

---

# Experimentelle und numerische Analysen zum Aufbau eines Tragwerks mit Tilgern

S. Herold, T. Koch, D. Mayer, J. Pöllmann, T. Röglin, T. Siebel

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF



# Übersicht

---

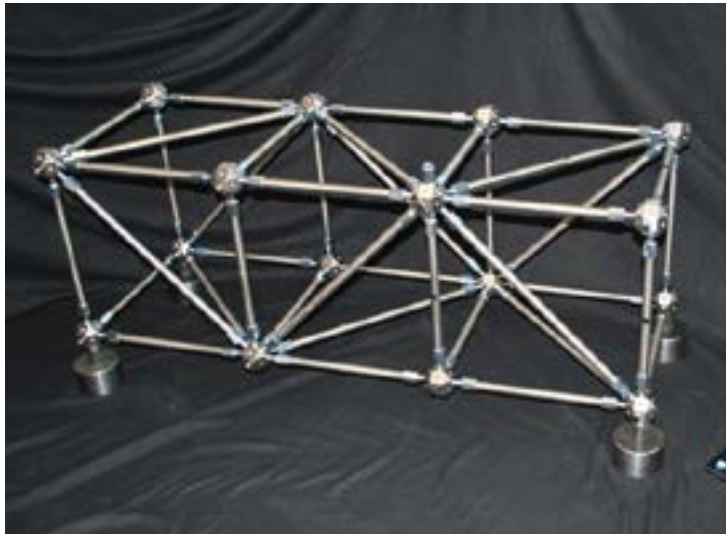
- Einleitung
- Entwicklung eines Tragwerks
  - Experimentelle Frequenzgang- und Modalanalysen für verschiedene Konfigurationen
  - Aufbau modularer numerischer Modelle
  - Modellabgleich
- Auslegung von Tilgern für die Beeinflussung einer globalen Biegeeigenform
  - Konstruktion und Aufbau der Tilger
  - Charakterisierung der Tilger und Einstellung der Tilgerparameter
- Analyse des Tragwerks mit Tilgern
  - Experimentelle Analyse
  - Numerische Analyse/Simulation
  - Vergleich von Simulation und Experiment
- Zusammenfassung/Ausblick



# Projekt LOEWE AdRIA - Funktionsdemonstratoren

- LOEWE AdRIA - Übergreifendes Projekt zur Adaptronik
- Förderung durch das Land Hessen
- Zusammenarbeit zwischen Fraunhofer LBF, Technischer Universität Darmstadt und Hochschule Darmstadt

FD Tragwerk



FD Motorlager

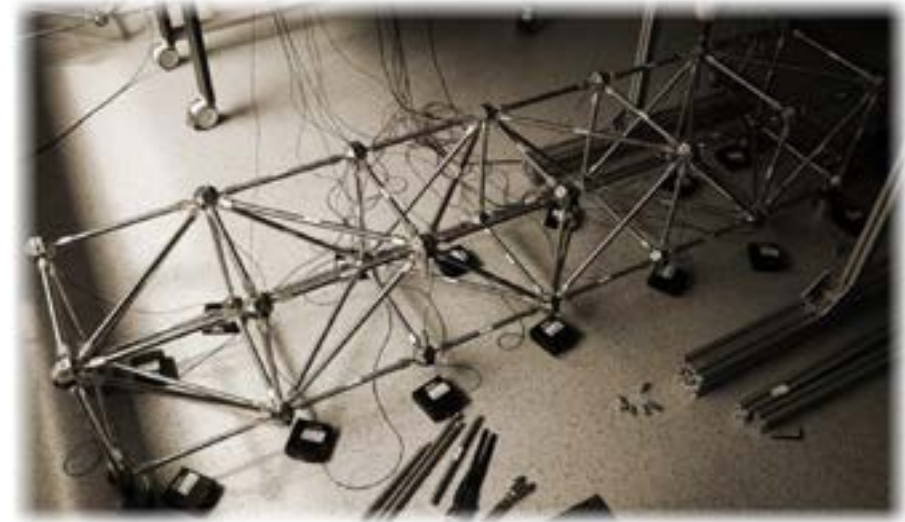


FD Akustik



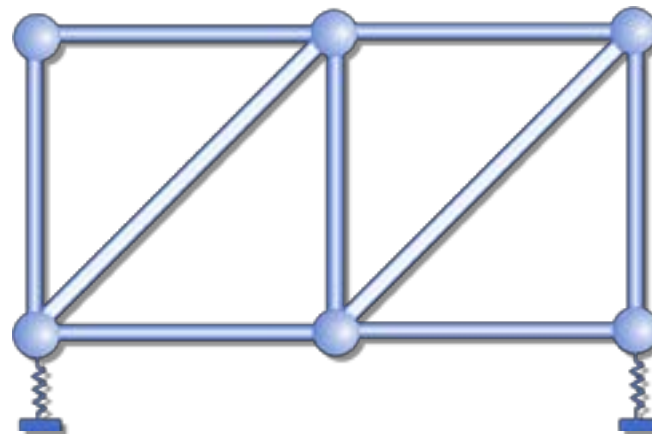
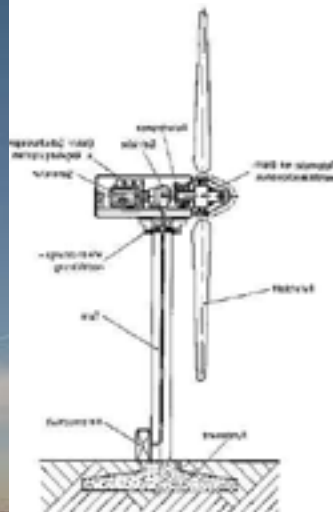
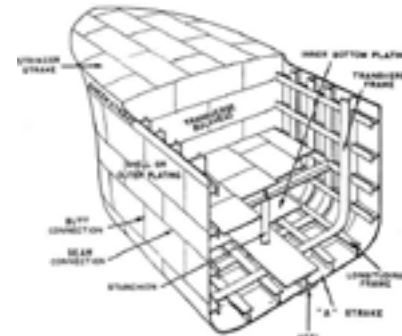
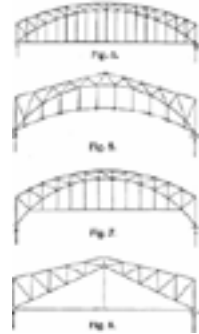
# Motivation - Tragwerk

- Abstraktion für Leichtbaustrukturen (Luft- und Raumfahrt, Infrastruktur,...)
- Grundlegendes Konzept der Mechanik
- Bekanntes Benchmark-Problem der Adaptronik
- Definierte Freiheitsgrade/ Knoten
- Aufbau modularer Teststrukturen
- Gezielte Auslegung des dynamischen Verhaltens mit numerischen Modellen
- Validierung mit Experimentellen Modalanalysen und Frequenzgangmessungen
- Untersuchung schwingungstechnischer Maßnahmen (passiv und aktiv)
  - passive (verteilte) Tilger
  - Shunt-Damping Techniken, Aktive Stäbe
  - Adaptive (verteilte) Tilger/Neutralisatoren
  - Aktive Systeme mit Inertialmassenaktoren





# Abstraktion für technische Leichtbausysteme

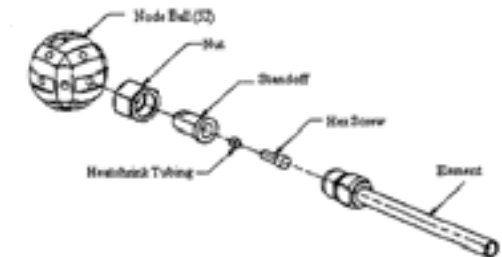
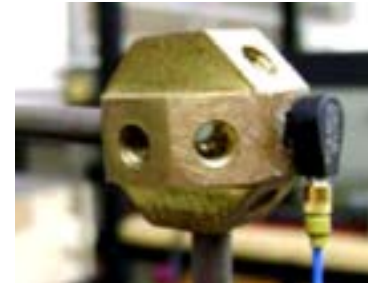
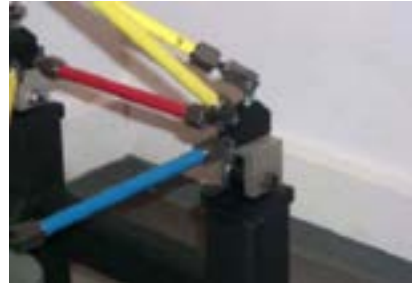
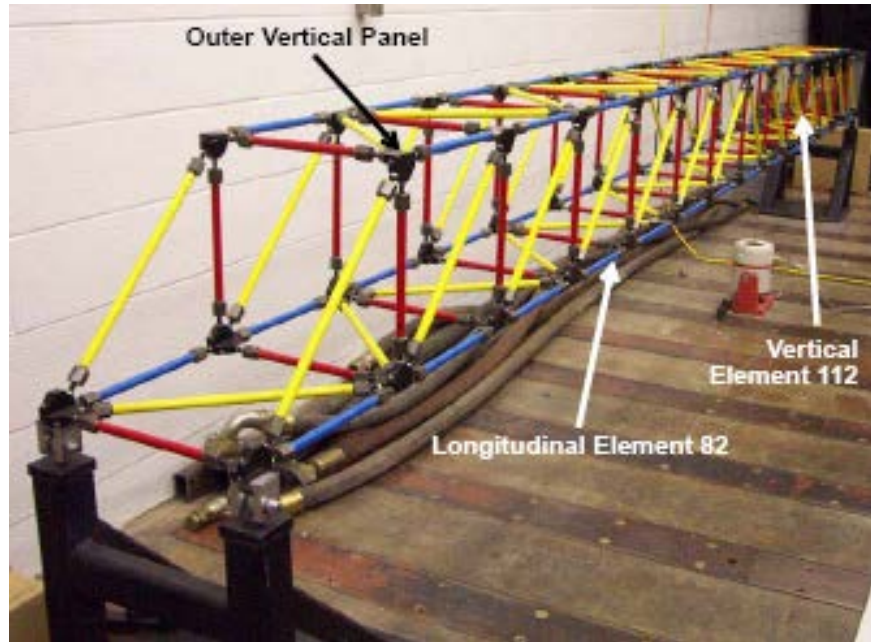


Archivierungsangaben

LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung  
Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz



# Beispiele für ähnliche Strukturen



Y. Gao, "STRUCTURAL HEALTH MONITORING STRATEGIES FOR SMART SENSOR NETWORKS", University of Illinois at Urbana-Champaign, 11.07.2005.

Quelle: <http://www.nps.edu> (Naval Postgraduate School)

# Erster Entwurf

Stabtragwerk aus 3 „Einheitszellen“,

Abmessungen ca. 90x30x30

Dynamisches Verhalten:

**Starrkörpermoden**

→ z.B. Vibration Control mit Tilgern

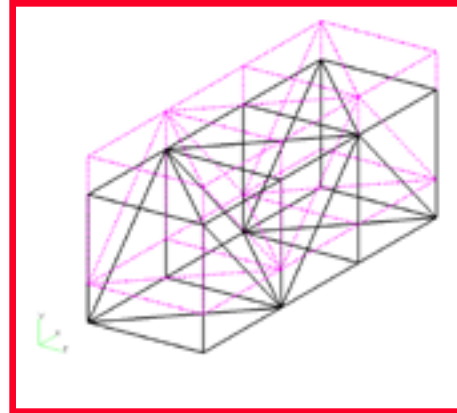
**Elastische Moden (global)**

→ Vibration Control mit Tilgern oder aktiven Stäben

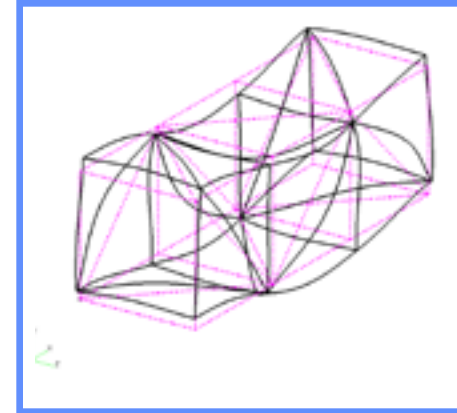
→ Elastische (Biege-)Moden der Streben

→ SHM ...?

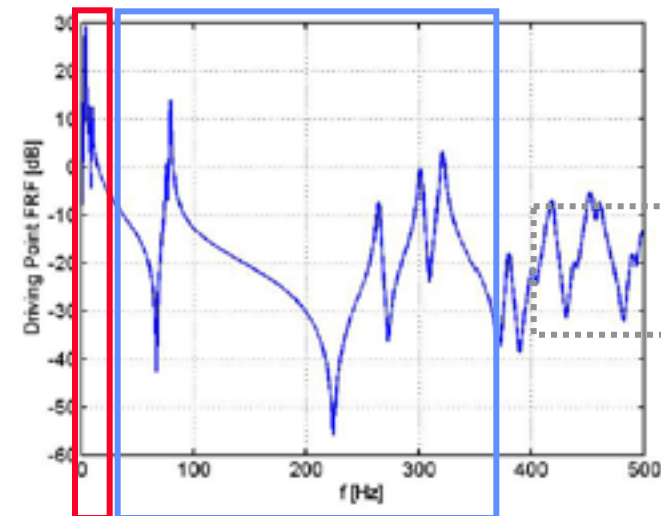
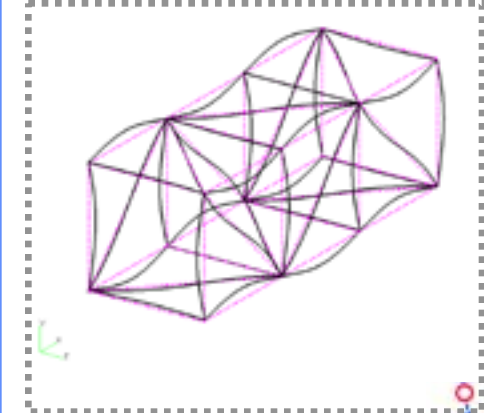
Mode 3: 7 Hz



Mode 11: 321 Hz



Mode 47: 596 Hz







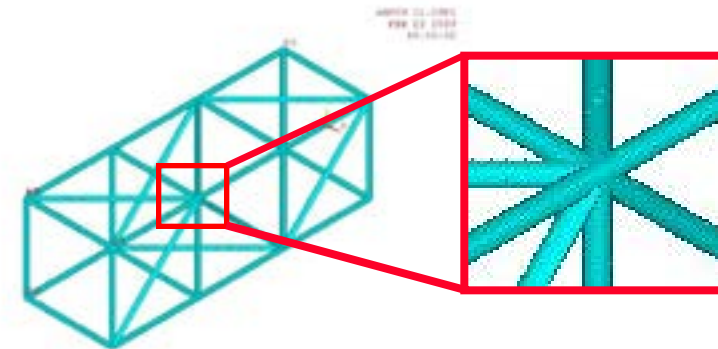


# Detailierung (3D- Balkenmodelle - Ansys)

## Stufenweise Verfeinerung der Modelle

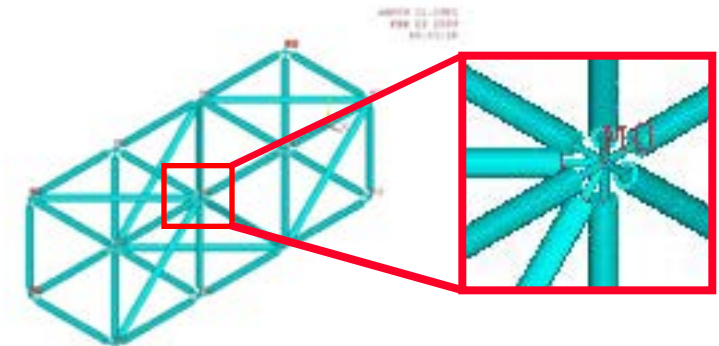
### Modell 1

- Elastische 3D-Balken mit rohrförmigem Querschnitt,
- diskrete Massenelemente an den Koppelstellen,
- Lagerung der Struktur auf diskreten Federelementen



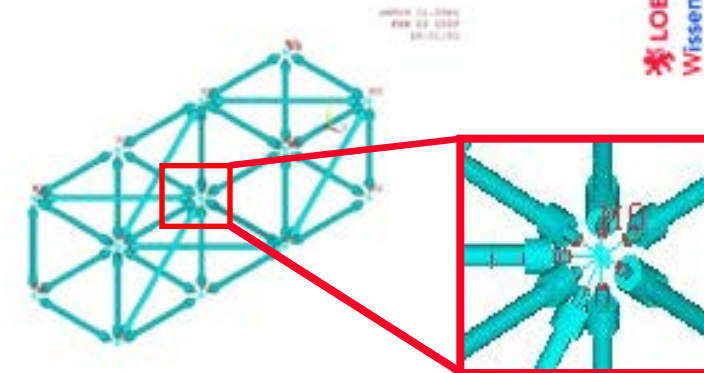
### Modell 2

- Elastische 3D-Balken (3 Abschnitte mit unterschiedlichem Querschnitt),
- diskrete Massenelemente an den Koppelstellen (Einbeziehung der Rotationsträgheit),
- Lagerung der Struktur auf diskreten Federelementen



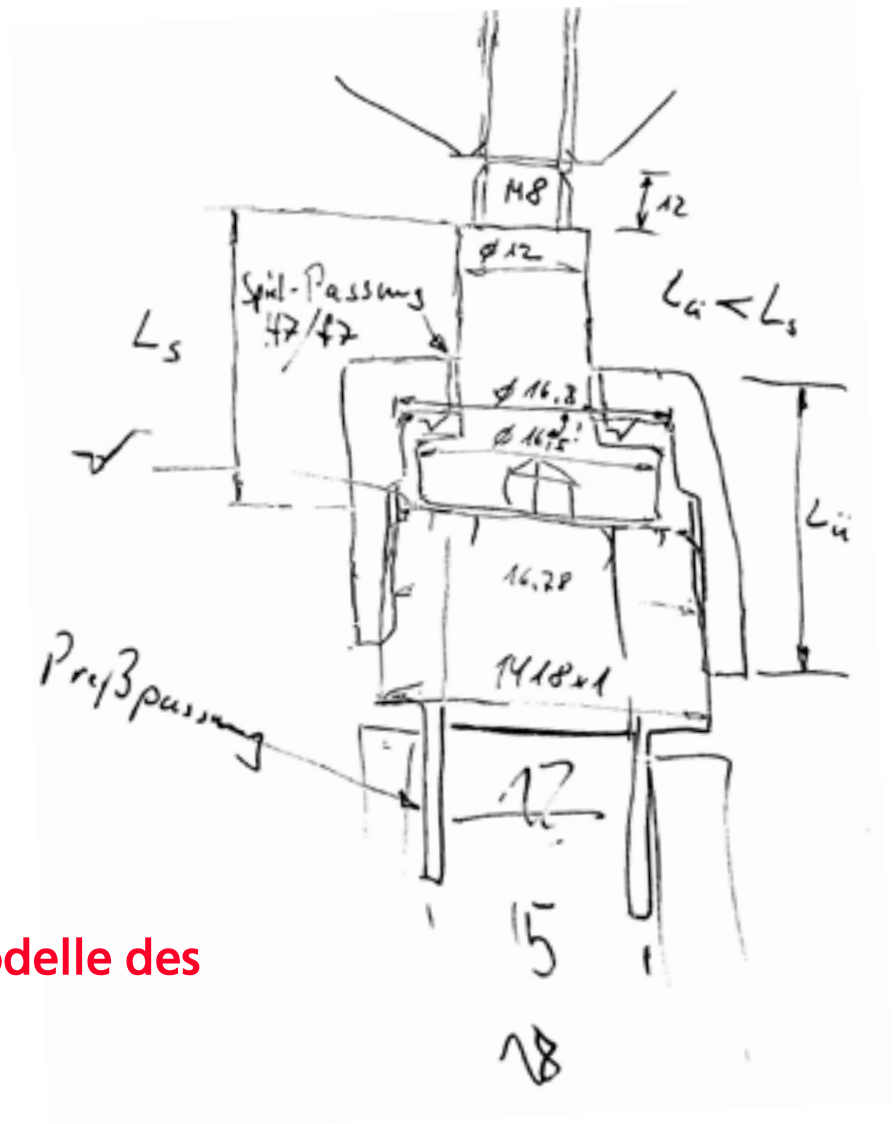
### Modell 3

- Elastische 3D-Balken (5 Abschnitte mit unterschiedlichem Querschnitt),
- diskrete Massenelemente an den Koppelstellen (Einbeziehung der Rotationsträgheit und der Geometrie der Massen),
- Lagerung der Struktur auf diskreten Federelementen
- Parametrierung des Modells und der Ergebnisausgabe (Makros)



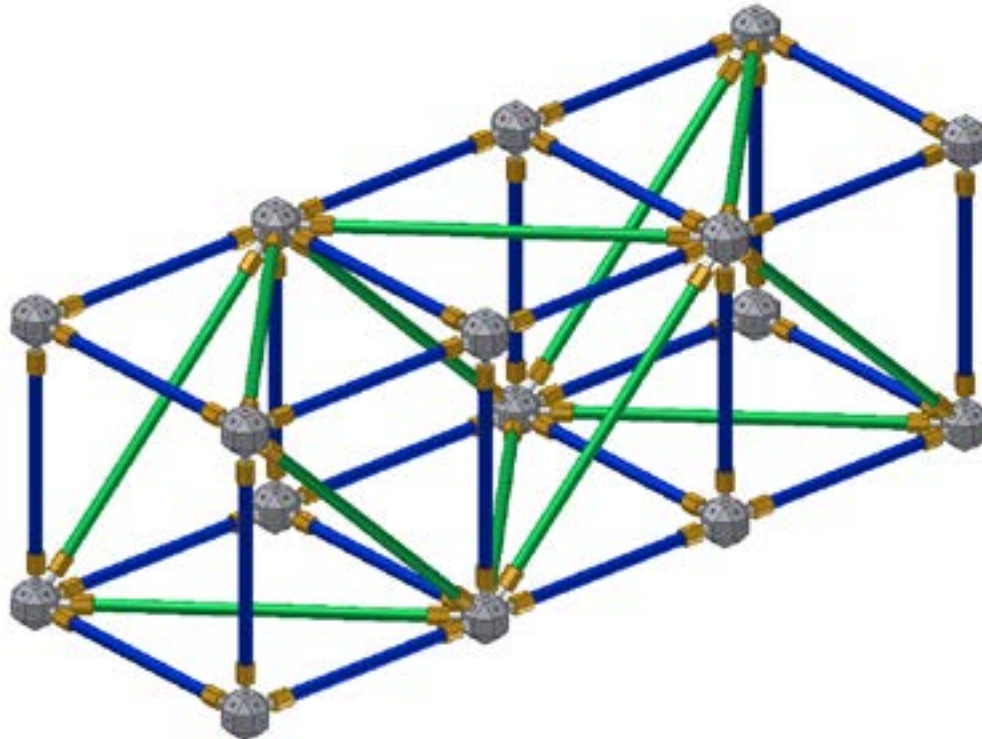
# Konstruktive Details und Verfeinerungen

- Überwurfmutter als Sonderanfertigung, zusammen mit den Schrauben und Endstücken der Stäbe (ca. 600 Stück)
- Endstücke mit Gewinde werden auf die Stäbe (180 kurze und 100 lange) aufgespresst
- Möglichkeit, einfach verschiedene Stäbe zu bauen (z.B. Rohr, Vollmaterial, CFK,...)
- Knoten (120 Stück) aus Edelstahl gefräst mit Anschlussmöglichkeiten jeweils im 45°-Raster

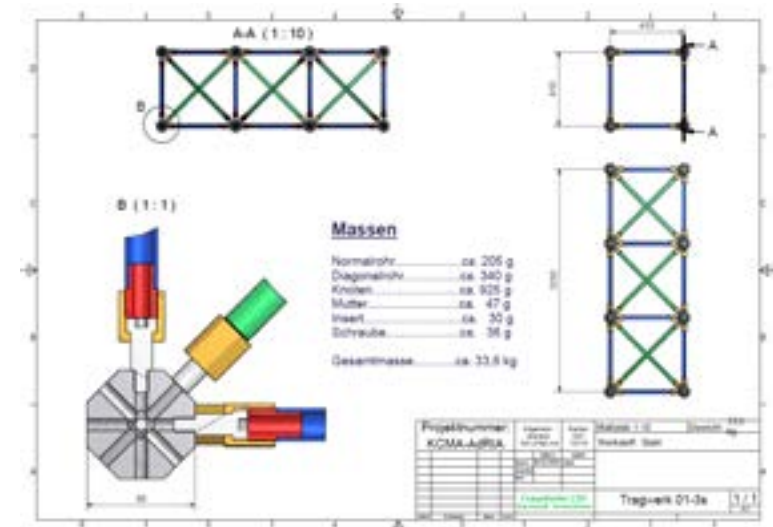


**Konstruktive Änderungen werden in die FE-Modelle des Tragwerks (bzw. den Komponenten) integriert**

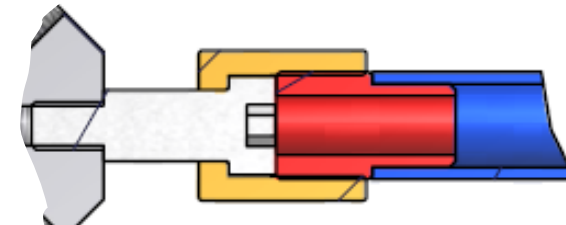
# Verfeinerter konstruktiver Entwurf



3D-Darstellung



Konstruktionszeichnung



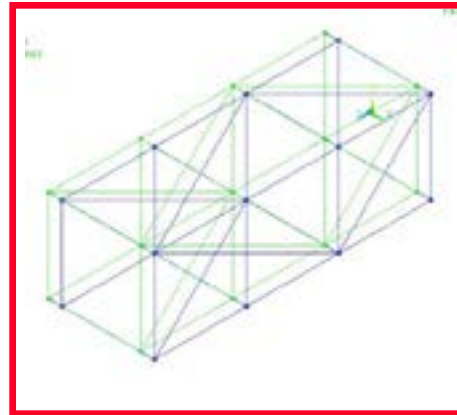
Verbindungselemente

# Verfeinerter konstruktiver Entwurf – num. Ergebnisse (Modell 3)

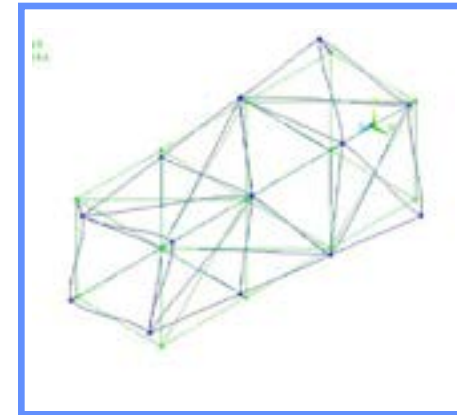
Stabtragwerk aus 3 „Einheitszellen“,

- Abmessungen  
ca. 1.20 m x 0.44 m x 0.44 m

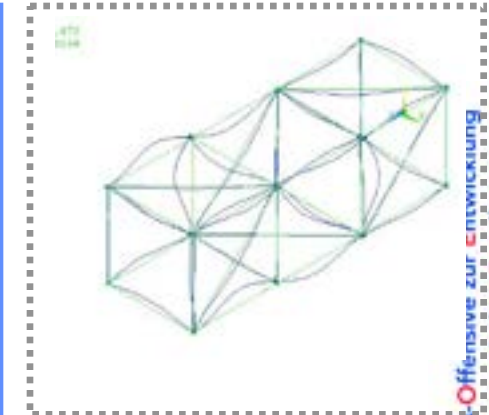
Mode 3: 5.5 Hz



Mode 7: 75 Hz



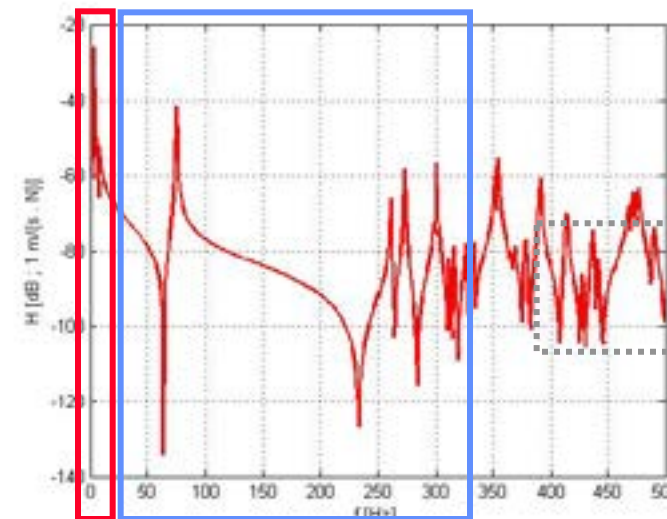
Mode 50: 476 Hz



Starrkörpermoden

Elastische Moden (global)

Elastische (Biege-)Moden der  
Streben





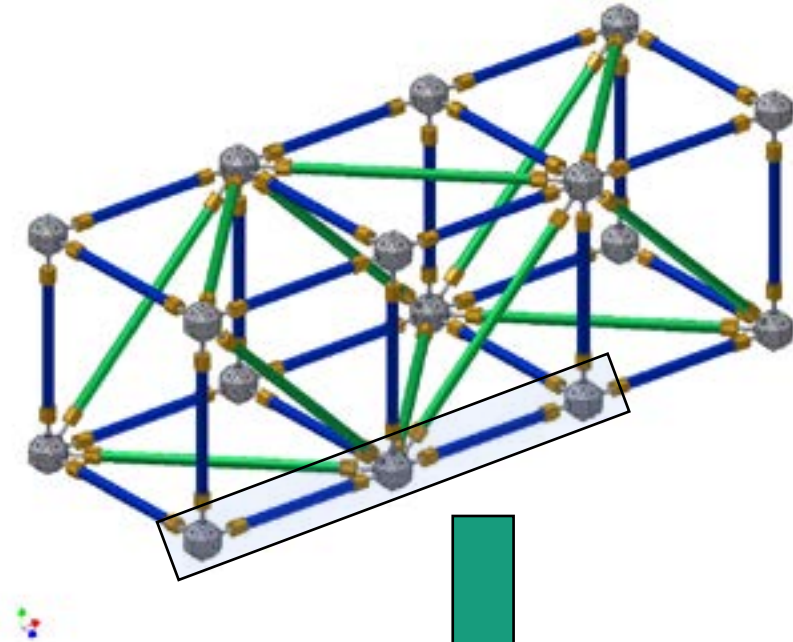
# Erster Schritt zur Realisierung

## Fertigung eines Prototypen aus drei Knoten und zwei Stäben:

- Test der Konstruktion und des Zusammenbaus
- Abschätzung von Steifigkeiten der Verbindungen
- Abgleich der Modellierung (u.a. der Verbindungselemente)



**Folge: kleinere konstruktive Modifikationen**

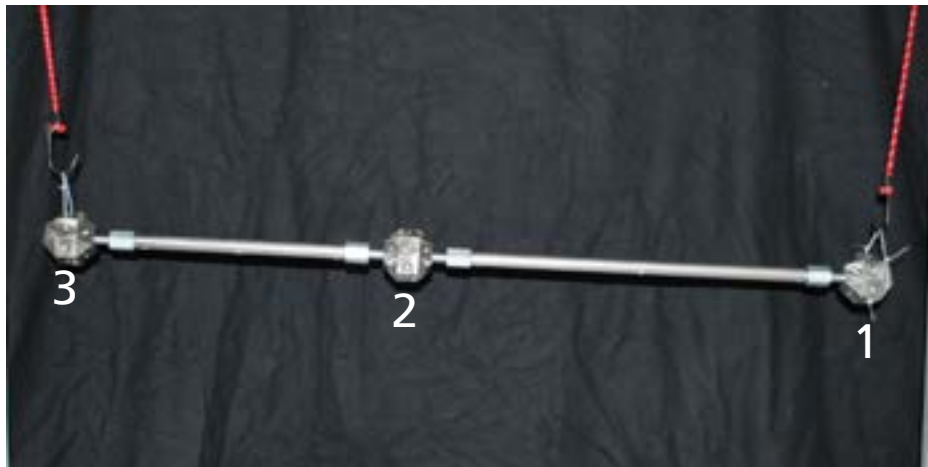


# Experimentelle Untersuchungen

- Fertigung von 3 Knoten und 3 Stäben
- Erste Messungen wurden mit u.g. Konfiguration durchgeführt (exp. Modalanalyse und FRF-Messungen)

## FRF-Messungen

- Messwerterfassung: Ono Sokki CF5220
- Beschl.-sensor: PCB M352C68 (100 mV/g)
- Impulshammer: PCB 086C02 (11 mV/N)



Archivierungangaben

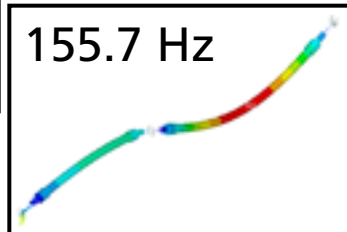
Werte für Frequenzen, Amplituden und Dämpfungen  
(bestimmt mit auto-peak-picking Verfahren *max\_damp* für die ersten 9 Resonanzfrequenzen aus Summenfrequenzgang)

f [Hz]	A [E1/E2]	J [-]
3.0000e+001	1.2859e-001	1.7070e-002*
1.5800e+002	7.0243e-003	2.4090e-003
2.2700e+002	4.9083e-004	4.2319e-003
2.9100e+002	4.1419e-003	4.2036e-003
4.1700e+002	5.3523e-004	3.6748e-003
4.6200e+002	8.6562e-004	3.0045e-003
6.5000e+002	6.1194e-004	4.4311e-003
9.4800e+002	6.0477e-004	1.8783e-003
9.6000e+002	4.3881e-004	2.0123e-003

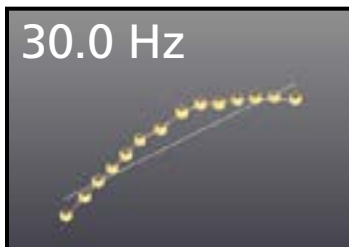
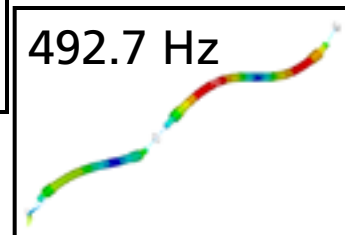
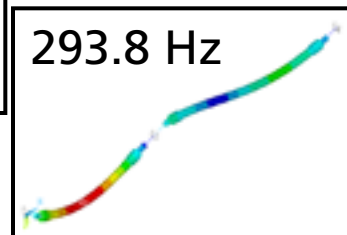
\* Nachmessung erforderlich → vermutlich bei Messzeitende nicht ausgeschwungen

# Experimentelle Untersuchungen

Eigenformen aus numerischer und Experimenteller Modalanalyse stimmen gut überein

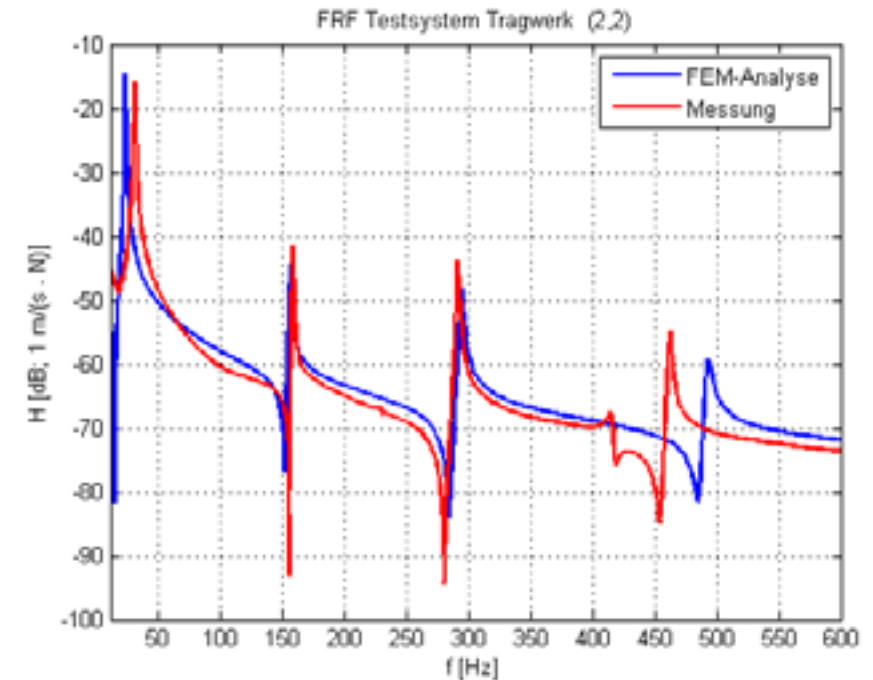


Simulation



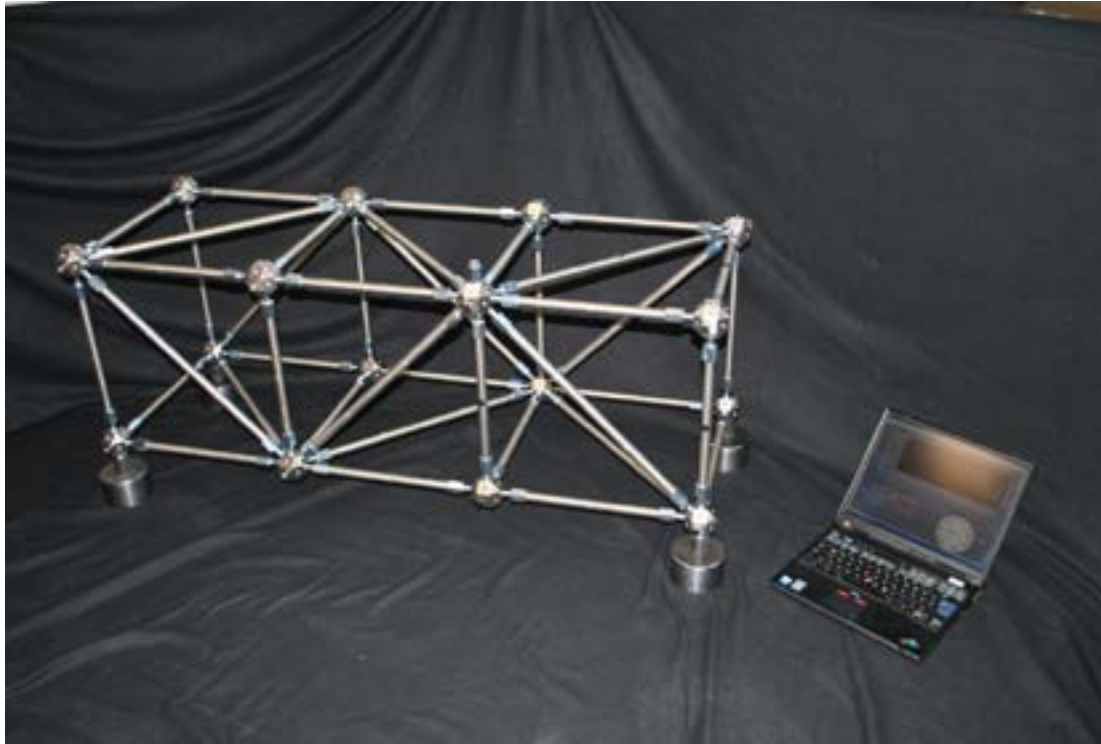
Experiment

Archivierungsaangaben



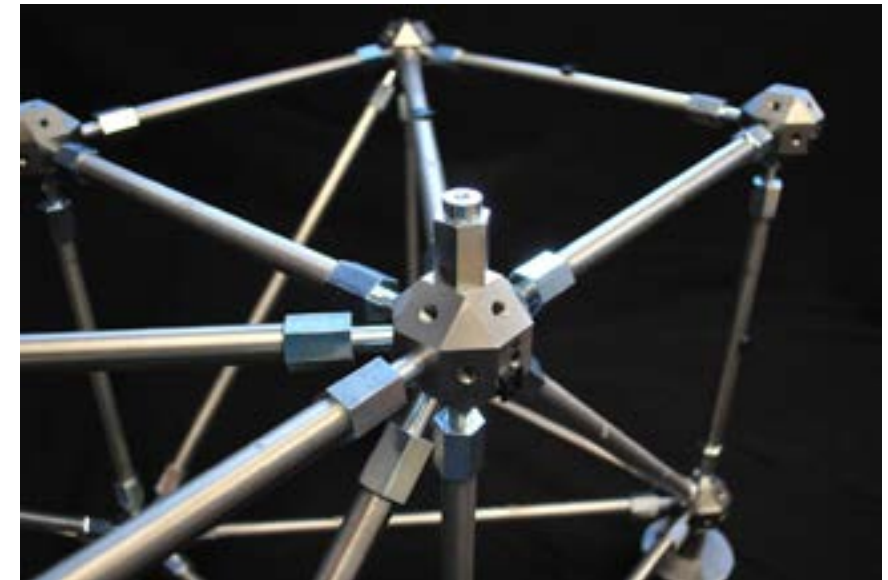
Vergleich der Driving-Point FRF von Simulation und Experiment

# Experimentelle Modalanalyse



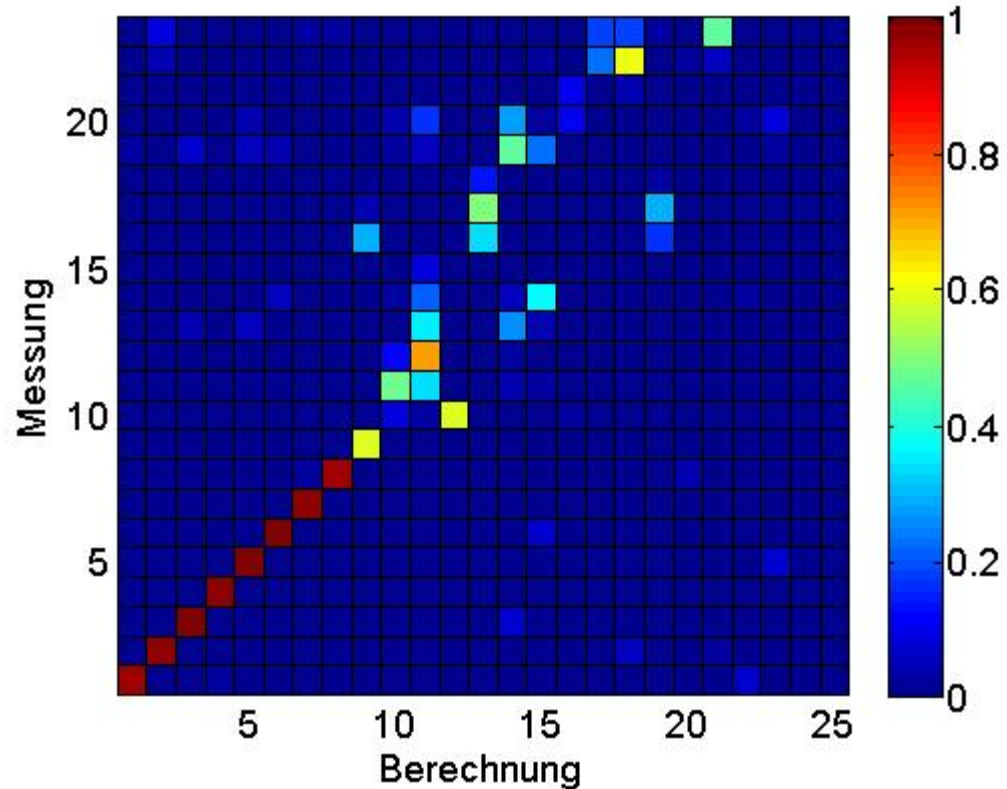
- Knotenpunkte und kurze Stäbe jeweils ein Sensor
- Lange Stäbe zwei Sensoren
- Frequenzbereich bis 250 Hz

- Anregungspunkte auf konstanter Position
- Anregung in 3 Richtungen
- 68 Positionen gemessen mit jeweils 8 3D-Beschleunigungssensoren
- LMS Test Lab





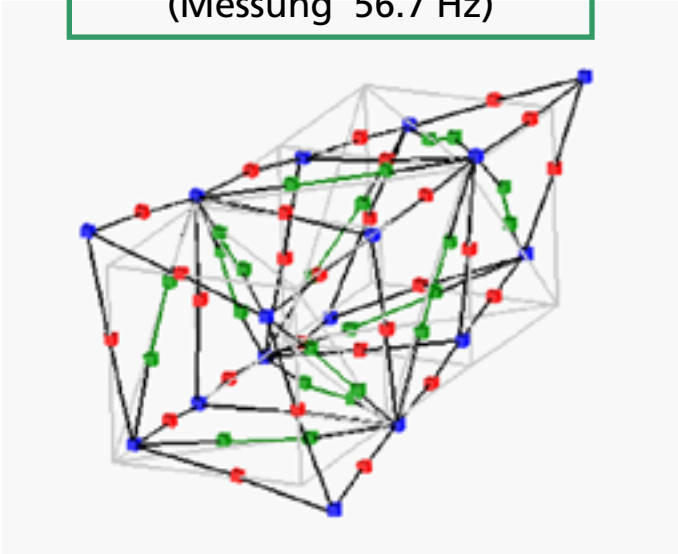
# MAC – Vergleich



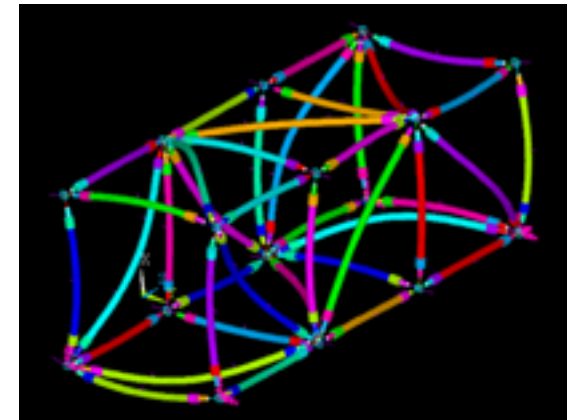
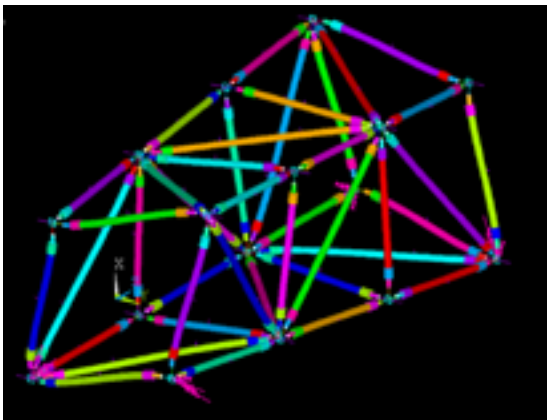
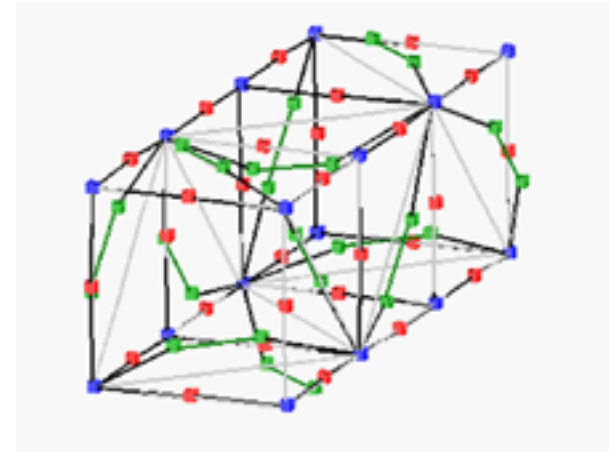
Messung Index	Ansys Index	MAC-Wert	Frequenz Messung	Frequenz Ansys
1	1	0,96	3,67	3,54
2	2	0,97	4,47	3,74
3	3	0,99	6,44	5,22
4	4	0,97	10,61	9,47
5	5	0,99	11,68	11,92
6	6	0,99	15,94	15,80
7	7	0,98	55,98	53,61
8	8	0,96	56,76	54,29
9	9	0,58	178,9	181,6
11	12	0,70	188,2	190,5
12	10	0,58	189,1	189,9
18	22	0,60	209,1	235,2

# Typische Schwingformen

Rautenform  
(Messung 56.7 Hz)



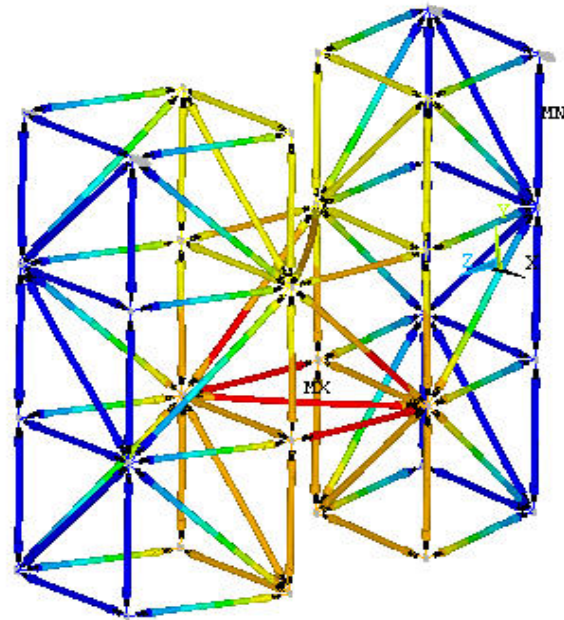
Biegung lange Stäbe  
(Messung 189.1 Hz)



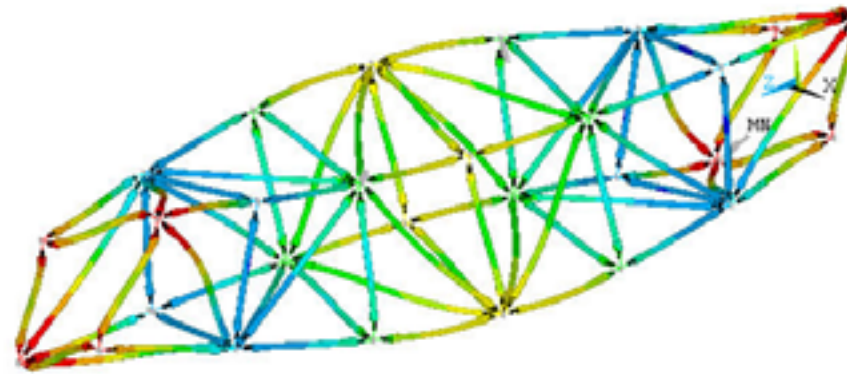
Archivierungsangaben

LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung  
Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz

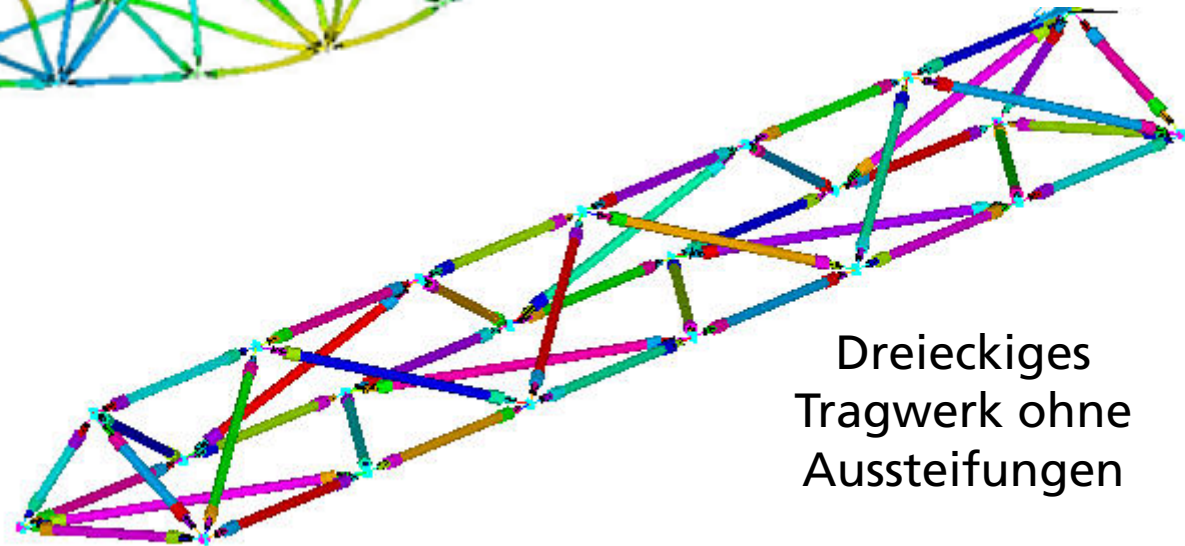
# Alternative Tragwerksstrukturen



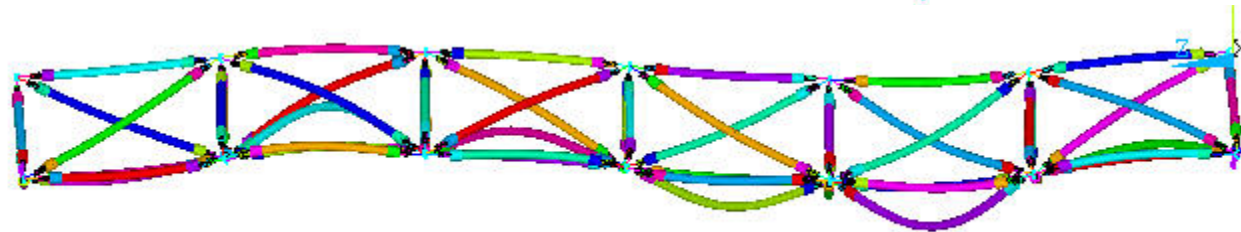
H-Form



6-zelliges Tragwerk



Dreieckiges  
Tragwerk ohne  
Aussteifungen



Dreieckiges  
Tragwerk mit  
Aussteifungen

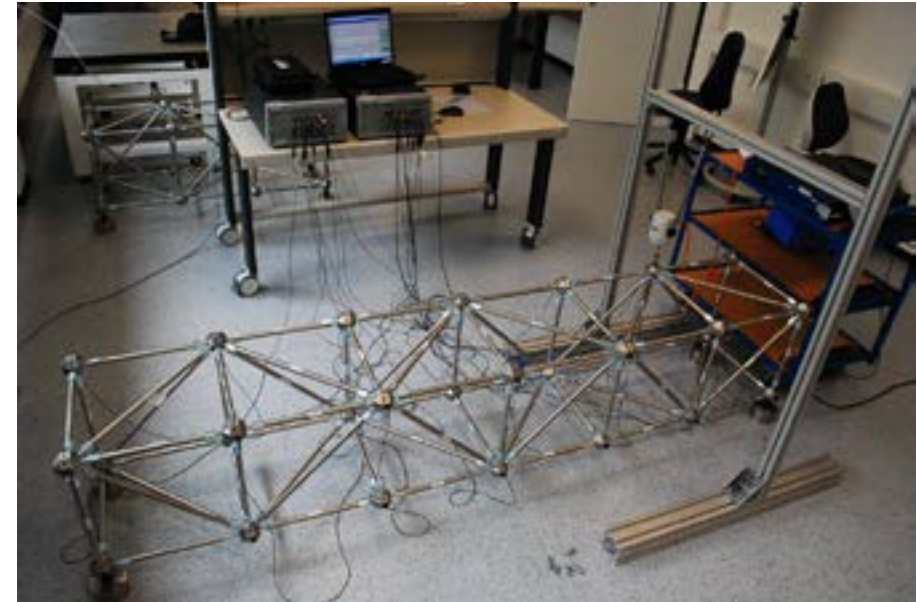


# Tragwerk mit 6 Zellen

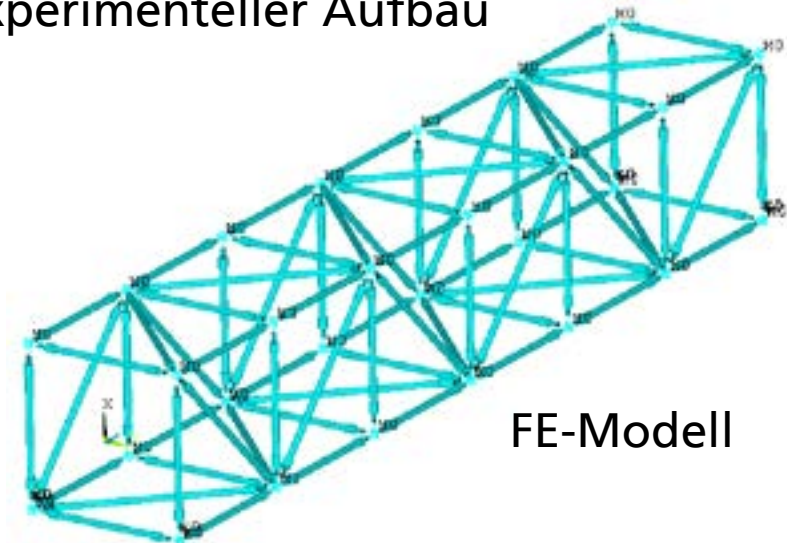
- Aufbau eines Tragwerks mit 6 Zellen in Hardware und als modulares numerisches Modell

## Experimentelle Modalanalyse

- Anregungspunkte auf konstanter Position (Knoten 13)
- Anregung in 3 Richtungen
- 28 Positionen gemessen mit jeweils 14 3D-Beschleunigungssensoren
- Ein Sensor pro Knotenpunkt
- Frequenzbereich bis 250 Hz
- Erfassung und Auswertung mit SCADAS III und LMS Test Lab



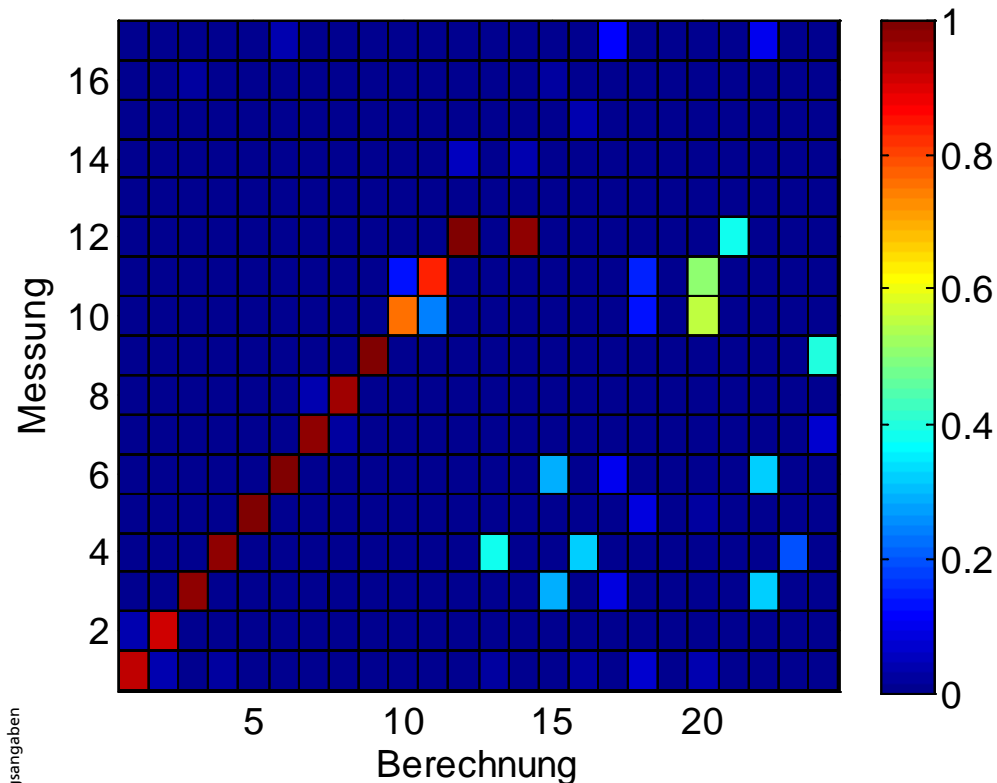
Experimenteller Aufbau



FE-Modell

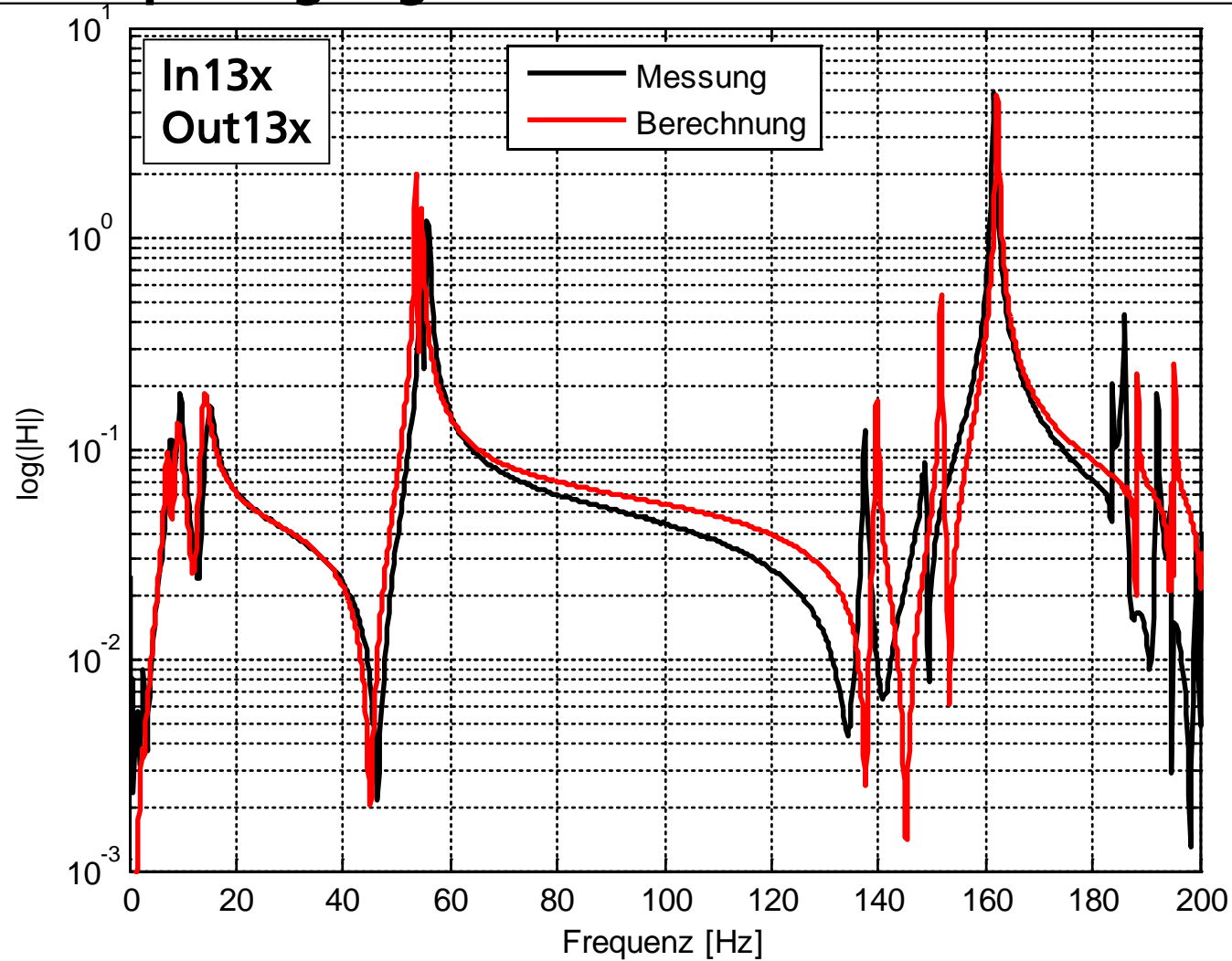


# MAC-Vergleich



Messung Index	Ansys Index	MAC-Wert	Frequenz Messung	Frequenz Ansys
1	1	0,93	3,11	2,62
2	2	0,92	3,53	2,78
3	3	0,98	5,54	4,30
4	4	0,97	7,98	7,02
5	5	0,99	9,61	8,78
6	6	0,99	14,88	13,48
7	7	0,97	54,65	52,91
8	8	0,96	55,83	53,86
9	9	0,99	137,5	140,5
10	10	0,76	148,4	151,5
11	11	0,84	148,8	152,0
12	12	0,99	161,7	163,5

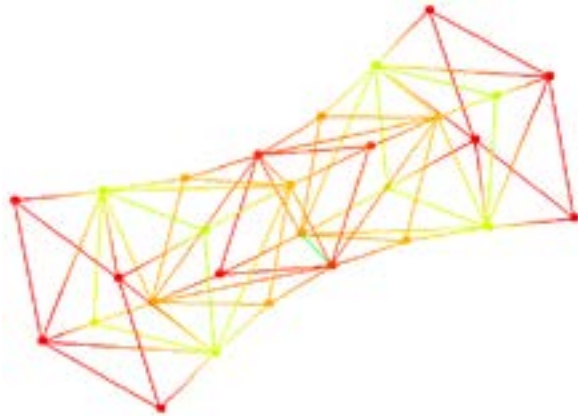
# Typischer Frequenzgang



Leichte Abweichungen der dritten Rauteneigenform und der Biegemoden

# Typische Schwingformen

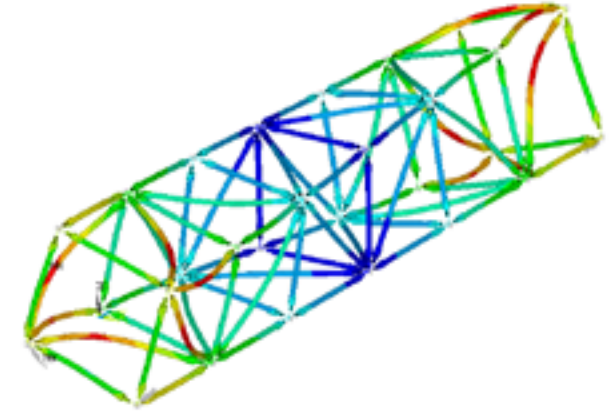
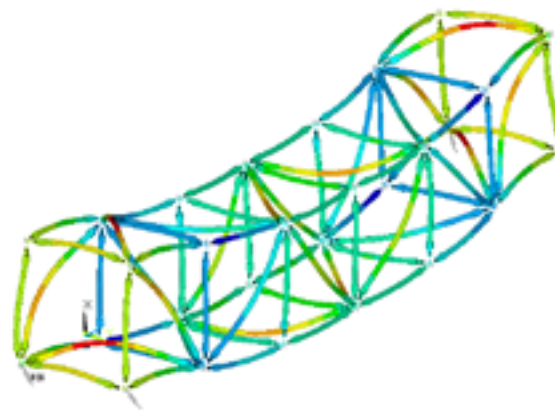
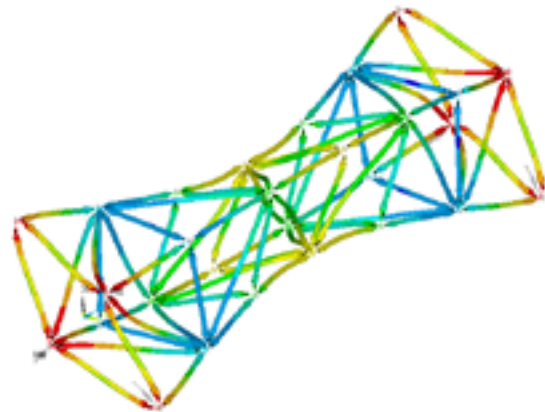
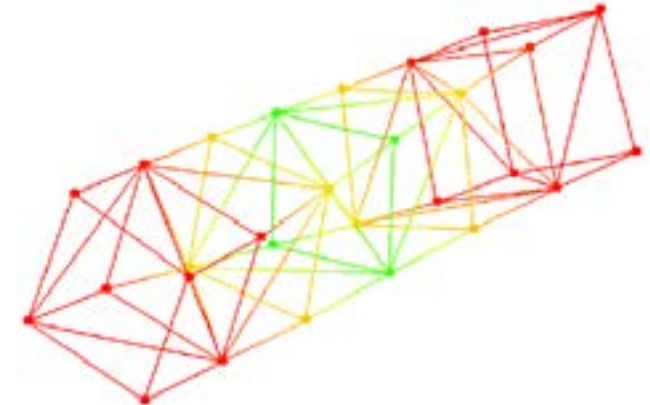
3. Rautenform  
(Messung 137.5 Hz)



2. Biegung  
(Messung 148.8 Hz)



1. Torsion  
(Messung 161.7 Hz)



Archivierungsaangaben

LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung  
Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz

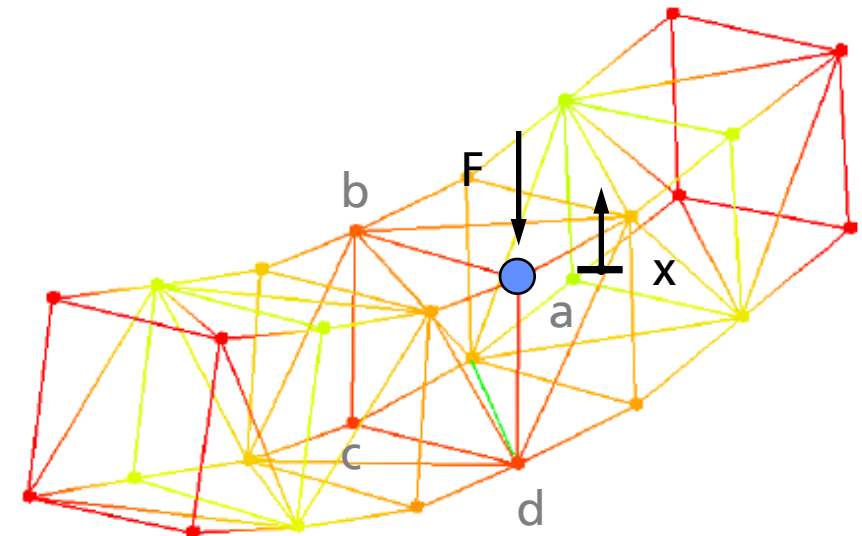
# Beeinflussung einer Biegeeigenform mit Tilgern

## Ziel:

Reduktion der Schwingungsamplituden des Tragwerks im Bereich der Biegeresonanz um 150 Hz mit Tilgern

## Vorgehen:

- Anregung / Messung an Punkt a (FRF Geschwindigkeit/Kraft)
- Auslegung von Tilgerwirkung und -parametern für bis zu vier Tilger mit FEM und Simulink
- Konstruktion und Aufbau der Tilger
- Charakterisierung der Tilger und Einstellung der Tilgerparameter
- Vermessung des Tragwerks mit Tilgern
- Simulation des Tragwerks mit Tilgern
- Vergleich von Simulation und Experiment





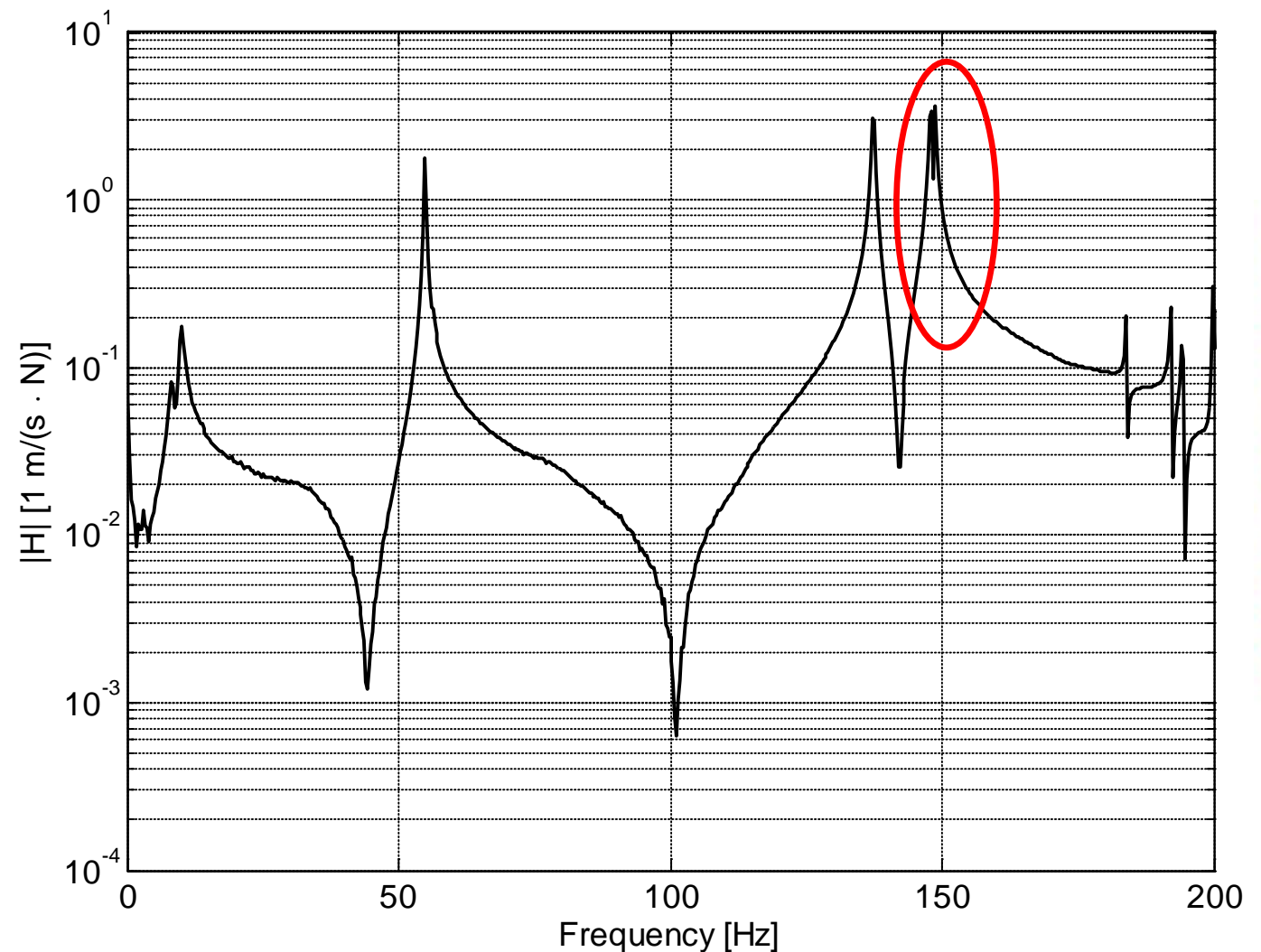
# Beeinflussung einer Biegeeigenform mit Tilgern

## Ausgangssituation

- Ausgezeichnete Eigenfrequenzen in den Bereichen unter 10 Hz um 55 Hz um 135 Hz und um 150 Hz
- Weitere Eigenfrequenz bei um 160 Hz (wird hier nicht angeregt)

## Ziel:

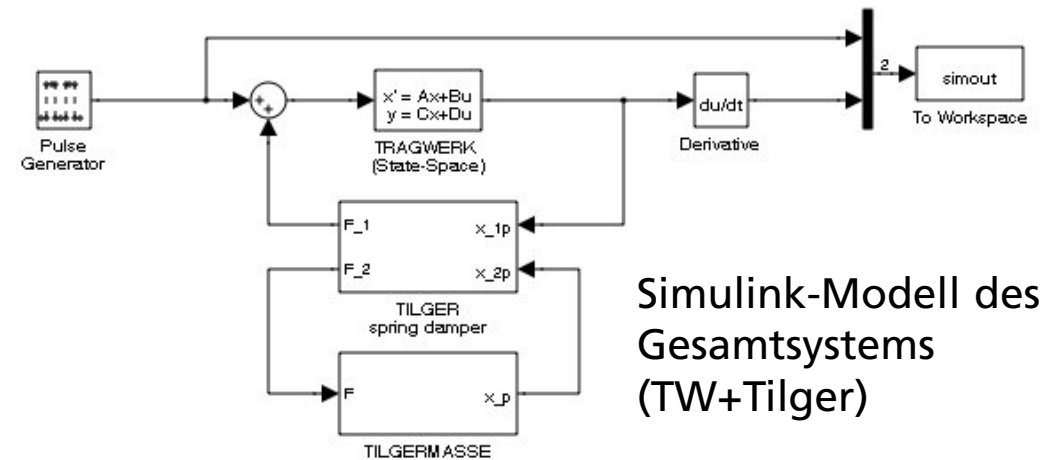
Verbesserung des Verhaltens im markierten Bereich



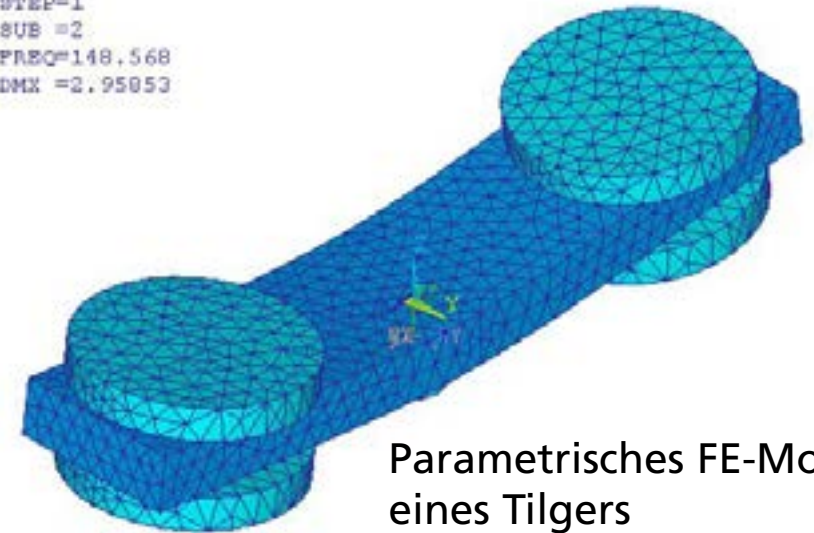
# Auslegung der Tilgereigenschaften

## mit Simulink und FEM am Gesamtsystem Tragwerk + Tilger

- Reduktion des Tragwerksmodells aus FE
- Implementierung in Matlab/Simulink
- Integration von Tilgermodellen
- Analyse des Gesamtsystems
- Parametrierung der Tilger
- Aufbau eines Tilgermodells in FE (konstruktionsbegleitend)
- Variation der Parameter und Analyse der Auswirkungen zur Auslegung der Einstell-Mechanismen



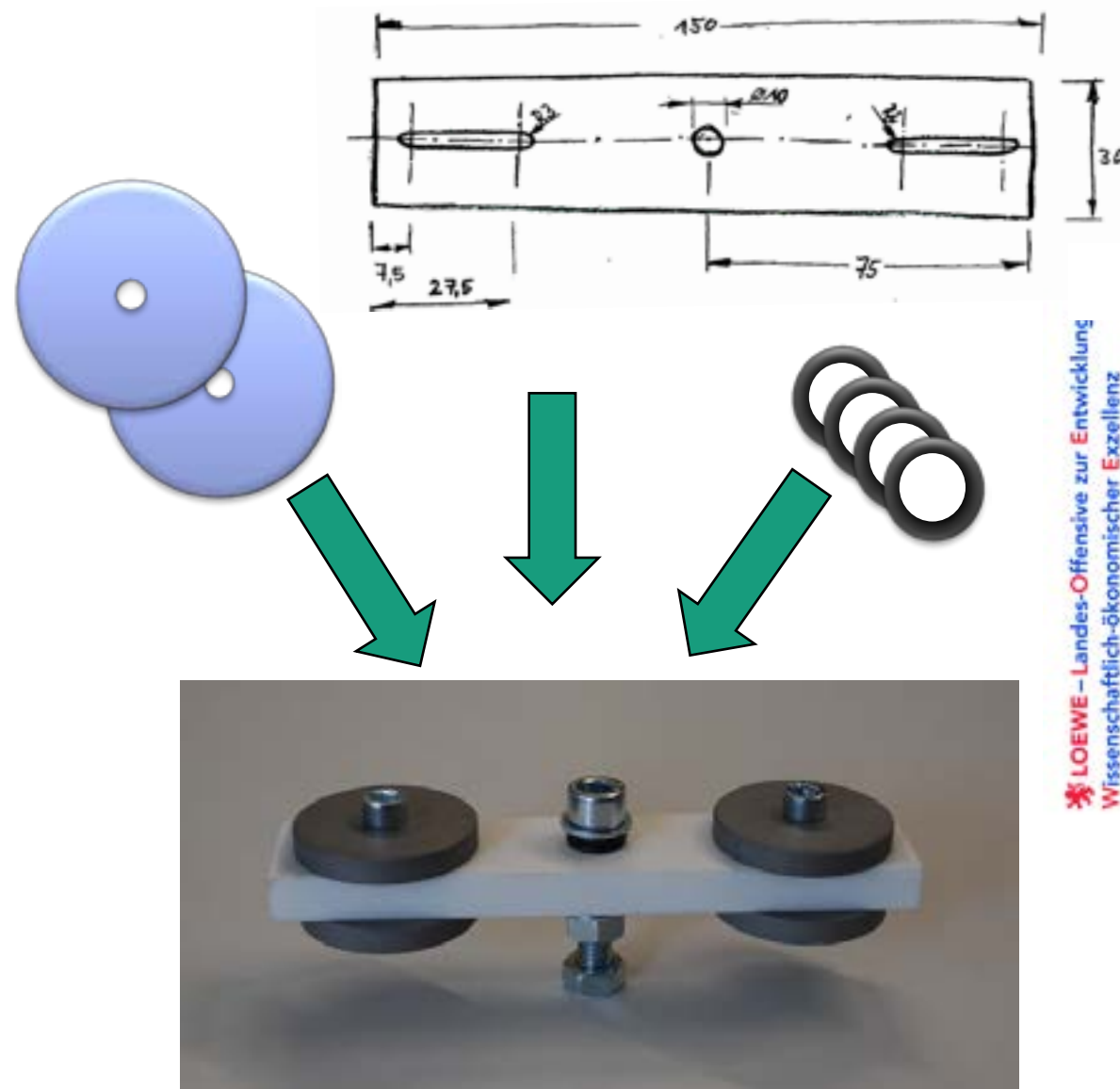
STEP=1  
SUB =2  
FREQ=148.568  
DMX =2.95053



# Konstruktion und Aufbau der Tilger

## Anforderungen:

- Masse ca. 250 g
  - Eigenfrequenz ca. 150 Hz
  - Dämpfung ca. 5 %
  - Einstellbare Parameter
- 
- Grobverstellung der Eigenfrequenz über Verschiebung der Massen
  - Realisierung der verstellbaren Dämpfung über Elastomer-Elemente
  - Verstellbereich der Frequenz zwischen ca. 100 Hz und 200 Hz

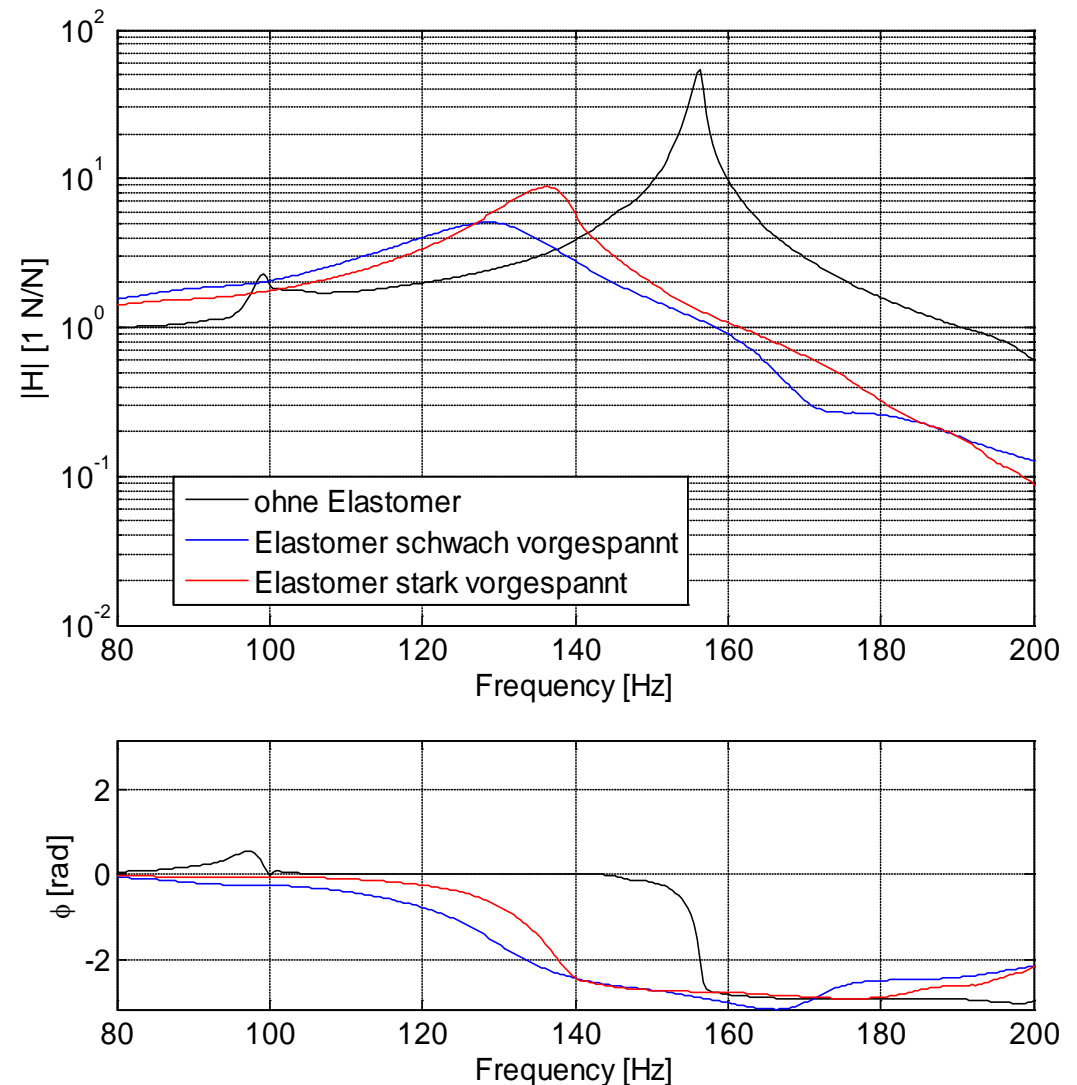




# Experimentelle Analyse der Dämpfungseigenschaften der Tilger

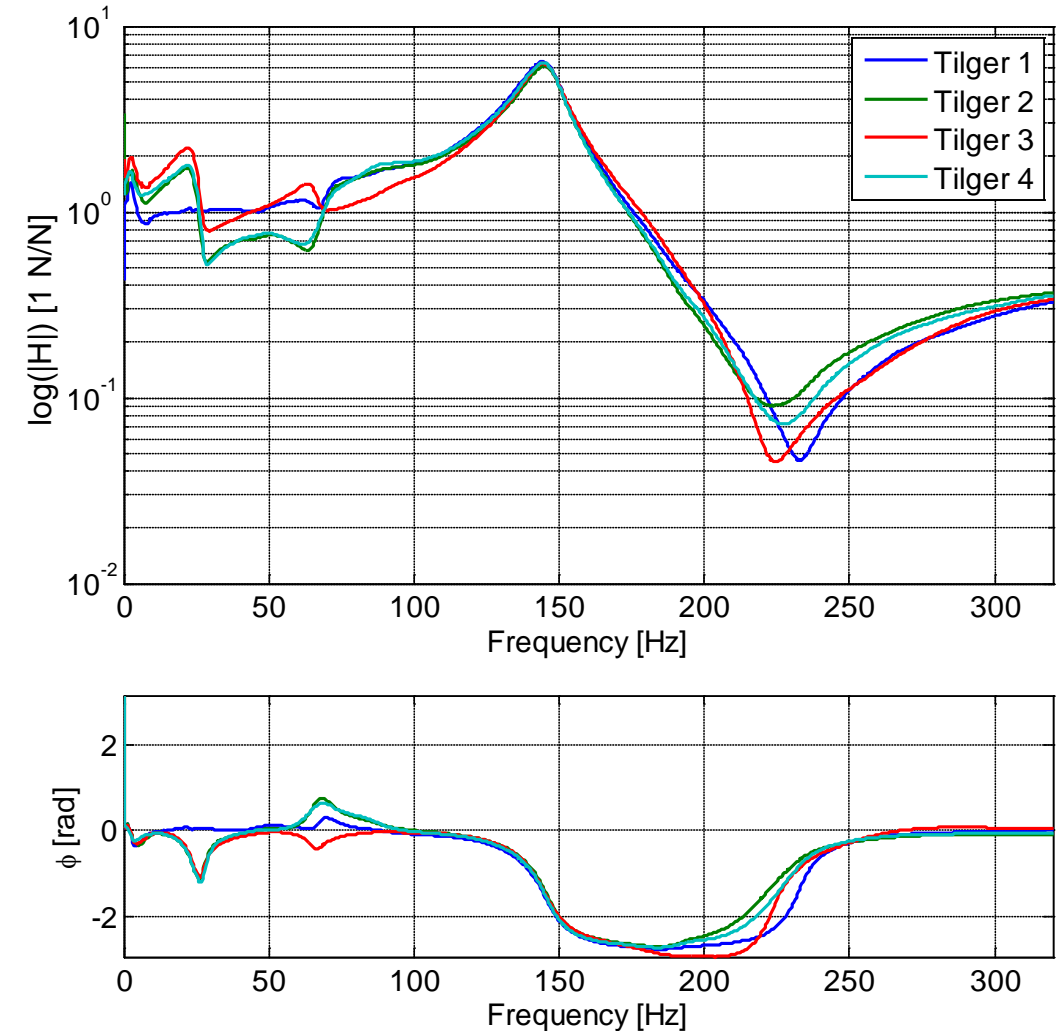
## Tilger mit Polymerbalken

- Analyse der Tilger mit verschiedenen Zuständen der Elastomer-Elemente
- Verhalten wie erwartet
- Schwierigkeit bei Einstellung der Dämpfung verstellt sich auch die Eigenfrequenz
- Zusätzliche Einstellung der Eigenfrequenz durch Verschiebung der Massen möglich
- Möglicher Verstellbereich der Dämpfung zwischen ca. 0.5 % und 8 %



# Tuning der Tilger

- Einstellung der Tilger auf „optimale“ Parameter zur Tilgung der Biegeeigenform
- Frequenz  $f_0$  ca. 145 Hz
- Dämpfungsgrad  $\delta$  ca. 5.5 %
- Einstellung funktioniert gut
- Nahezu identisches Verhalten kann erreicht werden

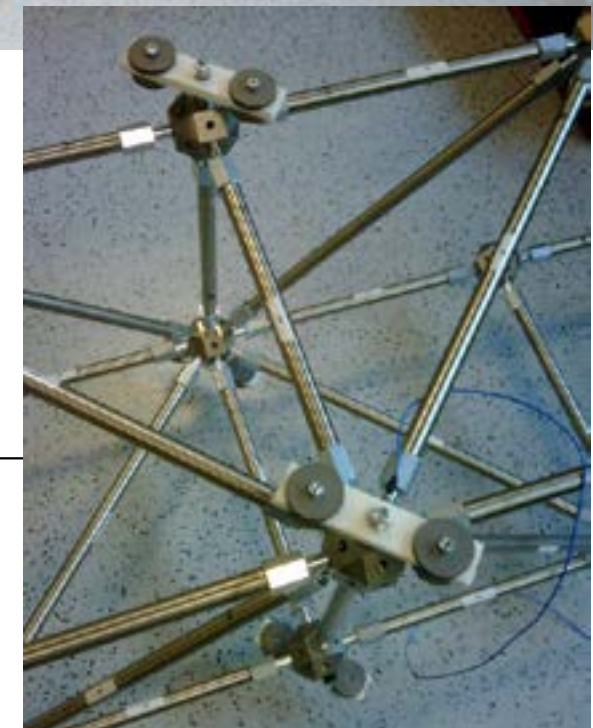
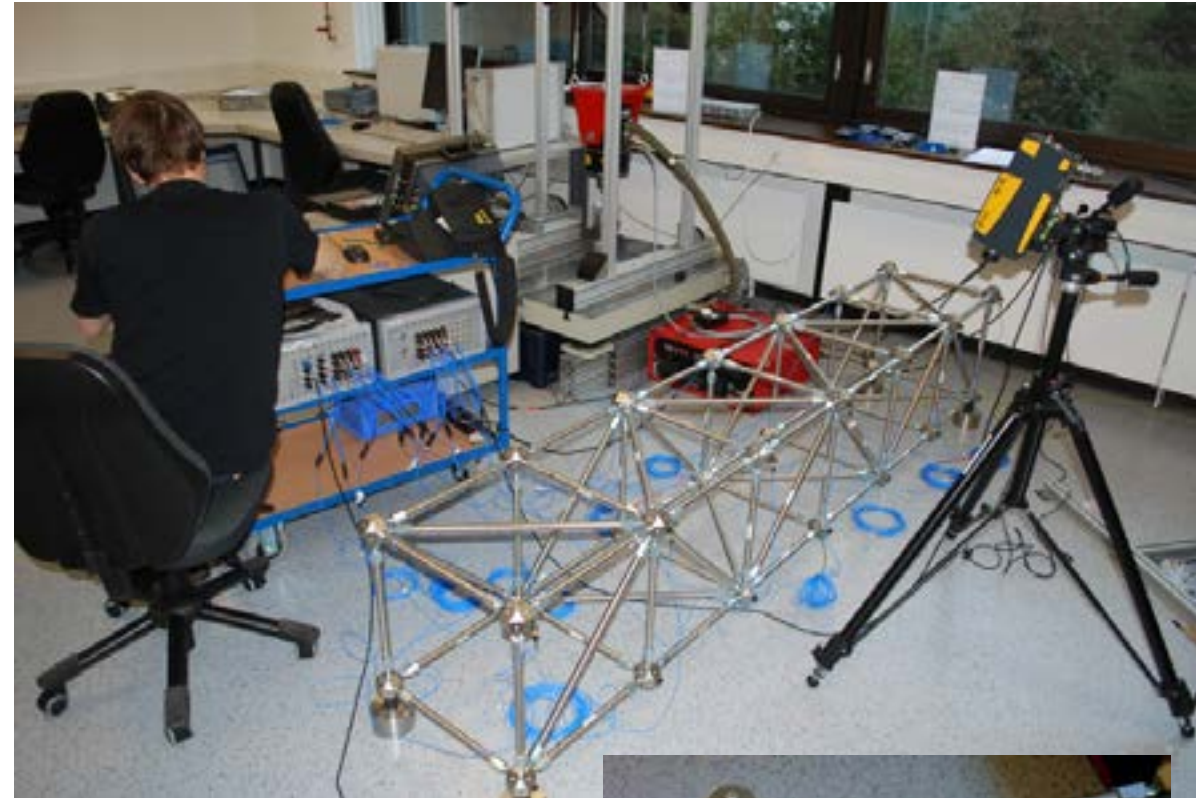


Exp. Ergebnisse der Tilgereinstellung

# Experimentelle Analyse des Tragwerks mit Tilgern

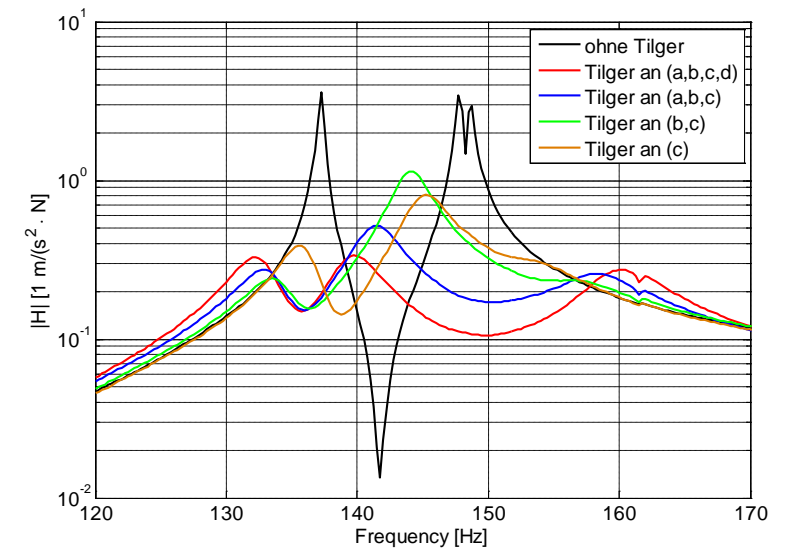
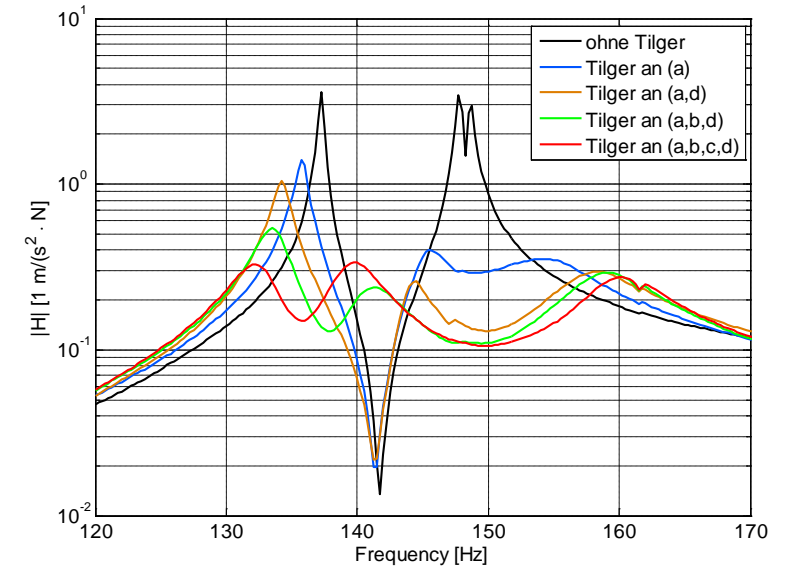
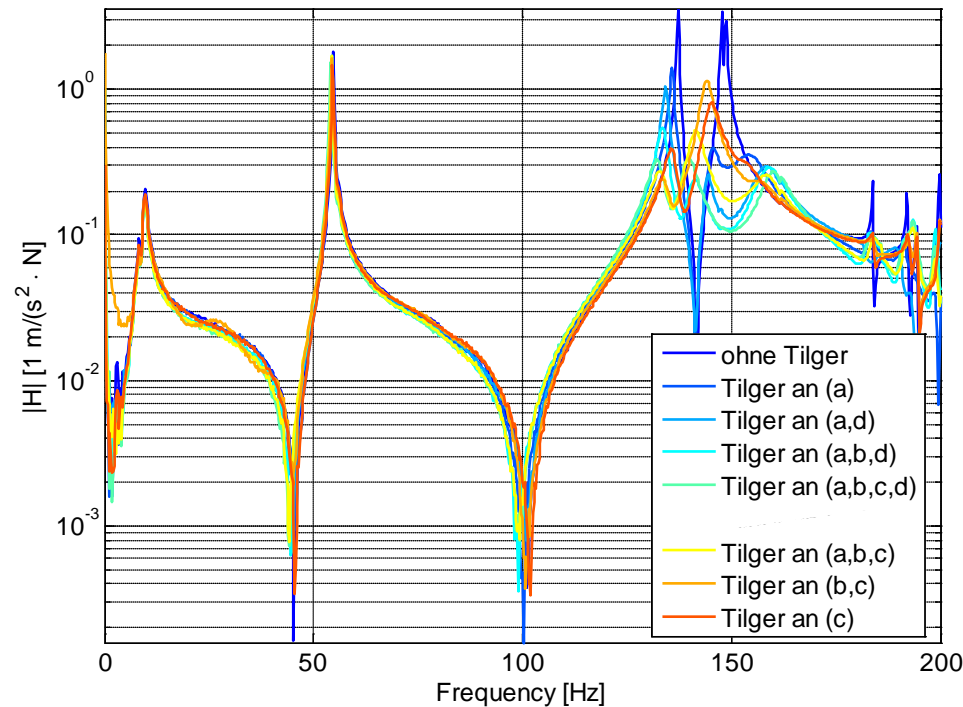
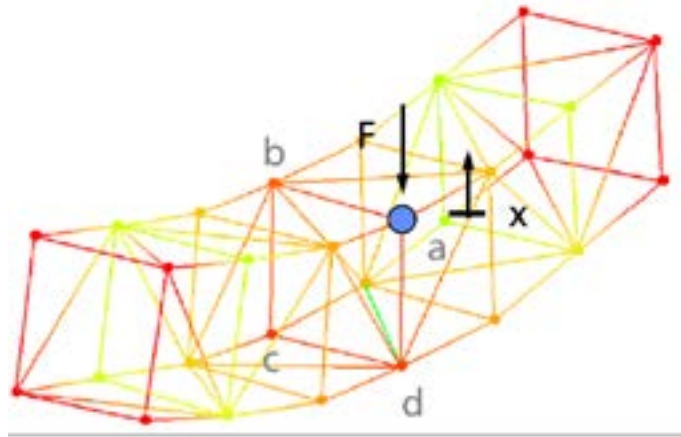
## Versuchsaufbau für EMA:

- Anregungspunkt auf konstanter Position (Knoten 15)
- Anregung in 3 Richtungen
- 28 Positionen gemessen mit jeweils 14 3D-Beschleunigungssensoren
- Ein Sensor pro Knotenpunkt
- Tilgervibrationen gemessen mit Laservibrometer PDV 100
- Sensorbefestigung mit Modalwachs
- Erfassung und Auswertung mit SCADAS III und LMS Test Lab
- Frequenzbereich bis 250 Hz





# Experimentelle Analyse des Tragwerks mit Tilgern



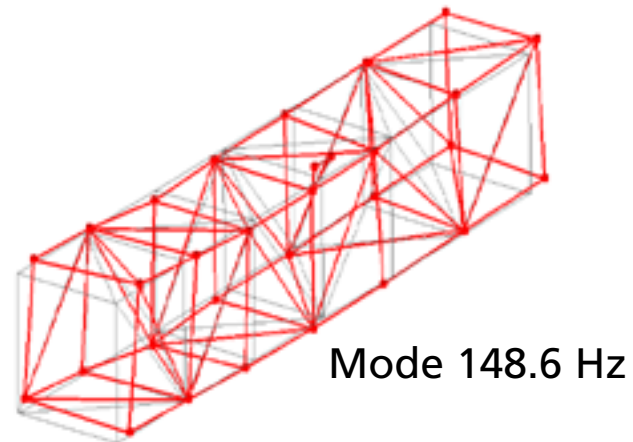
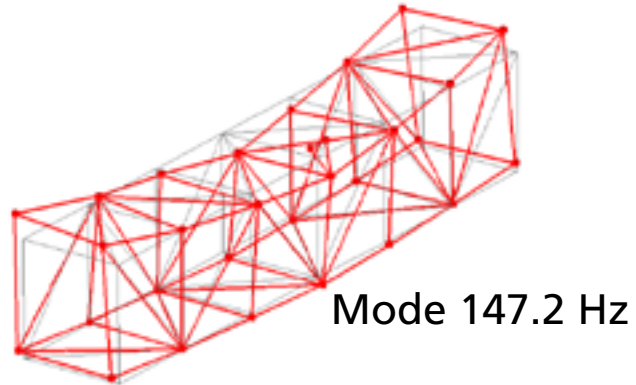
Archivierungsangaben

LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung  
Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz

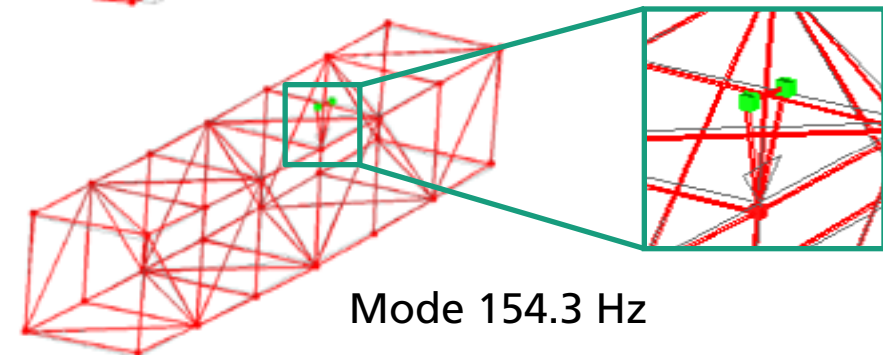
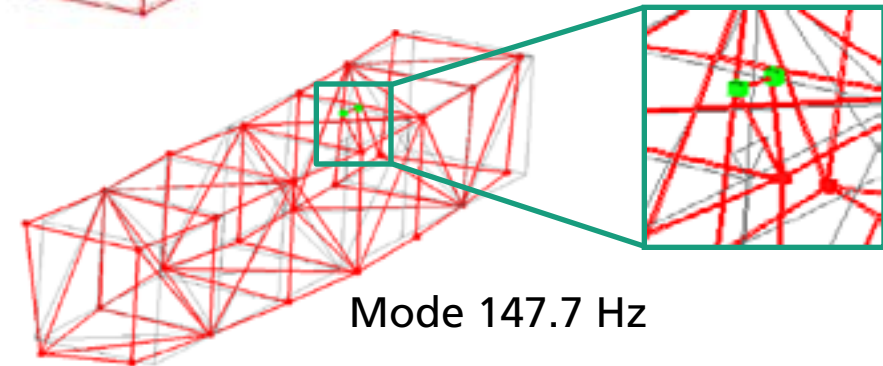
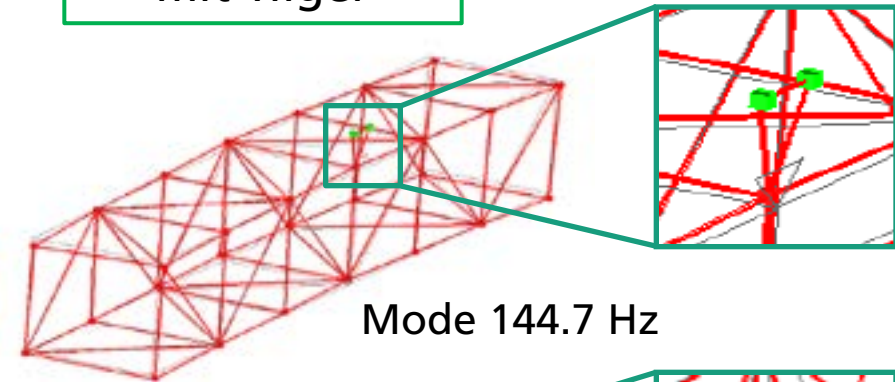


# Experimentelle Analyse - Schwingformen

ohne Tilger

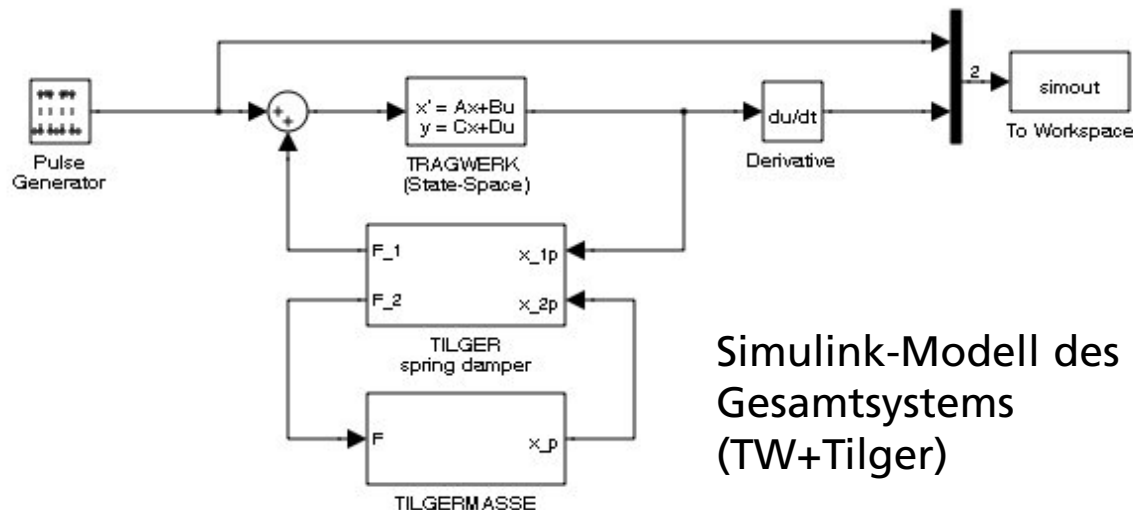


mit Tilger

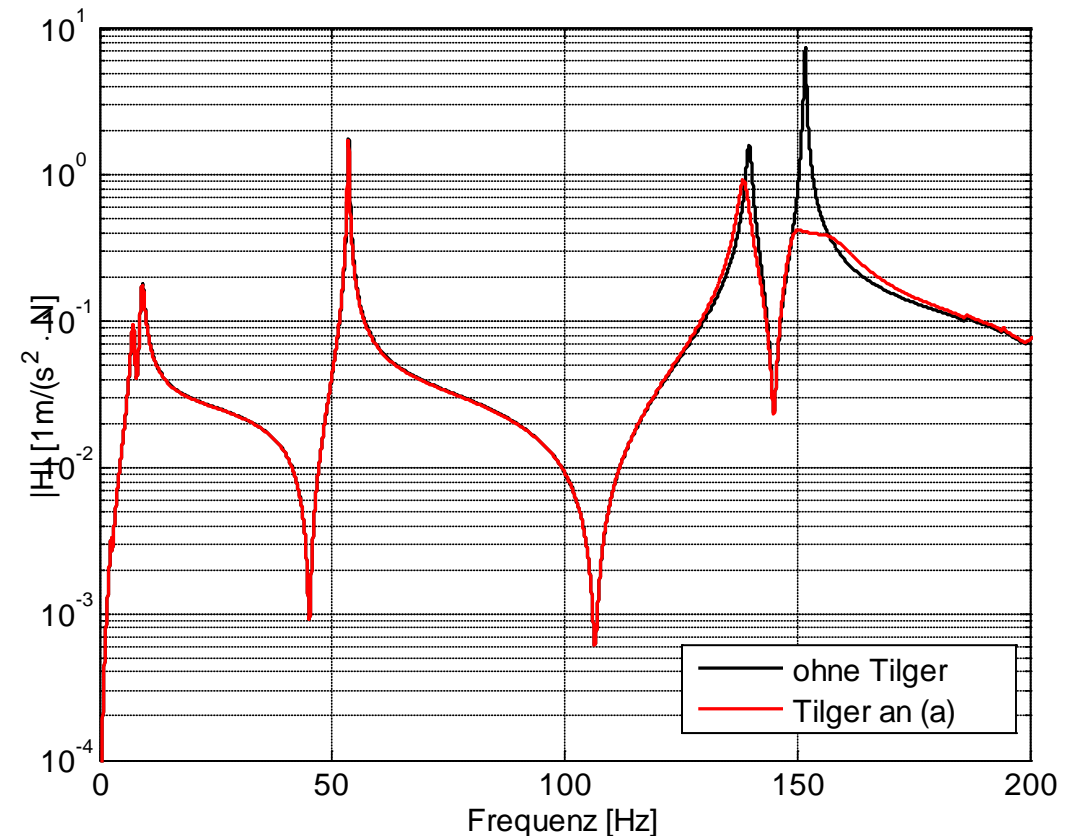


# Simulation des Tragwerks mit Tilgern

- Implementierung des Tragwerks als State-Space Modell in Simulink
- Tilgermodelle als Admittanz-Impedanz-Formulierung
- Tilgerparameter:
  - Masse  $m = 250 \text{ g}$
  - Eigenfrequenz  $f_0 = 152 \text{ Hz}$
  - Dämpfung  $\vartheta = 5.5 \%$



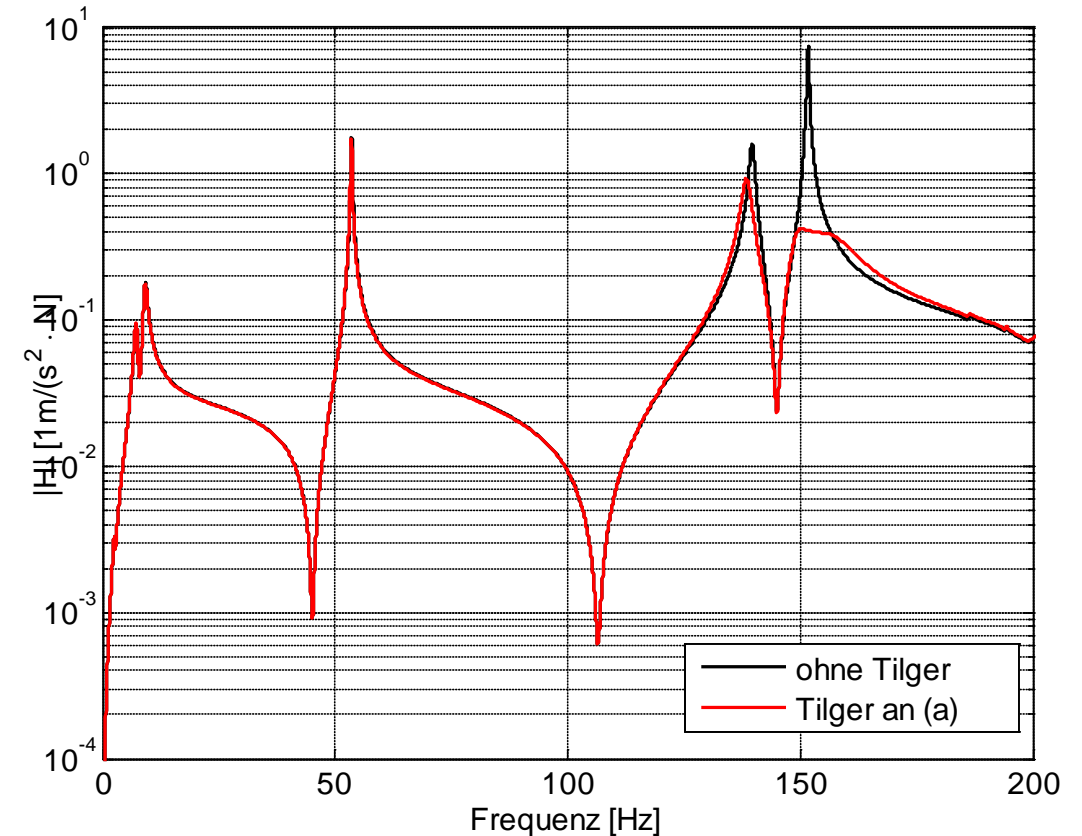
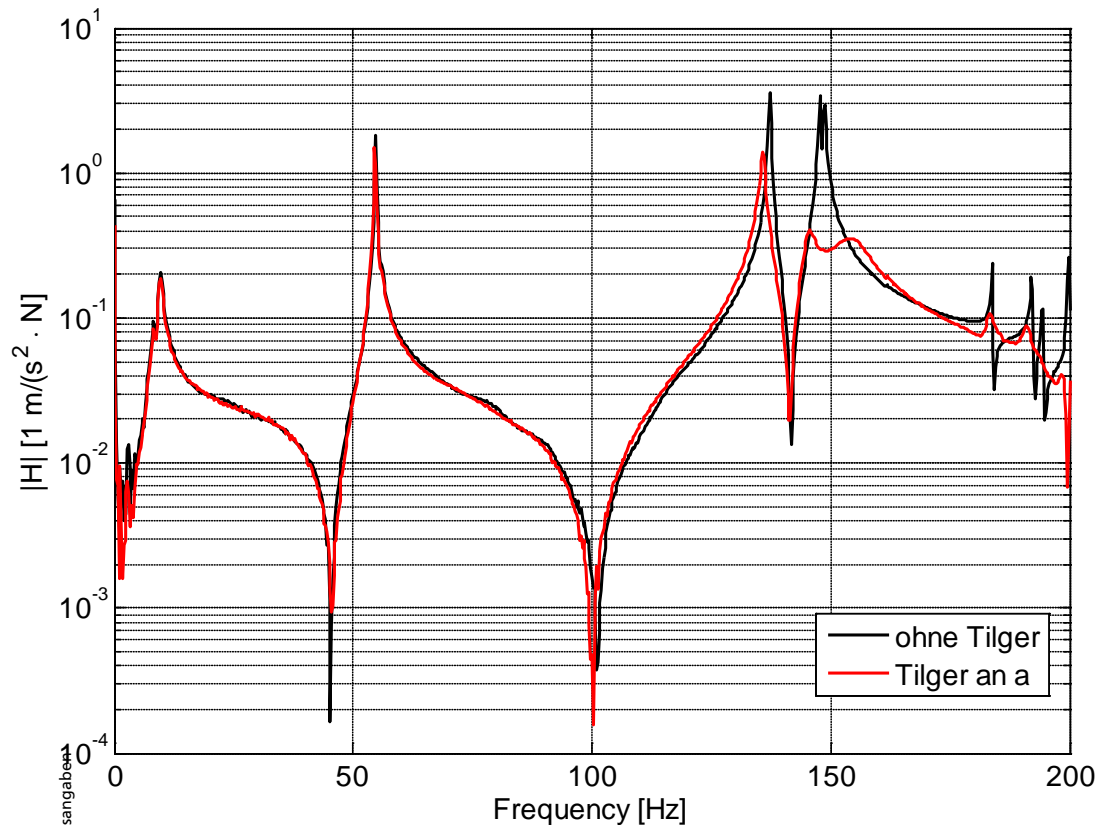
Simulink-Modell des Gesamtsystems (TW+Tilger)





# Vergleich exp. und num. Ergebnisse

## Driving-Point FRF an Punkt (a)



Frequenzganganalyse des Tragwerks

Simulation (Simulink) des Tragwerks



# Zusammenfassung und Ausblick

## Zusammenfassung

- Aufbau, experimentelle und numerische Analyse eines Tragwerks
- Tilgerauslegung und –analyse mit numerischen und experimentellen Techniken
- Implementierung schwingungstechnischer Maßnahmen (Tilger) am Tragwerk
- Abgegliche Modelle spiegeln das Systemverhalten gut wider
- Vorgehen hat sich bewährt und gute Wirkung der Tilger
- Wenn kein Tilger am Driving-Point, dann Verschlechterung der Wirkung

## Ausblick

- Numerische Positions- und Parameteroptimierung für verteilte Systeme zur Schwingungsminderung
- Shunt-Damping Techniken mit aktiven Streben und Impedanzanpassung
- Adaptive verteilte Neutralisatoren (auf variable Erregerfrequenz abstimmbare Tilger) zur Unterdrückung von Störungen bei Hochlaufvorgängen von Maschinen
- Aktive verteilte Systeme mit Inertialmassenaktoren



# Vielen Dank!

Die vorgestellten Arbeiten entstanden im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA (Adaptronic - Research, Innovation, Application), das vom Fraunhofer LBF koordiniert und vom Land Hessen finanziell gefördert wird.  
Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.

