform	1021 Hz	2508 Hz
3. Eigenform	2019 Hz	3850 Hz
4. Eigenform	3309 Hz	5200-5400 Hz
5. Eigenform	4766 Hz	

Da das Bauteil inhomogen ist (ungleiche Masseverteilung, ungleiche E-Modul, Verspannungen durch Schleifen...) liegen die Amplituden der einzelnen Messungen im Diagramm nicht sauber übereinander. Dadurch wird es schwieriger die exakte Eigenfrequenz zu bestimmen. Die 5. Eigenform der Torsion befindet sich außerhalb des Anregungsbereiches (siehe Abschnitt 4).

1.2 Versuch Hammeranregung

1.2.1 Aufbau

Ein Balken aus Edelstahl liegt auf einem Stück Pyramiden-Schaumstoff. Auf der Oberfläche des Balkens befinden sich 29 Messpunkte mit Vorrichtungen zum Befestigen von Beschleunigungssensoren (siehe Abbildung 1.2). An der Stelle des fehlenden Messpunktes (Messpunkt 5) wird mit dem Impulshammer angeregt. Die 30. Messstelle befindet sich auf der Unterseite. Im Kopf des Impulshammers befindet sich ein Kraftaufnehmer.

1.2.2 Durchführung

Tabelle 1.5: Übersetzung eines Impulses in den Frequenzbereich

Das Impulssignal wird zunächst über die Multiplikation mit einer getriggerten Transienten-Fensterfunktion beschnitten

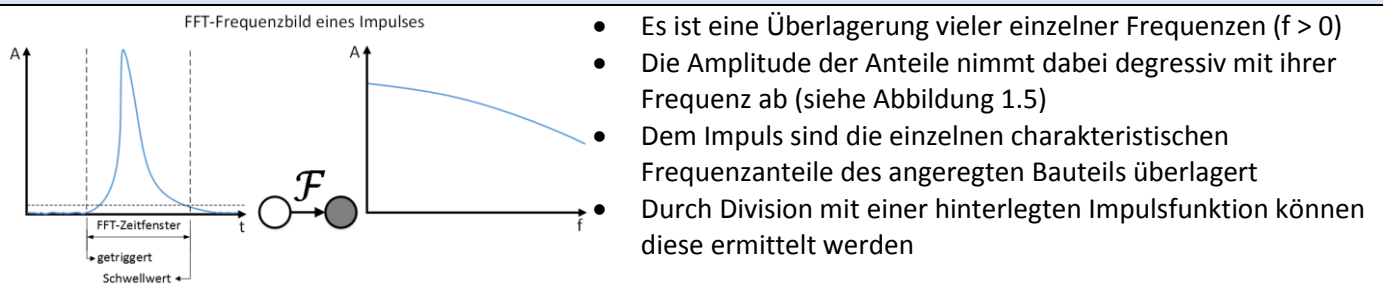


Abbildung 1.5: Impuls im Frequenzbereich

Die Anregung des Balkens erfolgt über drei kurz nacheinander ausgeführte leichte Schläge mit dem Hammer auf die Stelle an der sich normalerweise Messpunkt 5 befände. Auch hier werden pro Durchgang jeweils an drei Messstellen die Beschleunigungen gemessen, wodurch sich in Summe wieder 10x3 Messungen ergeben. Diese werden mittels Fouriertransformation aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert. Anschließend erfolgt die Bildung der Übertragungsfunktion: jedes Messsignal (Beschleunigung) wird durch das anregende Signal (Kraft) dividiert, um das Antwortsignal zu normieren, da das anregende Signal nicht konstant ist. Es resultiert das Autospektrum. Anschließend werden wie im vorherigen Versuch alle Messdaten am Computer übereinandergelegt (Y-Achse Amplitude, X-Achse Zeit) und die einzelnen Peaks untersucht.

1.2.3 Ergebnisse

	Biegung	Torsion
1. Eigenform	380 Hz	1200 Hz
2. Eigenform	1040 Hz	2520 Hz
3. Eigenform	2030 Hz	3850 Hz
4. Eigenform	3320 Hz	5370 Hz
5. Eigenform	4900 Hz	

Beim Vergleich der Eigenfrequenzen für die jeweils gleichen Eigenformen aus beiden Versuchen kann festgestellt werden, dass die gemessenen Frequenzen zwar voneinander abweichen aber sich immer im selben Bereich befinden. Die Abweichungen sind auf die Inhomogenität der Balken, die unterschiedlichen Anregungsarten (Eintrag von Masse in das System bei der Shakeranregung) und Messungenauigkeit zurückzuführen.

2 Auswertung der Peaks

Die Peaks treten auf, wenn eine Eigenfrequenz vorliegt. Dies lässt sich dadurch begründen, dass bei Erreichen der EF die Amplitude maximal ansteigt. Damit steigt auch die Beschleunigung, die der Balken örtlich erfährt.

Diese wird vom Piezokristall des Messsignalaufnehmers in Form von Spannungspotentialen ausgegeben und von der Elektronik in Digitalsignale gewandelt. Die Extremwerte der Digitalsignale sind äquivalent zur auftretenden Beschleunigung. Aus dieser Antwort, kann in Abhängigkeit zur Anregungsfrequenz, auf eine Resonanzfrequenz geschlossen werden. Während der Messung mit dem Shaker werden die Eigenfrequenzen schnell durchlaufen, um ein Aufschwingen zu unterbinden (siehe Änderungsrate in Abbildung 1.3).

Der Zusammenhang zwischen den Peaks und der Eigenfrequenz bzw. Eigenform des Balkens ergibt sich wie folgt:

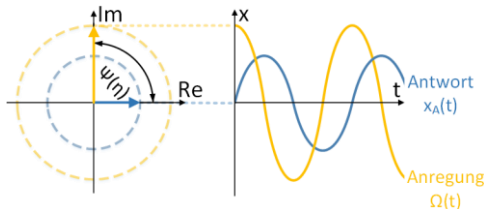


Abbildung 2.1: Nachweiswinkel

Eigenfrequenz bei $\frac{\Omega}{\omega_d} = 1$, mit $\omega_d \approx \omega$

Nachweiswinkel $\psi = 90^\circ$ bei $\eta = \frac{\Omega}{\omega} = 1$

- Stellt sich ein Peak in der Antwort des Balkens bei einer Erregerfrequenz ein
- und weist das anregende- zum Messsignal einen Phasenversatz von $\pm 90^\circ$ auf (hoher Imaginärteil siehe Abbildung 2.1)

So nimmt der Balken an dieser Anregungsfrequenz eine Eigenform an. Er nimmt zu jeder Eigenfrequenz eine zugehörige charakteristische Eigenform an, die durch die graphische Darstellung eingeordnet werden kann. Über sie kann Rückschluss auf Art und Grad der Eigenfrequenz (z.B.: zweite Eigenfrequenz Biegung) getätigt werden.

Tabelle 2.1: Ort der Anregung

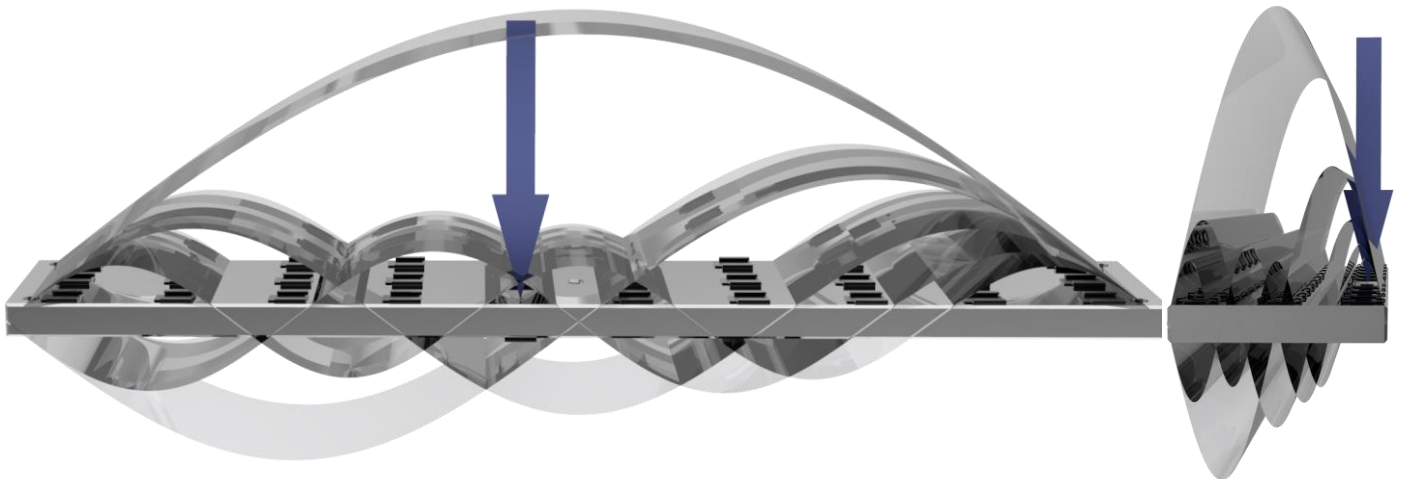


Abbildung 2.2: Ort der Anregung in L-t-Ebene

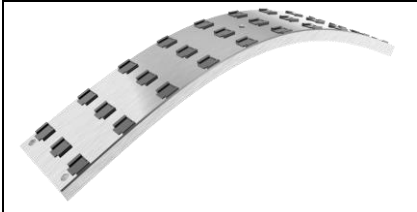
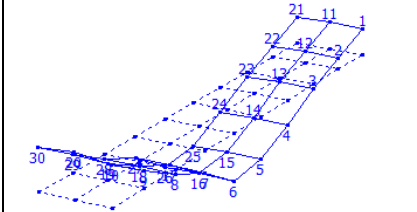
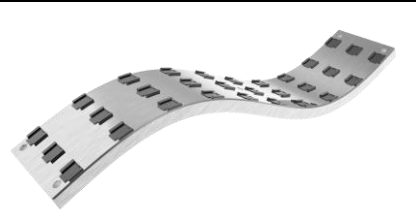
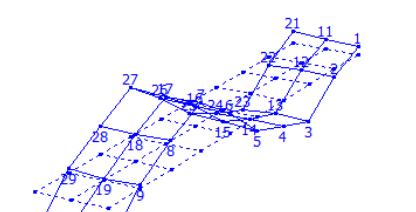
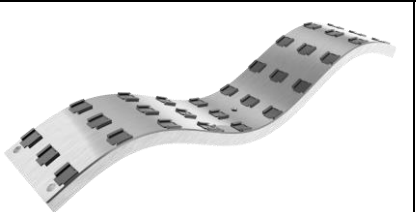
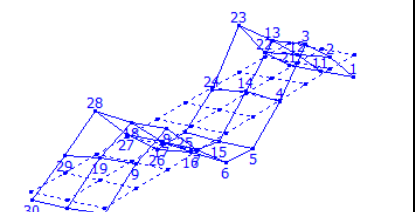
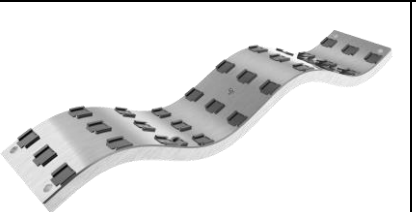
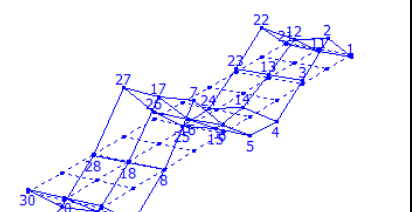
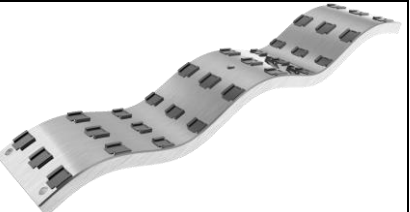
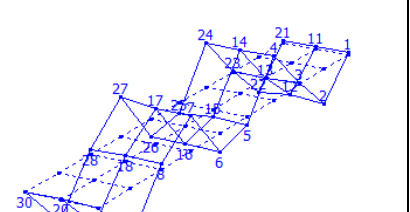
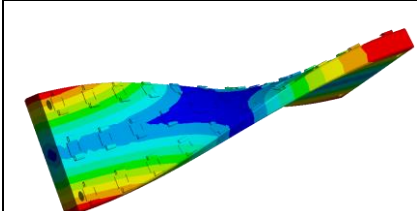
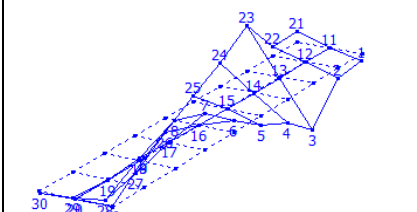
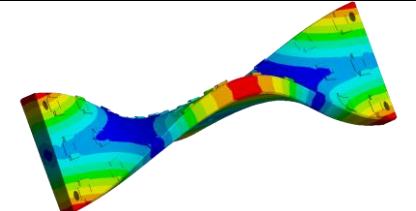
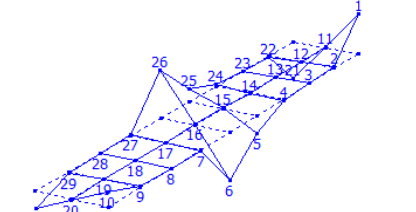
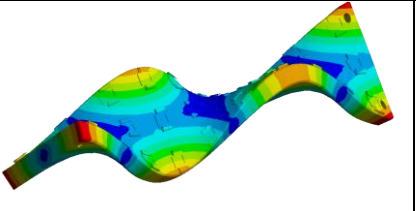
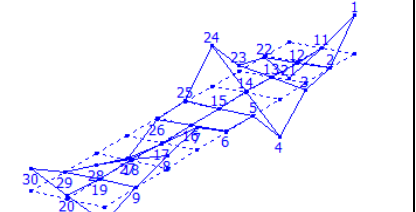
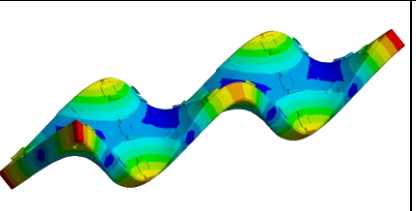
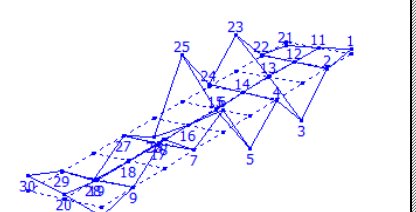
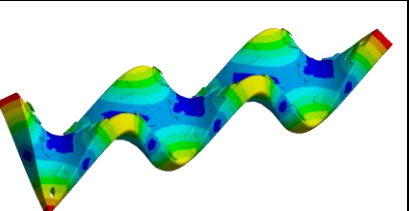
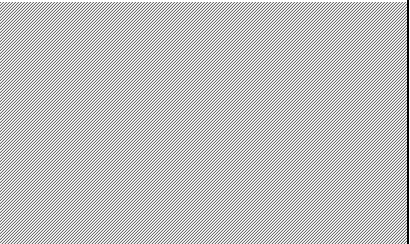
Abbildung 2.3: Ort der Anregung in B-t-Ebene

Warum ist es wichtig, den Ort, an dem die Struktur angeregt wird, sorgsam auszuwählen?

- Die Anregung muss geschickt so gewählt werden, dass nicht in einem Knoten einer bedeutsamen Eigenfrequenz angeregt wird (siehe beispielsweise in Beachtung der bedeutsamen Biegemoden in Tiefe und Länge in Abbildung 2.2)
- Wenn im Knotenpunkt einer oder mehrerer Eigenfrequenzen mit der Frequenz f angeregt wird, gibt der Balken auf die Frequenz f keine Antwort und die Eigenfrequenz geht in der Messung unter
- Wenn mit einer anderen Anregungsart angeregt wird, als gemessen werden soll wird die Eigenform nicht erzeugt
 - Deswegen wurde die Kraft nicht in der Symmetrieebene des Balkens eingeleitet (siehe Abbildung 2.3), sodass der Balken auch in Torsion angeregt wird

Es lassen sich jeweils die ersten 9 Eigenformen in Biegung und Torsion finden. Die Eindeutigkeit der Messergebnisse nimmt dabei zu höheren Frequenzen stark ab. Nicht zuordnungsbar Messergebnisse sind nicht in die Auswertung aufgenommen worden.

Tabelle 2.2: Darstellung der Messergebnisse

1. Biegemode 378Hz / 380Hz	2. Biegemode 1021Hz / 1040Hz	3. Biegemode 2019Hz / 2030Hz	4. Biegemode 3309Hz / 3320Hz	5. Biegemode 4766Hz / 4900Hz
 	 	 	 	 
1. Torsionsmode 1200Hz / 1240Hz	2. Torsionsmode 2508Hz / 2520Hz	3. Torsionsmode 3850Hz / 3850Hz	4. Torsionsmode 5400Hz / 5370Hz	5. Torsionsmode
 	 	 	 	 

3 Analytische Berechnung der Biegemoden

Berechnung der Eigenfrequenzen	
Eingangsparameter des Flachstabs	
Geometrie	Werkstoff
$L = 400mm$ $B = 70mm$ $t = 12mm$	$E_{1.4301} = 210000 \cdot 10^3 \frac{kg \cdot mm}{s^2 \cdot mm^2}$ $\rho_{1.4301} = \frac{7,84}{10^3} \frac{g}{mm^3}$
Ausgangsparameter des Flachstabs	
Aus Geometrie	
$I = I_y = I_B = \frac{B \cdot t^3}{12}$ $\Rightarrow I = 10080mm^4$ $A = A_{Bt} = B \cdot t$ $\Rightarrow 840mm^2$	$\lambda_j = ((2 \cdot j) + 1) \cdot \frac{\pi}{2}$ $\omega_j = \lambda_j^2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A \cdot L^4}}$ $f_j = \frac{\omega_j}{2 \cdot \pi}$

j	Λ_j	ω_j	f_j	f_{j_Shaker}	$f_{j_Impulshammer}$
[]	[]	[rad/s]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	4,71	2488	396	378	380
2	7,85	6912	1100	1021	1040
3	11,00	13547	2156	2019	2030
4	14,14	22395	3564	3309	3320
5	17,28	33454	5324	4766	4900

4 Die Modalanalyse

Mode	Zuordnung	Frequenz [Hz]
1	Translation X	0
2	Translation Y	0,0062
3	Translation Z	0,0079
4	Drehen Y	7,0827
5	Drehen Z	12,269
6	Drehen X	83,762
7	1. Biegung (Ebene Lt)	392,94
8	2. Biegung (Ebene Lt)	1080,8
9	1. Torsion (Ebene Bt)	1279,1
10	1. Biegung (Ebene LB)	2071,4
11	3. Biegung (Ebene Lt)	2106,8
12	2. Torsion (Ebene Bt)	2605,7
13	4. Biegung (Ebene Lt)	3461,7
14	3. Torsion (Ebene Bt)	4012,3
15	2. Biegung (Ebene LB)	4974,5
16	5. Biegung (Ebene Lt)	5115,6
17	4. Torsion (Ebene Bt)	5553,7

Eine Modalanalyse mittels FEM-Software spart Zeit und Geld. Die Abschätzung von Eigenformen in komplexen Geometrien ist schwer, wenn nicht unmöglich. Die Messungen der Eigenformen am realen Bauteil würden die Herstellung eines Prototypen erfordern. Dies ist teuer und unwirtschaftlich. Kritische Frequenzen können über die Voraussage der Eigenformen in einer Modalanalyse mittels FEM ermittelt werden. So können kritische Eigenfrequenzen während des Konstruktionsprozesses erkannt und ihnen über konstruktive Anpassungsmaßnahmen frühzeitig entgegengesteuert werden.

In einer Modalanalyse hat die Lagerung des Bauteils entscheidenden Einfluss auf die Eigenformen. Zur Simulation der durchgeführten Versuche wird das Bauteil ungelagert im Raum analysiert. Aus diesem Grund entsprechen die ersten 6 Eigenfrequenzen den 6 Freiheitsgraden des Bauteils (siehe Tabelle linke Hand).

