

Diploma Thesis

# Development of an evaluation tool for measured response functions and application on two network arch bridges

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

Diplomarbeit

## Entwicklung eines Programms zur Auswertung gemessener Übertragungsfunktionen und Anwendung anhand zweier Netzwerkbogenbrücken

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Joachim STEPHAN, BSc**

Matr.Nr.: 0626882

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Josef FINK**

Dipl.-Ing. **Georg BRANDSTETTER**

Institut für Tragkonstruktionen – Bereich Stahlbau  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/212, A-1040 Wien

Wien, im November 2016

---



# Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand am Institut für Tragkonstruktionen, Bereich Stahlbau, der Technischen Universität Wien. An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich während meines Studiums und im Rahmen dieser Masterarbeit begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink, der mich mit einer interessanten Aufgabenstellung zur Bearbeitung dieser Diplomarbeit motivierte.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Georg Brandstetter, für die geduldige sowie engagierte Betreuung und Begleitung während der gesamten Zeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Institutes für die freundliche Unterstützung während meines Studiums, allen voran Frau Barbara Bastian.

Großer Dank gebührt auch meiner Freundin, auf deren Rückhalt ich immer zählen konnte und die damit für mich vieles einfacher gemacht hat.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich während meiner langen Ausbildung in vielerlei Hinsicht unterstützt haben.



# Kurzfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit war die Entwicklung eines Programms, welches die automatisierte Erstellung und Auswertung gemessener Übertragungsfunktionen ermöglicht. Das Programm wurde speziell für Schwingungsmessungen an Brückenstrukturen bei erzwungener Anregung durch Richterregger konzipiert. Die Programmierung erfolgte mit Hilfe der Mathematiksoftware MATLAB. Für die einzelnen Bearbeitungsschritte wurden jeweils separate grafische Benutzeroberflächen erstellt, welche eine intuitive Bedienbarkeit und übersichtliche Auswertung mit möglichst geringem Aufwand für den Benutzer gewährleisten.

In der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen zur Bestimmung von modalen Parametern (Eigenfrequenzen, Eigenformen und Dämpfungswerte) anhand eines Einfreiheitsgradmodells erläutert. Insbesondere werden verschiedene Dämpfungsmodelle sowie die Dämpfung in realen Baukonstruktionen diskutiert. Im Anschluss erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Struktur und Funktionsweise des Programms FRF PROCESSING TOOL. Zusätzlich wird die experimentelle Bestimmung von dynamischen Parametern anhand zweier Eisenbahnbrücken unter Verwendung der Software FRF PROCESSING TOOL gezeigt.



# Abstract

The objective of this diploma thesis was to develop a tool for evaluation of measured frequency response functions. The program has been designed for vibration testing of bridge structures by means of harmonic excitations with vibration generators. The program called FRF PROCESSING TOOL was written basing on the mathematical software MATLAB. It is build up by using several graphical user interfaces (GUI) for each processing step. The design enables rapid evaluation of measured response functions und allows the user to work intuitively.

In this thesis the basic principles for the determination of modal parameters (natural frequencies, mode shapes and damping factors) are explained by means of a singel degree of freedom system. In particular, various damping models as well as damping in real building constructions are discussed. This is followed by a detailed description of the structure and operation of the FRF PROCESSING TOOL. In addition, the experimental analysis of dynamic parameters is shown for two railway bridges using the software FRF PROCESSING TOOL.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>13</b>
2.1	Der lineare Einmassenschwinger . . . . .	13
2.1.1	Freie gedämpfte Schwingung . . . . .	15
2.1.2	Erzwungene Schwingung . . . . .	17
2.2	Dämpfungsmodelle . . . . .	22
2.2.1	Dämpfungsmechanismen . . . . .	22
2.2.2	Grundmodelle . . . . .	24
2.2.3	Dämpfung in Baukonstruktionen . . . . .	28
2.3	Dämpfungsermittlung . . . . .	32
2.3.1	Ausschwingversuche - Logarithmisches Dekrement Methode . . . . .	32
2.3.2	Resonanzversuche - Bandbreitenmethode . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Beschreibung des Programms</b>	<b>40</b>
3.1	MATLAB . . . . .	40
3.2	Bausteinprinzip - modularer Aufbau . . . . .	40
3.3	Festlegungen für den Import von Messdaten . . . . .	41
3.4	Benutzeroberflächen (GUIs) . . . . .	43
3.4.1	Programmstart über die Benutzeroberfläche <code>FRFprocTool</code> . . . . .	43
3.4.2	Benutzeroberfläche <code>KernelPanel</code> - Rechenkern . . . . .	44
3.4.3	Benutzeroberfläche <code>OrigFRFpanel</code> - AFG Original . . . . .	48
3.4.4	Benutzeroberfläche <code>ProcFRFpanel</code> - AFG Processed . . . . .	50
3.4.5	Benutzeroberfläche <code>ControlPanel</code> - Steuerung . . . . .	50
3.4.6	Benutzeroberfläche <code>ModePanel</code> - Schwingungsform . . . . .	53
3.4.7	Benutzeroberfläche <code>SignalPanel</code> - Signale . . . . .	54
3.4.8	Benutzeroberfläche <code>AmpSpecPanel</code> - Amplitudenspektrum . . . . .	57
3.4.9	Benutzeroberfläche <code>PeakPanel</code> - Peak Auswertung . . . . .	58
3.4.10	Benutzeroberfläche <code>PeakFRFpanel</code> - AFG Processed Peak . . . . .	61
3.4.11	Benutzeroberfläche <code>ExportPanel</code> - Ausgabe . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Versuchsreihe zur Ermittlung dynamischer Parameter</b>	<b>65</b>
4.1	Beschreibung der untersuchten Brückenobjekte . . . . .	65
4.2	Messinstrumente und Datenerfassung . . . . .	68
4.3	Anregung der Tragstruktur . . . . .	69

---

4.4	Versuchsprogramm . . . . .	71
4.5	Auswertung . . . . .	73
4.6	Ergebnisse für Tragwerk 5.1 . . . . .	75
4.6.1	Richterregermessungen ohne Schotteroberbau . . . . .	75
4.6.2	Ausschwingversuche ohne Schotteroberbau . . . . .	77
4.6.3	Richterregermessungen mit Schotteroberbau . . . . .	78
4.6.4	Ausschwingversuche mit Schotteroberbau . . . . .	80
4.7	Ergebnisse für Tragwerk 5.3 . . . . .	81
4.7.1	Richterregermessungen ohne Schotteroberbau . . . . .	81
4.7.2	Ausschwingversuche ohne Schotteroberbau . . . . .	83
4.7.3	Richterregermessungen mit Schotteroberbau . . . . .	84
4.7.4	Ausschwingversuche mit Schotteroberbau . . . . .	86
4.8	Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>89</b>

# Kapitel 1

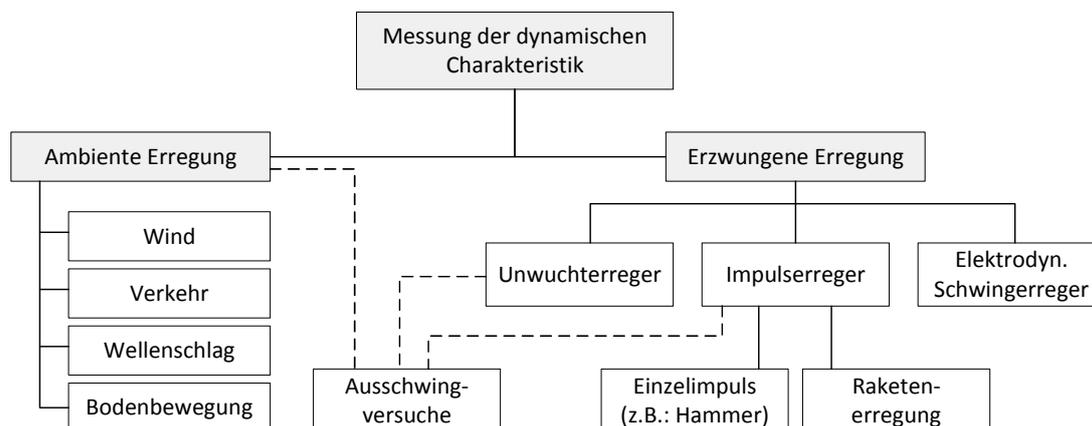
## Einleitung

Für die Weiterentwicklung der österreichischen Bahninfrastruktur wurden in den letzten Jahren zahlreiche Erweiterungs- und Modernisierungsinvestitionen getätigt. Die Intention des Ausbauplans geht dahin, die Bedeutung der Bahn als umweltfreundliches Massenverkehrsmittel weiter zu stärken. Die Zielsetzungen reichen von der Steigerung transportierter Gütermengen über den Einsatz neuer Zugarnituren bis zu Verkürzungen der Fahrzeiten. An dieser Stelle sei die Westbahnstrecke erwähnt, auf der Züge mit einer Höchstgeschwindigkeit von bis zu 250 km/h eingesetzt werden. Gleichzeitig ermöglicht die Verwendung fortschrittlicher Bauweisen und hochfester Baustoffe die Realisierung von Überbauten mit größeren Spannweiten und größerer Schlankheit, wodurch deren Schwingungsempfindlichkeit erhöht wird. Durch das Zusammenspiel von höheren Achslasten, schnelleren Reisegeschwindigkeiten und schwingungsanfälliger Strukturen kann es zu ungünstigen dynamischen Anregungen der Brückenbauwerke kommen. Derartige dynamische Vorgänge in Brücken treten vor allem dann auf, wenn die Erregerfrequenz einer Bauwerkseigenfrequenz entspricht (Resonanz). Es kommt dabei zu einer dynamischen Überhöhung der Strukturantwort in Form von hohen Amplituden der Verformungen und Beschleunigungen. Dies hat zur Folge, dass einerseits der Reisekomfort herabgesetzt wird und andererseits die Lagesicherheit der Gleise durch die Destabilisierung des Schotteroberbaus beeinträchtigt werden kann. Um das Verhalten von Eisenbahnbrücken, vor allem auf Hochgeschwindigkeitsstrecken genauer zu analysieren, wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche dynamische Untersuchungen durch den Infrastrukturbetreiber initiiert. Daraus gewonnene Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Einführung der *Richtlinie für die dynamische Berechnung von Eisenbahnbrücken* [1] und der Richtlinie *Dynamische Messung von Eisenbahnbrücken* [13].

Das Strukturverhalten bei Resonanz (Erregerfrequenz entspricht Eigenfrequenz) wird maßgeblich durch die vorhandenen Dämpfungseigenschaften der angeregten Struktur beeinflusst. Erst durch die Dämpfung wird eine Begrenzung der dynamischen Überhöhungen im Resonanzfall ermöglicht. Die Dämpfung beruht auf einer komplexen Überlagerung verschiedener Wirkmechanismen, wodurch mechanische Energie vor allem in Wärme umgewandelt (dissipiert, lat. zerstreut) wird. Eine Dämpfungsbestimmung durch die mathematische Abbildung dieser Mechanismen ist nach dem heutigen Stand der Wissenschaft nicht möglich. Daher ist es erforderlich, die Dämpfungsparameter im Rahmen von experimentellen Untersuchungen zu bestimmen.

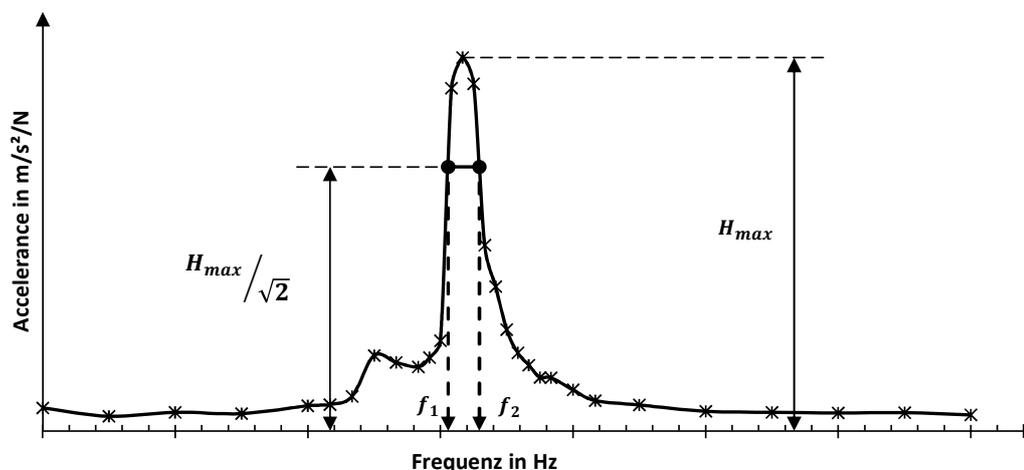
Für die Ermittlung von modalen Parameter (Eigenfrequenzen, Eigenformen und Dämpfungswerte) an realen Brückenstrukturen werden in der Baupraxis üblicherweise zwei messtechnische

Methoden angewendet. Einerseits erfolgen dynamische Messungen häufig bei *ambienter* Schwingungsanregung infolge natürlicher Einwirkungen aus der unmittelbaren Umgebung (Wind, Verkehr, etc.) des Bauwerks. Zum anderem werden die dynamischen Eigenschaften einer Struktur bei erzwungener (künstlicher) Anregung bestimmt. Hierbei können unterschiedliche Anregungsgeräte (Impulserreger, Unwuchterreger, etc.) verwendet werden. In Abbildung 1.1 ist eine Übersicht der baupraktisch relevanten Anregungsmechanismen dargestellt.



**Abb. 1.1:** Anregungsmechanismen für Schwingungsmessungen; Quelle: [12]

Das Institut für Tragkonstruktionen, Bereich Stahlbau, der Technischen Universität Wien verfügt über zwei Unwuchterreger (Richterregger) der Firma *ConviTec*. Die rotierenden Unwuchtmassen dieser Aggregate ermöglichen die Bauwerkserregung durch eine harmonische Krafteinleitung in das schwingungsfähige System. Bei dynamischen Messungen wird die Erregerfrequenz der Richterregger schrittweise verändert und parallel dazu die stationäre Systemantwort über Messwertaufnehmer erfasst. Durch Analyse der Anregungskräfte und Schwingungsantworten (Amplituden) kann der sogenannte Amplitudenfrequenzgang (FRF - Frequency Response Function) erstellt werden, siehe Abbildung 1.2.



**Abb. 1.2:** Amplitudenfrequenzgang und Dämpfungsermittlung nach der Bandbreitenmethode

Für die Erstellung von gemessenen Amplitudenfrequenzgängen ist die Verarbeitung von umfangreichen Messdaten erforderlich. Um aus den erstellten Frequenzgängen dynamische Parameter zu ermitteln, müssen zusätzlich Auswerteverfahren im Rahmen der modalen Analyse angewendet werden (vgl. Abb. 1.2). Aus diesem Umstand ergibt sich ein Bedarf an Hilfsmitteln, deren Anwendung die Erstellung von Frequenzgängen mit möglichst geringem Aufwand ermöglicht.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, das Programm FRF PROCESSING TOOL zu entwickeln, welches die automatisierte Erstellung und Auswertung gemessener Übertragungsfunktionen ermöglicht. Zusätzlich soll die Anwendbarkeit der Software durch die Auswertung von dynamischen Messungen an zwei Netzwerkbogenbrücken der Österreichischen Bundesbahnen gezeigt werden.

Diese Arbeit gliedert sich wie folgt:

- Im **zweiten Kapitel** werden die baulastdynamischen Grundlagen anhand eines Einfreiheitsgradsystems dargestellt. Zunächst wird das freie Ausschlagen des gedämpften Einmassenschwingers und dessen Verhalten bei erzwungener Anregung erläutert. Anschließend werden verschiedene Dämpfungsmodelle, sowie die Dämpfung in realen Baukonstruktionen diskutiert. Im letzten Abschnitt wird die indirekte Dämpfungsermittlung nach der Logarithmische-Dekrement-Methode und die Bandbreitenmethode erläutert.
- Das **dritte Kapitel** beschreibt den Aufbau des erstellten Programms FRF PROCESSING TOOL anhand der einzelnen Benutzeroberflächen (kurz: GUI, Graphical User Interface) und die Festlegungen hinsichtlich des Imports von Messdaten. Anhand dieser Dokumentation soll der Benutzer einen Überblick über die Funktionalität der einzelnen Bedienoberflächen erhalten.
- Das **vierte Kapitel** befasst sich mit der experimentellen Bestimmung von dynamischen Parametern und insbesondere mit der Ermittlung von Dämpfungswerten anhand zweier Eisenbahnbrücken unter Verwendung der Software FRF PROCESSING TOOL. Neben der Auswertung von Resonanzkurven werden zusätzlich die Ergebnisse von Ausschlagversuchen dargestellt.
- Im **fünften Kapitel** erfolgt die zusammenfassende Beschreibung der entwickelten Software und deren Anwendungsmöglichkeiten.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

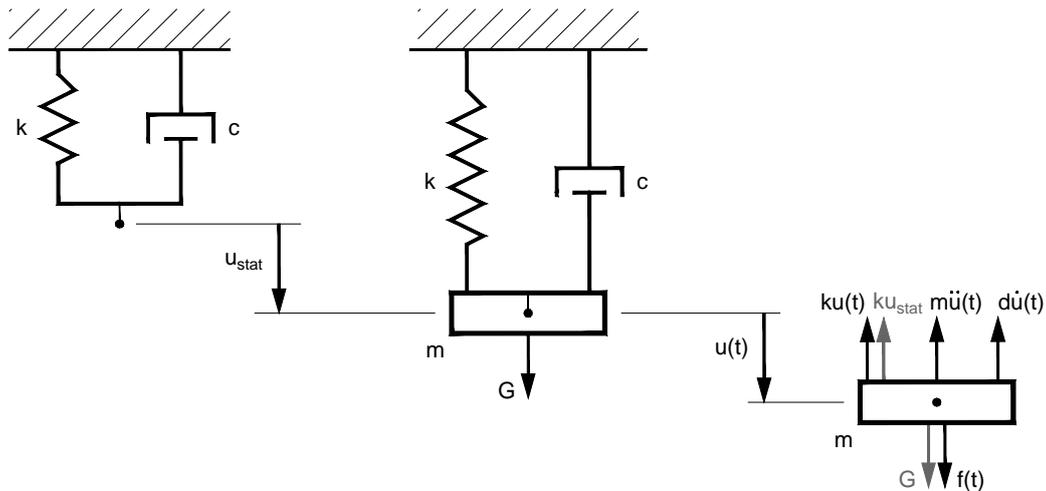
In der Baudynamik gelingt es häufig, komplexe schwingungsfähige Strukturen durch modale Zerlegung in eine Reihe von einfachen Systemen mit einem Freiheitsgrad überzuführen. An diesen Einfreiheitsgradsystemen (Einmassenschwinger) können alle wesentlichen Schwingungsphänomene linearer Systeme beobachtet werden. In diesem Kapitel wird daher zunächst das freie Ausschlagen des gedämpften Einmassenschwingers und dessen Verhalten bei erzwungener Anregung erläutert. Anschließend werden verschiedene Dämpfungsmodelle, sowie die Dämpfung in realen Baukonstruktionen diskutiert. Im letzten Abschnitt werden Einfreiheitsgrad-Methoden zur indirekten Dämpfungsermittlung erläutert.

### 2.1 Der lineare Einmassenschwinger

Der Einmassenschwinger dient als mechanisches Grundmodell zur analytischen Behandlung von Schwingungsproblemen. Der diskrete Schwinger besteht aus der Punktmasse  $m$ , einer linearen Feder mit der Steifigkeit  $k$  (Federkonstante) und dem geschwindigkeitsproportionalen Dämpfer mit Dämpfungskonstante  $c$ . Sowohl Feder als auch Dämpfer werden als massiefrei betrachtet. In Abbildung 2.1 ist das Feder-Dämpfer-Modell mit der Punktmasse  $m$  dargestellt. Die Bewegung dieses Systems erfolgt ausschließlich in Richtung der Koordinate  $u$ . Folglich bezeichnet man dieses System auch als Einfreiheitsgradmodell (SDOF, Single-Degree-Of-Freedom system).

Unter der Gewichtskraft  $G = mg$  wird das System zunächst um den Wert  $u_{stat} = G/k$  in die statische Ruhelage verschoben. Dabei wird die Feder mit der Kraft  $F_{stat} = -ku_{stat}$  vorgespannt. Der Dämpfer bleibt aufgrund  $du_{stat}/dt = 0$  unbelastet. Von dieser Gleichgewichtslage aus wird nun die Bewegungskordinate  $u(t)$  eingeführt. Durch die äußere zeitabhängige Erregerkraft  $f(t)$  wird das System um den Wert  $u(t)$  aus der statischen Ruhelage ausgelenkt. Dadurch entstehen zusätzliche zeitabhängige Kräfte, welche auf den Massenpunkt  $m$  einwirken: die Federkraft  $F_{el} = -ku(t)$ , die Dämpfungskraft  $F_d = -c\dot{u}(t)$  und die (d'Alembertsche) Trägheitskraft  $F_T = -m\ddot{u}(t)$ . Mithilfe der in Abbildung 2.1 dargestellten Schnittkräfte kann nun das Kräftegleichgewicht

$$\sum F = 0 \Rightarrow G + f(t) + F_{stat} + F_T(t) + F_d(t) + F_{el}(t) = 0 \quad (2.1)$$



**Abb. 2.1:** Freischnitt am Einmassenschwinger [23], [9]

formuliert werden, welches zu jedem Zeitpunkt erfüllt sein muss. Durch Einsetzen der oben angeführten Ausdrücke für die einzelnen Kräfte und Umordnen der Terme folgt schließlich die Bewegungsgleichung für den Einmassenschwinger:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f(t) \quad (2.2)$$

Wird die Bewegungskordinate  $u(t)$  auf die statische Ruhelage bezogen, so erfolgt die Kompensation der Gewichtskraft  $G$  durch die Federvorspannkraft  $F_{stat}$  und ist in der Bewegungsgleichung nicht mehr enthalten [27]. In der Mechanik wird häufig eine alternative Darstellungsform dieser Gleichung gewählt, mit der die Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

und das dimensionslose Lehrsche Dämpfungsmaß

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (2.4)$$

sichtbar wird [15]. Dies gelingt, indem man Gl. (2.2) durch  $m$  dividiert und mittels den Abkürzungen (2.3) und (2.4) umformt zu

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2u(t) = \frac{1}{m}f(t). \quad (2.5)$$

Es handelt sich dabei um eine gewöhnliche lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten. Aufgrund der einwirkenden Erregerkraft  $f(t)$  ist die Gleichung inhomogen. Demnach setzt sich die Schwingungsantwort  $u(t)$  aus der homogenen Lösung  $u_h$  und einer partikulären Lösung  $u_p$  zusammen [25]:

$$u(t) = u_h + u_p \quad (2.6)$$

In den nachfolgenden Kapiteln wird zunächst das freie Ausschwingen des Einmassenschwingers (homogene Lösung) behandelt und anschließend die stationäre Schwingungsantwort bei Kraftanregung (partikuläre Lösung) näher erläutert.

### 2.1.1 Freie gedämpfte Schwingung

Schwingungen, die eine geschwindigkeitsproportionale Dämpfungskraft aufweisen, werden als *viskos* gedämpfte Schwingungen bezeichnet. Wird beispielsweise ein System vorübergehend durch eine äußere Belastung  $f(t)$  angeregt und betrachtet man die Schwingungsantwort nach Entfernen der äußeren Erregerkraft, so bezeichnet man diesen Ausschwingvorgang als freie Schwingung [23]. Deren Bewegung  $u(t)$  ist durch die homogene Differentialgleichung

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2u(t) = 0 \quad (2.7)$$

und einer Anfangsauslenkung  $u_0$  und/oder Anfangsgeschwindigkeit  $\dot{u}_0$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  gekennzeichnet. Für die homogene Lösung  $u_h(t)$  wird folgender Ansatz getroffen:

$$u_h(t) = Ce^{\lambda t}. \quad (2.8)$$

Spezialisiert man (2.7) für  $u(t) = u_h(t)$  mit  $u_h(t)$  aus (2.8) so ergibt sich folgende Bedingung:

$$(\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2)e^{\lambda t} = 0. \quad (2.9)$$

Um Gleichung (2.9) für den gesamten Wertebereich von  $t$  zu erfüllen, muss der Klammerausdruck in (2.9) verschwinden:

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2 = 0. \quad (2.10)$$

Die sogenannte *charakteristische Gleichung* (2.10) besitzt die beiden Nullstellen

$$\lambda_{1,2} = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n. \quad (2.11)$$

Der Wurzelausdruck in (2.11) kann entweder reell, imaginär oder Null sein. Maßgebend dafür ist die Größe des Lehrsche Dämpfungsmaßes und damit das resultierende Vorzeichen des Radikanden. Daher müssen bei der freien Schwingung die folgenden Fälle unterschieden werden [11]:

- $\zeta > 1$ : starke Dämpfung (aperiodische Bewegung bzw. Kriechvorgang)
- $\zeta = 1$ : Grenzdämpfung (aperiodischer Grenzfall)
- $\zeta < 1$ : schwache Dämpfung (Schwingungsvorgang)

Im aperiodischen Grenzfall ( $\zeta = 1$ ) verschwindet der Wurzelausdruck in (2.11). Die zugehörige Dämpfungskonstante wird als die *kritische Dämpfung*  $c_{krit}$  bezeichnet:

$$\frac{c}{2m\omega_n} = 1 \quad \Rightarrow \quad c_{krit} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km}. \quad (2.12)$$

Mit diesem Vergleichswert kann nun das Lehrsche Dämpfungsmaß auch als Dämpfungsgrad eingeführt werden, der sich aus dem Verhältnis der vorherrschenden zur kritischen Dämpfung ergibt:

$$\zeta = \frac{c}{c_{krit}}. \quad (2.13)$$

Diese Definition ermöglicht eine alternative Bezeichnung als *unterkritische* ( $\zeta < 1$ ), *kritische* ( $\zeta = 1$ ) oder *überkritische* ( $\zeta > 1$ ) Dämpfung. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die Dämpfungswerte wichtiger Baustoffe. Daraus wird ersichtlich, dass in der Baudynamik üblicherweise Konstruktionen mit *unterkritischer Dämpfung* von Bedeutung sind. Daher werden in den nachfolgenden Ausführungen nur schwach gedämpfte Systeme behandelt.

Für den Fall mit  $\zeta < 1$  wird der Wurzelausdruck in (2.11) imaginär. Damit ergeben sich die beiden konjugiert komplexen Lösungen der charakteristischen Gleichung

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm i\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} = -\zeta\omega_n \pm i\omega_d \quad (2.14)$$

mit der *Eigenkreisfrequenz*  $\omega_d$  des gedämpften Systems

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} < \omega_n \quad (2.15)$$

und der zugehörigen *Schwingungsdauer* (Periode)

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}. \quad (2.16)$$

Die allgemeine Lösung der homogenen Differentialgleichung lautet

$$u_h(t) = A_1e^{\lambda_1 t} + A_2e^{\lambda_2 t} = e^{-\zeta\omega_n t}(A_1e^{i\omega_d t} + A_2e^{-i\omega_d t}). \quad (2.17)$$

Durch Anwendung der Eulerschen Formel  $e^{\pm i\varphi} = \cos \varphi \pm i \sin \varphi$  wird (2.17) wie folgt umgeformt:

$$u_h(t) = e^{-\zeta\omega_n t}((A_1 + A_2) \cos \omega_d t + (A_1 - A_2) \sin \omega_d t). \quad (2.18)$$

Setzt man für die Konstanten  $A_1$  und  $A_2$  die konjugiert komplexen Ausdrücke  $A_1 = (A - iB)/2$  und  $A_2 = (A + iB)/2$  ein, so folgt die allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung [11]

$$u_h(t) = e^{-\zeta\omega_n t}(A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t). \quad (2.19)$$

Eine gleichwertige Darstellung mittels Phasenverschiebung  $\varphi$  und der Amplitude  $a$  erhält man durch Umformung mit  $A = a \cos \varphi$ ,  $B = a \sin \varphi$  und Anwendung des Additionstheorems  $(\cos \varphi \cos \omega_n t + \sin \varphi \sin \omega_n t) = \cos(\omega_n t - \varphi)$  [15]

$$u_h(t) = ae^{-\zeta\omega_n t}(\cos \omega_d t - \varphi) \quad (2.20)$$

mit

$$a = \sqrt{A^2 + B^2} \quad ; \quad \cos\varphi = \frac{A}{a}. \quad (2.21)$$

Ist nur die freie Schwingung von Interesse, so erhält man mit den Anfangsbedingungen  $u(0) = u_0$  und  $\dot{u}(0) = \dot{u}_0$  das Bewegungsgesetz der Eigenschwingung des viskos gedämpften Einmassenschwingers

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left( u_0 \cos\omega_d t + \frac{\dot{u}_0 + \omega_n u_0}{\omega_d} \sin\omega_d t \right). \quad (2.22)$$

Gemäß (2.15) ergeben sich für gedämpfte Systeme kleinere Eigenfrequenzen als für ungedämpfte Systemen. Die Auswirkung der Dämpfung ist für schwach gedämpfte Systeme mit  $\zeta \leq 0.2$  allerdings geringfügig, siehe Tabelle 2.1.

Dämpfungsgrad $\zeta$	1 %	5%	10%	20%	30%
$w_d/w_n = \sqrt{1 - \zeta^2}$	0,9999	0,998	0,995	0,98	0,95

**Tab. 2.1:** Auswirkung der Dämpfung auf die Grundfrequenz [8]

### 2.1.2 Erzwungene Schwingung

Wirkt auf den Einmassenschwinger die harmonische äußere Kraft

$$f(t) = p_0 \cos\Omega t \quad (2.23)$$

mit der Kraftamplitude  $p_0$  und der Erregerkreisfrequenz  $\Omega$ , so folgt unter Beachten von (2.5) die Bewegungsgleichung

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) = \frac{1}{m} p_0 \cos\Omega t, \quad (2.24)$$

welche die zeitlich harmonisch erzwungenen Schwingungen des Systems beschreibt. Es handelt sich dabei um eine inhomogene gewöhnliche Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten. Zur vollständigen Lösung der Bewegungsgleichung muss die Lösung der homogenen Bewegungsgleichung  $u_h$  gemäß (2.19)

$$u_h(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (A \cos\omega_d t + B \sin\omega_d t)$$

mit einer beliebigen partikulären Lösung der Bewegungsgleichung  $u_p$  überlagert werden [11]. Zu diesem Zweck wird der Ansatz für die partikuläre Lösung

$$u_p(t) = C \cos\Omega t + D \sin\Omega t \quad (2.25)$$

gewählt, bei dem die Frequenz der Schwingungsantwort mit der Erregerkreisfrequenz  $\Omega$  übereinstimmt. Die Dämpfung verursacht eine Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen Kraftanregung und Auslenkung. Folglich muss in (2.25) ein kombinierter Ansatz mit kosinusförmigen und sinusförmigen Anteilen berücksichtigt werden [15].

Durch Einsetzen von (2.25) in die Bewegungsgleichung (2.24) folgt

$$\left[ (\omega_n^2 - \Omega^2) C + 2\zeta\omega_n\Omega D \right] \cos \Omega t + \left[ 2\zeta\omega_n\Omega C + (\omega_n^2 - \Omega^2) D \right] \sin \Omega t = \frac{1}{m} p_0 \cos \Omega t \quad (2.26)$$

und durch Koeffizientenvergleich ergibt sich das lineare Gleichungssystem

$$\begin{Bmatrix} (\omega_n^2 - \Omega^2) & 2\zeta\omega_n\Omega \\ 2\zeta\omega_n\Omega & (\omega_n^2 - \Omega^2) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} C \\ D \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{p_0}{m} \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (2.27)$$

Die Lösung für die beiden Konstanten  $C$  und  $D$  lautet demnach

$$C = \frac{(\omega_n^2 - \Omega^2) p_0}{\Delta} \frac{1}{m}, \quad D = \frac{2\zeta\omega_n\Omega p_0}{\Delta} \frac{1}{m}, \quad (2.28)$$

wobei für die Koeffizientendeterminante  $\Delta$  gilt:

$$\Delta = (\omega_n^2 - \Omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\Omega)^2. \quad (2.29)$$

Im Unterschied zur homogenen Lösung sind die Konstanten  $C$  und  $D$  direkt aus den Systemparametern und der Kraftanregung bestimmbar. Die partikuläre Lösung lautet somit:

$$u_p(t) = \frac{1}{\Delta} \frac{p_0}{m} [(\omega_n^2 - \Omega^2) \cos \Omega t + (2\zeta\omega_n\Omega) \sin \Omega t]. \quad (2.30)$$

Gleichwertig dazu ist die folgende Darstellung unter Verwendung der Phasenverschiebung  $\varphi$  und der stationären Amplitude  $a_p$ :

$$u_p(t) = a_p \cos(\Omega t - \varphi). \quad (2.31)$$

Ein Vergleich von (2.30) und (2.25) ergibt unter Zuhilfenahme des Additionstheorems für die Kosinusfunktion [15]:

$$a_p = \sqrt{C^2 + D^2} = \frac{1}{\sqrt{\Delta}} \frac{p_0}{m} \quad ; \quad \cos \varphi = \frac{C}{a_p} = \frac{(\omega_n^2 - \Omega^2)}{\sqrt{\Delta}}. \quad (2.32)$$

Die Gesamtlösung  $u(t)$  lässt sich durch die Überlagerung der freien Schwingung  $u_h(t)$  nach (2.19) mit der stationären Antwort  $u_p(t)$  gemäß (2.31) bestimmen:

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) + a_p \cos(\Omega t - \varphi). \quad (2.33)$$

Die Lösung der homogenen Differentialgleichung (freie Schwingung) nimmt aufgrund des Terms  $e^{-\zeta\omega_n t}$  mit der Zeit exponentiell ab und ist daher nach kurzer Dauer vernachlässigbar klein. Obwohl dieser Zustand genau genommen erst bei  $t \rightarrow \infty$  eintritt, wird der abklingende Beitrag als *transienter* Anteil bezeichnet [4]. Nach dem Einschwingvorgang wird die Systemantwort nur mehr durch den partikulären Teil der Lösung  $u_p$  beschrieben. Die Kenntnis des stationären (eingeschwungenen) Schwingungszustandes ist für zahlreiche baulynamische Aufgabenstellungen ausreichend [30]. Eine Ausnahme bilden Einschwingvorgänge, bei denen die Konstanten  $A$  und

$B$  durch Anpassung der Gesamtlösung an die Anfangsbedingungen  $u(0) = u_0$  und  $\dot{u}(0) = \dot{u}_0$  bestimmt werden:

$$A = x_0 - a_p \cos \varphi \quad ; \quad B = [\dot{x}_0 + x_0 \zeta \omega_n - a_p (\zeta \omega_n \cos \varphi - \Omega \sin \varphi)] / \omega_D \quad (2.34)$$

Durch Einsetzen der stationären Lösung (2.31) in die DGL (2.24) und Anwendung der trigonometrischen Gleichungen  $\cos(x - y) = \cos(x) \cos(y) + \sin(x) \sin(y)$  und  $\sin(x - y) = \sin(x) \cos(y) - \cos(x) \sin(y)$  wird ein Koeffizientenvergleich ermöglicht. Daraus folgen zwei Gleichungen, die mit den Beziehungen  $\sin \varphi = \tan \varphi / \sqrt{1 + \tan^2(\varphi)}$  bzw.  $\cos \varphi = 1 / \sqrt{1 + \tan^2(\varphi)}$  und durch Einführung der statischen Auslenkung

$$a_0 = a_p(\Omega = 0) = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{p_0}{m} = \frac{p_0}{k} \quad (2.35)$$

sowie der Abstimmung (auch: Frequenzverhältnis)

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega_n}, \quad (2.36)$$

die Darstellung der Vergrößerungsfunktion (Amplitudenfrequenzgang)

$$V_p = \frac{a_p}{a_0} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\Omega}{\omega_n})^2]^2 + [2\zeta(\frac{\Omega}{\omega_n})]^2}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - \eta^2]^2 + [2\zeta\eta]^2}} \quad (2.37)$$

und des Phasenfrequenzganges

$$\tan \varphi = \frac{2\zeta(\Omega/\omega_n)}{1 - (\Omega/\omega_n)^2} = \frac{2\zeta\eta}{1 - \eta^2} \quad (2.38)$$

ermöglichen [15]. In Abbildung 2.2 sind die beiden Frequenzgänge in Abhängigkeit vom Frequenzverhältnis  $\eta$  zwischen Anregungs- und Eigenkreisfrequenz für verschiedene Dämpfungswerte  $\zeta$  dargestellt. Die Vergrößerungsfunktion  $V_p$  zeigt, wie sich die Amplitude einer Antwortschwingung gegenüber der statischen Verformung  $a_0$  in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz verhält. Es können daraus Frequenzverhältnisse  $\eta$  abgelesen werden, bei denen Erhöhungen bzw. Reduktionen der Ausgangsschwingung möglich sind.

Bei einer äußerst langsamen Lastaufbringung antwortet das System mit einer quasi-statischen Auslenkung  $a_0 = p_0/k$ . Dabei verschwinden die dynamischen Reaktionen fast gänzlich ( $V(\eta \rightarrow 0) = 1$ ). Wird das System mit einer Frequenz nahe der Eigenfrequenz angeregt, so kommt es zu einer dynamischen Verstärkung der Schwingungsantwort, abhängig von der Dämpfung. Im Sonderfall des ungedämpften Schwingers treten bei Übereinstimmung von Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz (Resonanz) theoretisch unbegrenzte Amplitudenwerte auf. Im gedämpften Fall kann die zum Maximalwert der Vergrößerungsfunktion zugehörige Frequenz durch Ableiten und anschließendes Nullsetzen der Vergrößerungsfunktion  $V_p$  erhalten werden [11]:

$$\omega_R = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}. \quad (2.39)$$

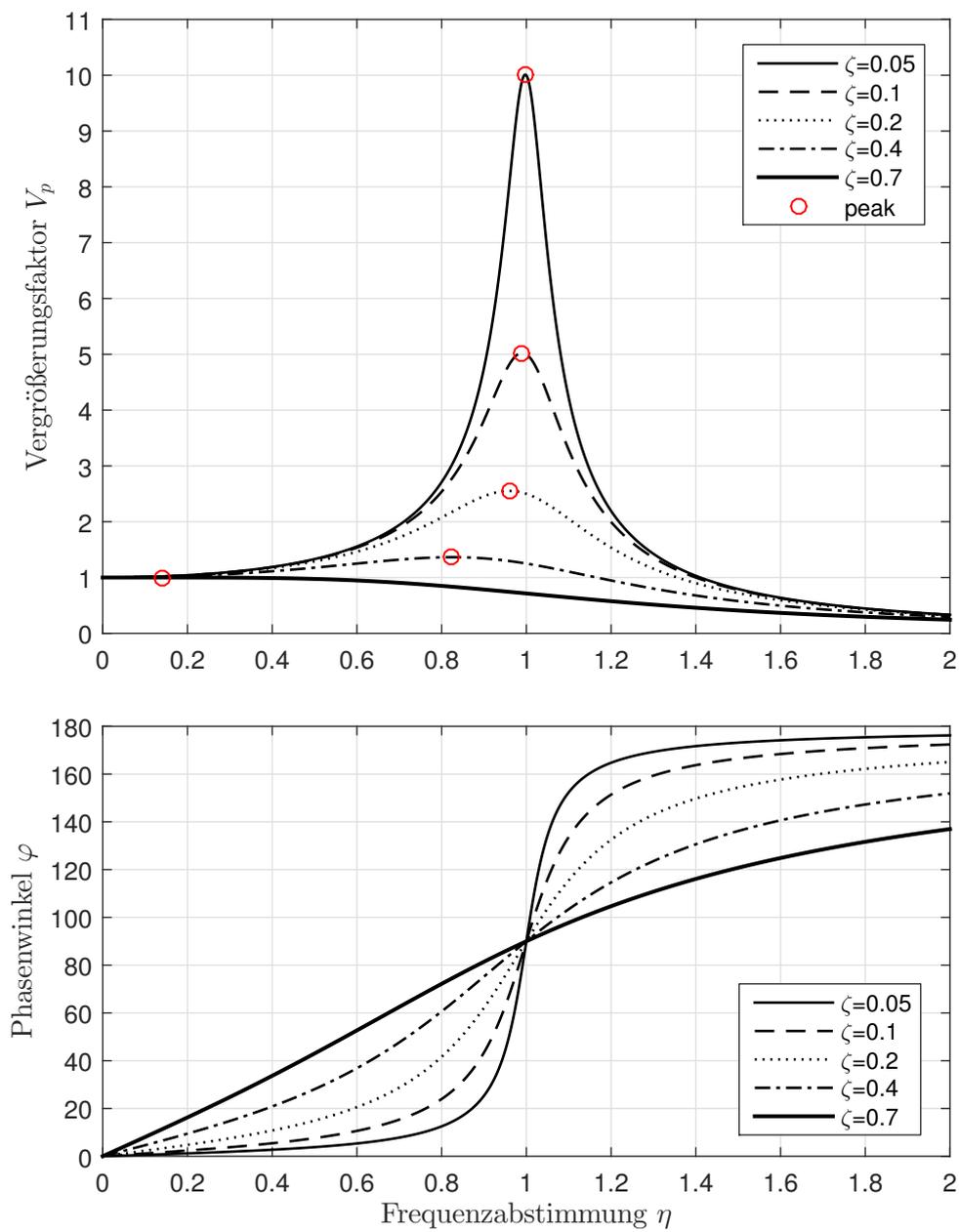
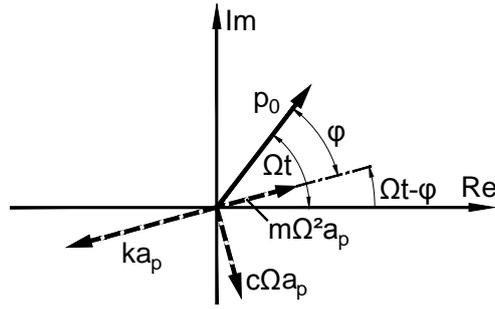


Abb. 2.2: Amplituden- und Phasenfrequenzgang [4], [31]



**Abb. 2.3:** Darstellung der Kraftvektoren im Zeigerdiagramm [6]

Die Unterschiede zwischen der Frequenz bei Amplitudenresonanz  $\omega_R$ , gedämpfter Eigenkreisfrequenz  $\omega_d$  bzw. ungedämpfter Eigenkreisfrequenz  $\omega_n$  sind für schwache Dämpfungen gering. Daher gilt für die in der Baudynamik üblichen Dämpfungswerte ( $\zeta \ll 1$ ) folgende Näherung für den Maximalwert der Vergrößerungsfunktion bei Resonanz [15]:

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega_n} = \sqrt{1 - 2\zeta^2} \approx 1 \quad \rightarrow \quad \max V_p = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1 - 2\zeta^2}} \approx \frac{1}{2\zeta}. \quad (2.40)$$

Im oberen Frequenzbereich werden die Amplituden der Schwingungsantwort stark reduziert. In diesem Bereich überwiegt die Trägheit des Schwingers. Durch Einsetzen der partikulären Lösung (2.31) in die Bewegungsgleichung (2.2) erhält man mit den beiden Ableitungen für die Geschwindigkeit und Beschleunigung

$$\dot{u} = -a_p\Omega \sin(\Omega t - \varphi) \quad ; \quad \ddot{u} = -a_p\Omega^2 \cos(\Omega t - \varphi) \quad (2.41)$$

sowie unter Berücksichtigung von Gl. (2.23) folgenden Ausdruck:

$$m a_p \Omega^2 \cos(\Omega t - \varphi) + c a_p \Omega \sin(\Omega t - \varphi) - k a_p \cos(\Omega t - \varphi) + p_0 \cos \Omega t = 0. \quad (2.42)$$

Diese Beziehung ist als Gleichgewichtsbedingung rotierender Kraftvektoren interpretierbar, welche auf den Einmassenschwinger einwirken [6]. Dazu werden die vektoriellen Kräfte in einem Zeigerdiagramm dargestellt, siehe Abbildung 2.3. Das Gleichgewicht wird in Gl. (2.42) aus den Projektionen der Vektoren auf die horizontale Achse gebildet. Maßgebend für die Konfiguration zwischen Erregerkraft und Schwingungsantwort ist das Frequenzverhältnis  $\eta = \Omega/\omega_n$ . Dies wird in Abbildung 2.4 anhand von geschlossenen Kraftpolygonen für verschiedene Frequenzabstimmungen veranschaulicht. Für tiefe Abstimmungen ( $\eta < 1$ ) schwingt das System mit der Einwirkung im Gleichtakt. Die Schwingungsantwort ist dabei durch die dominierenden Federkräfte gekennzeichnet. Im Resonanzfall ( $\eta = 1$ ) kann das Gleichgewicht mit der Erregerkraft nur über die Dämpfungskraft erreicht werden. Diese schwingt als einzige Widerstandskraft gegenphasig zur harmonischen Anregung. In Resonanzferne schwindet der Einfluss der Dämpfung zunehmend. Bei tiefer Abstimmung ( $\eta > 1$ ) schwingt das System in Gegenphase zu dessen Anregung. Hierbei dominieren die Trägheitskräfte. Für den Extremfall sehr hoher Erregerfrequenzen verschwindet

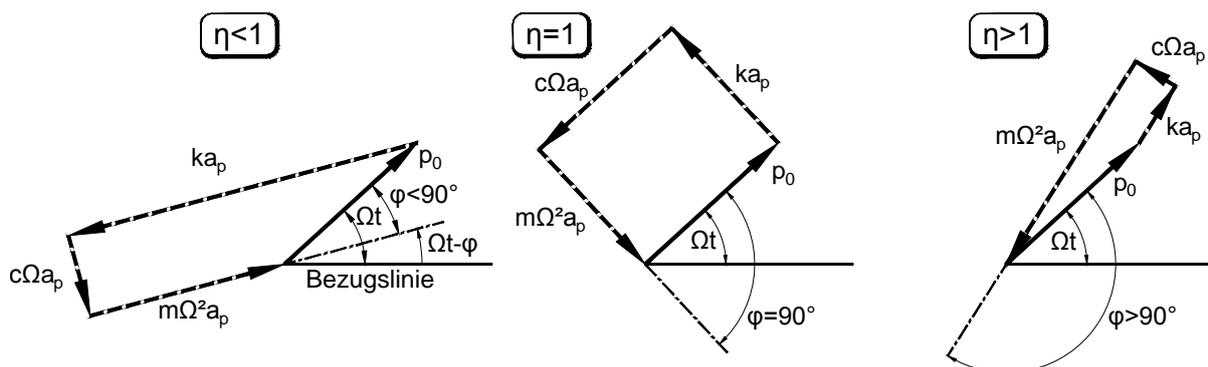


Abb. 2.4: Kraftvektoren für verschiedene Frequenzverhältnisse  $\eta$  [25], [17], [30]

die Antwortbewegung der Struktur und damit auch die Feder- und Dämpfungskräfte im System [30].

## 2.2 Dämpfungsmodelle

Durch die Dämpfung wird mechanische Energie überwiegend in Wärme umgewandelt bzw. dissipiert (lat. zerstreut). Die in allen Baukonstruktionen vorhandene Dissipationsfähigkeit führt dazu, dass freie Schwingungen mit der Zeit abklingen. Bei erzwungenen Schwingungen wird ein bestimmter Teil der zugeführten Energie dem schwingenden Tragwerk entzogen [17]. Ist dieser Anteil der dissipierten Energie gleich der eingebrachten Anregungsenergie, so stellt sich eine stationäre Schwingung ein [8].

### 2.2.1 Dämpfungsmechanismen

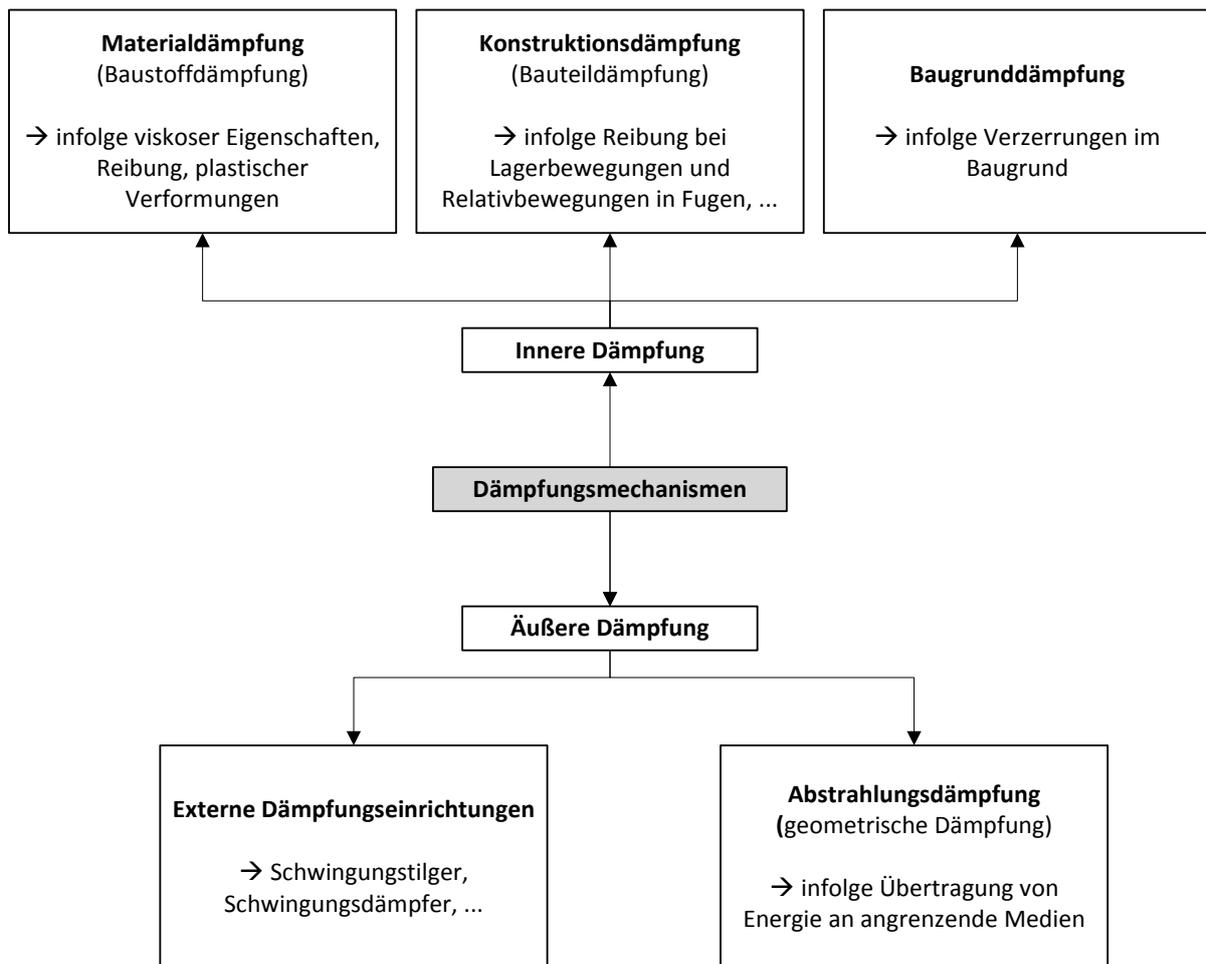
In den vorangehenden Ausführungen wurde eine lineare viskose Dämpfung (auch als Fluidreibung bezeichnet) vorausgesetzt. Diese Annahme bringt wesentliche Vorteile bei der mathematischen Formulierung der Bewegungsgleichung mit sich, da eine zur Geschwindigkeit proportionale Dämpfungskraft  $F_d$  berücksichtigt wird:

$$F_d = c\dot{u}(t). \quad (2.43)$$

Reale Baukonstruktionen weisen allerdings eine Überlagerung verschiedener Dämpfungsmechanismen auf, die häufig auf nichtlinearen Vorgängen beruhen. Das linear-viskose Dämpfungsmodell ist daher nur eine Näherung, deren Fehler bei Vorliegen geringer Dämpfungswerte tolerierbar ist [17]. Eine mögliche Unterscheidung der Dämpfungsarten ist in Abbildung 2.5 dargestellt [8], [2].

Bei den verschiedenen Dämpfungsmechanismen treten Kräfte auf, die nach Flesch [8] wie folgt unterschieden werden:

- viskose Dämpfung (bzw. äquivalente viskose Dämpfung)
- hysteretische Dämpfung



**Abb. 2.5:** Arten der Dämpfung

- Reibungsdämpfung

Als Ursache werden nach Kramer [17] die nachstehenden Effekte angeführt:

- makroskopische Effekte:
  - Reibung
  - viskose Strömung
  - Schallabstrahlung
- mikroskopische Effekte:
  - innere Reibung (in Fließflächen, Plastizität)
  - Viskoelastizität bzw. Viskoplastizität (kristalline Deformationen)

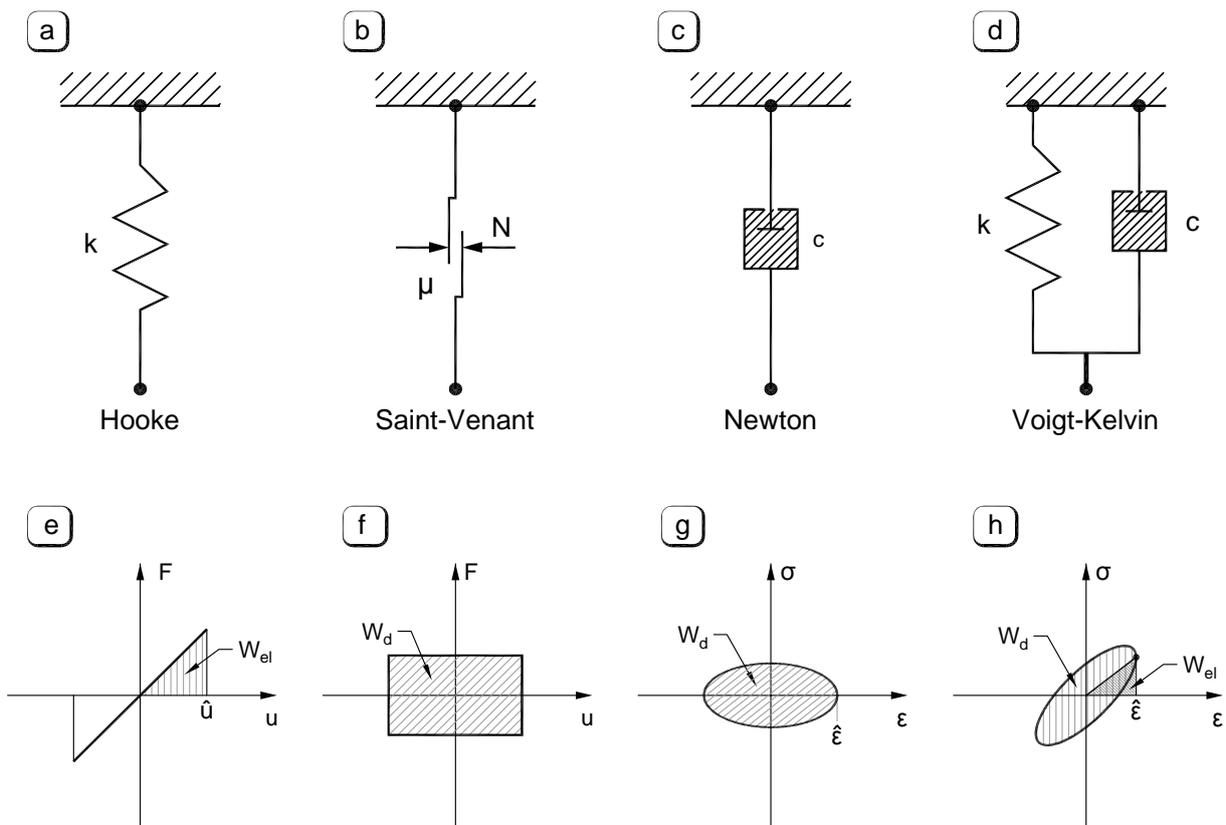


Abb. 2.6: Grundmodelle für baulastdynamische Aufgabenstellungen [25], [17]

## 2.2.2 Grundmodelle

Lit.: [25], [4], [17]

Zur Beschreibung des Materialverhaltens werden in der Baulastdynamik häufig die in Abbildung 2.6 dargestellten Grundmodelle verwendet. Mit diesen masselos betrachteten Elementen gelingt es, die den jeweiligen Stoffen innewohnenden Feder- und Dämpfungseigenschaften in phänomenologischer Weise abzubilden. Da die einzelnen Wirkmechanismen in einem homogenen Material unzertrennlich miteinander gekoppelt sind, kommen häufig Kombinationen der Grundmodelle zum Einsatz.

### 2.2.2.1 Hooke-Modell

Das Hooke-Modell beschreibt eine linear-elastische Feder, bei der ein linearer Zusammenhang zwischen einer (harmonischen) Kraft  $F(t)$  bzw. Spannung  $\sigma(t)$  und der Auslenkung  $u(t)$  mit der Amplitude  $\hat{u}$  bzw. Verzerrung  $\varepsilon(t)$  besteht. Als Proportionalitätsfaktor dient die Federsteifigkeit  $k$  bzw. der Elastizitätsmodul  $E$ . Es kommt hierbei zu keiner Phasenverschiebung zwischen Spannungen und Dehnungen, d.h. die Maximalwerte von  $\sigma$  und  $\varepsilon$  treten zeitgleich auf:

$$F(t) = ku(t) \quad \text{bzw.} \quad \sigma(t) = E\varepsilon(t). \quad (2.44)$$

Diese Gesetzmäßigkeit ist in Abbildung 2.6e dargestellt, worin die elastische Deformationsarbeit  $W_{el}$  dem schraffierten Flächeninhalt entspricht:

$$W_{el} = \frac{1}{2}k\hat{u}^2. \quad (2.45)$$

### 2.2.2.2 Saint-Venant-Modell

Das Saint-Venant-Modell bildet die (Coulombsche) Reibung zwischen Festkörpern ab, deren Grenzflächen gegeneinander bewegt werden. Die dabei geweckten Reibungskräfte  $F$  sind durch ihre konstante Größe  $R$  und einer Wirkung entgegen der Auslenkungsrichtung gekennzeichnet [31]:

$$F = \pm R \quad \text{bzw.} \quad F = \text{sign}\dot{u}R. \quad (2.46)$$

Die Reibungskraft  $F$  wechselt nach jedem Erreichen des Größt- bzw. Kleinstwertes der Schwingung ihr Vorzeichen. Daher müssen zur Behandlung der beschreibenden Differentialgleichungen, Fallunterscheidungen für jeden Halbzyklus beachtet werden. Die analytische Lösung ist somit aufwendig und schwierig [25].

### 2.2.2.3 Newton-Modell

Ein viskoser Dämpfer (Stichwort: Stoßdämpfer) wird durch das Newton-Modell abgebildet, welches eine Proportionalität zwischen Dämpfungskraft  $F(t)$  und Geschwindigkeit der Auslenkung  $\dot{u}(t)$  vorgibt:

$$F(t) = c\dot{u}(t) \quad \text{bzw.} \quad \sigma(t) = \eta_V\dot{\varepsilon}(t). \quad (2.47)$$

Der Proportionalitätsfaktor in Gl. (2.47) ist die Dämpfungskonstante  $c$  bzw. die dynamische Viskosität  $\eta_V$ . Wird das Dämpfungselement einer harmonischen Dehnung  $\varepsilon(t) = \hat{\varepsilon}\sin(\Omega t)$  mit der Amplitude  $\hat{\varepsilon}$  unterworfen, so folgt mit

$$\dot{\varepsilon}(t) = \hat{\varepsilon}\Omega\cos(\Omega t) \quad (2.48)$$

die Spannungsfunktion aus (2.47) zu:

$$\sigma(t) = \eta_V\dot{\varepsilon}(t) = \eta_V\hat{\varepsilon}\Omega\cos(\Omega t) = \hat{\sigma}\cos(\Omega t). \quad (2.49)$$

In Abbildung 2.6g ist der Dehnungs- und Spannungsverlauf dargestellt, woraus die beim Newton-Modell vorhandene Phasenverschiebung von  $\sigma$  und  $\varepsilon$  mit dem Winkel von  $\Omega t = \pi/2$  hervorgeht. Unter Berücksichtigung von  $\cos(\Omega t) = \sqrt{1 - \sin^2(\Omega t)}$  kann (2.49) umgeschrieben werden zu

$$\sigma(t) = \eta_V\Omega\hat{\varepsilon}\sqrt{1 - \sin^2(\Omega t)} = \eta_V\Omega\sqrt{\hat{\varepsilon}^2 - \varepsilon^2} \quad (2.50)$$

und durch anschließendes Quadrieren und neuerliches Umformen erhält man die Beziehung zwischen  $\sigma(t)$  und  $\varepsilon(t)$  in Form einer Ellipsengleichung:

$$\sigma^2 = (\eta_V \Omega)^2 (\hat{\varepsilon}^2 - \varepsilon^2) = (\eta_V \Omega \hat{\varepsilon})^2 \left(1 - \left(\frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}}\right)^2\right) \longrightarrow \left(\frac{\sigma}{\eta_V \Omega \hat{\varepsilon}}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}}\right)^2 = 1. \quad (2.51)$$

In Abbildung 2.6g ist diese achsparallele Ellipse dargestellt, welche als Hysterese (Nachwirkung) bezeichnet wird. Abweichend von einer einfachen Input-Output-Beziehung, ist bei einem Hystereseverhalten der aktuelle Zustand (Ausgangsgröße) nicht nur von der einwirkenden Größe (Eingangsgröße), sondern auch vom vorherigen Zustand (Vorgeschichte) abhängig. Somit sind bei gleicher Einwirkungsgröße verschiedene Systemreaktionen möglich. Der Flächeninhalt dieser Ellipse entspricht der während eines Schwingungszyklus unumkehrbar zerstreuten Energie:

$$W_d = \pi \hat{\varepsilon} \cdot \eta_V \Omega \hat{\varepsilon} = \pi \eta_V \Omega \hat{\varepsilon}^2. \quad (2.52)$$

Für die analoge Betrachtungsweise von Kraft- und Verschiebungsgrößen nach (2.47) kann Gleichung (2.52) umformuliert werden zu:

$$W_d = \pi c \Omega \hat{u}^2. \quad (2.53)$$

Gemäß Gleichung (2.53) ist die geleistete Dämpfungsarbeit  $W_d$  proportional zur Frequenz und zum Quadrat der Auslenkungsmaxima.

Bei Materialien mit hoher Dämpfung ist es teilweise möglich, eine Hystereseschleife messtechnisch zu bestimmen. Aus dem Flächeninhalt kann die Dämpfungskonstante  $c$  wie folgt ermittelt werden:

$$c = \frac{W_d}{\pi \Omega \hat{u}^2}. \quad (2.54)$$

#### 2.2.2.4 Voigt-Kelvin-Modell

Durch die Parallelschaltung eines Hooke-Elements (elastische Feder) mit einem Newton-Element (viskoser Dämpfer) wird das sogenannte Voigt-Kelvin-Modell gebildet. Wirkt eine harmonische Spannungsänderung (Spannungsamplitude  $\hat{\sigma}$ )

$$\sigma(t) = \hat{\sigma} \sin(\Omega t) \quad (2.55)$$

auf das masselos betrachtete System ein, so ergibt sich aus der Gleichgewichtsbetrachtung zwischen harmonischer Einwirkung und den Spannungen im Feder- und Dämpferelement folgender Beziehung:

$$\sigma(t) = \hat{\sigma} \sin(\Omega t) = \eta_V \dot{\varepsilon}(t) + E \varepsilon(t). \quad (2.56)$$

Um aus dieser Differentialgleichung den Zusammenhang zwischen der Spannungs- und Dehnungsamplitude zu erhalten, wird ein reeler Ansatz zur Lösung gewählt:

$$\varepsilon(t) = \hat{\varepsilon} \sin(\Omega t - \varphi) \quad \text{bzw.} \quad \dot{\varepsilon}(t) = \hat{\varepsilon} \Omega \cos(\Omega t - \varphi). \quad (2.57)$$

Durch Einsetzen von (2.57) in (2.56) folgt:

$$\hat{\sigma} \sin(\Omega t) = \eta_V \Omega \hat{\varepsilon} \cos(\Omega t - \varphi) + E \hat{\varepsilon} \sin(\Omega t - \varphi) \quad (2.58)$$

und durch Auswerten von (2.58) für  $\Omega t = 0$  unter Berücksichtigung von  $\sin(\frac{\pi}{2} - \varphi) = \cos \varphi$  und  $\cos(\frac{\pi}{2} - \varphi) = \sin \varphi$  erhält man:

$$\hat{\sigma} = \hat{\varepsilon}(\eta_V \Omega \sin \varphi + E \cos \varphi). \quad (2.59)$$

Gleichung (2.59) kann als rechtwinkeliges Kraftdreieck interpretieren werden, wobei die elastischen und viskosen Amplituden als Katheten den rechten Winkel bilden. Die einwirkende Spannungsamplitude ergibt sich gemäß Hypotenusensatz zu:

$$\hat{\sigma}^2 = (\eta_V \Omega \hat{\varepsilon})^2 + (E \hat{\varepsilon})^2. \quad (2.60)$$

Durch Umformen von (2.59) bzw. (2.60) erhält man schließlich das Verhältnis zwischen Spannungs- und Dehnungsamplitude (auch: dynamische Steifigkeit) mit [17]:

$$\frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} = \eta_V \Omega \sin \varphi + E \cos \varphi = \sqrt{E^2 + (\eta_V \Omega)^2}. \quad (2.61)$$

Die Schwingungsantwort des Voigt-Kelvin-Modells auf eine harmonische Einwirkung kann aus einer Überlagerung der elastischen Reaktion (2.44) und der viskosen Antwort (2.50) ermittelt werden:

$$\sigma(t) = E \varepsilon \pm \eta_V \Omega \sqrt{\hat{\varepsilon}^2 - \varepsilon^2}. \quad (2.62)$$

In Abbildung 2.6h ist diese Hystereseschleife als geneigte Ellipse dargestellt. Die Spannung  $\sigma(t)$  geht der Dehnung  $\varepsilon(t)$  mit der Phase  $\varphi$  voraus. Die dabei umfahrene Fläche kann mit Gleichung (2.52) bestimmt werden.

Wird Gleichung (2.58) für  $\Omega t = 0$  ausgewertet, so erhält man:

$$0 = \eta_V \Omega \hat{\varepsilon} \cos(\varphi) - E \hat{\varepsilon} \sin(\varphi) \quad \longrightarrow \quad \tan \varphi = \frac{\eta_V \Omega}{E}. \quad (2.63)$$

Unter Berücksichtigung der Analogie gemäß Gl. (2.47) folgt aus (2.63) der sogenannten Verlustfaktor

$$d = \tan \varphi = \frac{c \Omega}{k}. \quad (2.64)$$

Wird linear-viskose Dämpfung vorausgesetzt, so ist  $c$  eine Materialkonstante und demnach ist  $d$  direkt proportional zur Erregerfrequenz  $\Omega$ . Durch Umformen von (2.64) kann die Dämpfungskonstante  $c$  bestimmt werden

$$c = \frac{kd}{\Omega} = \frac{k \tan \varphi}{\Omega} \quad (2.65)$$

und aus Gleichung (2.4) folgt der Dämpfungsgrad

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{kd}{2m\omega_n\Omega} = \frac{\omega_n d}{\Omega} \frac{1}{2}. \quad (2.66)$$

Um den Zusammenhang zwischen Verlustfaktor  $d$  und Dämpfungsgrad  $\zeta$  zu erhalten, wird das System an der Resonanzstelle  $\Omega = \omega_n$  betrachtet. Somit folgt aus (2.66):

$$d = 2\zeta. \quad (2.67)$$

Durch Vergleich von (2.64) mit (2.66) ist erkennbar, dass der Dämpfungsgrad im Gegensatz zum Verlustfaktor  $d$  kein reiner Materialkennwert ist, sondern eine Verknüpfung zu einer massenbehafteten Struktur und deren Eigenfrequenz  $\omega_n$  aufweist (Einmassenschwinger).

Die spezifische Dämpfung  $\psi$  für einen masselos betrachteten Werkstoff wird aus dem Verhältnis zwischen der dissipierten Energie pro Zyklus nach (2.52) und der elastischen Deformationsarbeit gemäß (2.45) gebildet:

$$\psi = \frac{W_d}{W_{el}} = \frac{\pi c \Omega \hat{u}^2}{\frac{1}{2} k \hat{u}^2} = \frac{2\pi c \Omega}{k}. \quad (2.68)$$

Bestimmt man  $\psi$  durch Messung von  $W_d$  und  $W_{el}$ , so lässt sich  $c$  wie folgt bestimmen:

$$c = \frac{2\pi\psi\Omega}{k}. \quad (2.69)$$

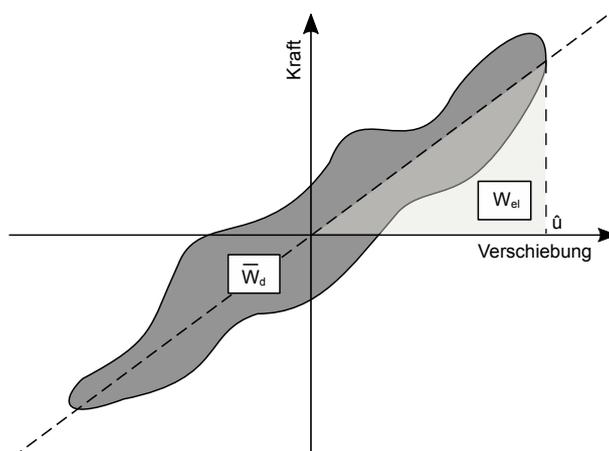
Ausgehend von (2.68) kann unter Beachten von (2.64) folgende Beziehung angeschrieben werden:

$$\psi = 2\pi d \quad (2.70)$$

### 2.2.3 Dämpfung in Baukonstruktionen

In der Baudynamik sind massenbehaftete Strukturen von Interesse. Um ein schwingungsfähiges System zu erhalten, welches die kontinuierliche Energiewandlung zwischen kinetischer und potentieller Energie ermöglicht, muss das zuvor beschriebene Voigt-Kelvin-Modell um eine Trägheitseigenschaft in Form einer Masse  $m$  erweitert werden. Dadurch entsteht das in Abschnitt 2.1 erläuterte Basismodell des Einmassenschwingers, welches üblicherweise zur Beschreibung von Schwingungsproblemen angewendet wird. Spezialisiert man  $\psi$  gemäß (2.68) für  $c_{crit}$  aus (2.4) unter Beachtung von (2.13) und (2.36), so erhält man für den Einmassenschwinger:

$$\psi = \frac{W_d}{W_{el}} = \frac{2\pi c \Omega}{k} = \frac{4\pi c \Omega}{\omega_n c_{crit}} = 4\pi \zeta \eta. \quad (2.71)$$



**Abb. 2.7:** Äquivalenzbetrachtungen bei nicht-viskoser Dämpfung anhand eines Kraft-Weg-Diagramms (Hysteresebeziehung) [4]

Für dieses System kann der Energieumsatz infolge Dämpfung nach (2.68) wie folgt angeschrieben werden:

$$W_d = \psi W_{el} = \frac{2\pi c\Omega}{k} \cdot \frac{1}{2} k \hat{u}^2 = \pi c \Omega \hat{u}^2. \quad (2.72)$$

Demnach wächst einerseits die spezifische Dämpfung  $\psi$  (2.71) linear mit der Frequenz und andererseits ist die durch Dämpfung zerstreute Energie je Zyklus gemäß (2.72) proportional zur Anregungsfrequenz und zum Quadrat der Auslenkungsamplitude.

Das Verhalten realer Werkstoffe von Baukonstruktionen weicht allerdings von diesen Gesetzmäßigkeiten ab, wobei die spezifische Dämpfung  $\psi$  eine Unabhängigkeit von der Frequenz und insbesondere eine Amplitudenabhängigkeit aufweist. Dieser Diskrepanz gegenüber dem linear-viskosen Verhalten ist durch eine nicht-elliptische Kurve der Hysterese gekennzeichnet, welche aus der experimentellen Untersuchung von Werkstoffen hervorgeht [8].

Diese Erkenntnisse stehen genau genommen im Widerspruch zur Annahme viskoser (frequenzabhängiger) Dämpfung, welche üblicherweise für die analytische Behandlung von Schwingungsaufgaben verwendet wird. Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 erwähnt, ermöglicht diese praktische Annahme die einfache mathematische Abhandlung von Schwingungsproblemen, aufgrund der Linearität der beschreibenden Differentialgleichung (mit konstanten Koeffizienten). Dieses vereinfachende Vorgehensweise erscheint näherungsweise gerechtfertigt, da das Strukturverhalten in Resonanzferne nur geringfügig durch die Dämpfung beeinflusst wird. Grund dafür ist die Kleinheit der dissipativ wirksamen Kräfte gegenüber den Rückstell- und Trägheitskräften, welche bei Beanspruchungen im elastischen Bereich vorliegt. Darüber hinaus ist bei schwach gedämpften Konstruktionen die Wirkung der Dämpfung auf die Frequenzen der Eigenschwingungen relativ gering, siehe Tabelle 2.1 [25].

Im Gegensatz dazu hat die Dämpfung bei Resonanz einen entscheidenden Einfluss auf die Stärke und Dauer der Schwingungsreaktion. Um auch das Verhalten an der Resonanzstelle zufriedenstellend abzubilden, werden die Kenngrößen des linearen Dämpfungsansatzes so modifiziert, dass die in einem Zyklus zerstreute Energie äquivalent zum tatsächlichen Wert ist.

Gelingt es den Flächeninhalt  $\bar{W}_d$  aus der Hystereseurve eines nicht-viskos gedämpften Systems nach Abbildung 2.7 zu bestimmen, so kann die äquivalente Dämpfungskonstante  $c_{eq}$  aus (2.54) unter Beachtung von  $W_d = \bar{W}_d$  wie folgt angeschrieben werden:

$$c_{eq} = \frac{\bar{W}_d}{\pi\Omega\hat{u}^2}. \quad (2.73)$$

Wird  $\bar{W}_d$  bei Resonanzanregung ( $\eta = 1$ ) bestimmt, so folgt aus (2.71) der äquivalente Dämpfungsgrad:

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi\eta} \frac{\bar{W}_d}{W_{el}} \quad \longrightarrow \quad \zeta_{eq} (\eta = \Omega/\omega_n = 1) = \frac{\bar{W}_d}{2\pi k \hat{u}^2}. \quad (2.74)$$

Die so ermittelten Dämpfungszahlen werden als summarische Größen betrachtet, die aus der Wirkung zahlreicher (nicht-viskoser) Dämpfungsmechanismen hervorgehen, siehe Abschnitt 2.2.1.

### 2.2.3.1 Hysteretische Dämpfung

Die zuvor erwähnte Unabhängigkeit der Dämpfung bei Werkstoffen von der Geschwindigkeit kann durch das Modell der hysteretischen Dämpfung (auch: Strukturdämpfung) berücksichtigt werden. Um die Frequenzunabhängigkeit zu gewährleisten, wird im Ansatz für die Dämpfungskraft  $F_d$  der Kehrwert der Erregerkreisfrequenz  $\Omega$  berücksichtigt [8]

$$F_d = \frac{\xi k}{\Omega} \dot{u}, \quad (2.75)$$

wobei  $\xi$  die hysteretische Dämpfungszahl und  $k$  die Federkonstante darstellt. Durch Vergleich von (2.75) mit der viskosen Dämpfungskraft (2.43) kann eine äquivalente Dämpfungszahl wie folgt angeschrieben werden:

$$c_{eq} = \frac{\xi k}{\Omega}. \quad (2.76)$$

Die dissipierte Energie infolge hysteretischer Dämpfung ergibt sich aus (2.72) unter Beachtung von (2.76) zu:

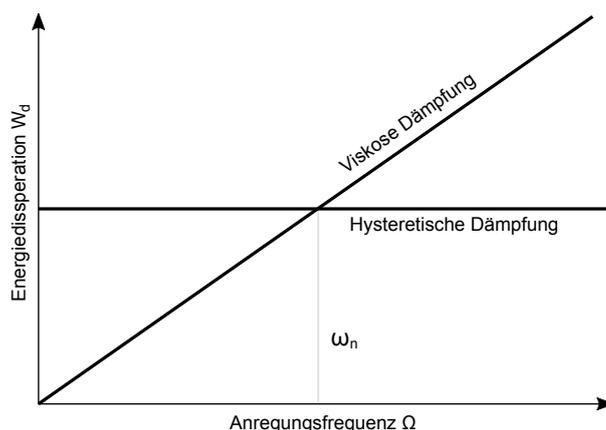
$$W_d = \pi \xi k \hat{u}^2. \quad (2.77)$$

Im Gegensatz zur viskosen Dämpfung ist gemäß (2.77) der Energieumsatz je Zyklus infolge Strukturdämpfung unabhängig von der Frequenz, siehe Abbildung 2.8. Spezialisiert man (2.74) für (2.77), erhält man den äquivalenten Dämpfungsgrad:

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi\eta} \frac{W_d}{W_{el}} = \frac{\xi}{2} \frac{1}{\eta} = \frac{\xi}{2} \left( \frac{\omega_n}{\Omega} \right) \quad \longrightarrow \quad \zeta_{eq} (\Omega = \omega_n) = \frac{\xi}{2}. \quad (2.78)$$

Für den hysteretisch gedämpften Einmassenschwinger erhält man die Bewegungsgleichung bei harmonischer Anregung  $p(t) = p_0 \sin \Omega t$  durch Einsetzen von (2.76) in (2.2):

$$m\ddot{u}(t) + \frac{\xi k}{\Omega} \dot{u}(t) + ku(t) = p_0 \sin \Omega t. \quad (2.79)$$



**Abb. 2.8:** Energieumsatz infolge viskoser und hysteretischer Dämpfung [4]

Die partikuläre Lösung, also die stationäre Schwingungsantwort kann man analog zu (2.31) wie folgt bestimmen:

$$u_p(t) = a_p \cos(\Omega t - \varphi). \quad (2.80)$$

Durch Spezialisieren von (2.37) und (2.38) für den ersten Ausdruck  $\zeta_{eq}$  aus (2.78) erhält man die Vergrößerungsfunktion

$$V_p = \frac{a_p}{a_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \xi^2}} \quad (2.81)$$

und die Phasenverschiebung zu

$$\tan \varphi = \frac{\xi}{1 - (\Omega/\omega)^2}. \quad (2.82)$$

Bei hysteretischer Dämpfung treten die Auslenkungsmaxima im Unterschied zu viskos gedämpften Systemen bei  $\Omega = \omega_n$ , woraus ein Vergrößerungsfaktor  $V = 1/\xi$  an der Resonanzstelle folgt. Die oben angeführten Analogien zum viskosen Dämpfungsmodell gelten streng genommen nur bei harmonischer Anregung. Für nicht-harmonische Erregungsarten ist die Bestimmung der Lösung im Zeitbereich nicht widerspruchsfrei möglich [25]. Näherungsweise kann ein System mit Strukturdämpfung durch ein Modell mit äquivalenter viskoser Dämpfung - definiert durch den zweiten Ausdruck in Gleichung (2.78) - abgebildet werden. Für Strukturen mit schwacher Dämpfung ergeben sich aus dieser Approximation annähernd gleiche Ergebnisse [4].

### 2.2.3.2 Reibungsdämpfung

Ist das Dämpfungsverhalten eines Systems durch die Reibung zwischen Festkörpern gekennzeichnet, so kann die Bewegungsgleichung (Reibungsbeiwert  $\mu$ , Normalkraft  $N$  auf Kontaktfläche) wie folgt angeschrieben werden:

$$m\ddot{u}(t) + R \operatorname{sgn}(\dot{u}(t)) + ku(t) = p(t) \quad \text{mit} \quad R = \mu N. \quad (2.83)$$

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erläutert, ändert sich mit jedem Richtungswechsel auch das Vorzeichen der in ihrer Größe konstanten Reibungskraft  $R$ . Das zugehörige Kraft-Weg-Diagramm (Hysterese) ist in Abbildung 2.6f dargestellt. Die umfahrene Fläche entspricht dabei der Energiezerstreuung je Zyklus [8]:

$$W_d = 4R\hat{u} = 4\mu N\hat{u}. \quad (2.84)$$

Die exakte analytische Lösung für (2.83) ist vergleichsweise schwierig. Im Unterschied dazu ergibt eine näherungsweise Beschreibung des Systemverhaltens mittels äquivalenter viskoser Dämpfungskraft ein einfaches, aber für kleine Dämpfungen hinreichendes Simulationsmodell [4]. Durch Spezialisierung von (2.73) bzw. (2.74) für  $W_d$  gemäß (2.84) erhält man die äquivalente Dämpfungskonstante

$$c_{\text{eq}} = \frac{4\mu N}{\pi\Omega\hat{u}} \quad (2.85)$$

und den äquivalenten Dämpfungsgrad

$$\zeta_{\text{eq}} = \frac{2}{\pi} \frac{\omega_n}{\Omega} \frac{\mu N}{k\hat{u}}. \quad (2.86)$$

## 2.3 Dämpfungsermittlung

Eine rein theoretische Behandlung der Dämpfung durch die mathematische Formulierung der zugrunde liegenden Wirkmechanismen ist für praktische Belange nicht möglich [23]. Daher ist man bei der Umsetzung einer bauldynamischen Aufgabe auf Erfahrungswerte angewiesen. Hierfür werden im allgemeinen Richtwerte verwendet, welche auf experimentell bestimmte Dämpfungswerte vergleichbarer Strukturen basieren. Für die versuchstechnische Ermittlung der Dissipationskapazität stehen im Wesentlichen drei Methoden zur Verfügung:

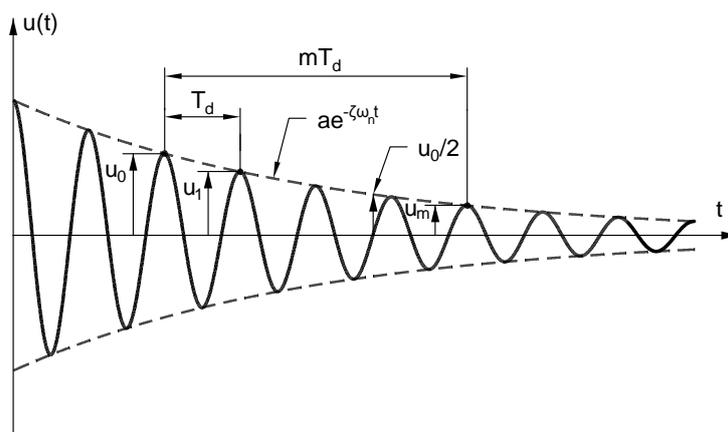
- Ausschwingversuche (Logarithmisches Dekrement Methode)
- Resonanzversuche (Bandbreitenmethode)
- direkte Bestimmung durch Vermessen der Hystereseschleife

Die direkte Bestimmung der Dämpfung ist nur mit vergleichsweise hohem technischen Aufwand möglich und daher unüblich [25]. Die baupraktisch relevanten Methoden basieren auf indirekten Dämpfungsmessungen mittels Ausschwing- oder Resonanzversuchen, welche in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert werden.

### 2.3.1 Ausschwingversuche - Logarithmisches Dekrement Methode

Die experimentelle Bestimmung von Dämpfungsparametern kann durch die Messung von Abklingkurven erfolgen, siehe Abbildung 2.9. Unter der Voraussetzung, dass die Struktur nach Anregung einer bestimmten Eigenform als Einmassenschwinger antwortet, erhält man aus (2.22) das Verhältnis der Schwingungsamplituden am Beginn und Ende eines Schwingungszyklus mit

$$\frac{u_0}{u_1} = e^{\zeta\omega_n T_d}. \quad (2.87)$$



**Abb. 2.9:** Abklingkurve eines linearen Einmassenschwingers [2], [6]

Grundsätzlich sind hierbei die Zeitpunkte der gewählten Amplitudenwerte irrelevant, sofern deren zeitlicher Abstand exakt eine Periodendauer  $T_d$  beträgt. Mittels Gleichung (2.87) kann das sogenannte *logarithmische Dekrement*  $\delta$  definiert werden als

$$\delta = \ln \frac{u_0}{u_1} = \zeta \omega_n T_d. \quad (2.88)$$

Durch Einsetzen von (2.16) für die Schwingungsdauer  $T_d$  des gedämpften Systems folgt schließlich

$$\delta = \zeta \omega_n T_d = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}. \quad (2.89)$$

Für die Untersuchung von schwach gedämpften Systemen ( $\zeta < 0.2$ ) kann (2.89) durch

$$\delta \approx 2\pi\zeta \quad (2.90)$$

angenähert und daraus der Dämpfungsgrad (Lehrsche Dämpfungsmaß)

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{u_0}{u_1} \quad (2.91)$$

bestimmt werden. Der Fehler, welcher durch diese Approximation entsteht, beträgt für ein System mit Dämpfungsgrad  $\zeta \leq 0.2$  maximal zwei Prozent [5] (siehe auch Tabelle 2.1).

Für Messungen von Abklingkurven bei realen Strukturen kann es hilfreich sein, eine genügend große Periodenanzahl zwischen den gewählten Amplitudenwerten zu wählen. Dies geschieht einerseits, weil die Amplituden realer Bauwerke häufig nicht gleichförmig abklingen und andererseits um den Ausgleich von Ungenauigkeiten bei der Messdurchführung zu ermöglichen [30]. Für diese praktische Vorgehensweise lautet das Verhältnis der Amplituden

$$\frac{u_0}{u_m} = \frac{u_0}{u_1} \frac{u_1}{u_2} \dots \frac{u_{m-1}}{u_m} = (e^{\zeta\omega_n T_d})^m = e^{m\zeta\omega_n T_d}. \quad (2.92)$$

Somit ergibt sich das logarithmische Dekrement  $\delta$  ausgewertet über  $m$ -Perioden

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{u_0}{u_m} = \zeta \omega_n T_d \quad (2.93)$$

und daraus folgt unter der Voraussetzung geringer Dämpfung der Dämpfungsgrad

$$\zeta \approx \frac{1}{2\pi m} \ln \frac{u_0}{u_m}. \quad (2.94)$$

In [6] führt Craig mit der Halbe-Amplituden Methode (*Half-Amplitude Methode*) eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung von Dämpfungen aus Ausschwingversuchen an. Die Grundlage hierfür bildet das exponentielle Abklingen der Schwingungen, welches durch die Einhüllende

$$\bar{u} = ae^{-\zeta \omega_n t} \quad (2.95)$$

beschrieben wird. Anstatt wie bisher die Amplituden aus dem tatsächlichen Zeitverlauf des Abklingvorgangs mit ganzzahligem Periodenabstand zu bestimmen, werden hierbei die Amplituden der Einhüllenden verwendet. Insbesondere wird jene - im allgemeinen nicht ganzzahlige - Periodenanzahl ermittelt, bei der die Amplitude der Einhüllenden  $\bar{u}$  auf 50 % ihres ursprünglichen Werts abgeklungen ist. Formuliert man das Verhältnis der Amplitudenwerte, ausgehend von Gleichung (2.95), so erhält man

$$\frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{50\%}} = e^{\zeta \omega_n N T_d} = 2. \quad (2.96)$$

Unter Berücksichtigung der Beziehung (2.16) gilt

$$\frac{2\pi N \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = \ln(2) \quad (2.97)$$

und für geringe Dämpfungswerte ( $\zeta^2 \ll 1$ ), welche in der Baupraxis üblich sind, ergibt sich folgenden Näherung [6]:

$$2\pi N \zeta \approx \ln(2). \quad (2.98)$$

Durch Umformung erhält man schließlich eine einfache und für praktische Zwecke hilfreiche Formel zur Abschätzung der vorhandenen Dämpfung auf Basis der Periodenanzahl  $N$ :

$$\zeta \approx \frac{0.11}{N}. \quad (2.99)$$

Grundsätzlich kann die Anregung des Systems vor dem freien Ausschwingen durch zwei verschiedene Methoden erfolgen:

- Harmonische Resonanzanregung
- Statische Auslenkung der Konstruktion

Die erste Möglichkeit hat den Vorteil, dass die Struktur bereits vor dem Freigeben mit der gewünschten Eigenform schwingt, wodurch das Abklingen ungestört verlaufen kann. Hingegen

können bei statischer Auslenkung Störungen auftreten, da generell die Biegeform infolge statischer Verschiebung von der Schwingungseigenform abweicht. Durch eine statische Auslenkung ist es allerdings möglich, größere Schwingungsamplituden zu erreichen als durch gezieltes Aufschaukeln [25].

Für den ausschließlich viskos gedämpften Einmassenschwinger resultiert aus dem Ausschwingversuch eine exponentielle Abnahme der Amplituden. Bei reiner Reibungsdämpfung ergibt sich eine lineare Reduktion mit der Zeit. Laut Bachmann [2] ist davon auszugehen, dass reale Strukturen im Allgemeinen eine Abklingkurve aufweisen, die sich zwischen diesen beiden Grenzzuständen - viskose Dämpfung und Reibungsdämpfung - befindet.

Die Bestimmung modaler Dämpfungswerte für Strukturen, welche durch Mehrmassenschwinger abgebildet werden, kann in gleicher Weise aus dem freien Ausschwingen erfolgen. Die so ermittelten Dämpfungswerte sind allerdings mit Unsicherheiten behaftet, weil derartige Ausschwingvorgänge häufig eine Überlagerung mehrerer Eigenformen darstellen [8].

Wie bereits erwähnt, handelt es sich beim Ausschwingversuch um eine indirekte Messung der Dämpfung, bei der sämtliche Dämpfungsbeiträge erfasst werden. Nach Peterson [25] kann die Dämpfung einer Baukonstruktion als summarische Größe in Form des logarithmischen Dekrements wie folgt angeschrieben werden:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3. \quad (2.100)$$

Gemäß (2.100) setzt sich die Gesamtdämpfung zusammen aus der Materialdämpfung  $\delta_1$ , Konstruktionsdämpfung  $\delta_2$  und Baugrunddämpfung  $\delta_3$ . Tabelle 2.2 beinhaltet Anhaltswerte für die einzelnen Dämpfungsanteile, wobei diese Werte für geringe, mittlere und hohe Beanspruchungen auf Gebrauchslastniveau aufgelistet sind. Hierbei ergibt sich allerdings eine Schwierigkeit in der Anwendung, da in [25] keine Schranken für die drei Beanspruchungsklassen definiert sind.

Aus dem logarithmischen Dekrement  $\delta$  erhält man durch Umformen von (2.90) den Dämpfungsgrad

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi}. \quad (2.101)$$

Material   Konstruktion   Lagerung		Beanspruchungslevel innerhalb des Gebrauchslastbereiches		
		gering	mittel	hoch
$\delta_1$	Stahl - ferritisch	0.005	0.008	0.012
	Aluminium - Legierung	0.010	0.015	0.025
	Bauholz - Nadelholz	0.040	0.045	0.050
	Stahlbeton - Zustand I	0.025	0.030	0.040
	Spannbeton	0.020	0.025	0.030
	Mauerwerk - Ziegel, Betonstein	0.045	0.050	0.060
$\delta_2$	Stahlhochbau   ohne Ausbau   mit SLP-, GV- oder Schweißverbindung	0.012	0.015	0.018
	Stahlhochbau   ohne Ausbau   mit SL-Verbindungen	0.015	0.020	0.025
	Fußweg und Straßenbrücken in Stahl   Fahrbahn: Stahl u. Asphalt	0.020	0.025	0.030
	Fußweg und Straßenbrücken in Stahl   Fahrbahn: Beton, Stahlverbund	0.025	0.035	0.040
	Eisenbahnbrücken in Stahl   offene Bauweise	0.030	0.035	0.050
	Eisenbahnbrücken in Stahl   geschl. Bauweise ohne Schotterbett	0.025	0.030	0.050
	Eisenbahnbrücken in Stahl   geschl. Bauweise ohne Schotterbett	0.040	0.050	0.070
	Brücken in Stahlbetonweise   Fußweg- u. Straßenbrücken	0.015	0.020	0.025
	Brücken in Stahlbetonweise   Eisenbahnbrücken ohne Schotterbett	0.020	0.025	0.030
	Brücken in Stahlbetonweise   Eisenbahnbrücken mit Schotterbett	0.035	0.040	0.045
$\delta_3$	Hochbau: Decken, Träger, Binder   Lagerung auf Beton u. Mauerwerk	0.004	0.005	0.006
	Turmartige frei auskragende Konstruktionen   auf Fundamenten über Fels	0.004	0.005	0.006
	Turmartige frei auskragende Konstruktionen   auf Fundamenten über Kies	0.006	0.008	0.010
	Turmartige frei auskragende Konstruktionen   auf Fundamenten über Pfahlrost	0.012	0.015	0.018
	Brückenbau: Lagerung der Hauptträger   Rollenlager	0.004	0.005	0.006
	Brückenbau: Lagerung der Hauptträger   Topf- u. Kallottenlager (PTFE)	0.008	0.010	0.012
	Elastomer-Verformungs-Lager	0.010	0.015	0.025

**Tab. 2.2:** Logarithmisches Dekrement als Bezugsgröße für Materialdämpfung, Konstruktionsdämpfung und Baugrunddämpfung; Quelle: [25]

### 2.3.2 Resonanzversuche - Bandbreitenmethode

Neben der Dämpfungsermittlung aus dem Zeitverlauf einer Abklingkurve kann die Bestimmung auch im Frequenzbereich aus der Resonanzkurve bei harmonischer Kraftanregung mittels Schwingerreger erfolgen. Durch die stufenweise Erhöhung der Erregerfrequenz in einem bestimmten Frequenzband, welches die Resonanzstelle beinhaltet, erhält man den Verlauf der Amplitudenmaxima (auch: Resonanzspektrum, gemessene Übertragungsfunktion).

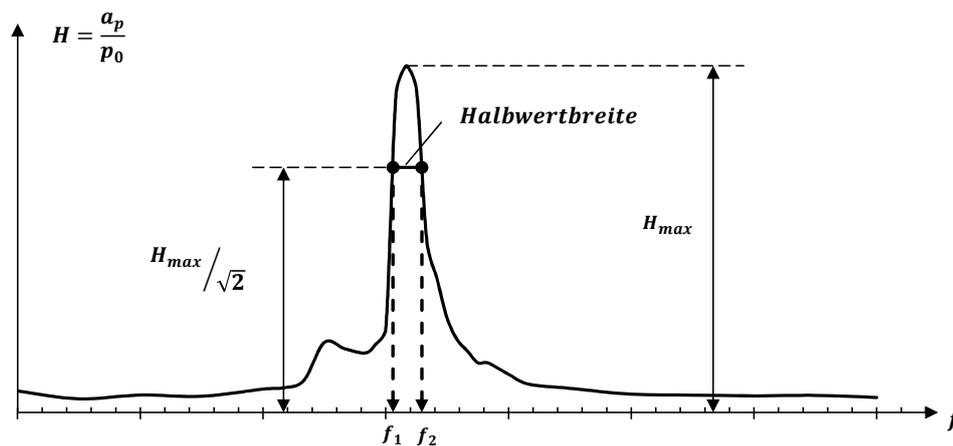


Abb. 2.10: Resonanzkurve - Bandbreitenmethode [2], [6]

Für die Dämpfungsermittlung aus dem Resonanzversuch kommen üblicherweise zwei Methoden zur Anwendung [25]:

- Ermittlung aus der maximalen Amplitude bei Resonanz (Überhöhungsfaktor)
- Bestimmung über die Halbwertsbreite (Bandbreitenmethode, Methode der halben Bandbreiten, half-power method)

Für den ersten Weg ergibt sich für  $\zeta^2 \ll 1$  der Dämpfungsgrad ausgehend von Gleichung (2.40) mit

$$\max V_p = \frac{\max a_p}{a_0} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-2\zeta^2}} \approx \frac{1}{2\zeta} \rightarrow \zeta \approx \frac{a_0}{2\max a_p} = \frac{p_0}{2k\max a_p}. \quad (2.102)$$

Wie aus (2.102) ersichtlich, ist für diese Vorgangsweise die Kenntnis der statischen Auslenkung  $a_0$  erforderlich. Allerdings kann  $a_0$  mit den Standardmesseinrichtungen nicht aufgezeichnet werden und daher ist diese Art der Dämpfungsmessung unüblich [5].

Für die Auswertung mittels Bandbreitenmethode wird die sogenannte Halbwertsbreite der Resonanzspitze zur Bestimmung der Dämpfungsparameter verwendet. Der Dämpfungsgrad wird aus den Grenzfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  bestimmt, welche die Bandbreite  $\Delta f = f_2 - f_1$  definieren, in dem das Amplitudenspektrum den  $\sqrt{2}/2$ -fachen Wert der Amplitude bei Resonanz ( $\eta = \frac{\Omega}{\omega_n} = 1$ ) überschreitet, siehe Abbildung 2.10. Je nach Darstellungsart des Frequenzganges können anstatt der Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  auch die Abstimmungsverhältnisse

$$\eta_1 = \frac{\Omega_1}{\omega_n} = \frac{2\pi f_1}{\omega_n} ; \quad \eta_2 = \frac{\Omega_2}{\omega_n} = \frac{2\pi f_2}{\omega_n} \quad (2.103)$$

verwendet werden. Zur Bestimmung der Dämpfung aus dem Resonanzspektrum wird zunächst die Vergrößerungsfunktion  $V_p = a_p/a_0$  gemäß Gleichung (2.37) betrachtet. Da die statische Auslenkung  $a_0 = p_0/k$  üblicherweise nicht bekannt ist, werden häufig die Amplituden der Strukturantwort auf die zugehörige Kraftamplitude  $p_0$  bezogen:

$$\bar{V}_p = \left( \frac{a_p}{p_0} \right) = \frac{1/k}{\sqrt{[1 - \eta^2]^2 + [2\zeta\eta]^2}}. \quad (2.104)$$

Formuliert man für diesen Frequenzgang die Amplitude bei der Resonanzstelle, so ergibt sich aus (2.40) wie folgt:

$$\left( \frac{a_p}{p_0} \right)_{\eta=1} = \frac{1/k}{2\zeta}. \quad (2.105)$$

Mit (2.105) kann nun die Amplitude  $1/\sqrt{2} \left( \frac{a_p}{p_0} \right)_{\eta=1}$  zur Bestimmung der Bandbreite wie folgt formuliert werden:

$$\left( \frac{a_p}{p_0} \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{a_p}{p_0} \right)_{\eta=1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1/k}{2\zeta}. \quad (2.106)$$

Durch Einsetzen von (2.106) in (2.104) und anschließendem Quadrieren ergibt sich:

$$\frac{1}{2} \left( \frac{1/k}{2\zeta} \right)^2 = \frac{(1/k)^2}{[1 - \eta^2]^2 + [2\zeta\eta]^2}. \quad (2.107)$$

Wird (2.107) umgeformt, so erhält man eine quadratische Gleichung

$$\eta^4 - 2(1 - 2\zeta^2)\eta^2 + (1 - 8\zeta^2) = 0, \quad (2.108)$$

aus der sich die Wurzeln wie folgt bestimmen lassen:

$$\eta_{1,2}^2 = (1 - 2\zeta^2) \pm 2\zeta\sqrt{1 + \zeta^2}. \quad (2.109)$$

Für die in der Baupraxis vorkommenden kleinen Dämpfungswerte ( $\zeta^2 \ll 1$ ) kann (2.109) wie folgt vereinfacht werden:

$$\eta_{1,2}^2 = 1 \pm 2\zeta. \quad (2.110)$$

Durch Entwicklung der Ausdrücke (2.110) in einer Binomischen Reihe ergibt sich [6]:

$$\begin{aligned} \eta_2 &= (1 + 2\zeta)^{1/2} = 1 + \frac{1}{2}(2\zeta) + \dots \\ \eta_1 &= (1 - 2\zeta)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2}(2\zeta) - \dots \end{aligned} \quad (2.111)$$

Für gering gedämpfte Systeme ( $\zeta^2 \ll 1$ ) erhält man

$$\eta_2 - \eta_1 = 2\zeta, \quad (2.112)$$

und unter Beachten der Beziehungen (2.103) folgt schließlich:

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{\omega_n} = \frac{1}{2} \frac{f_2 - f_1}{f_n}. \quad (2.113)$$

Bei der Dämpfungsermittlung aus Resonanzkurven sollte stets berücksichtigt werden, dass die in der Baupraxis vorkommenden Systeme meist amplitudenabhängige Dämpfungen aufweisen. Daher existiert in der Regel ein Zusammenhang zwischen dem ermittelten Dämpfungswert und der zugehörigen Kraftamplitude des Schwingerregers [5].

Speziell bei sehr gering gedämpften Strukturen besteht die Gefahr der Schädigung von Tragwerken bei der Messdurchführung. Falls hierbei eine Beschränkung auf geringe Amplitudenwerte gewählt wird, ergibt sich das Problem der Auswertung zu geringer Dämpfungswerte infolge ihrer Amplitudenabhängigkeit. Überdies bildet sich bei kleinen Dämpfungswerten eine schmale Resonanzspitze aus, wodurch die exakte Ermittlung des Frequenzganges und die Auswertung der Halbwertbreite als schwierig einzustufen ist. Das Vorliegen höherer Dämpfungen verursacht ebenfalls Probleme, weil sich dadurch die einzelnen Resonanzspitzen überlagern können und damit die Messung von höheren Eigenformen beeinflusst wird. Auch die Anregung der Konstruktionen beiderseits von Resonanzstellen gestaltet sich oftmals als nicht einfach, da bereits geringe Abweichungen in der Anregungsfrequenz zu deutlichen Amplitudenänderungen der Strukturantwort führen [25].

Nach Bachmann [2] besteht neben der Verwendung von Verschiebungsdaten auch die Möglichkeit, Messaufzeichnung der Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen zur Erstellung der Resonanzkurven zu verwenden.

# Kapitel 3

## Beschreibung des Programms

### 3.1 MATLAB

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde das Programm FRF PROCESSING TOOL mit Hilfe der Mathematiksoftware MATLAB entwickelt. Matlab ist ein Programmpaket für numerische Berechnungen und Visualisierungen von Daten im technisch-wissenschaftlichen Bereich. Die Berechnungen sind unter Verwendung von Matrizen ausgelegt (= MATrix LABoratory), woher sich auch der Name ableitet. Die Dimensionen der Matrix müssen nicht dezidiert definiert werden, dadurch lassen sich numerische Probleme innerhalb kürzester Zeit lösen. Die Software wird hauptsächlich für die numerische Simulation, sowie für die Datenerfassung, Datenanalyse und Datenauswertung eingesetzt. Kleinere Programme können als so genannte Skripte oder Funktionen (M-Files) zu Einheiten verpackt werden. Dies erlaubt das Erstellen von anwendungsorientierten Werkzeugkisten (Toolboxes). M-Files werden mit einem Texteditor geschrieben und sind ASCII-Files. Durch die verständlich und übersichtlich mathematisch orientierte Syntax der Matlab-Skriptsprache ist die Erstellung entsprechender Programme wesentlich einfacher durchführbar als zum Beispiel unter der Programmiersprache C. Zusätzlich bietet MATLAB die Möglichkeit grafischen Benutzeroberflächen (kurz GUI, Graphical User Interface) mit Hilfe des integrierten GUIDE-Editors (GUI Development Editor) zu erstellen.

### 3.2 Bausteinprinzip - modularer Aufbau

Der modulare Aufbau des Programms FRF PROCESSING TOOL wird durch die Verwendung von mehreren grafischen Benutzeroberflächen (GUIs) gewährleistet. Durch Aufteilung der einzelnen Arbeitsschritte in separate Bedienoberflächen wird der Benutzer intuitiv durch den Bearbeitungsprozess geführt. Die modulare Programmierung ist ein vielfach angewandter Programmierstil und bezweckt, Computerprogramme systematisch in logische Teilblöcke (genannt Module) auszulagern. Demnach besteht ein modulares Programm aus in sich funktionsfähigen Einzelmodulen. Diese Einzelteile können logisch miteinander verknüpft und zu einer größeren Anwendung aufgebaut werden. Danach ist das Hauptprogramm als Gesamtes betriebsbereit. Der modulare Aufbau eines Hauptprogramms ist übersichtlicher, leichter wieder verwendbar und leichter erweiterbar als ein integraler Aufbau.

### 3.3 Festlegungen für den Import von Messdaten

Für das Einlesen von gespeicherten Messdaten stehen zwei Datentypen zur Verfügung. Der Benutzer kann zwischen dem Import von ASCII Dateien im \*.asc-Format oder von MS Excel Dateien im \*.xls-Format wählen. Der gespeicherte Datentyp ist üblicherweise abhängig von der Software, welche für die Messaufzeichnungen verwendet wird. Generell handelt es sich dabei um spaltenorientierte Formate, die im Regelfall in ein ASCII Format umgewandelt bzw. abgespeichert werden können. Die Schnittstelle für den Datenimport ermöglicht somit dem Benutzer die universelle Einsetzbarkeit des Programms unabhängig vom verwendeten Messsystem. Die Signaldaten, aus den Spalten der ASCII- bzw. Excel-Tabellen, werden durch die Eingabe der zu importierenden Spaltennummer beim Einlesen zugewiesen. Informationen aus nicht verwendeten Spalten werden dabei ignoriert.

Zusätzlich können in den Dateien enthaltene Kopfzeilen (Header) entfernt werden. Beim Einlesen von MS Excel Dateien wird die Anzahl der Kopfzeilen automatisch durch die MATLAB-Funktion `xlsread` erkannt und von den einzulesenden numerischen Daten getrennt. Da in MATLAB die automatische Erkennung von Kopfzeilen beim ASCII-Datentyp nicht in allen Fällen fehlerfrei funktioniert, muss zusätzlich die Anzahl der Kopfzeilen beim Laden vorgegeben werden. Überdies muss bei \*.asc-Dateien darauf geachtet werden, dass das Kommazeichen als Punkt (‘.’) und nicht als Komma (‘,’) getrennt ist.

Gemessene Übertragungsfunktionen setzen sich aus einer Vielzahl von Einzelmessungen zusammen, deren jeweilige Anregungsfrequenz für die Normierung des Amplitudenfrequenzganges elementar ist. Durch eine sinnvolle Wahl von Dateinamen beim Abspeichern der Messdaten, unmittelbar nach dem Aufzeichnen der Signale, kann einerseits eine spätere Verwechslung vermieden werden und andererseits die Drehzahl der Richterregger beim Laden der Einzelmessungen in MATLAB automatisch für jede Einzelmessung extrahiert werden. Eine wichtige Voraussetzung für den korrekten Programmablauf ist die folgende Namenskonvention für die zu ladenden Einzeldateien: Der Dateiname setzt sich erstens aus einem Präfix (zur Beschreibung der Messkonfiguration) und zweitens aus der Drehzahl des Richterreggers in Umdrehungen pro Minute (U/min) zusammen. Als Trennzeichen zwischen den beiden Namensteilen wird zwecks automatischer Kennung beim Einlesen ein Unterstrich (‘\_’) verwendet:

[Präfix] \_ [U/min] . [Dateiendung]

Beispielsweise könnten die Dateinamen einer Messreihe folgendermaßen aussehen:

TW5-1\_1391-syn\_120.asc

TW5-1\_1391-syn\_122.asc

TW5-1\_1391-syn\_124.asc

Im oben dargestellten Beispiel ermöglicht der Präfix `TW5-1_1391-syn` den Rückschluss auf ein Tragwerk mit der Objektnummer 5.1 (‘TW5-1’) synchron angeregt (‘syn’) mit einem statischen Moment  $m_{st} = 1371 \text{ kgcm}$  (‘1391’) je Unwuchterregger. Die Zahl 120 vor der Dateiendung kennzeichnet die Drehzahl des Richterreggers in Umdrehungen pro Minute (U/min).

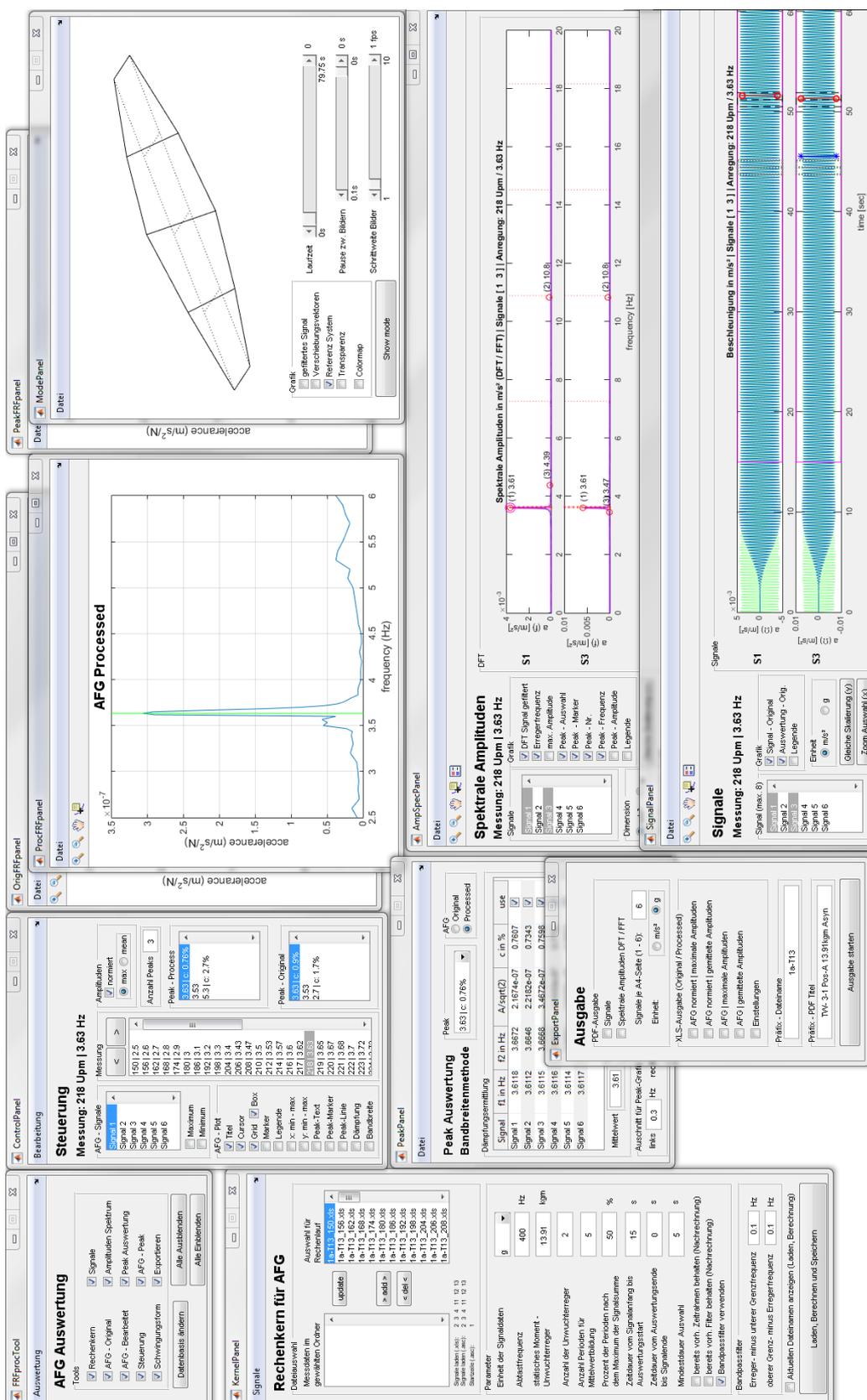


Abb. 3.1: Übersicht Benutzeroberflächen - FRF PROCESSING TOOL

## 3.4 Benutzeroberflächen (GUIs)

### 3.4.1 Programmstart über die Benutzeroberfläche FRFprocTool

Zum Start des Programms FRF PROCESSING TOOL wird die Datei `FRFprocTool.m` aufgerufen. Danach erfolgt automatisch das Öffnen sämtlicher Programmfenster und deren vordefinierte Positionierung am Bildschirm. Zur besseren Übersicht werden zunächst nicht benötigte Fenster ausgeblendet und es bleibt nur die zentrale Bedienoberfläche `FRFprocTool` sichtbar. In diesem Fenster bleiben die Auswahlfelder und Schaltflächen entweder bis zum Neustart einer Auswertung oder bis zum Öffnen eines bereits bestehenden Projektes gesperrt.



Abb. 3.2: Benutzeroberfläche `FRFprocTool`

Diese grafische Benutzeroberfläche (kurz GUI, Graphical User Interface) spielt eine herausragende Rolle im Programmablauf und ist durch folgende Funktionalitäten gekennzeichnet:

- Start des Programms FRF PROCESSING TOOL
- Initialisierung und Öffnen sämtlicher Benutzeroberflächen und deren Positionierung am Bildschirm
- Verwaltung der Sichtbarkeit von Programmfenstern
- Neustart einer Auswertung
- Öffnen von gespeicherten Auswertungen
- Speichern von Projekten
- Ändern des Messdatenverzeichnisses
- Basis und Schnittstelle für den Informations- und Datenaustausch zwischen den einzelnen Benutzeroberflächen mittels spezieller MATLAB-Variable `HB` vom Datentyp `structure`

Zum Start, Speichern und Beenden einer Bearbeitung wird das Menü AUSWERTUNG in der Menüleiste direkt unter der Titelzeile aufgerufen. Dieses Pull-Down-Menü beinhaltet folgende Punkte (siehe Abbildung 3.2b):

- NEU: Eine neue Auswertung wird gestartet und es öffnet sich zunächst eine Dialogbox mit der Aufforderung zur Auswahl einer Referenz-Messdatei im \*.asc-Format oder \*.xls-Format. Durch die Kombination der MATLAB-Funktionen `uigetfile` und `textscan` wird mittels gewählter Datei das Basisverzeichnis und der Präfix des Dateinamens ermittelt. Nach gültiger Beendigung des Dialogfensters mit dem Befehl ÖFFNEN erfolgt die Freischaltung und das Einblenden des Rechenkerns zur Durchführung eines ersten Rechenlaufes.
- ÖFFNEN: Dieser Befehl ermöglicht das Laden bereits bestehender Auswertungen. Hierbei öffnet sich ein Dialogfenster (`uigetfile`), in dem gespeicherte Auswertungen als MATLAB-Datendatei im \*.mat-Format auswählbar sind. Nach Bestätigung der Auswahl mit dem Befehl ÖFFNEN erfolgt die Initialisierung der einzelnen Module mittels gespeicherter Parameter sowie das Freischalten und Einblenden sämtlicher Benutzeroberflächen.
- SPEICHERN: Hier können durchgeführte Auswertungen als MATLAB-Datendatei im \*.mat-Format gespeichert werden. Die Auswahl des Zielverzeichnisses und Dateinamens erfolgt über ein Dialogfenster mit Zugriff auf das Dateisystem.
- BEENDEN: Dieser Menüpunkt ermöglicht das reguläre Beenden des Programms und somit das Schließen sämtlicher Benutzeroberflächen. Dies erfolgt über den mehrfachen und richtig gereihten Aufruf der MATLAB-Funktion `delete` in der zugehörigen Callback-Funktion. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das Schließen einzelner Programmfenster unweigerlich zu einer Fehlfunktion im Programmablauf führt. Daher wird diese Aktion durch eine Rückfrage-Dialogbox abgesichert, um ein versehentliches Schließen zu vermeiden.

Die eigentliche Bedienoberfläche ist in zwei Bereiche gegliedert. Im Feld TOOLS befinden sich zehn Auswahlfelder mit den jeweiligen Namen der grafischen Benutzeroberflächen. Durch An- bzw. Abwahl der so genannten *Check Boxes* wird die Sichtbarkeit der jeweiligen GUI ein- bzw. ausgeschaltet. Für den Benutzer ist es wichtig zu wissen, dass durch das Ausblenden der Fenster, diese trotzdem im Hintergrund geöffnet bleiben. Im unteren Bereich des Fensters sind drei Schaltflächen (so genannte PUSH BUTTONS) angeordnet. Unter Verwendung des Schalters DATENBASIS ÄNDERN kann ein zuvor definiertes Verzeichnis der Messdaten und deren Präfix durch die Wahl einer neuen Referenzdatei nachträglich geändert werden. Diese Funktion kann für den Benutzer hilfreich sein, wenn Messdaten nach einer Auswertung im Dateisystem verschoben werden. Die Schaltflächen ALLE EINBLENDEN bzw. ALLE AUSBLENDEN ermöglichen es, sämtliche GUIs durch einmaliges Betätigen des jeweiligen Buttons ein- bzw. auszublenden.

### 3.4.2 Benutzeroberfläche `KernelPanel` - Rechenkern

Die Benutzeroberfläche `KernelPanel` dient als Rechenkern für die Erstellung von Resonanzkurven. Hier werden alle Einstellungen getroffen, die für das Laden der Messsignale und deren Auswertung

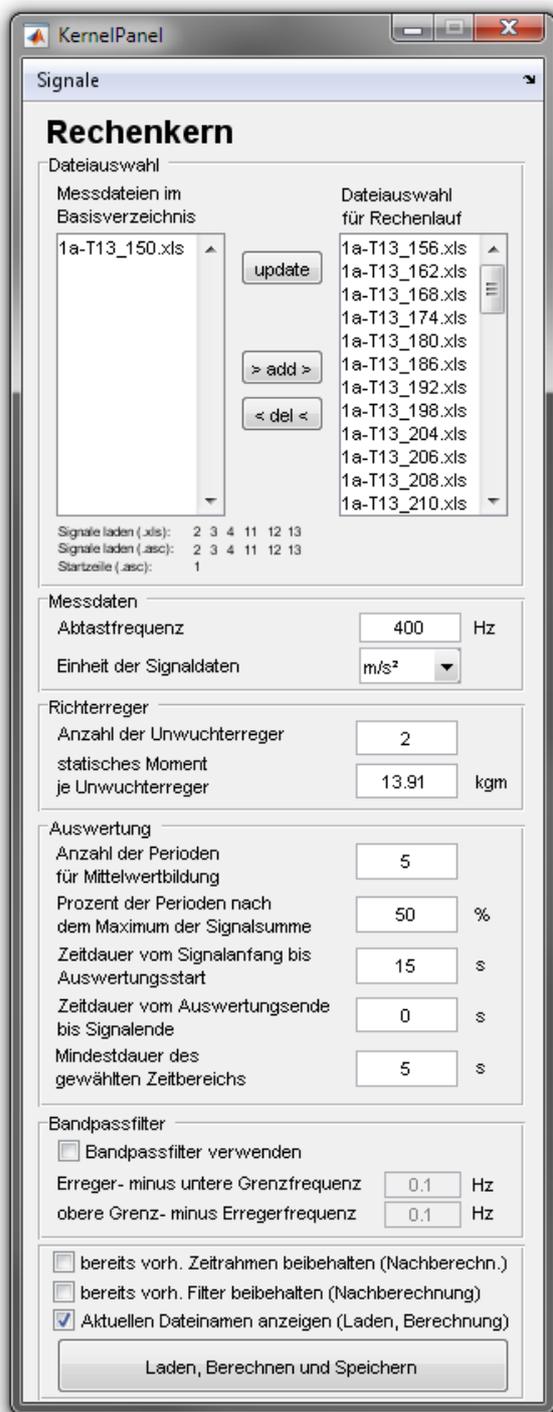
zu einem ersten Amplitudenfrequenzgang erforderlich sind. Die Oberfläche ist in sechs Felder unterteilt. Im obersten Bereich DATEIAUSWAHL sind zwei korrespondierende Listen angeordnet. In der linken Spalte werden zunächst sämtliche Messdateien angezeigt, die sich im gewählten Basisverzeichnis befinden. Über die Schaltfläche >ADD> können die zuvor markierten Messdateien in die rechte Auswahlliste übertragen werden. Gleichzeitig reduziert sich die linke Spalte um diese Einträge, wodurch hier nur mehr die nicht verwendete Messdateien angezeigt werden. In der rechten Spalte sind alle Dateinamen aufgelistet, die bereits hinzugefügt wurden. Das Entfernen von Dateien aus dieser Liste erfolgt durch das Markieren der jeweiligen Einträge und Betätigen der Schaltfläche <DEL<. Durch Betätigung des UPDATE-Schalters kann jederzeit die linke Spalte aktualisiert werden. Dies kann für den Benutzer hilfreich sein, falls sich die Anzahl der Messdateien im Basisverzeichnis während einer Bearbeitung ändert.

Unterhalb der Spalten wird mittels Text angezeigt, welche Signaldaten aus den Spalten der Messschriebe importiert werden. Die Einstellung der Spaltennummern erfolgt über das Menü SIGNALE > AUSWAHL SIGNALE. Dabei öffnet sich in ein Dialogfenster (siehe Abbildung 3.3) zur Eingabe der Spaltennummern, jeweils für den Import von Dateien im \*.xls sowie \*.asc-Format gesondert. Zum Entfernen von Kopfzeilen (*headers*) in ASCII-Dateien wird im letzten Eingabefeld die Startzeile der numerischen Daten definiert. Für MS Excel Dateien geschieht dieser Vorgang automatisch. Details über die Voraussetzungen für den Import von Messaufzeichnungen sind in Punkt ... angeführt.

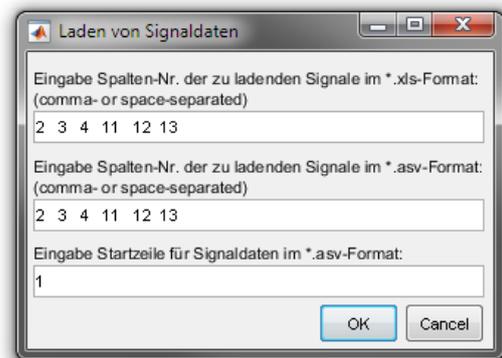
Im zweiten Bereich MESSDATEN werden die Eigenschaften der verwendeten Messschriebe zugewiesen. Dazu wird die Abtastfrequenz in Hertz (Hz) über ein Eingabefeld und die Einheit der aufgezeichneten Signaldaten mittels Pop-up-Menü (mit Auswahlmöglichkeit g oder m/s<sup>2</sup>) definiert. Der Bereich RICHTERREGER beinhaltet zwei Eingabefelder für die Anzahl der Unwuchterrger und deren statisches Moment je Aggregat in kgm. Diese beiden Angaben sind elementar, um in Kombination mit der Erregerfrequenz die Kraftamplitude der harmonischen Anregung zu bestimmen und somit die Normierung des Amplitudenfrequenzganges (AFG) zu ermöglichen.

Der Bereich AUSWERTUNG umfasst grundlegende Parameter für die Erstellung des Amplitudenfrequenzganges aus den Signaldaten. Dazu stehen dem Benutzer fünf Eingabefelder zur Verfügung:

- ANZAHL DER PERIODEN FÜR DIE MITTELWERTBILDUNG:  
Aus den gespeicherten Messsignalen wird für die hier definierte Anzahl von sequentiellen Schwingungsperioden jeweils ein Maximalwert der Schwingungsamplituden ausgewertet. Der verwendete Bezugspunkt für die Auswahl dieser Perioden ergibt sich aus der Summe der Absolutwerte aller Zeitsignale. Daraus kann der Zeitpunkt des Maximums ermittelt und dieser als Bezugspunkt für die Periodenauswahl sämtlicher Signale herangezogen werden. Anschließend wird aus den Höchstwerten ein Mittelwert gebildet. In Kombination mit der zugehörigen Frequenz kann somit schrittweise ein AFG erstellt werden.
- PROZENT DER PERIODEN NACH DEM MAXIMUM DER SIGNALSSUMME:  
Der hier eingegebene Prozentsatz legt die Aufteilung der gewählten Periodenanzahl für die Mittelwertbildung von Messdaten vor und nach dem oben erwähnten Bezugspunkt fest.



(a) Bedienoberfläche



(b) Menü Signale

Abb. 3.3: Benutzeroberfläche KernelPanel

- **ZEITDAUER VOM SIGNALANFANG BIS AUSWERTUNGSSTART:**  
Durch diese Eingabe kann ein bestimmter Zeitbereich in Sekunden am Beginn des jeweiligen Signals von der Amplitudenermittlung ausgeschlossen werden. Die Zeitdauer wird für sämtliche Messdateien und deren Signale übernommen. Im Zuge der Berechnung wird die Gültigkeit dieser Eingabe geprüft und falls für einen fehlerfreien Programmablauf erforderlich, bis auf den Wert null zurückgesetzt.
- **ZEITDAUER VOM AUSWERTUNGSENDE BIS SIGNALLENDE:**  
Der hier eingegebene Wert in Sekunden ermöglicht es, einen Zeitbereich am Ende des jeweiligen Signals von der Amplitudenermittlung auszuschließen. Die Zeitdauer wird für sämtliche Messdateien und deren Signale übernommen. Während des Rechenlaufes wird die Gültigkeit dieser Eingabe geprüft und falls für den fehlerfreien Programmablauf erforderlich, bis auf den Wert null reduziert.
- **MINDESTDAUER AUSWAHL:**  
Durch diese Eingabe wird die Mindestlänge (in Sekunden) des gewählten Zeitbereichs für die Signalauswertung festgelegt. Die hier getroffene Einstellung hat im Zuge der Gültigkeitsprüfung Vorrang gegenüber den oben erwähnten Möglichkeiten, Zeitbereiche einzuschränken.

Eine detaillierte Beschreibung der Parameter für die Auswertung des AFG findet sich in Kapitel ... .

Der Bereich **BANDPASSFILTER** ermöglicht den Einsatz eines *Butterworth* Bandbreitenfilters zehnter Ordnung im Rahmen der Signalauswertung. Über die Auswahl der Check Box **BANDPASSFILTER VERWENDEN** wird dieser Filter aktiviert. Die obere und untere Grenzfrequenz (*cutoff frequency*) wird ausgehend von der jeweiligen Anregungsfrequenz ermittelt. In Kombination mit den eingegebenen Differenzen in den Feldern **ERREGER- MINUS UNTERE GRENZFREQUENZ** und **OBERE GRENZ- MINUS ERREGERFREQUENZ** sind nun die Grenzfrequenzen definiert.

Im untersten Bereich befindet sich die Schaltfläche **LADEN, BERECHNEN UND SPEICHERN** zum Start des eigentlichen Rechenlaufes. Darüber stehen dem Benutzer drei Auswahlfelder mit folgenden Rechenkonfigurationen zur Verfügung:

- **BEREITS VORHANDENE ZEITRAHMEN BEIBEHALTEN (NACHBERECHNUNG):**  
Wird diese Option angewählt, werden bereits festgelegte Zeitfenster für die Signalauswertung, auch im nächsten Rechenlauf verwendet. Dabei werden Eingaben in den Feldern **ZEITDAUER VOM SIGNALANFANG BIS AUSWERTUNGSSTART** und **ZEITDAUER VOM AUSWERTUNGSENDE BIS SIGNALLENDE** ignoriert und die gespeicherten Zeitbereiche nicht überschrieben. Diese Einstellung ermöglicht dem Benutzer, in einem zweiten Rechenlauf (Nachberechnung) einen Bandpassfilter zu verwenden ohne die vorher für jedes Signal einzeln definierten Start- und Endzeiten der Signalauswertung zu überschreiben.
- **BEREITS VORHANDENE FILTER BEIBEHALTEN (NACHBERECHNUNG):**  
Analog zu den Ausführungen im vorangehenden Punkt können hier bereits verwendete Filter für den nächsten Rechenlauf übernommen werden. Einstellungen im Feld **BANDPASSFILTER**

werden dabei ignoriert und gespeicherte Filterparameter nicht überschrieben. Dies ist für den Benutzer hilfreich, falls im Rahmen einer Nachberechnung generell ein Zeitbereich am Beginn und/oder Ende der Signale ausgeschlossen werden soll, ohne die vorher (für jedes Signal einzeln) festgelegten Grenzfrequenzen zu verändern.

- **AKTUELLEN DATEINAMEN ANZEIGEN (LADEN, BERECHNUNG):**

Mit der Anwahl dieser Option wird während dem Lade- und Auswertungsvorgang die jeweils aktuelle Messdatei im Command-Fenster von MATLAB ausgegeben. Falls aufgrund falsch konfigurierter Messdateien Fehler im Programmablauf auftreten, kann somit die entsprechende Datei in kürzestmöglicher Zeit festgestellt werden. Die bis dahin geladenen Messungen bleiben im Speicher des Programms erhalten und müssen im nächsten Rechenlauf nicht erneut importiert werden.

Ein Rechenlauf besteht im Wesentlichen aus zwei Vorgängen. Zunächst erfolgt der Import noch nicht geladener Messdateien und danach werden diese Messaufzeichnungen ausgewertet. Vor allem das Laden der Dateien kann hierbei mehrere Minuten in Anspruch nehmen. Um den Benutzer laufend über den Fortschritt des Rechenlaufs zu informieren, wird dieser für beide Prozeduren mittels Statusbalken angezeigt (siehe Abbildung 3.4).



**Abb. 3.4:** Fortschrittsanzeige (*waitbar*) für den Rechenlauf

### 3.4.3 Benutzeroberfläche `OrigFRFpanel` - AFG Original

Dieses Programmfenster beinhaltet die Grafikausgabe des originalen Amplitudenfrequenzganges. Die Bezeichnung ORIGINAL bezieht sich auf die Auswertung ohne Verwendung eines Signalfilters und ohne Einschränkung der Signallänge. Es dient als Referenz im Vergleich zur Berechnung des AFG mit gefilterten und/oder zeitlich reduzierten Signaldaten, dargestellt im Fenster `ProcFRFpanel`. Dies ermöglicht dem Benutzer, die Auswirkungen der gewählten Signalbearbeitung in übersichtlicher Form nachzuvollziehen.

Über die zentrale Steuerungsschnittstelle `ControlPanel` stehen dem Anwender umfangreiche Auswahlmöglichkeiten für die grafische Ausgabe zur Verfügung. Diese umfassen u.a. die Darstellung von einzelnen Signalauswertungen, Suprema/Infima der Amplituden, Spitzenwerten samt Beschriftungen und die Ausgabe mittels *Bandbreitenmethode* errechneter Dämpfungswerte im AFG. Sämtliche Optionen sind in Kapitel 3.4.5 näher erläutert.

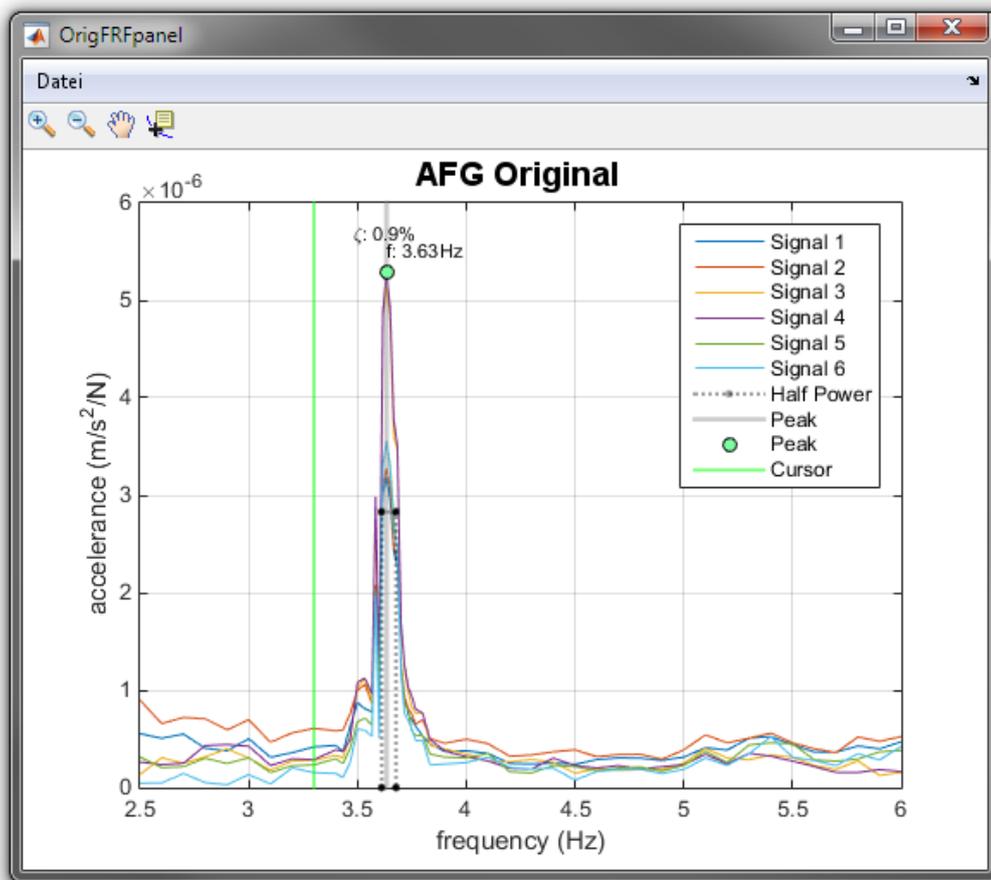


Abb. 3.5: Benutzeroberfläche OrigFRFpanel - AFG Original

Unterhalb der Menüleiste ist eine Toolbar mit Buttons zur genaueren Betrachtung eines Ausschnittes (Zoom, Pan) und zur Koordinatenanzeige einzelner Datenpunkt angeordnet. Das Menü DATEI beinhaltet drei Einträge für das Drucken bzw. Exportieren des AFG als Grafikdatei:

- **DRUCKVORSCHAU:** Über diesen Menüpunkt öffnet sich ein Dialogfenster, in dem das Layout für den Ausdruck über entsprechende Bedienelementen auf vier Registerkarten (Layout, Linien/Text, Farbe und Erweitert) konfiguriert wird. Die gewählten Druckeinstellungen können mittels Vorschau überprüft werden (MATLAB-Funktion: `printpreview`).
- **EXPORTIEREN ALS GRAFIKDATEI:** Diese Funktion ermöglicht das Speichern des aktuellen AFG als Bilddatei im \*.eps-, \*.jpg-, \*.png-, oder \*.pdf-Format. Die Grafik wird hier automatisch auf ein DIN A4 Blatt (Hochformat) positioniert. Der Aufruf für den Export erfolgt programmintern über den in Befehl `saveas`.
- **EXPORT-SPEZIAL ALS GRAFIKDATEI:** Diese Option ermöglicht den fehlerfreien Export als Vektorgrafik. Da die oben genannte MATLAB-Funktion `saveas` diesen Vorgang nicht in allen Fällen gewährleisten kann, wird hier eine erweiterte Funktionsbibliothek angewendet. Die Grafiken können wahlweise als Vektor- oder Rastergrafik mit automatischen Zuschnitt

auf die äußeren Begrenzungen im \*.eps-, \*.jpg-, \*.png-, oder \*.pdf-Format gespeichert werden. Für das Einfügen der Grafiken in Dokumente sind keine weiteren Bearbeitungsschritte erforderlich.

### 3.4.4 Benutzeroberfläche ProcFRFpanel - AFG Processed

Dieses Fenster beinhaltet die druckfertige Grafikausgabe des finalisierten Amplitudenfrequenzganges. Die Bezeichnung PROCESSED bezieht sich auf die Auswertung mit Anwendung eines Filters und/oder Auswahl eines bestimmten Zeitbereichs der Signale. Der Aufbau dieser Benutzeroberfläche entspricht weitestgehend dem in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Programmfenster. Deswegen wird auf diese Benutzerschnittstelle nicht näher eingegangen.

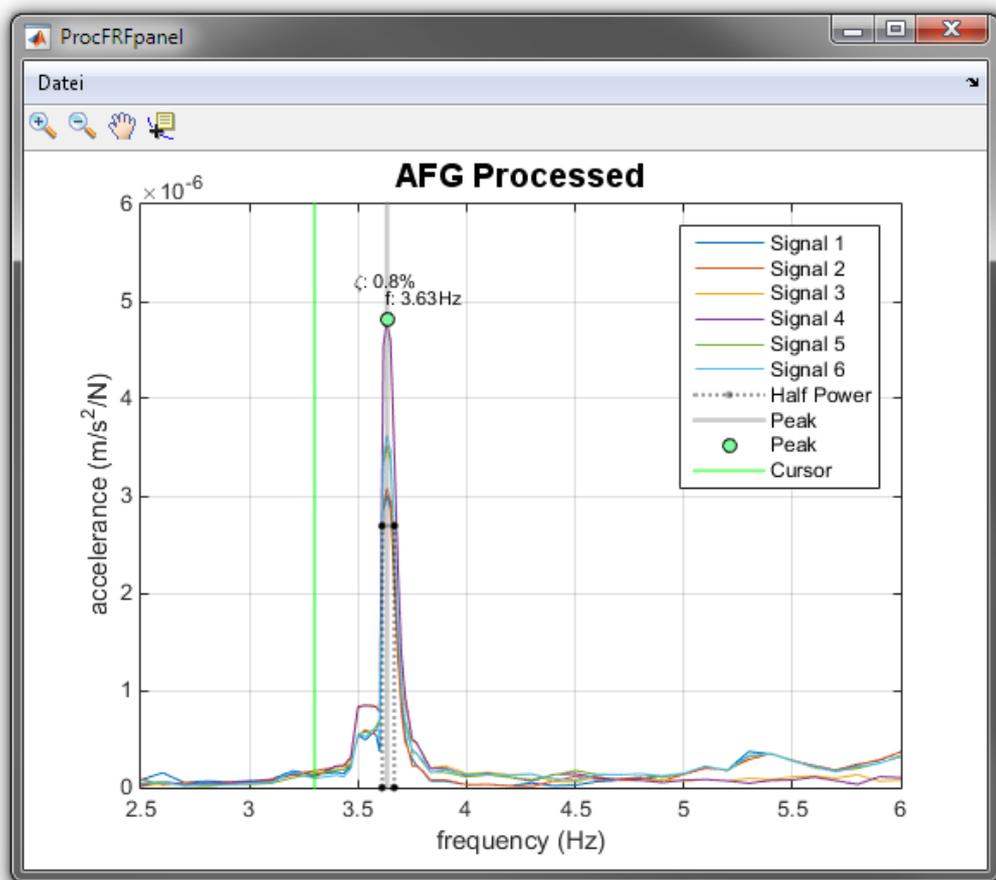


Abb. 3.6: Benutzeroberfläche ProcFRFpanel - AFG Processed

### 3.4.5 Benutzeroberfläche ControlPanel - Steuerung

Diese Benutzerschnittstelle dient als zentrale Steuerungseinheit zur Darstellung des Amplitudenfrequenzganges und zur Kontrolle einzelner Punkte des AFG durch die grafische Ausgabe der zugeordneten Messschriebe, Amplituden Spektren und Schwingungsformen in den jeweiligen Programmfenstern. Die im Folgenden beschriebenen Grafikausgaben beziehen sich stets auf

die Oberflächen `OrigFRFpanel` und `ProcFRFpanel`. Das Interface setzt sich aus sieben Bereichen zusammen. Im Feld AFG-SIGNALE befindet sich eine Auswahlliste mit den vorhandenen Messsignalen. Es können mehrere Einträge gleichzeitig ausgewählt werden, um die grafische Darstellung der entsprechenden Frequenzgänge zu ermöglichen. Darunter sind zwei Auswahlfelder zur Ausgabe von SUPREMA und INFIMA der Amplituden sämtlicher Signale.

Der Bereich AFG-GRAFIK dient zum Ein- und Ausblenden von Objekten in den Darstellungen der Amplitudenfrequenzgänge. Dazu stehen insgesamt 13 Auswahlfelder (*Check Boxes*) zur Verfügung. Die Nummerierung in der folgenden Aufzählung bezieht sich auf die Abbildung ... :

1. TITEL: Fügt den Titel der Grafik AFG ORIGINAL/AFG PROCESSED ein.
2. CURSOR: Diese Option markiert die Anregungsfrequenz bei der die aktuell ausgewählte Messung durchgeführt wurde. Der Cursor wird als vertikale grüne Linie im AFG dargestellt.
3. GRID: Zeigt die Gitternetzlinien entsprechend der Achsteilung.
4. BOX: Der Rahmen der Grafik wird eingeblendet.
5. MARKER: Durch die Anwahl werden die einzelnen Datenpunkte der Signale mit Symbolen markiert.
6. LEGENDE: Erzeugt eine Legende in der Grafikausgabe.
7. X: MIN - MAX: Ermöglicht die manuelle Skalierung der Abszissenachse. Bei der ersten Anwahl öffnet sich ein Dialogfenster zur Eingabe der Schranken (siehe Abbildung 3.8a). Dieses Fenster kann auch über das Menü BEARBEITEN aufgerufen werden.
8. Y: MIN - MAX: Analog zum vorstehenden Punkt wird hier die manuelle Skalierung der Ordinatenachse ermöglicht (siehe Abbildung 3.8b).
9. PEAK-TEXT: Einblenden der Beschriftung (Frequenz  $f$ ) ausgewählter Peaks.
10. PEAK-MARKER: Markierung ausgewählter Peaks mittels Symbole.
11. PEAK-LINIE: Markierung ausgewählter Peaks mittels vertikaler grauer Linien.
12. DÄMPFUNG: Ausgabe der aus den Halbwertbreiten ermittelten Dämpfungswerte.
13. BANDBREITE: Darstellung der Halbwertbreiten für die Dämpfungsermittlung.

Der Bereich MESSUNGEN beinhaltet eine Liste mit den verwendeten Messaufzeichnungen. Diese sind mittels zugehöriger Drehzahl der Richterregler und daraus abgeleiteter Anregungsfrequenz in aufsteigender Reihenfolge gelistet. Durch Anwahl eines Eintrags wird einerseits die Anregungsfrequenz über einen Cursor im AFG dargestellt und andererseits erfolgt die grafische Ausgabe der Signaldaten und deren Amplitudenspektrum sowie die Animation der Schwingungsform in den entsprechenden Benutzeroberflächen (`SignalPanel`, `AmpSpecPanel` und `ModePanel`). Diese

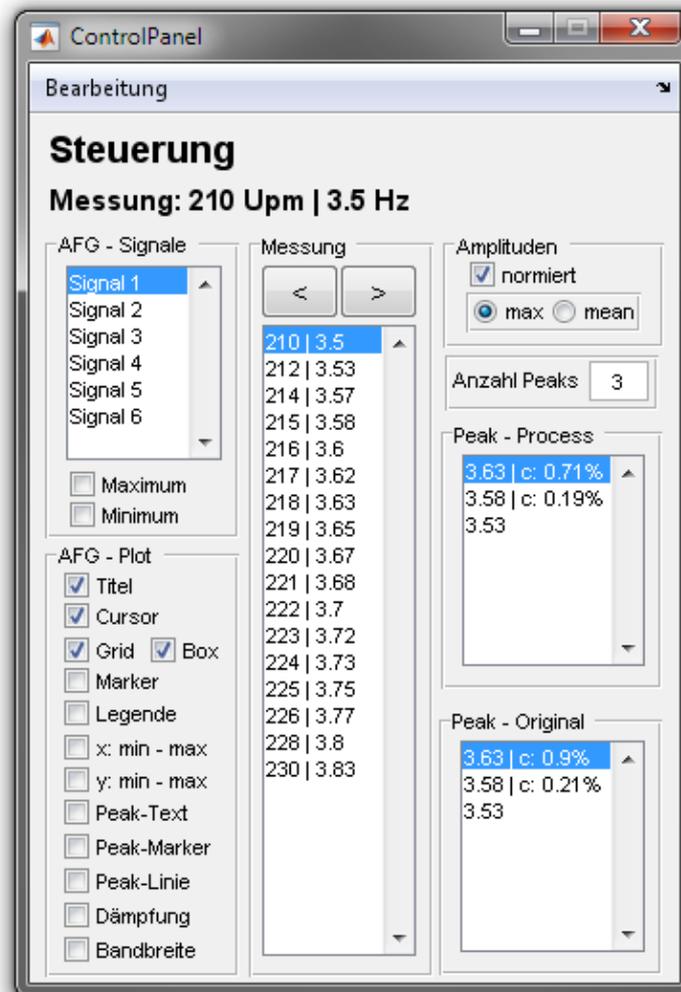


Abb. 3.7: Benutzeroberfläche ControlPanel - Steuerung

Aufbereitung der Datengrundlage ermöglicht dem Benutzer eine rasche und einfache Kontrolle der ermittelten Amplituden (Datenpunkte) des Frequenzganges.

Rechts oben können verschiedene Methoden zur Ermittlung der AMPLITU DEN ausgewählt werden. Üblicherweise sind gemessene Übertragungsfunktionen in *normierter* Form dargestellt. Dabei erfolgt die Division der einzelnen Amplitudenwerte durch die zugehörige Kraftamplitude der harmonischen Anregung. Die Abwahl der Option NORMIERT ermöglicht dem Benutzer, die Frequenzgänge ohne den letztgenannten Rechenschritt darzustellen. Über die Auswahlfelder MAX und MEAN kann zwischen den beiden in Kapitel ?? beschriebenen Auswertemethoden unter Verwendung eines Maximalwertes oder Mittelwertes (über eine bestimmte Periodenanzahl) gewählt werden.

Unterhalb befindet sich das Eingabefeld für die maximale Anzahl der zu berechnenden Höchstwerte (*Peaks*). Damit kann die Zahl der Einträge in den darunter angeordneten Auswahllisten PEAKS-ORIGINAL und PEAKS-PROCESSED vorgegeben werden. Diese sind mittels zugeordneter Frequenz und falls möglich, mit dem aus der Halbwertbreite bestimmten Dämpfungswert, gelistet.

Durch Anwahl der Einträge erfolgt die Markierung der Spitzenwerte im zugeordneten AFG. Voraussetzung dafür ist die Anwahl einer der Optionen PEAK-TEXT, PEAK-MARKER oder PEAK-LINIE im Feld AFG-GRAFIK. Zusätzlich kann über die Auswahlfelder DÄMPFUNG und BANDBREITE der Dämpfungswert samt zugehöriger Halbwertbreite dargestellt werden. Über das Menü BEARBEITUNG lässt sich die Skalierung der Achsen manuell einstellen. Dafür stehen zwei Menüpunkte SKALIERUNG X-ACHSE und SKALIERUNG Y-ACHSE zur Verfügung. In beiden Fällen öffnet sich ein Dialogfenster zur Eingabe der Schranken, jeweils für die den AFG ORIGINAL und AFG PROCESSED gesondert.

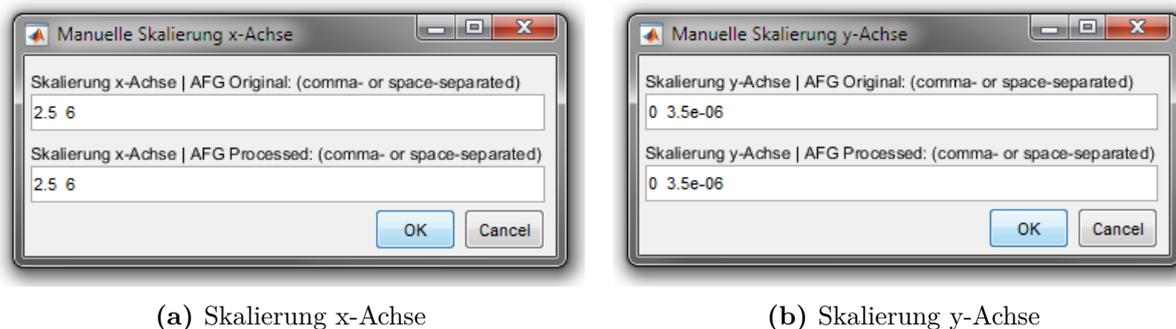


Abb. 3.8: Menü Bearbeitung

### 3.4.6 Benutzeroberfläche ModePanel - Schwingungsform

Dieses Interface ermöglicht eine schematische Animation der Schwingungsantwort des Tragwerkes infolge erzwungener Anregung mittels Richterreger anhand der gewählten Sensorpositionen. Dabei wird aus den zeitdiskreten Signaldaten der aktuell ausgewählten Messung für jeden Abtastzeitpunkt (*Sample*) ein Einzelbild rekonstruiert. Durch die Wiedergabe dieser Bildsequenz wird die Bewegung des Tragwerks animiert. Links unten befindet sich die Schaltfläche zum START bzw. zwischenzeitlichen Anhalten der Animation. Rechts unten sind drei Schieberegler (*Sliders*) angeordnet. Der obere Slider erfüllt zwei Funktionen. Erstens wird die aktuelle Laufzeit der Animation über die Position des Schiebers dargestellt und zusätzlich in Sekunden rechts neben dem Slider angezeigt. Zweitens kann durch Betätigen des Schiebers die Wiedergabe von einer beliebigen Stelle des Zeitsignals fortgesetzt werden. Über den mittleren Slider können Pausen zwischen der Wiedergabe von Einzelbildern eingefügt werden, um die Geschwindigkeit der Animation zu reduzieren. Im Gegensatz dazu, dient der untere Schieberegler zur Erhöhung der Geschwindigkeit. Die hier gewählte Schrittweite  $x$  hat zur Folge, dass nur mehr jedes  $x$ -te Einzelbild wiedergegeben wird.

Das Menü Datei beinhaltet drei Befehle zum Drucken der Schwingungsform und für das Exportieren als Grafikdatei. Diese Kommandos wurden im Kapitel 3.4.3 erläutert. Im Bereich GRAFIK befinden sich fünf Auswahlfelder zur Steuerung der grafischen Ausgabe:

**Gefiltertes Signal** ermöglicht die Animation der Schwingungsform auf Basis der gefilterten Zeitsignaldaten (bei Anwendung eines Bandpassfilters).

**Verschiebungsvektoren** legt fest, ob die Verschiebungen der Sensorpositionen jeweils durch vertikale Linie animiert werden.

**Referenzlage** bestimmt, ob neben der Schwingungsform auch die Ausgangslage der Sensorpositionen dargestellt werden.

**Transparenz** wird nur benötigt, falls vom Benutzer das Ausfüllen der animierten Fläche gewünscht wird (Colormap) und dabei die Kanten der Referenzlage zu jedem Zeitpunkt sichtbar bleiben sollen. Der *Transparenzgrad* (zwischen 0 und 1) wird über das (bei Anwahl aktivierte) Eingabefeld definiert.

**Colormap** ermöglicht das Ausfüllen der animierten Fläche mittels Farbtabellen. Bei Auswahl dieser Option wird rechts ein Dropdownmenü eingeblendet. Darin stehen 13 vordefinierte Farbtabellen zur Auswahl.

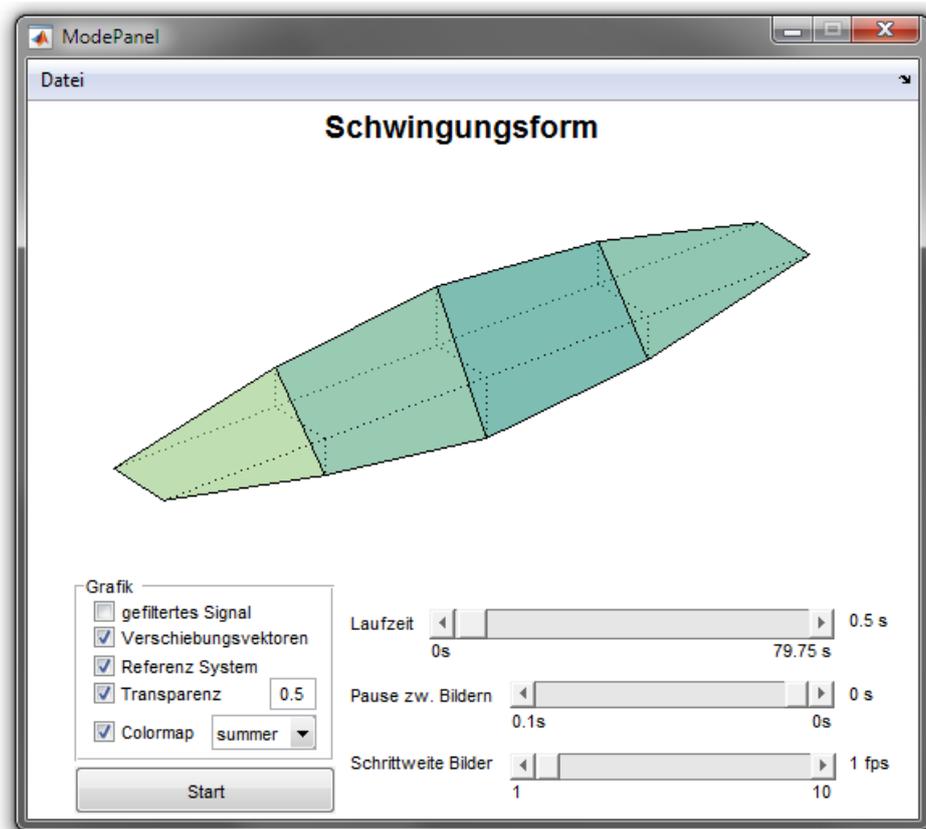


Abb. 3.9: Benutzeroberfläche ModePanel - Schwingungsform

### 3.4.7 Benutzeroberfläche SignalPanel - Signale

Die Bedienoberfläche `SignalPanel` dient zur Darstellung der aufgezeichneten Signaldaten. Es ermöglicht dem Benutzer zunächst die Kontrolle der Amplituden, welche aus den Signaldaten im

Zuge eines ersten Rechenlaufes ermittelt wurden. Danach kann die Optimierung der Signalauswertung über das Einschränken des verwendeten Zeitbereichs und durch die Anwendung eines Bandpassfilters erfolgen. Die Oberfläche ist dafür in sieben Bereiche gegliedert.

Im Bereich AUSGABE befindet sich eine Liste zur Auswahl der vorhandenen Messsignale. Es können bis zu acht Einträge gleichzeitig ausgewählt werden, um die zugehörigen Messschriebe im Bereich SIGNALE übereinander darzustellen. Die Signaldaten beziehen sich jeweils auf die aktuelle Messdatei, welche im Programmfenster CONTROL PANEL ausgewählt werden kann (siehe Kapitel 3.4.5). Falls der Anwender bestimmte Zeitbereiche am Signalanfang oder Signalende aufgrund instationärer Schwingungsvorgänge oder kurzzeitlichen Störungen in der Messaufzeichnung von der Amplitudenermittlung ausschließen möchte, so kann dieser Ausschluss über die Definition von Start- und Endzeit für die verwendeten Zeitsignaldaten erfolgen. Die Zeitpunkte können im Bereich ZEITFENSTER FÜR AUSWERTUNG festgelegt werden. In diesem Bereich steht jeweils ein Feld für die Eingabe von Start- bzw. Endzeit zur Verfügung. Durch die Eingaben werden nur jene Zeitsignaldaten zur Amplitudenermittlung herangezogen, die sich im gewählten Zeitfenster befinden. Rechts neben den beiden Eingabefeldern wird die Gesamtdauer der Messung und die Länge des gewählten Zeitfensters (in Sekunden) ausgegeben.

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung der Amplitudenermittlung stellt die Verwendung eines Bandpassfilters dar. Diese Option kann im Bereich BANDPASSFILTER durch Betätigen der Schaltfläche FILTER VERWENDEN ausgewählt werden. Über die Definition der oberen und unteren Grenzfrequenz in den entsprechenden Eingabefeldern kann der Benutzer das Frequenzband bestimmen, in dem der Filter die Signalanteile weitgehend unverändert lässt. Die außerhalb dieser Bandbreite liegenden Signalanteile werden gedämpft. Dadurch können die gewünschten Frequenzanteile aus den Signaldaten gefiltert werden. Die restlichen Eingangsparameter des Filters sind im Programm vordefiniert. Analog zu den Ausführungen in Kapitel 3.4.2 wird ein Filter vom Typ *Butterworth* mit Filterordnung  $n = 10$  verwendet.

Links unten befindet sich eine Liste mit den ausgewerteten Amplituden. Die Ergebnisse sind (zeilenweise) getrennt für die ausgewählten Signale angeführt. Es werden hier jeweils zwei Werte ausgegeben. Der erste Amplitudenwert bezieht sich auf die Auswertung der originalen Signaldaten und ist Bestandteil des AFG ORIGINAL. Die zweite Amplitude wird aus jenen Signaldaten ermittelt, die durch zeitliche Einschränkung und/oder Frequenzbasierter Filterung der originalen Signaldaten hervorgegangen sind. Dieser Wert liegt als Datenpunkt dem AFG PROCESSED zu Grunde. Darüber hinaus wird der Unterschied zwischen den beiden Amplituden jeweils in Prozent angegeben. Somit kann der Benutzer die Auswirkungen der durchgeführten Signalbearbeitung in übersichtlicher Form nachvollziehen. Die Auswertemethode der Amplituden wird über das Auswahlfeld direkt oberhalb der Liste festgelegt. In diesem Feld kann zwischen den beiden in Kapitel ?? beschriebenen Auswertemethoden, unter Verwendung eines Maximalwertes oder Mittelwertes (über eine bestimmte Periodenanzahl), gewählt werden.

Die Stellen der ermittelten Amplituden im zugehörigen Zeitsignal werden für beide Methoden durch vertikale Linien in den Signaldiagrammen gekennzeichnet. Zusätzlich wird der ausgewählte Zeitbereich für die optimierte Auswertung des AFG PROCESSED als Rechteck dargestellt (siehe Abbildung 3.10). Optional kann im Feld GRAFIK die Darstellung des originalen Zeitsignals und

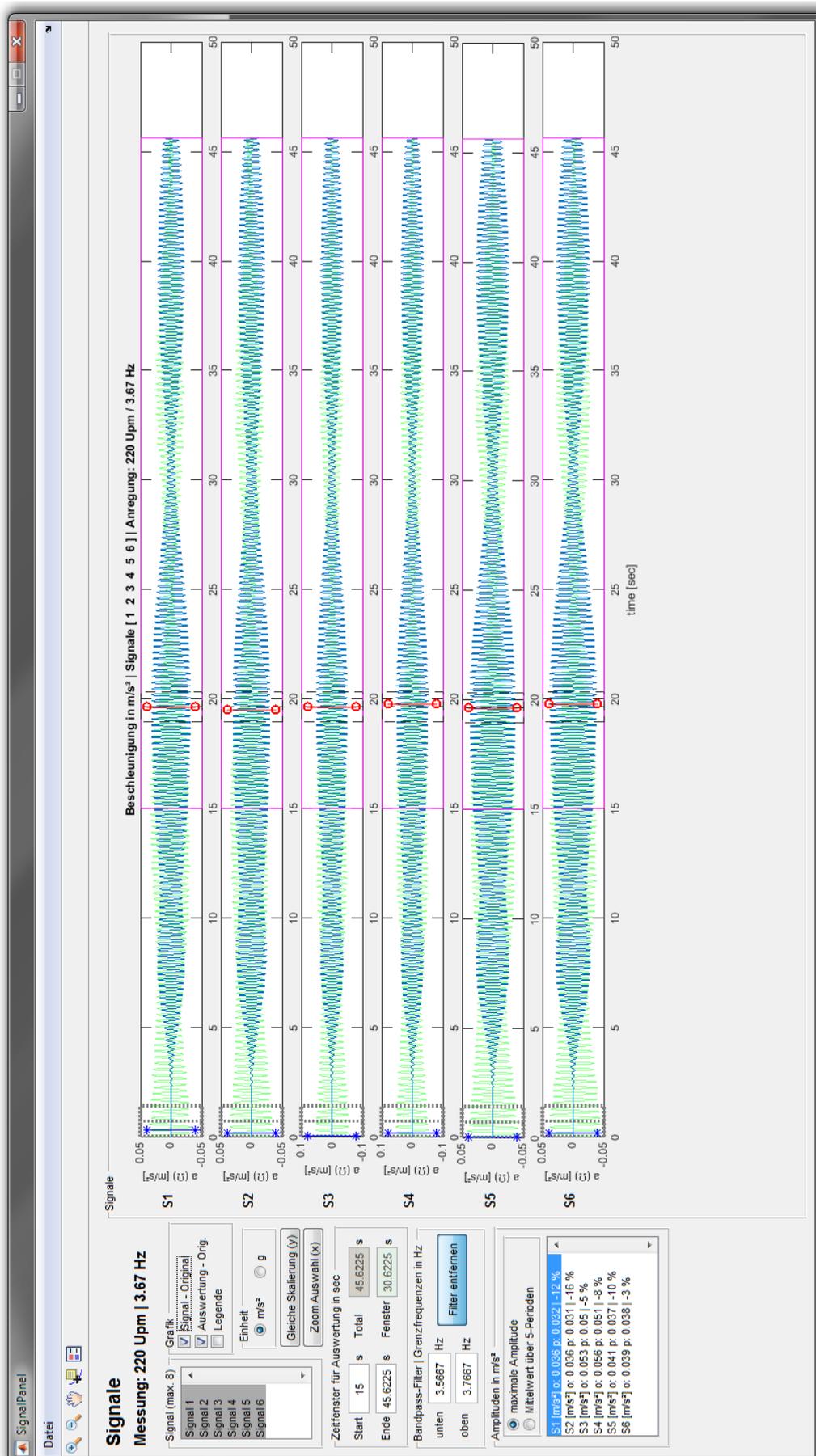


Abb. 3.10: Benutzeroberfläche SignalPanel - Signale

der daraus ermittelten Amplituden ein- bzw. ausgeblendet werden. Darunter befindet sich ein Feld zur Auswahl der Einheit ( $m/s^2$  oder  $g$ ), welche für die Darstellung der Signaldaten verwendet wird. Für die Skalierung der Diagrammachsen stehen zwei Schaltflächen zur Verfügung. Durch Betätigen des Schalters GLEICHE SKALIERUNG (Y), können sämtliche Signaldiagramme mit gleicher Skalierung der y-Achse angezeigt werden. Über die Schaltfläche ZOOM AUSWAHL wird der Wertebereich der x-Achse auf den ausgewählten Zeitbereich für die Amplitudenauswertung beschränkt.

Unterhalb der Menüleiste ist eine Toolbar angeordnet, deren Symbole zur genaueren Betrachtung eines Ausschnittes (Zoom, Pan) und zur Koordinatenanzeige einzelner Datenpunkte dienen. Das Menü Datei umfasst drei Einträge zum Drucken der angezeigten Signaldaten und für das Exportieren als Grafikdatei. Diese Befehle werden in Kapitel 3.4.3 näher erläutert.

### 3.4.8 Benutzeroberfläche AmpSpecPanel - Amplitudenspektrum

In diesem Interface erfolgt die Darstellung der Messsignale im Frequenzbereich (Frequenzspektrum) durch die Anwendung einer Diskreten Fouriertransformation (DFT). Es ermöglicht dem Benutzer, die Zusammensetzung der Signale aus den einzelnen Frequenzanteilen nachzuvollziehen. Durch die Frequenzbasierte Analyse kann festgestellt werden, ob die dominante Frequenz der Schwingungsantwort mit der Anregungsfrequenz des Tragwerkes (abgeleitet aus der Drehzahl der Richterregger) übereinstimmt. Zusätzlich dient die Spektraldarstellung als Entscheidungsgrundlage für die Anwendung eines Frequenzfilters zur Signalaufbereitung (siehe Kapitel 3.4.7).

Der Aufbau des Fensters entspricht im Wesentlichen dem GUI SIGNALPANEL. Links oben befindet sich eine Liste zur Auswahl der vorhandenen Signaldaten. Es können bis zu acht Einträge gleichzeitig angewählt werden, um die zugehörigen Amplitudenspektren im rechten Bereich DFT übereinander grafisch darzustellen. Die Signaldaten beziehen sich jeweils auf eine bestimmte Messdatei, welche über die Oberfläche CONTROLPANEL ausgewählt wird (siehe Kapitel 3.4.5). Über die Anzeige der Anregungsdrehzahl (Upm) während der Messung und daraus abgeleiteter Anregungsfrequenz (Hz) unterhalb des Titels SPEKTRALE AMPLITUDEN wird auf die aktuell ausgewählte Messdatei hingewiesen. Unterhalb der Signalliste ist ein Feld zur Auswahl der Einheit ( $m/s^2$  oder  $g$ ), welche für die Darstellung der Signaldaten verwendet wird. Für eine übersichtliche Grafikausgabe der Amplitudenspektren kann der angezeigte Frequenzbereich durch Eingabe der oberen und unteren Grenzfrequenz eingeschränkt werden. Das Betätigen dieser Schaltfläche GLEICHE SKALIERUNG (Y) ermöglicht es, sämtliche Amplitudenspektren mit einem jeweils identischen Wertebereich der y-Achse darzustellen.

Zur Kennzeichnung dominanter Signalanteile können die Spitzenwerte (*Peaks*) der Spektralverteilungen ermittelt und ausgegeben werden. Für die Bestimmung der Spitzenwerte kann im Feld ERMITTLUNG PEAKS die maximale Anzahl der Peaks und deren minimaler Abstand festgelegt werden. Darunter erfolgt die Ausgabe der ermittelten Spitzenwerte in einer Liste, sortiert nach zugehörigen Signalen und in absteigender Reihenfolge (vom größten bis zum kleinsten Wert). Durch Anwahl eines bestimmten Spitzenwertes in der Liste wird dieser in der Grafikausgabe mit einem Kreis in der Farbe Magenta markiert. Im Bereich GRAFIK stehen dem Anwender mehrere

Optionen für die Kennzeichnung bzw. Beschriftung der ermittelten Spitzenwerten, sowie für die Darstellung zusätzlicher Informationen zur Verfügung:

**DFT Signal gefiltert** legt fest, ob ergänzend zum Amplitudenspektrum des originalen Signals, die Spektralverteilung der gefilterten Signaldaten angezeigt wird. Die Ermittlung und Kennzeichnung von Peaks bezieht sich jedoch immer auf die originalen Daten.

**Erregerfrequenz** ermöglicht die Darstellung der Anregungsfrequenz des Tragwerks, sowie ganzzahlige Vielfache dieser Frequenz, als vertikale, punktierte Linien im Spektrum.

**Max. Amplitude** erlaubt den Höchstwert im jeweiligen Amplitudenspektrum mittels einer vertikalen strich-punktierten Linie zu kennzeichnen.

**Peak - Auswahl** bestimmt, ob der aktuelle ausgewählte Spitzenwert in der Liste PEAKS - AMPLITUDEN SPEKTRUM mittels Kreissymbol markiert wird.

**Peak - Marker** legt fest, ob die ermittelten Spitzenwerte durch (rote) Kreissymbole im Spektrum markiert werden.

**Peak - Nr.** ermöglicht die Anzeige der Nummerierung der Spitzenwerte in absteigender Reihenfolge (vom größten bis zum kleinsten Wert).

**Peak - Frequenz** legt fest, ob die zum jeweiligen Spitzenwert zugehörige Frequenz in der Grafikausgabe als Beschriftung ausgegeben wird.

**Peak - Amplitude** legt fest, ob die Amplitude des jeweiligen Spitzenwertes in der Grafikausgabe als Beschriftung ausgegeben wird.

**Legende** erzeugt eine Legende in der Grafikausgabe.

Unterhalb der Menüleiste ist eine Toolbar angeordnet, deren Symbolen zur genaueren Betrachtung eines Ausschnittes (Zoom, Pan) und zur Koordinatenanzeige einzelner Spektralpunkte dienen. Das Menü Datei umfasst drei Befehle zum Drucken der angezeigten Signaldaten und für das Exportieren als Grafikdatei. Diese Punkte werden in Kapitel 3.5 näher erläutert.

### 3.4.9 Benutzeroberfläche PeakPanel - Peak Auswertung

Diese Benutzeroberfläche dient zur Untersuchung bzw. Auswertung einzelner Resonanzspitzen der Amplitudenfrequenzgänge. Grundsätzlich erfolgt hier die Bestimmung des Dämpfungsmaßes durch die Anwendung der Bandbreitenmethode. Die Dämpfungs-ermittlung kann jedoch nur durchgeführt werden, falls die Bestimmung der Hilfsfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  durch die Ausprägung der Resonanzspitze gewährleistet wird (siehe Kapitel ... ab Seite ...). Sofern diese Anforderung eingehalten wird, erfolgt die Berechnung für die Resonanzkurven der einzelnen Signale jeweils getrennt. Darüber hinaus dient diese Schnittstelle als zentrale Steuerungseinheit für die grafische Darstellung der Resonanzspitzen im Fenster PeakFRFpanel.

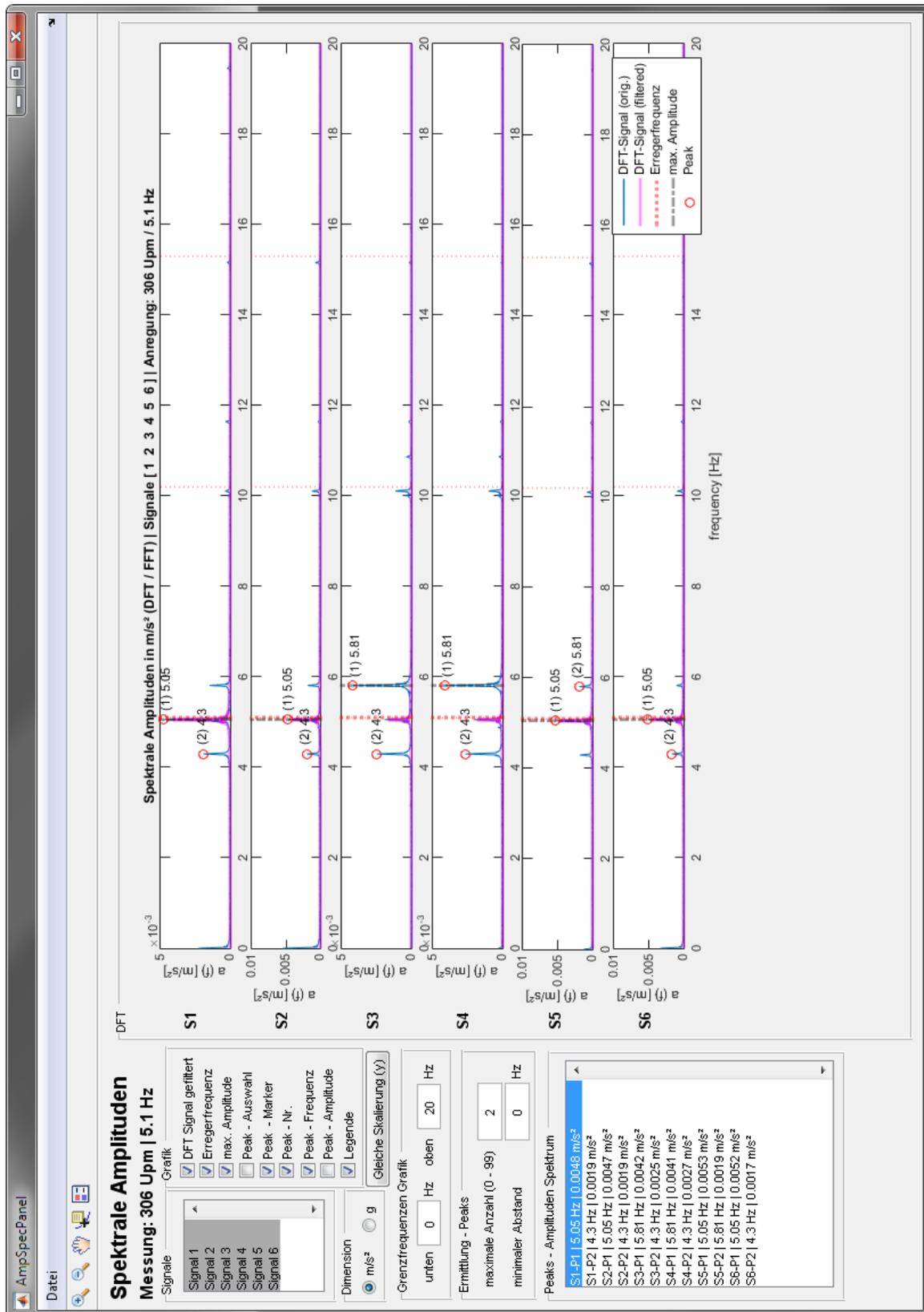


Abb. 3.11: Benutzeroberfläche AmpSpecPanel - Spektrale Amplituden

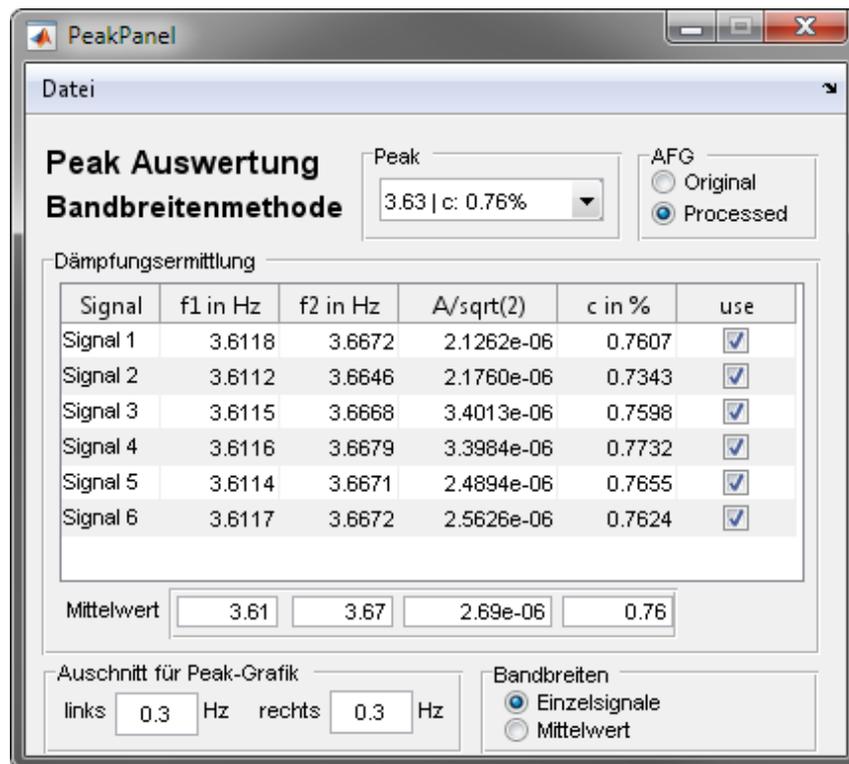


Abb. 3.12: Benutzeroberfläche PeakPanel - Peak Auswertung

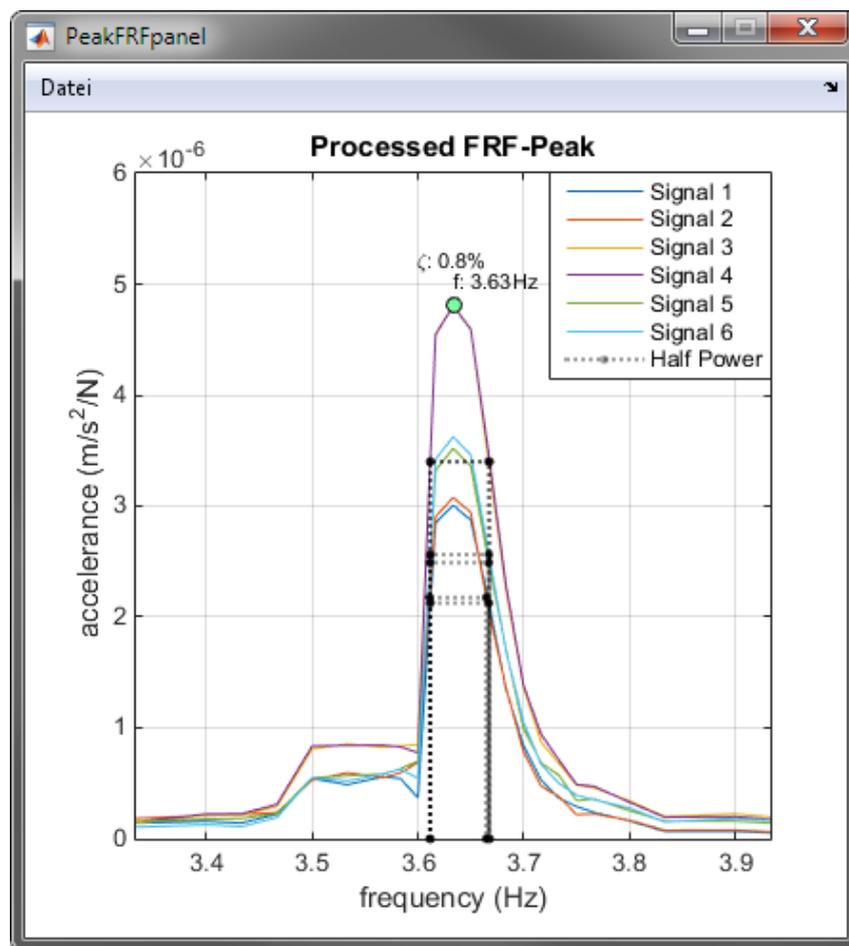
Das Programmfenster ist in fünf Bereiche unterteilt. Zunächst wird im Feld AFG entweder der Frequenzgang AFG ORIGINAL oder AFG PROCESSED ausgewählt. Danach stehen die zugeordneten Spitzenwerte im Feld PEAKS über ein Dropdownmenü zur Auswahl bereit. Die Anzahl der Einträge in diesem Menü wird über die Benutzeroberfläche `ControlPanel` festgelegt (siehe Kapitel 3.4.5). Sobald der Anwender einen Spitzenwert im Menü auswählt, erfolgt unterhalb die Darstellung der Dämpfungs-berechnung in tabellarischer Form. Dabei werden die Hilfsfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$ , die Amplitudenhöhe des Spitzenwertes dividiert durch  $\sqrt{2}$  (Halbwert) und die resultierenden Dämpfungswerte für sämtliche gemessene Signale ausgegeben. In der letzten Spalte mit der Überschrift USE sind jeweils Auswahlfelder angeordnet. Durch An- bzw. Abwahl kann der Benutzer festlegen, welche Signale für eine Mittelwertbildung verwendet werden. Aus den hier angewählten Signalen wird ein arithmetischer Mittelwert für die Eingangsgrößen und Ergebnisse des Bandbreiten-Ansatzes gebildet. Diese Mittelwerte werden direkt unterhalb der Tabelle ausgegeben und dienen zur Kennzeichnung bzw. Beschriftung von Resonanzspitzen der Amplitudenfrequenzgänge.

Darüber hinaus wird im Fenster `PeakFRFpanel` die zugehörige Resonanzspitze dargestellt (Grafikausgabe). Der Ausschnitt des AFG, welcher zur Darstellung der Resonanzspitze verwendet wird, kann im Fenster `PeakPanel` links unten über die Eingabe des Wertebereichs links und rechts vom Spitzenwert festgelegt werden. Unten rechts befindet sich ein Auswahlfeld, wodurch in der Grafikausgabe (`PeakFRFpanel`) entweder die Halbwertsbreite für sämtliche Signale separat oder als gemittelte Halbwertsbreite dargestellt wird. Über den Menüpunkt DATEI > EXPORTIEREN

kann der Benutzer die aktuelle Dämpfungsbestimmung zu jedem beliebigen Zeitpunkt als MS Excel Tabelle exportieren.

### 3.4.10 Benutzeroberfläche PeakFRFpanel - AFG Processed Peak

Diese Benutzeroberfläche enthält die Grafikausgabe der Resonanzspitze, welche im Fenster PeakPanel ausgewählt wurde (siehe Kapitel 3.4.9). Es dient dazu, Teilbereiche des Amplitudenfrequenzganges genauer zu untersuchen, indem nur ein bestimmter Ausschnitt des AFG (vergrößert) dargestellt wird. Somit kann der Benutzer die Resonanzspitzen sämtlicher Signale mit den zugehörigen Halbwertsbreiten zur Dämpfungsbestimmung detailliert betrachten.



**Abb. 3.13:** Benutzeroberfläche PeakFRFpanel - AFG Processed Peak

Der Aufbau ist nahezu identisch dem Interface OrigFRFpanel bzw. ProcFRFpanel. Über die Schnittstellen ControlPanel und PeakPanel werden sämtliche grafischen Parameter und Objekte gesteuert. Die Grafikeinstellungen für die GUIs OrigFRFpanel und ProcFRFpanel sind zu gleich die Grafikeinstellungen für das GUI PeakFRFpanel. Details zur Steuerung der Grafikausgaben sind in den Kapiteln 3.4.5 und Kapitel 3.4.9 beschrieben. Das Menü Datei umfasst drei Einträge zum Drucken der Resonanzspitzen und für das Exportieren als Grafikdatei. Diese Befehle werden in Kapitel 3.4.3 näher erläutert.

### 3.4.11 Benutzeroberfläche ExportPanel - Ausgabe

Dieses Programmfenster dient zum Exportieren der ausgewerteten Amplitudenfrequenzgänge als MS Excel Datei und zur Grafikausgabe der zu Grunde liegenden Signaldaten als PDF-Datei. Die Oberfläche ist dazu in vier Bereiche gegliedert (siehe Abbildung 3.14). Im obersten Bereich PDF-AUSGABE sind zwei Auswahlfelder angeordnet, die zur Ausgabe der Signaldarstellungen im Zeitbereich und im Frequenzbereich als \*.pdf-Datei dienen. Darunter befindet sich ein Feld zur Eingabe der maximalen Anzahl (1 - 6) von Signalen, die auf einer DIN A4 Seite übereinander dargestellt werden. Zusätzlich befindet sich unterhalb ein Feld zur Auswahl der Einheit ( $m/s^2$  oder  $g$ ), welches zur Darstellung der Beschleunigungssignale verwendet wird.

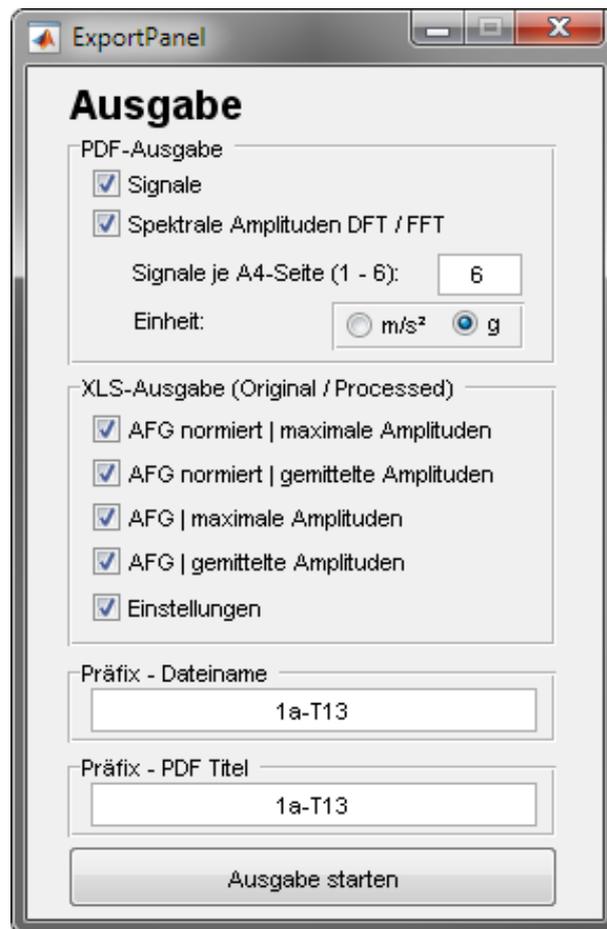


Abb. 3.14: Benutzeroberfläche ExportPanel - Ausgabe

Das Feld XLS-AUSGABE (ORIGINAL/PROCESSED) enthält fünf Auswahlfelder zum Exportieren ausgewerteter Amplitudenfrequenzgänge und zugehöriger Rechenparameter als MS Excel Datei. Dabei können Frequenzgänge mit bzw. ohne Normierung der Amplituden ausgegeben werden, wobei jeweils zwei Frequenzgänge mit unterschiedlichen Auswertemethoden zur Verfügung stehen. Bei diesen Methoden erfolgt die Amplitudenermittlung aus den Signaldaten einerseits unter Verwendung der maximalen Amplitude, andererseits auf Basis einer Mittelung der Amplituden über eine bestimmte Periodenanzahl. Je Auswahlfeld werden zwei AFG im

\*.xls-Format gespeichert. Zum Einen erfolgt hier die Ausgabe des Frequenzganges, ermittelt aus den originalen Signaldaten (AFG ORIGINAL), zum Anderen der Export des AFG, welcher unter Einschränkung der Signallänge und/oder Verwendung eines Signalfilters erstellt wird (AFG PROCESSED). Das letzte Auswahlfeld EINGANGSWERTE FÜR AUSWERTUNG dient zum Export der folgenden Einstellung und Eigenschaften für die Signalverarbeitung. Der Benutzer hat somit die Möglichkeit, seine gewählten Parameter extern zu dokumentieren, um die Auswertung der einzelnen Messungen zu einem späteren Zeitpunkt nachzuvollziehen:

- Erregerfrequenz in Hz
- Drehzahl der Richterregler in U/min
- Zeitdauer vom Signalanfang bis Auswertungsstart
- Zeitdauer vom Auswertungsende bis Signalende
- Gesamtdauer des originalen Zeitsignals
- Verwendung eines Signalfilter (0 = "ohne Filter", 1 = "mit Filter")
- untere Grenzfrequenz des Bandpassfilters
- obere Grenzfrequenz des Bandpassfilters

Darunter befinden sich zwei Textfelder zur Eingabe der Präfixe für den Dateinamen, sowie für den Titel der Signal-Grafikausgaben. Das eigentliche Exportieren der Dateien wird über die Schaltfläche AUSGABE STARTEN am Ende des Fensters gestartet. Nach Betätigung des Buttons öffnet sich ein Dialogfenster zur Auswahl des Zielverzeichnisses. Nach gültiger Beendigung der Dialogbox, mit dem Befehl ORDNER ÖFFNEN, erfolgt das Exportieren der Daten in das gewählte Verzeichnis. Dabei werden die Dateinamen automatisch generiert. Der Name setzt sich jeweils aus dem Präfix, einer Bezeichnung der exportierten Daten, sowie dem Frequenzbereich der Auswertung zusammen (Präfix\_Bezeichnung\_f<sub>min</sub>-f<sub>max</sub>Hz.Dateiendung). Tabelle 3.1 enthält die Zuordnung der Bezeichnungen im Dateinamen zu den entsprechenden Auswahlfeldern.

Auswahlfeld	Bezeichnung im Dateinamen
Signale	<i>Signale</i>
Spektrale Amplituden	<i>DFT</i>
AFG normiert - maximale Amplituden	<i>normFRFmaxAmpOrig</i> bzw. <i>normFRFmaxAmpProc</i>
AFG normiert - gemittelte Amplituden	<i>normFRFmeanAmpOrig</i> bzw. <i>normFRFmeanAmpProc</i>
AFG - maximale Amplituden	<i>FRFmaxAmpOrig, FRFmaxAmpProc</i>
AFG - gemittelte Amplituden	<i>FRFmeanAmpOrig, FRFmeanAmpProc</i>
Eingangswerte für Auswertung	<i>StateFRFprocTool</i>

**Tab. 3.1:** Zuordnung der Bezeichnungen im Dateinamen

Die Ausgabe der Signaldaten im PDF-Format erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird für jede verwendete Messdatei ein eigenes PDF-Dokument gespeichert, welches die Grafikausgaben der einzelnen Signale beinhaltet. Danach erfolgt das Zusammenführen dieser Dateien zu einem einzigen PDF-Dokument. Der Fortschritt beider Vorgänge wird jeweils über einen Statusbalken angezeigt (siehe Abb. 3.15). Der zweite Schritt setzt voraus, dass auf dem Rechner des Benutzers das Softwarepaket *Ghostscript* installiert ist. Darüber hinaus darf für ein fehlerfreies Zusammenfügen der vollständige Pfadname (bestehend aus Verzeichnis- und Dateinamen) die Länge von 128 Zeichen nicht überschreiten. Wird diese Länge überschritten, so erhält der Benutzer eine Warnmeldung. Diese weist ihn darauf hin, dass für den fehlerfreien Programmablauf ein anderes Verzeichnis gewählt werden muss.



**Abb. 3.15:** Fortschrittsanzeigen für den PDF-Export

# Kapitel 4

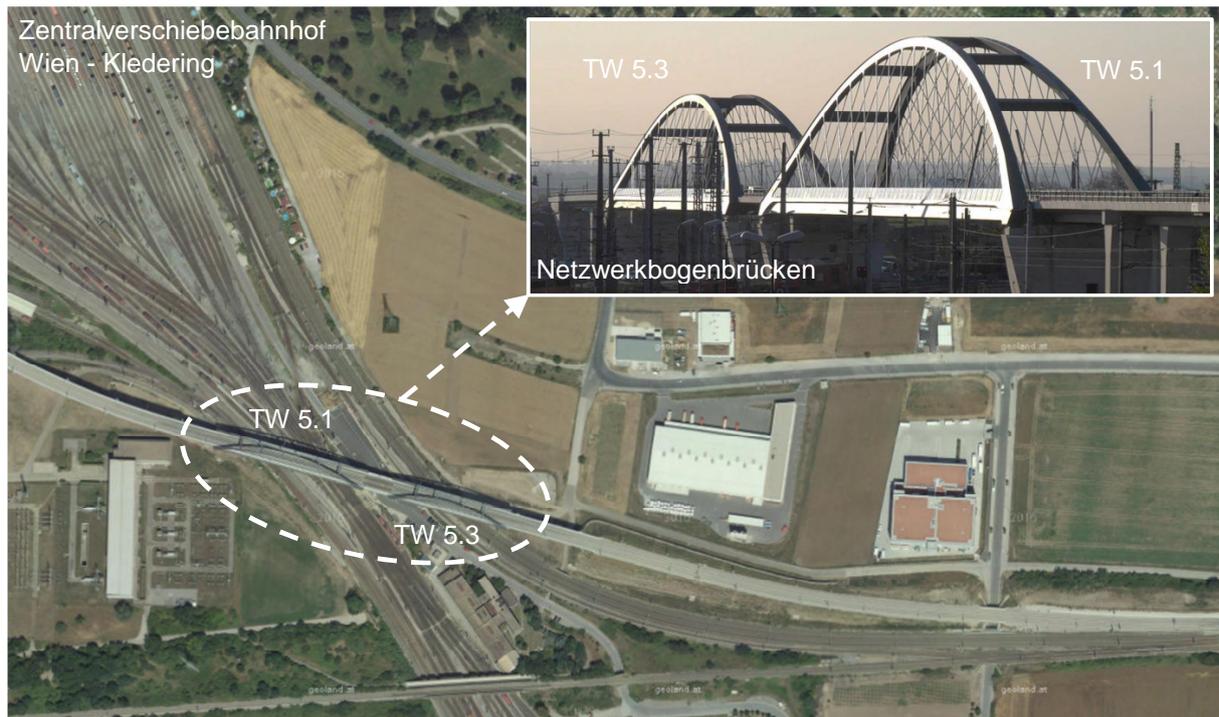
## Versuchsreihe zur Ermittlung dynamischer Parameter

Dieses Kapitel befasst sich mit der experimentellen Bestimmung von dynamischen Parametern und speziell mit der Ermittlung von Dämpfungswerten anhand zweier Eisenbahnbrücken unter Verwendung der Software FRF PROCESSING TOOL. Sämtliche Schwingungsmessungen wurden mithilfe der Anregung durch Richterreger realisiert. Nachfolgend werden das verwendete Messsystem und die Durchführung der Schwingungsmessungen näher erläutert. Neben der Auswertung von Resonanzkurven werden zusätzlich die Ergebnisse von Ausschwingversuchen dargestellt.

### 4.1 Beschreibung der untersuchten Brückenobjekte

Bei den untersuchten Objekten handelt es sich um zwei stählerne Netzwerkbogenbrücken der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) entlang der neuerrichteten Verbindung Ostbahn - Flughafenschnellbahn. Die beiden Eisenbahnbrücken sind Teil einer ca. 585 m langen Brückenkette und dienen der Überbrückung von Gleisanlagen im Ausfahrbereich des Zentralverschiebebahnhofs Wien-Kledering. Das Tragwerk (TW) 5.1 mit einer Spannweite von 112.5 m überführt die zweigleisige Bahnstrecke über die Fahrwege des Verschiebebahnhofs und der Ostbahn. Mit einer geringeren Stützweite von 88.5 m überspannt das Tragwerk 5.3 die Fahrwege der Schnellbahn S7 und das Gleis der Nordschleife, siehe Abbildung 4.1. Die Bauwerke wurden im Zeitraum zwischen April 2012 und Dezember 2014 errichtet.

Beide Brückentragwerke sind mit kreisförmigen Bögen ausgeführt, wobei jede Bogenebene mit  $12.5^\circ$  im Querschnitt nach innen geneigt ist. Zur Stabilisierung der Bögen in Querrichtung sind Querriegel zwischen den Bögen angeordnet. Die Querschnitte der Bögen, Versteifungsträger und Querträger sind dichtgeschweißte Hohlkästen. In Fortsetzung der Stegbleche des Bogenhohlkastens sind je Bogen zwei Hängerebenen konzipiert, in denen die Stege des Bogens mit den Stegen des Versteifungsträgers über Rundstahlhänger verbunden sind. Die Versteifungsträger bilden gemeinsam mit den Stahlquerträgern den Trägerrost der Verbundfahrbahnplatte. Die Eckdaten der beiden Netzwerkbögen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.



**Abb. 4.1:** Übersicht Netzwerkbogenbrücken Kledering; Quelle: basemap.at



**Abb. 4.2:** Ansicht Tragwerk 5.1



**Abb. 4.3:** Ansicht Tragwerk 5.3

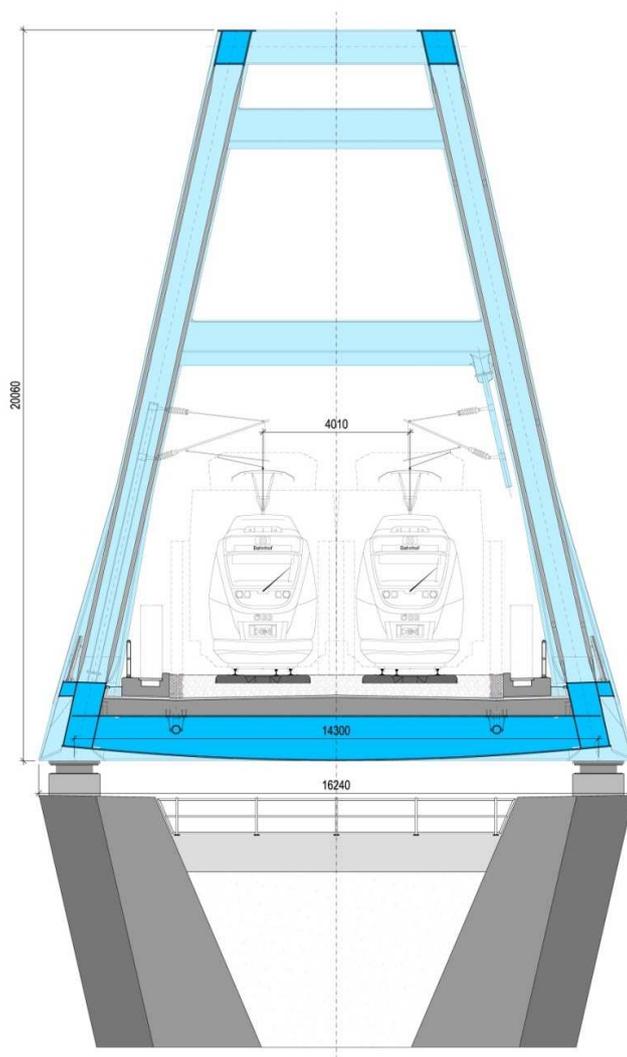


Abb. 4.4: Querschnitt; Quelle: [29]

Bezeichnung	Tragwerk 5.1	Tragwerk 5.3
Stützweite	112,50 m	88,50 m
Breite	15,20 m	15,20 m
Bogenstich	18,80 m	15,20 m
Höhe Bogenscheitel ü. GOK	28 m	24 m
Gewicht der Brücken	2.700 t	2.100 t
Konstruktionsstahl	1.100 t	800 t
Hänger Ø 100 mm	1.230 m / 80 Stk.	755 m / 64 Stk.
Bewehrungsstahl	230 t	180 t
Stahlbeton C35/45	625 m <sup>3</sup>	490 m <sup>3</sup>

Tab. 4.1: Hauptabmessungen und Hauptmassen der Bauwerke; Quelle: [29]

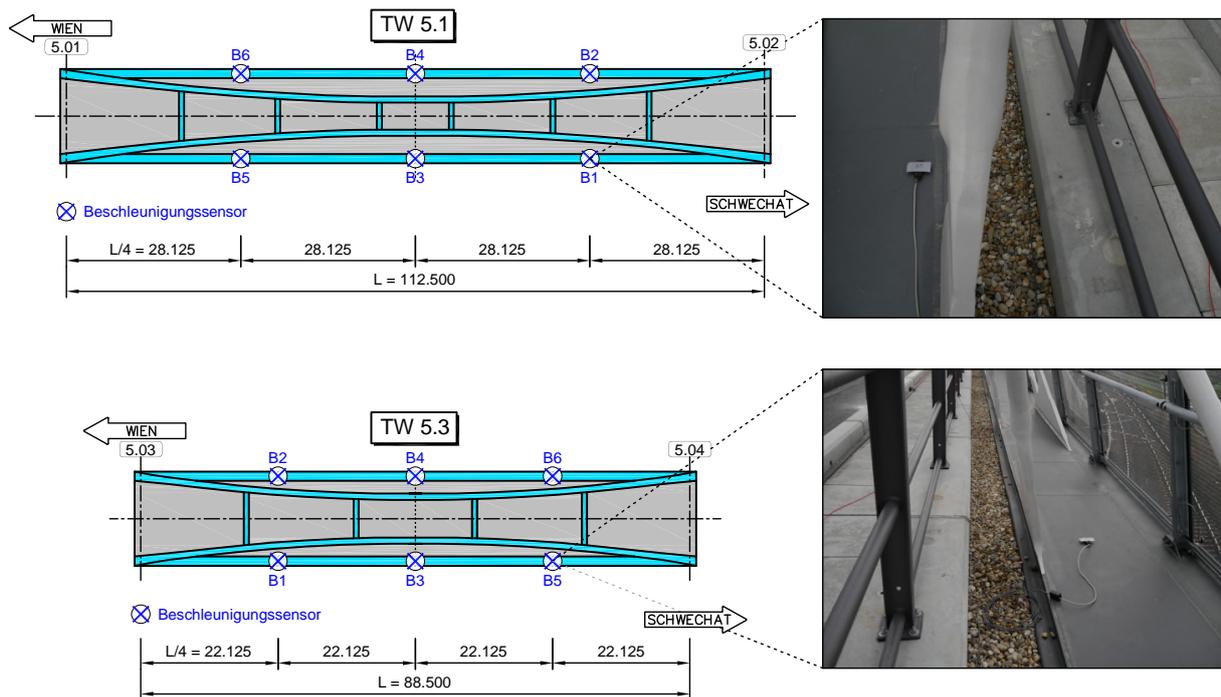


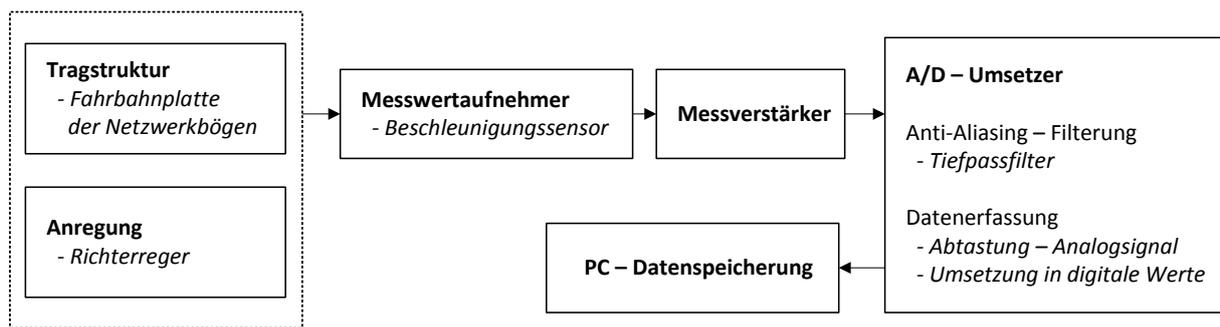
Abb. 4.5: Positionierung der Beschleunigungsaufnehmer auf den Versteifungsträgern der Netzwerkbögen

## 4.2 Messinstrumente und Datenerfassung

Im Zuge der vorliegenden Untersuchung soll in erster Linie das Schwingungsverhalten der beiden Fahrbahnplatten analysiert werden. Um deren Bewegungen aufzuzeichnen, werden die Platten mit insgesamt sechs Beschleunigungsaufnehmern ausgestattet. Die Sensoren erfassen Beschleunigungen in vertikaler Richtung, aus deren Signal die Eigenfrequenzen und Dämpfungsparameter bestimmt werden. Die Messung von Beschleunigungen erfordert keinen fixen Referenzpunkt und hat insofern einen Vorteil gegenüber der Messung von Verschiebungen mittels Wegaufnehmern. Bei den Sensoren handelt es sich um kapazitive Beschleunigungsaufnehmer der Firma Mikrotechnik-Sensorik GmbH vom Typ BG 21066.10 2g. Die Positionierung der Sensoren auf den Versteifungsträgern der beiden Tragwerke ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Grundsätzlich ist bei der Anordnung von Sensoren die Lage der Schwingungsknoten in Abhängigkeit von der betreffenden Eigenform zu beachten. Eine Positionierung in der Nähe von Schwingungsknoten bedeutet, dass die Möglichkeit zur Erfassung der zugehörigen Schwingungsform nicht mehr gegeben ist. Für die gegenständliche Untersuchung erfolgt die Sensorpositionierung in der Mitte und den Viertelpunkten der Brückenspannweite, jeweils an der Oberseite der beiden Versteifungsträger. Damit wird einerseits die Aufzeichnung von Biegeschwingungen bis zur dritten Eigenfrequenz und andererseits die Erfassung von Torsionsschwingungen gewährleistet.

Nach der Erfassung wird das Signal - falls erforderlich über einen Messverstärker - an den Eingang eines Analog-Digital-Umsetzer (auch: A/D-Wandler) weitergegeben. Hierzu werden Geräte der Firma HBM verwendet (*Spider 8*), welche die Datenerfassung durch Abtastung



**Abb. 4.6:** Messkette, Signalfluss und Signalverarbeitung

des eingehenden Analogsignals und nachfolgender Umwandlung in Digitalwerte ermöglichen. Anschließend erfolgt die Weitergabe des digitalen Signals an einen PC, welcher die Speicherung der Daten mithilfe des Software-Pakets *Catman 5.0* ermöglicht. Die Stromversorgung erfolgt über ein Stromaggregat. In Abbildung 4.6 ist die verwendete Messkette grafisch dargestellt.

Nach den Regeln der Signalverarbeitung muss die Abtastrate (Abtastfrequenz) so gewählt werden, dass aus dem erhaltenen diskreten Signal das originale Analogsignal reproduziert werden kann. Gemäß Abtasttheorem (nach *Whittaker*, *Kotelnikov* und *Shanon*) ist dieser Fall gegeben, wenn die Abtastfrequenz  $f_s$  größer ist als das Doppelte der maximalen Frequenzkomponente  $f_{max}$  im ursprünglichen Analogsignal. Der Halbwert  $f_s/2$  wird als *Nyquist-Frequenz* bezeichnet. Überschreiten die vorhandenen Frequenzanteile des Messsignals die Nyquist-Frequenz, so entsteht ein Fehler im abgetasteten Signal, welcher als *Aliasing-Effekt* bezeichnet wird. Da die Bandbreite der Frequenzkomponenten von vornherein nicht bekannt ist, müssen alle Frequenzkomponenten über der Nyquist-Frequenz durch Anwendung eines Tiefpassfilters (Anti-Aliasing-Filterung) unterdrückt werden [18].

Bei dynamischen Messungen von Brückentragwerken wird in der Regel ein Frequenzbereich von 0 bis 50 Hz betrachtet. Um die Bedingungen des Abtasttheorems einzuhalten, wäre somit eine Abtastfrequenz von größer 100 Hz ausreichend. Für praktische Belange werden häufig höhere Abtastraten verwendet [13]. Für die gegenständliche Untersuchung wird zur Messdatenerfassung eine Abtastrate von 400 Hz, sowie eine durchschnittliche Messdauer unter erzwungener Anregung von circa 30 Sekunden gewählt. Die Anti-Alias-Filterung wird hierbei durch einen Tiefpassfilter im A/D-Wandler mit einer Grenzfrequenz von 40 Hz gewährleistet.

### 4.3 Anregung der Tragstruktur

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuche wurden mittels harmonischer Kraftanregung durch zwei Richterregger der Firma *ConviTec* durchgeführt. Die Versuchsgeräte sind Eigentum des Institutes für Tragkonstruktionen, Abteilung Stahlbau der TU Wien. Als Richter- bzw. Unwichterregger werden Aggregate bezeichnet, welche mittels Fliehgewichten lineare Schwingungen erzeugen. Für die dynamische Anregung der beiden Eisenbahnbrücken werden die Schwingerregger mittels einer Grobblechplatte auf einem Drehgestell befestigt, siehe Abbildung 4.7. Die Kraftwirkung von Richterreggern wird erzeugt, indem zwei Wellen mit exzentrischen Massen

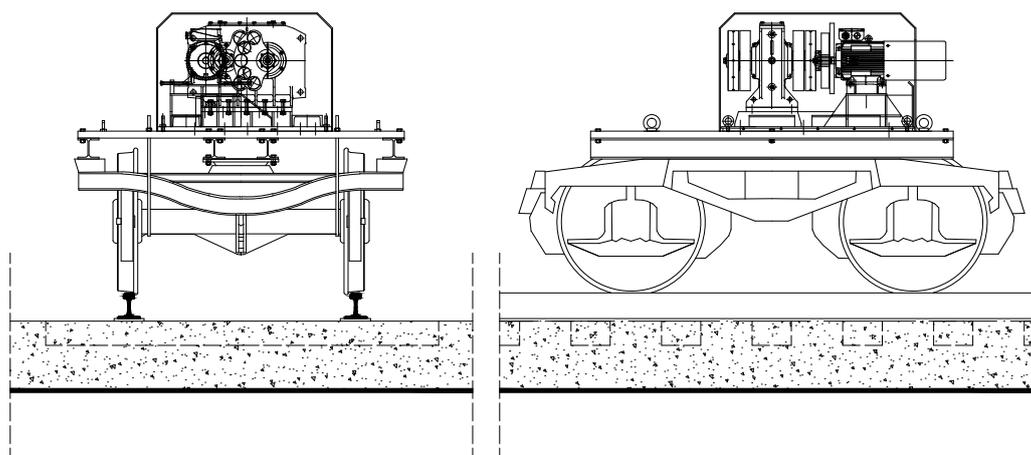
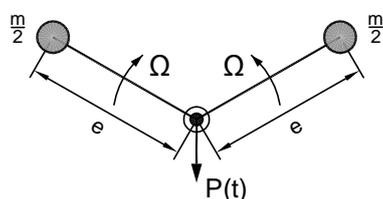


Abb. 4.7: Drehgestell mit Richterregger zur Anregung von Brückenstrukturen; Quelle: [16]



- $m$  ... Exzentermasse in kg
- $e$  ... Exzentrizität in m
- $\Omega$  ... Anregungsfrequenz in rad/s
- $P(t)$  ... Harmonische Kraftanregung in N

Abb. 4.8: Wirkungsweise der Richterregger; Quelle: [4]

über ein Getriebe gegenläufig betrieben werden. Durch den gegensinnigen Umlauf mit gleicher Drehzahl ist die Summe der horizontalen Kraftkomponenten gleich null, d.h. es treten keine Querschwingungen auf, siehe Abbildung 4.8. In vertikaler Richtung wird bei gleichbleibender Drehzahl durch die Radialkraft die Kraft  $P(t)$  mit sinusförmigen Verlauf erzeugt [4]:

$$P(t) = me\Omega^2 \sin(\omega t). \quad (4.1)$$

Für die Klassifizierung der Richterregger wird häufig das statische Moment  $m_{st}$  verwendet, welches aus dem Produkt der Unwuchtmasse  $m$  und der Exzentrizität  $e$  folgt:

$$m_{st} = me. \quad (4.2)$$

Die Unwucht eines Richterreggers setzt sich aus insgesamt vier Schwungscheiben zusammen. Das statische Moment kann durch verschiedene Anordnungen von Zusatzgewichten in den zylindrischen Löchern der Unwuchtscheiben reguliert werden. Die Amplitude

$$|P| = m_{st}\Omega^2 \quad (4.3)$$

der harmonischen Kraftanregung  $P(t)$  gemäß (4.1) wächst linear mit dem statischen Moment  $m_{st}$  und quadratisch mit der Anregungsfrequenz  $\Omega$ . Daraus folgt, dass die Kraftamplitude bei dynamischer Anregung mittels Richterregger über den gewählten Frequenzbereich der Erregung nicht konstant ist. Dieser Umstand kann vor allem bei geringen Anregungsfrequenzen von Nachteil

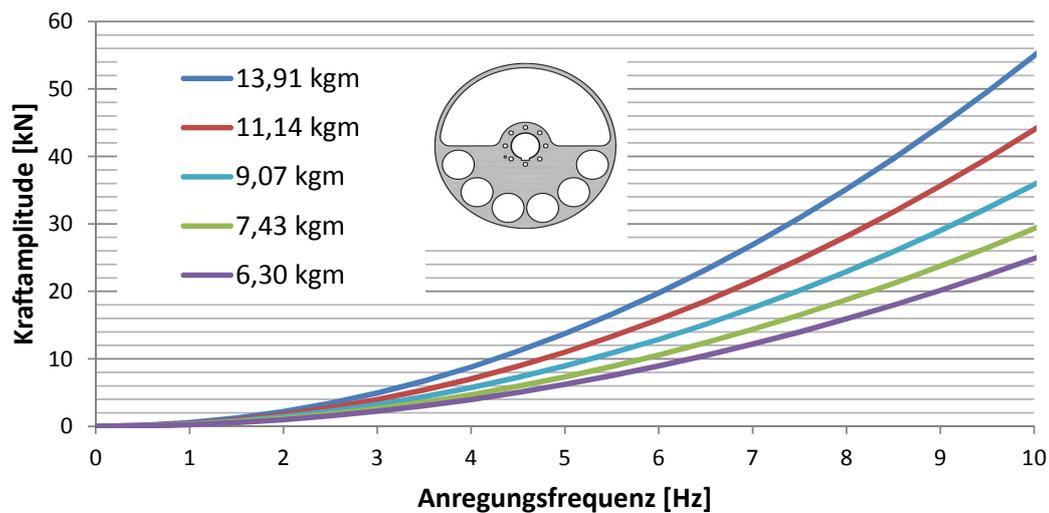


Abb. 4.9: Kraftamplituden der Richterregger bis 10 Hz; Quelle [16]

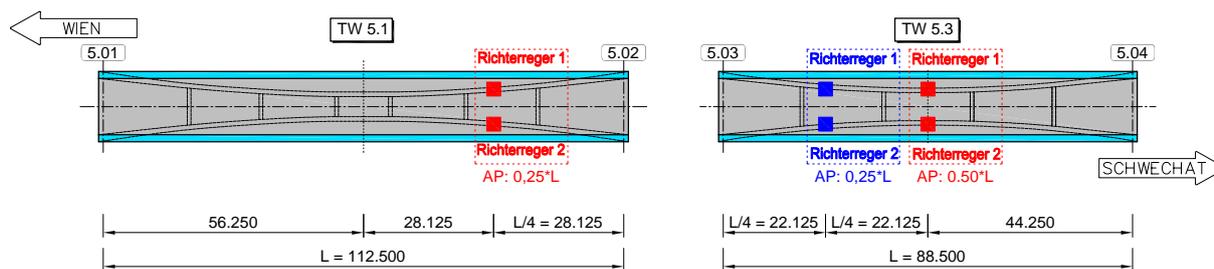
sein, da es hierbei schwierig ist, eine ausreichend große Erregerkraft in die Tragstruktur einzuleiten. Um dennoch Amplitudenfrequenzgänge zu erhalten, welche unabhängig von der Erregerfrequenz sind, werden die Amplituden der gemessenen Übertragungsfunktionen durch die Kraftamplitude  $|P|$  gemäß (4.3) dividiert. Abbildung 4.9 zeigt eine Übersicht der möglichen Kraftamplituden für verschiedene statische Momente  $m_{st}$  der Richterregger.

## 4.4 Versuchsprogramm

Um den Einfluss des Schotteroberbaus (SOB) auf das dynamische Verhalten der Eisenbahnbrücken zu bestimmen, wurden die im Folgenden beschriebenen Schwingungsmessungen an den Tragwerken (TW) 5.1 und 5.3 jeweils in zwei Messreihen durchgeführt. Die erste Messreihe erfolgte im April 2014 (14.4 bis 18.4) für die Situation ohne Schotteroberbau und die zweite Messreihe im September 2014 (8.9 bis 11.9) für den Endzustand der Tragwerke mit Schotteroberbau. Dabei wurden die nachstehend aufgelisteten Untersuchungen mit jeweils unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt:

- Messung bei Verwendung verschiedener statischer Momente  $m_{st}$  der Richterregger
- Messung bei unterschiedlichen Positionen der Richterregger am Tragwerk 5.3
- Messung bei unterschiedlichen Phasenwinkel  $\alpha_P$  zwischen den Richterreggern

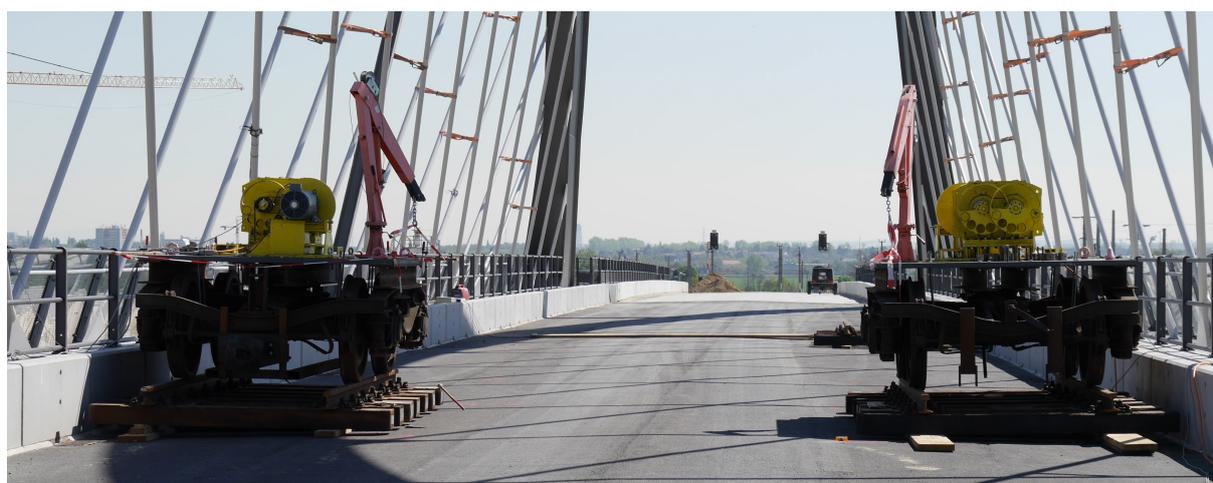
Für die Bestimmung von Dämpfungswerten wurden zwei unterschiedliche Versuchsverfahren angewendet. Einerseits wurden Ausschwingvorgänge der Tragwerke nach Beendigung der gezielten Frequenzanregung mittels Richterreggern aufgezeichnet. Andererseits wurden insgesamt über 1000 Messungen der stationären Schwingungsantwort (Richterreggermessungen) für die Erstellung von Amplitudenfrequenzgängen durchgeführt, vergleiche Abschnitt 2.3.2. Für die Erstellung gemessener Übertragungsfunktionen wird die Erregung der Tragwerke stufenweise hochgefahren und zugleich die Strukturantwort erfasst. Maßgebend für die Zuverlässigkeit dieser Messdaten



**Abb. 4.10:** Positionierung der Richterregger - Anregungspunkte (AP)

ist, dass die Messaufzeichnungen erst dann gestartet werden, sobald ein eingeschwungener und damit stationärer Zustand erreicht wird. Der angeregte Frequenzbereich befindet sich zwischen einer unteren und oberen Grenzfrequenz von 2.0 Hz und 8.5 Hz. Um einerseits eine effiziente Versuchsdurchführung und andererseits eine möglichst genaue Erfassung der Resonanzspitzen zu gewährleisten, werden die Frequenzschritte der Anregung grundsätzlich variabel gewählt. Dies ermöglicht eine Verdichtung der Messungen bei Resonanzstellen, welche allerdings durch die verwendeten Richterregger mit einer minimalen Schrittweite von 1 U/min (0.0167 Hz) begrenzt ist.

Die Positionierung der Unwucherregger erfolgte für beide Tragwerke mit einem Abstand gleich dem Viertel der Stützweite vom Trennpfeiler 5.02 bzw. 5.03. Für die Messungen am Tragwerk 5.3 wurde zusätzlich die Positionierung in Feldmitte gewählt. Abbildung 4.10 zeigt die unterschiedlichen Anordnungen der Richterregger auf dem Tragwerk 5.1 und 5.3. Die Anregung der Tragwerke erfolgte mit drei verschiedenen statischen Momenten  $m_{st}$  der Richterregger, deren Werte zwischen 7.43 kgm, 10.20 kgm und 13.91 kgm je Gerät variieren. Zur Anregung von Biege- sowie Torsionseigenformen wurden die Unwucherregger sowohl synchron (Phasenwinkel  $\alpha_P = 0^\circ$ ) als auch um  $\alpha_P = 180^\circ$  phasenversetzt betrieben. Die Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht über die in der vorliegenden Arbeit ausgewerteten Versuche.



**Abb. 4.11:** Tragwerk 5.3 ohne Schotteroberbau - Positionierung der Richterregger im 1. Viertel ausgehend von Achse 5.03 (AP:  $0.25 \cdot L$ )

Struktur	Richterreger			Resonanzversuche		Ausschwingversuche		
	Position	$m_{st}$	$\alpha_p$	Frequenzband in Hz	Bandbreite		1. BEF	1.TEF
		in kgm	in Grad		1. BEF	1.TEF		
TW 5.1 ohne Schotteroberbau	0.25*L	13.91	0	3.0 - 8.0	x	x	x	√
	0.25*L	13.91	180	3.0 - 8.5	x	√	x	√
	0.25*L	13.91	0	2.0 - 8.5	x	x	√	x
TW 5.1 mit Schotteroberbau	0.25*L	13.91	180	2.5 - 6.0	x	√	x	√
	0.25*L	10.2	0	2.0 - 4.6	√	x	x	x
	0.25*L	10.2	180	3.4 - 4.0	x	x	x	x
	0.25*L	13.91	0	2.7 - 8.5*	x	√	x	x
TW 5.3 ohne Schotteroberbau	0.25*L	7.43	0	2.5 - 6.0	x	x	x	x
	0.50*L	13.91	0	2.5 - 7.0	x	x	√	√
	0.50*L	10.20	0	2.5 - 8.5*	x	x	x	x
	0.50*L	13.91	0	2.0 - 7.5	√	x	√	x
TW 5.3 mit Schotteroberbau	0.50*L	13.91	180	2.5 - 5.6	x	√	x	√
	0.50*L	10.20	0	2.0 - 5.5	√	x	x	x
	0.25*L	10.20	0	2.0 - 7.3	x	x	x	x

*Anmerkung.* 0.25\*L = Richterregerposition im 1. Viertelpunkt ausgehend von Achse 5.02 bzw. 5.03, 0.50\*L = Positionierung der Richterreger in Feldmitte,  $m_{st}$  = statisches Moment je Richterreger,  $\alpha_p$  = Phasenverschiebung der beiden Richterreger,

\* = kein durchgängiger Frequenzgang ermittelt, √ = Untersuchung konnte durchgeführt werden, x = Untersuchung konnte nicht durchgeführt werden

**Tab. 4.2:** Übersicht Versuchsprogramm

## 4.5 Auswertung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Versuchsreihen für beide Tragwerke 5.1 und 5.3 dargestellt. Für die Auswertung der Ausschwingversuche wurde die Software MS EXCEL verwendet. Die Erstellung der Amplitudenfrequenzgänge erfolgte mit dem Programm FRFPROC TOOL, siehe Kapitel 3. An dieser Stelle werden noch einmal die wichtigsten Schritte zur Erstellung gemessener Übertragungsfunktionen aufgelistet:

- Aufzeichnung der stationären Schwingungsantwort bei erzwungener Anregung durch Richterreger mittels Messwertaufnehmer
- Ermittlung der maßgebenden Amplitude aus dem Zeitsignal der gemessenen Schwingungsantwort
- Division der ermittelten Amplitude durch die entsprechende Kraftamplitude  $|P|$
- Auftragen der bezogenen Amplitude über die zugehörige Erregerfrequenz  $\Omega$

Die so ermittelten Ordinatenwerte sind unabhängig von der Erregerfrequenz der Richterreger und die daraus erstellte Frequenz-Antwort-Funktionen (FRF) wird im Folgenden als *Accelerance* bezeichnet. Die Auswertung im Zuge der modalen Analyse beruht auf der Annahme, dass die komplexe Antwortbewegung eines Systems äquivalent durch eine Reihe von einfachen Schwingungserscheinungen (Eigenfrequenzen, Eigenformen und modale Dämpfungen) abgebildet werden kann. Die Strukturantwort bei Resonanz wird demnach durch den Beitrag einer Eigenform

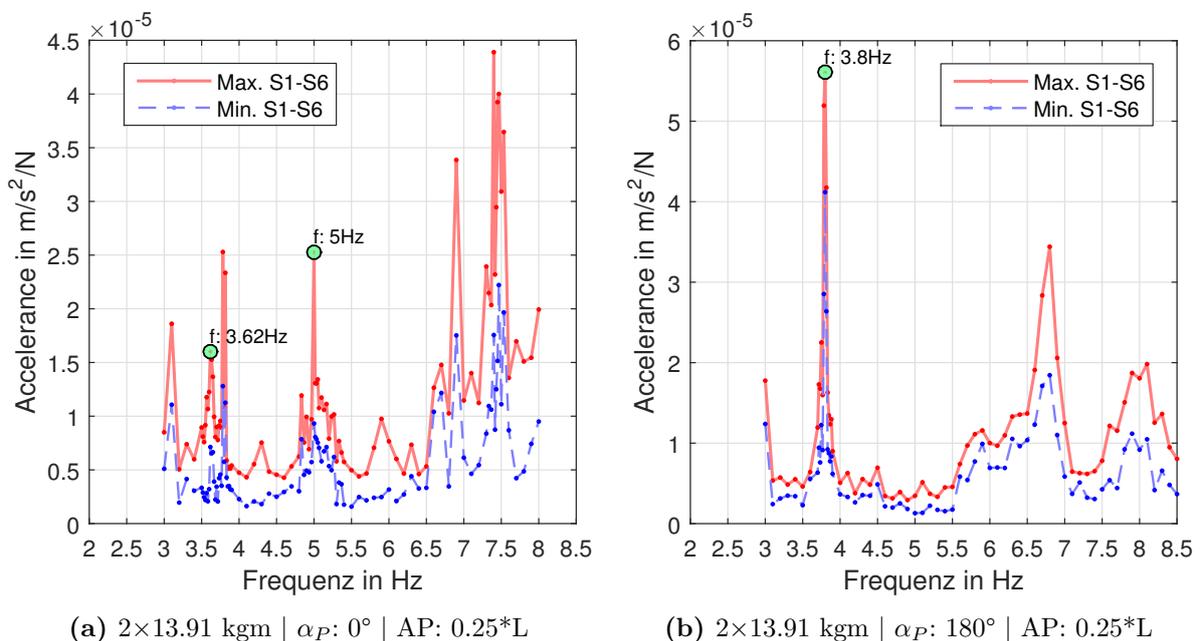
maßgeblich bestimmt und kann daher durch ein System mit einem Freiheitsgrad beschrieben werden.

Die Bestimmung von Eigenfrequenzen wird durch das händische Ablesen der Resonanzspitzen im Amplitudenfrequenzgang (auch als *Peak-Picking-Methode* bezeichnet) bewerkstelligt. Die Bestimmung von Dämpfungswerten aus dem Amplitudenfrequenzgang erfolgt durch Anwendung der Bandbreitenmethode, siehe Abschnitt 2.3.2. Zusätzlich werden Dämpfungswerte auch im Zeitbereich ausgewertet. Hierbei wird die Dämpfung anhand gemessener Ausschwingvorgänge mithilfe des logarithmischen Dämpfungsdekrement bestimmt, siehe Abschnitt 2.3.1.

## 4.6 Ergebnisse für Tragwerk 5.1

### 4.6.1 Richterregermessungen ohne Schotteroberbau

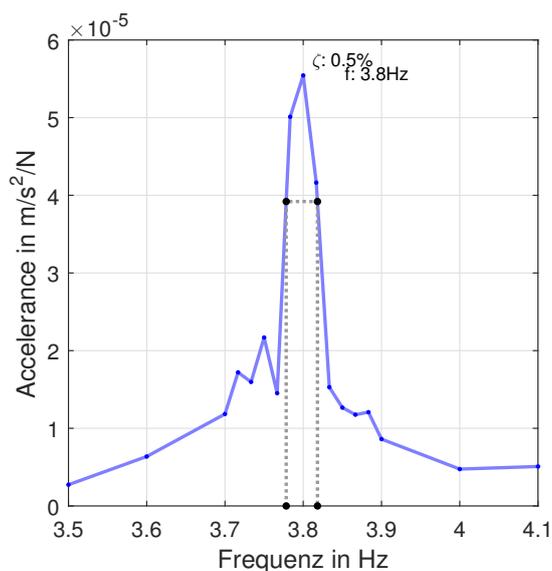
Die Messungen wurden mit einem statischen Moment  $m_{st} = 13.91$  kgm je Richterreger durchgeführt. Der erste Frequenzgang wurde bei phasengleicher Anregung der beiden Unwuchterreger ( $\alpha_P = 0^\circ$ ) aufgezeichnet. Für die Ermittlung von Torsionseigenformen erfolgte anschließend eine Versuchsreihe, bei der die Aggregate mit einem Phasenwinkel von  $\alpha_P = 180^\circ$  betrieben wurden. Für beide Betriebsarten wurde die Positionierung der Richterreger (Anregungspunkt) im 1. Viertelpunkt (AP:  $0.25 \cdot L$ ) ausgehend von Achse 5.02 (siehe Abb. 4.10) gewählt. In Abb. 4.12 sind die entsprechenden Übertragungsfunktionen dargestellt. Es sind hierbei die Einhüllenden der maximalen und minimalen *Accelerances* der Beschleunigungsaufnehmer S1 bis S6 aufgetragen.



**Abb. 4.12:** Amplitudenfrequenzgänge Tragwerk 5.1 ohne Schotteroberbau

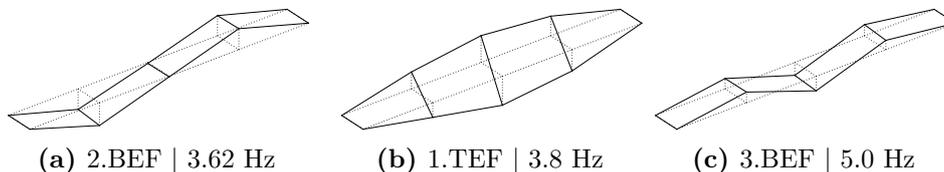
Im Rahmen der modalen Analyse konnte die 2. Biegeeigenform (2.BEF) bei 3.62 Hz, die 1. Torsionseigenform (1.TEF) bei 3.8 Hz und die 2. Torsionseigenform bei 5.0 Hz identifiziert werden. In Abb. 4.12 sind die entsprechenden Resonanzspitzen markiert. Für die restlichen Resonanzstellen in Abb. 4.12 konnten infolge Überlagerungen von Biege- und Torsionsschwingungen keine eindeutigen (separierten) Eigenformen bestimmt werden. Die 1. Biegeeigenform (1.BEF) mit einer Eigenfrequenz kleiner 3.0 Hz wurde in dieser Versuchsreihe nicht identifiziert. Grund dafür war eine fehlerhafte Abschätzung der 1.BEF anhand einer FE-Berechnung. Diese Analyse ergab eine Eigenform im Frequenzbereich über 3.0 Hz, weshalb im Zuge der ersten Messreihe keine Versuche mit geringeren Anregungsfrequenzen als 3.0 Hz durchgeführt wurden.

Für die Anwendung der modalen Analyse werden gut separierte Eigenschwingungen vorausgesetzt. Im gegenständlichen Fall war diese Bedingung nur für die Resonanzspitze der 1.TEF (siehe Abb. 4.12b) erfüllt. Daher wurde für das Tragwerk 5.1 ohne Schotteroberbau nur ein Dämpfungswert



**Abb. 4.13:** Dämpfungsermittlung nach der Bandbreitenmethode für 1.TEF  
 TW 5.1 ohne SOB |  $2 \times 13.91 \text{ kgm}$  |  $\alpha_P: 180^\circ$  | AP:  $0.25 * L$

mit  $\zeta = 0.5 \%$  nach der Bandbreitenmethode bestimmt. Die Berechnung des zugehörigen Frequenzganges erfolgte durch Mittelwertbildung aus den Messaufzeichnungen der Sensoren S3 und S4 in Feldmitte, siehe Abb. 4.13. Die wesentlichen Resultate dieser Messreihe sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.



Eigenschwingungen - Tragwerk 5.1 ohne Schotteroberbau

Mode	Frequenz in Hz	Dämpfungsgrad in %
2. Biegeeigenform	3.62	-
1. Torsionseigenform	3.80	0.5
3. Biegeeigenform	5.00	-

**Tab. 4.3:** Ergebnisse der Richterregermessungen

### 4.6.2 Ausschwingversuche ohne Schotteroberbau

Im Rahmen der dynamischen Untersuchung wurden neben den Richterregermessungen zusätzlich Ausschwingversuche durchgeführt. Für die Situation ohne Schotteroberbau erfolgte hierbei die Anregung der 1. Torsionseigenform sowohl mit synchronen Betrieb der Richterreger als auch mit einer Phasenverschiebung von  $\alpha_P = 180^\circ$ . Nach Abschalten der Aggregate erfolgte das Aufzeichnen der Abklingkurve. Die Dämpfungsermittlung nach der *Logarithmisches-Dekrement-Methode* wurde innerhalb der ersten 100 Schwingungszyklen mit unterschiedlichen Stützstellen im Abstand von  $n = 10$  bzw.  $n = 40$  Perioden für die Messaufzeichnungen des Sensors S3 durchgeführt, siehe Abb. 4.14 und 4.15. Wird hieraus der Mittelwert gebildet, liefert das eine Dämpfung von circa  $\zeta = 0.2 \%$ .

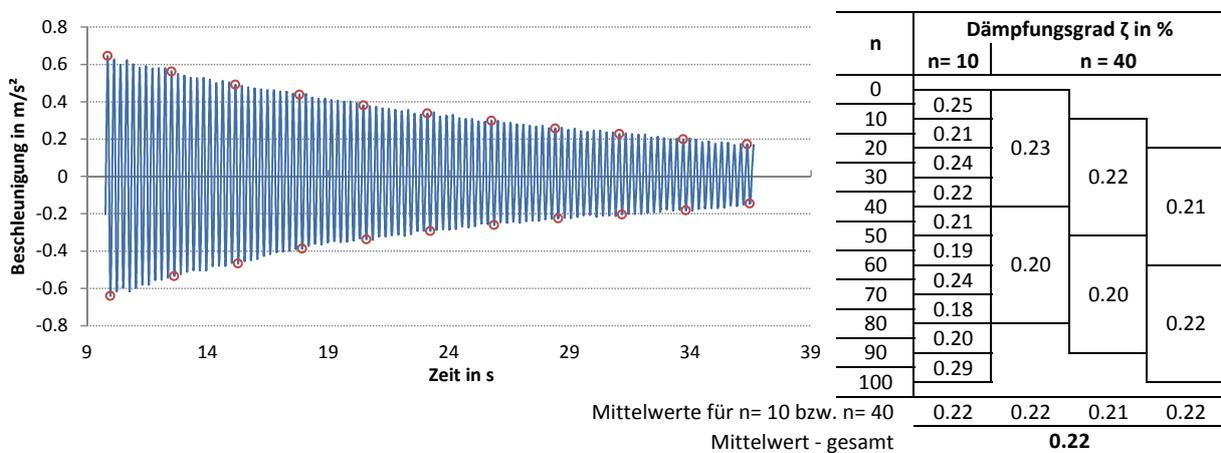


Abb. 4.14: Dämpfungsermittlung nach der *Logarithmisches-Dekrement-Methode* für 1.TEF; TW 5.1 ohne SOB |  $2 \times 13.91 \text{ kgm}$  |  $\alpha_P: 180^\circ$  | AP:  $0.25 * L$

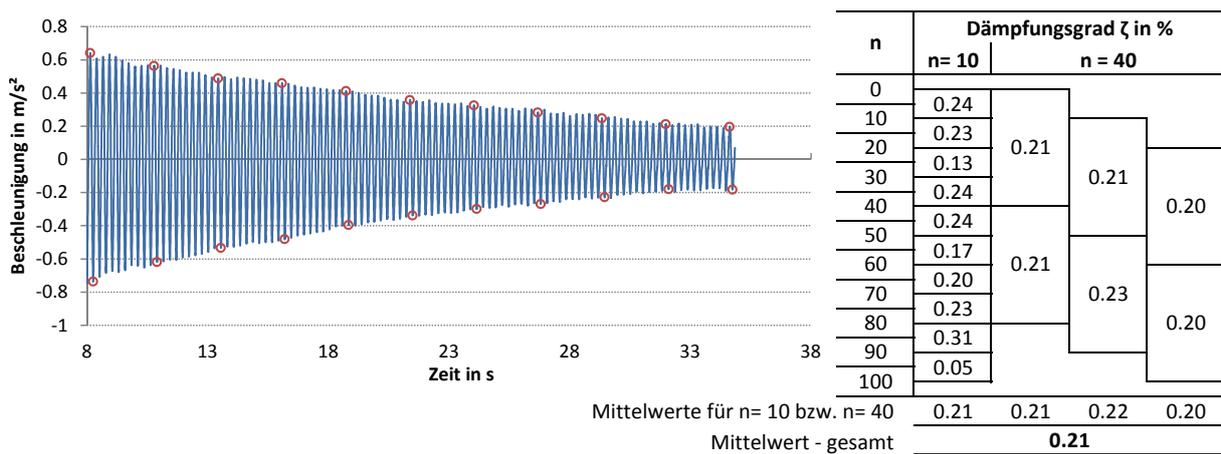
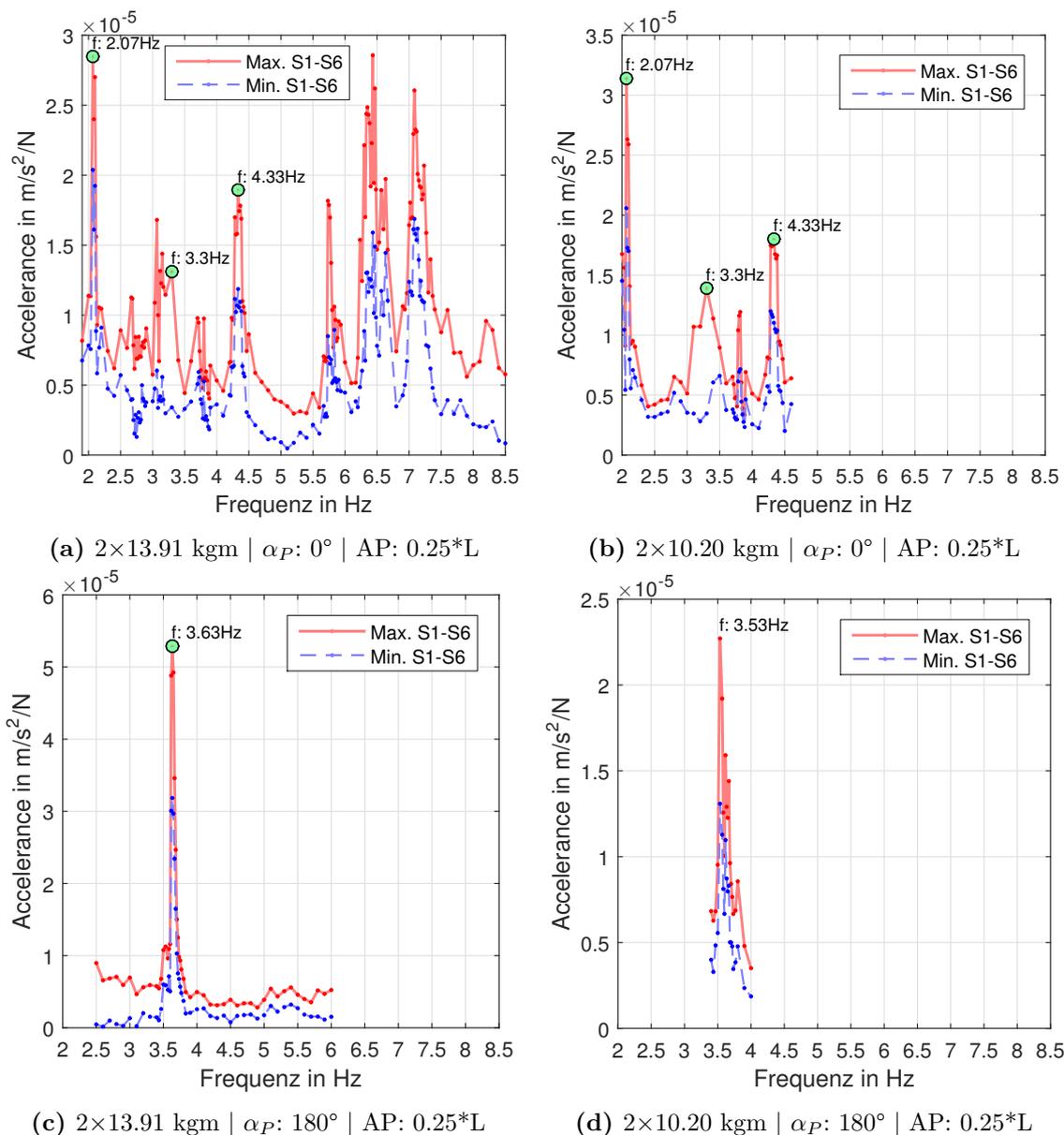


Abb. 4.15: Dämpfungsermittlung nach der *Logarithmisches-Dekrement-Methode* für 1.TEF; TW 5.1 ohne SOB |  $2 \times 13.91 \text{ kgm}$  |  $\alpha_P: 0^\circ$  | AP:  $0.25 * L$

### 4.6.3 Richterregermessungen mit Schotteroberbau

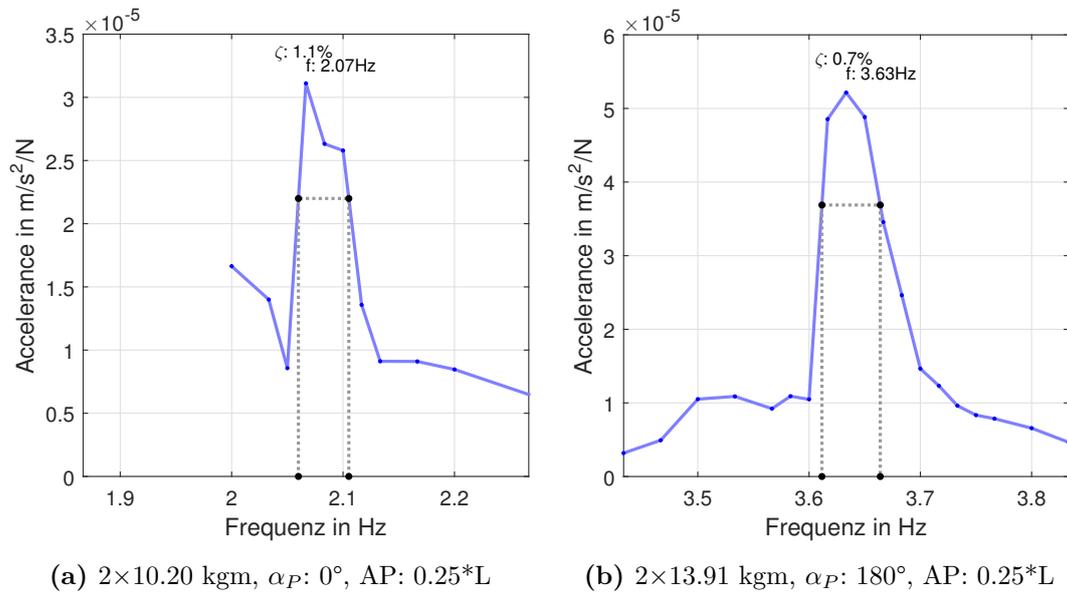
Nach Herstellung des Schotteroberbaus erfolgte die Versuchsdurchführung mit den statischen Momenten  $m_{st} = 10.20 \text{ kgm}$  und  $m_{st} = 13.91 \text{ kgm}$  je Richterreger. Zur Anregung von Biege- sowie Torsionseigenformen wurden die Unwuchterreger sowohl synchron ( $\alpha_P = 0^\circ$ ) als auch phasenverschoben ( $\alpha_P = 180^\circ$ ) betrieben. In Abb. 4.16 sind die ausgewerteten Amplitudenfrequenzgänge dargestellt. Es handelt sich dabei um die Hüllkurven der minimalen und maximalen Accelerances der Beschleunigungssensoren S1 bis S6.



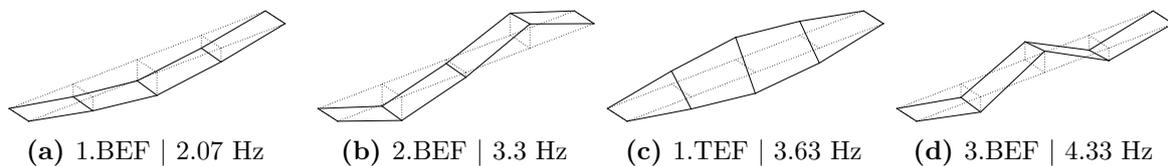
**Abb. 4.16:** Amplitudenfrequenzgänge Tragwerk 5.1 mit Schotteroberbau

Im Zuge der zweiten Messreihe mit Schotteroberbau wurden die ersten drei Biegeeigenformen (BEF) mit den Eigenfrequenzen 2.07 Hz, 3.3 Hz und 4.33 Hz identifiziert und die 1. Torsionseigenform (1.TEF) bei einer Frequenz von 3.63 Hz bestimmt, siehe Abb. 4.16. Zur Dämpfungsermittlung

wurden die Resonanzspitzen der 1.BEF (Abb. 4.16b) und der 1.TEF (Abb. 4.16c) verwendet. Nach der Bandbreitenmethode beträgt die Dämpfung  $\zeta = 0.7\%$  für die 1.TEF und  $\zeta = 1.1\%$  für die 1.BEF (siehe Abb. 4.17), wobei die Frequenzgänge durch Mittelwertbildung aus den Messaufzeichnungen der Sensoren S3 und S4 in Feldmitte ausgewertet wurden. In Tabelle 4.4 sind die wichtigsten Versuchsergebnisse mit Schotteroberbau zusammengefasst.



**Abb. 4.17:** Dämpfungsbestimmung nach der Bandbreitenmethode für (a) 1.BEF und (b) 1.TEF; Tragwerk 5.1 mit Schotteroberbau



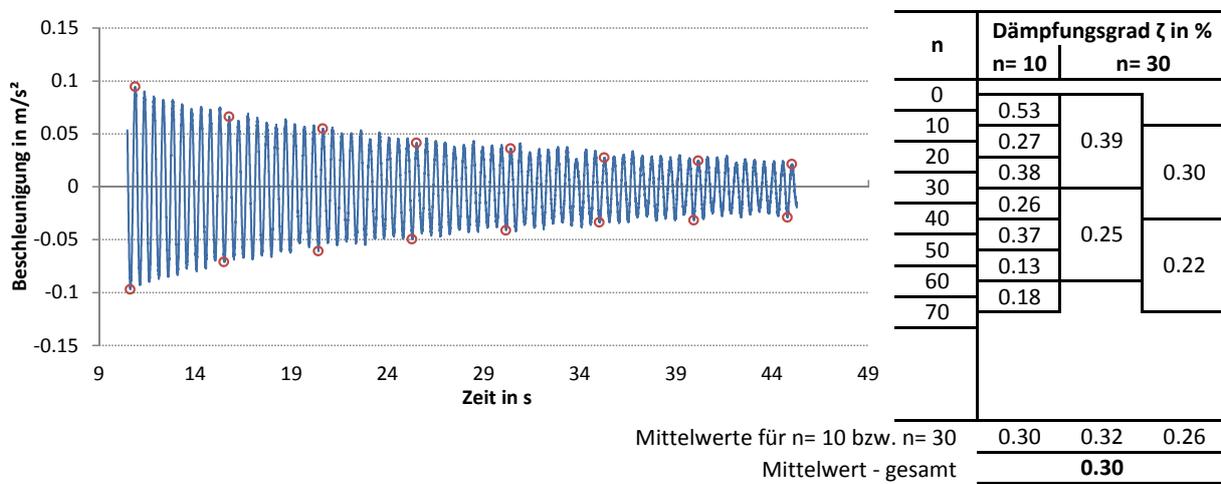
Eigenschwingungen - Tragwerk 5.1 mit Schotteroberbau

Mode	Frequenz in Hz	Dämpfungsgrad in %
1. Biegeeigenform	2.07	1.1
2. Biegeeigenform	3.30	-
1. Torsionseigenform	3.63	0.7
3. Biegeeigenform	4.33	-

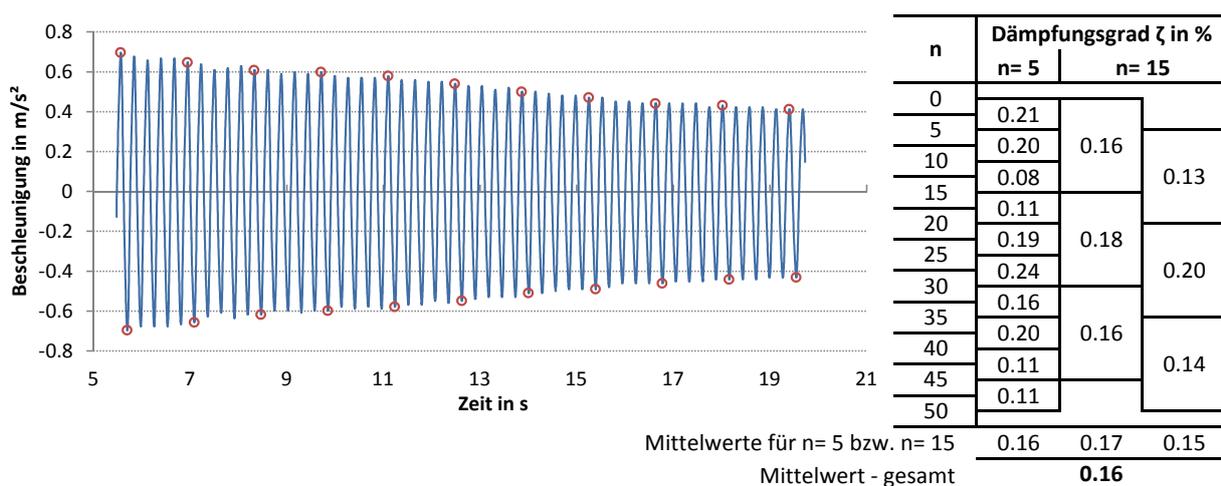
**Tab. 4.4:** Ergebnisse der Richterregermessungen

#### 4.6.4 Ausschwingversuche mit Schotteroberbau

Für die Situation mit Schotteroberbau wurden Ausschwingversuche für die 1. Biegeeigenform und 1. Torsionseigenform durchgeführt. Vor dem Freigeben der Struktur erfolgte jeweils die erzwungene Anregung mittels synchronen Betrieb der Richterreger mit einem statischen Moment  $m_{st} = 13.91 \text{ kgm}$ . In Abbildung 4.18 und 4.19 sind die Messergebnisse des Sensors S3 und die Auswertungen der Abklingkurven dargestellt. Zur Berechnung der Dämpfung nach der *Logarithmische-Dekrement-Methode* wurden die ersten 50 bzw. 70 Schwingungszyklen mit Stützstellen im Abstand von  $n = 10$  und  $n = 30$  bzw.  $n = 5$  und  $n = 15$  Perioden verwendet. Bildet man hieraus den Mittelwert, ergibt das eine Dämpfung  $\zeta = 0.30 \%$  für die 1.BEF und  $\zeta = 0.16 \%$  für die 1.TEF.



**Abb. 4.18:** Dämpfungsermittlung nach der *Logarithmische-Dekrement-Methode* für 1.BEF (2.07 Hz); TW 5.1 mit SOB |  $2 \times 13.91 \text{ kgm}$  |  $\alpha_P: 0^\circ$  | AP: 0.25\*L

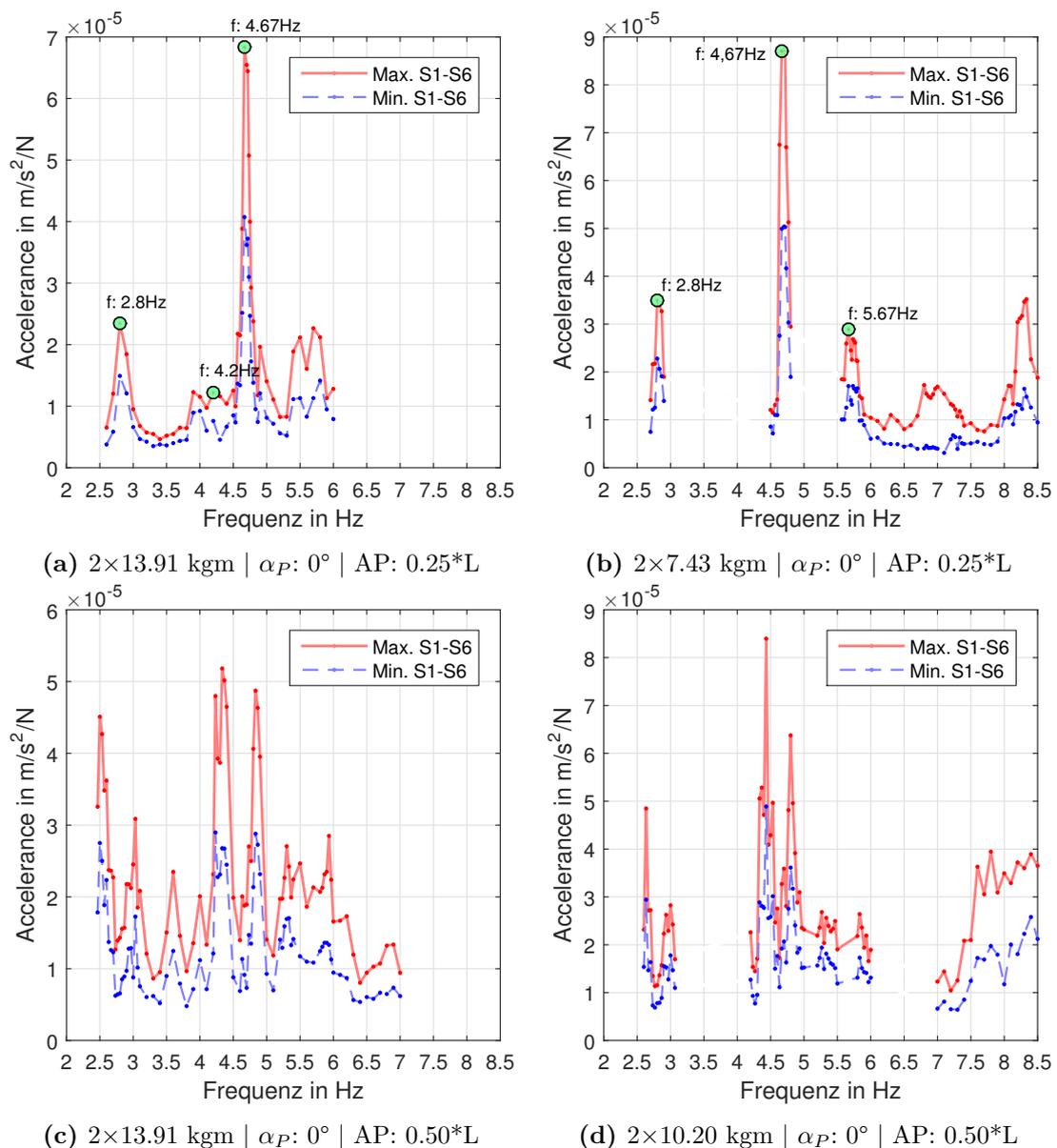


**Abb. 4.19:** Dämpfungsermittlung nach der *Logarithmische-Dekrement-Methode* für 1.TEF (3.63 Hz); TW 5.1 mit SOB |  $2 \times 13.91 \text{ kgm}$  |  $\alpha_P: 180^\circ$  | AP: 0.25\*L

## 4.7 Ergebnisse für Tragwerk 5.3

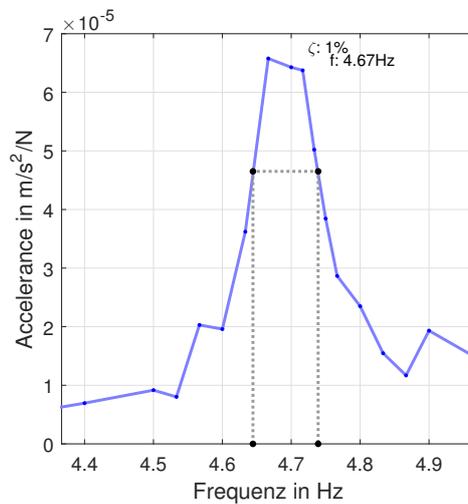
### 4.7.1 Richterregermessungen ohne Schotteroberbau

Die Messungen am Tragwerk 5.3 für die Situation ohne Schotteroberbau wurden mit den statischen Momenten  $m_{st} = 10.20$  kgm und  $m_{st} = 13.91$  kgm je Richterreger durchgeführt. Die Positionierung der Unwuchterreger erfolgte sowohl im ersten Viertelpunkt (AP:  $0.25 \cdot L$ ) ausgehend von der Achse 5.03 (siehe Abb. 4.10), als auch in Feldmitte (AP:  $0.50 \cdot L$ ). In Abb. 4.20 sind die zugehörigen Amplitudenfrequenzgänge aufgetragen. Darin ist jeweils die Einhüllende der minimalen und maximalen *Accelerances* der Beschleunigungsaufnehmer S1 und S6 dargestellt.

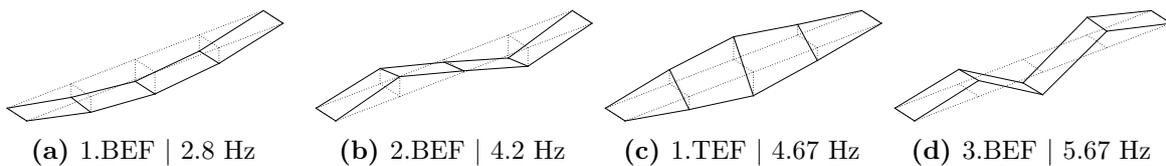


**Abb. 4.20:** Amplitudenfrequenzgänge Tragwerk 5.3 ohne Schotteroberbau

Im Rahmen der Versuchsauswertungen wurden die drei ersten Biegeeigenformen mit den Eigenfrequenzen 2.80 Hz, 4.2 Hz sowie 5.67 Hz und die 1. Torsionseigenform mit einer Frequenz von 4.67 Hz identifiziert, siehe Abb. 4.20. Für die Versuchsreihe mit Erregung in Feldmitte war es nicht möglich, die Tragstruktur so anzuregen, dass deren Schwingungsantwort den Voraussetzungen der modalen Analyse entspricht. Aus den zugehörigen Frequenzgängen sind daher keine dynamischen Parameter ableitbar, vgl. Abb. 4.20c und 4.20d. Für die gegenständliche Messreihe kann die Dämpfung nur für die Resonanzstelle der 1.TEF (siehe Abb. 4.20a) durch Anwendung des Bandbreitenansatzes mit  $\zeta = 1.0 \%$  bestimmt werden. Der zugrunde liegende Frequenzgang wurde durch Mittelwertbildung aus den Messaufzeichnungen der Sensoren S3 und S4 in Feldmitte bestimmt, siehe Abb. 4.21. Die wesentlichen Versuchsergebnisse sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.



**Abb. 4.21:** Dämpfungsermittlung nach der Bandbreitenmethode für 1.TEF; TW 5.3 ohne SOB  
 $2 \times 13.91 \text{ kgm} \mid \alpha_P: 0^\circ \mid AP: 0.25 * L$



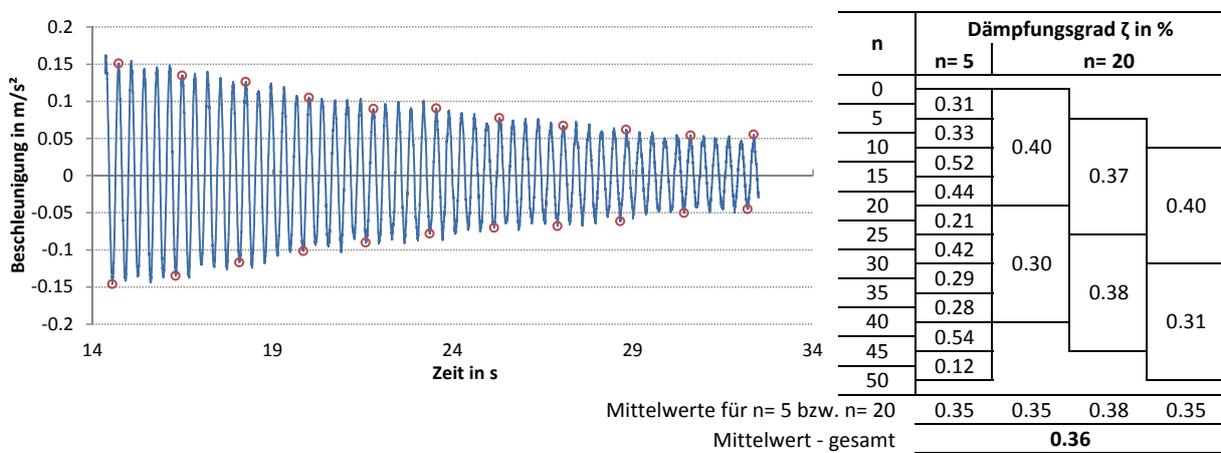
Eigenschwingungen - Tragwerk 5.3 ohne Schotteroberbau

Mode	Frequenz in Hz	Dämpfungsgrad in %
1. Biegeeigenform	2.80	-
2. Biegeeigenform	4.20	-
1. Torsionseigenform	4.67	1.0
3. Biegeeigenform	5.67	-

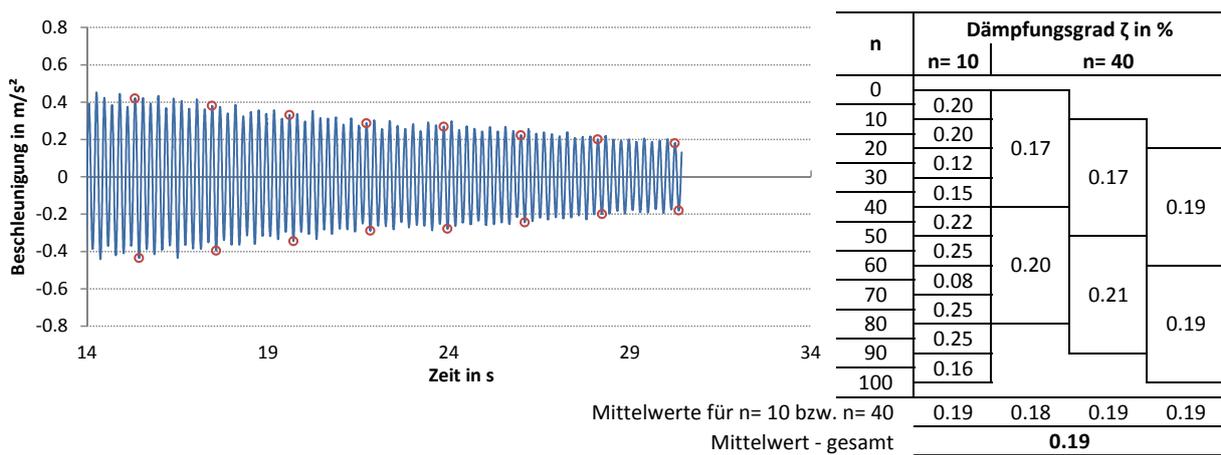
**Tab. 4.5:** Ergebnisse der Richterregermessungen

### 4.7.2 Ausschwingversuche ohne Schotteroberbau

Für die Situation ohne Schotteroberbau wurden Ausschwingversuche für die 1. Biegeeigenform und 1. Torsionseigenform durchgeführt. Vor dem Freigeben der Struktur erfolgte jeweils die erzwungene Anregung bei synchronem Betrieb der Richterregler mit einem statischen Moment  $m_{st} = 13.91 \text{ kgm}$ . In Abbildung 4.18 und 4.19 sind die Messergebnisse des Beschleunigungssensors S3 und die Auswertungen der Abklingkurven dargestellt. Zur Berechnung der Dämpfung nach der *Logarithmischen-Dekrement-Methode* wurden die ersten 50 bzw. 100 Schwingungszyklen mit Stützstellen im Abstand von  $n = 5$  und  $n = 20$  bzw.  $n = 10$  und  $n = 40$  Perioden verwendet. Wird hieraus der Mittelwert gebildet, liefert das eine Dämpfung  $\zeta = 0.36 \%$  für die 1.BEF und  $\zeta = 0.19 \%$  für die 1.TEF .



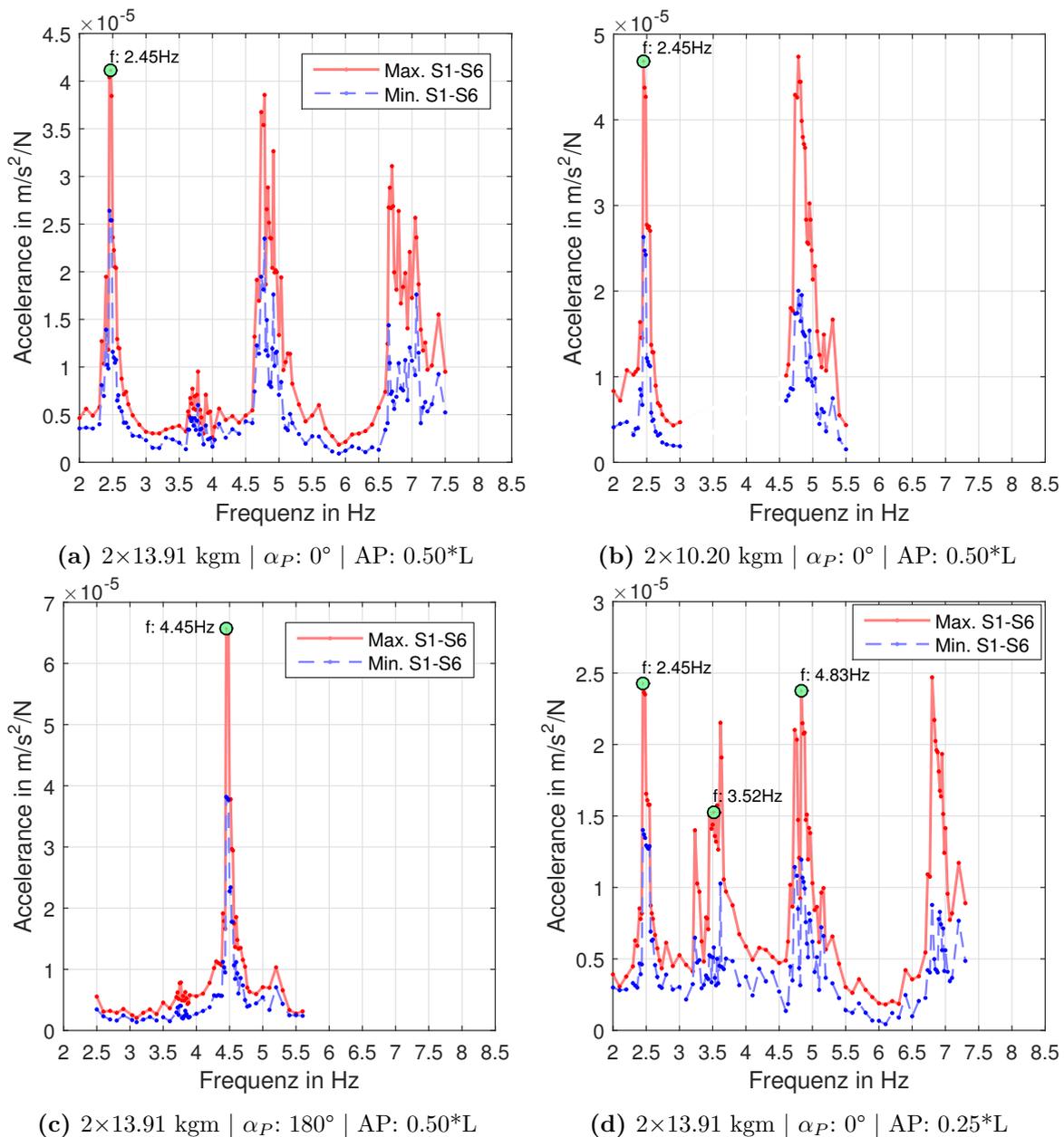
**Abb. 4.22:** Dämpfungsermittlung nach der *Logarithmischen-Dekrement-Methode* für 1.BEF (2.80 Hz); TW 5.3 ohne SOB |  $2 \times 13.91 \text{ kgm}$  |  $\alpha_P: 0^\circ$  | AP:  $0.50 * L$



**Abb. 4.23:** Dämpfungsermittlung nach der *Logarithmischen-Dekrement-Methode* für 1.TEF (4.67 Hz); TW 5.3 ohne SOB |  $2 \times 13.91 \text{ kgm}$  |  $\alpha_P: 0^\circ$  | AP:  $0.50 * L$

### 4.7.3 Richterregermessungen mit Schotteroberbau

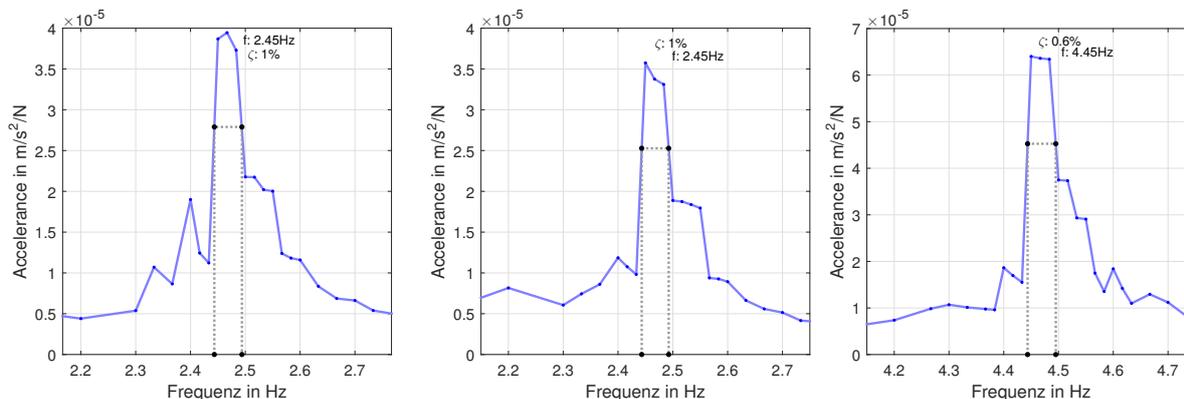
Die Versuche nach Fertigstellung des Schotteroberbaus erfolgten mit den statischen Momenten  $m_{st} = 10.20 \text{ kgm}$  und  $m_{st} = 13.91 \text{ kgm}$  je Unwuchterreger. Die Anregungspunkte der Aggregate wurden einerseits in Feldmitte (AP:  $0.50 \cdot L$ ) und andererseits im ersten Viertelpunkt (AP:  $0.25 \cdot L$ ), ausgehend von der Achse  $5.03$  (vgl. Abb. 4.10) gewählt. In Abb. 4.16 sind die berechneten Amplitudenfrequenzgänge dargestellt. Darin sind jeweils die Hüllkurven der minimalen und maximalen *Accelerances* der Beschleunigungssensoren S1 bis S6 abgebildet.



**Abb. 4.24:** Amplitudenfrequenzgänge Tragwerk 5.1 mit Schotteroberbau

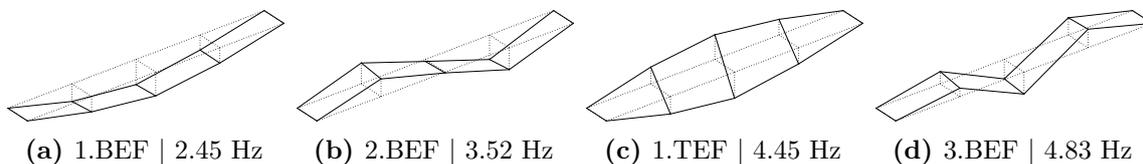
Im Zuge der Auswertungen wurden die ersten drei Biegeeigenformen (BEF) mit den Eigenfrequenzen  $2.45 \text{ Hz}$ ,  $3.52 \text{ Hz}$  sowie  $4.83 \text{ Hz}$  und die 1. Torsionseigenform (TEF) mit einer Frequenz

von 4.45 Hz identifiziert, siehe Abb. 4.24. Die Dämpfung nach der Bandbreitenmethode beträgt  $\zeta = 1.0 \%$  für die 1.BEF und  $\zeta = 0.6 \%$  für die 1.TEF. Diese Berechnungen basieren auf Frequenzgänge, welche durch Mittelwertbildung aus den Messaufzeichnungen der Sensoren S3 und S4 in Feldmitte bestimmt wurden, siehe Abb. 4.25. Die wesentlichen Ergebnisse der Versuche mit Schotteroberbau sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst.



(a)  $2 \times 13.91 \text{ kgm} \mid \alpha_P: 0^\circ \mid \text{AP}: 0.50^*L$  (b)  $2 \times 10.20 \text{ kgm} \mid \alpha_P: 0^\circ \mid \text{AP}: 0.50^*L$  (c)  $2 \times 13.91 \text{ kgm} \mid \alpha_P: 180^\circ \mid \text{AP}: 0.50^*L$

**Abb. 4.25:** Dämpfungsbestimmung nach der Bandbreitenmethode für (a),(b) 1.BEF und (c) 1.TEF; TW 5.3 mit Schotteroberbau



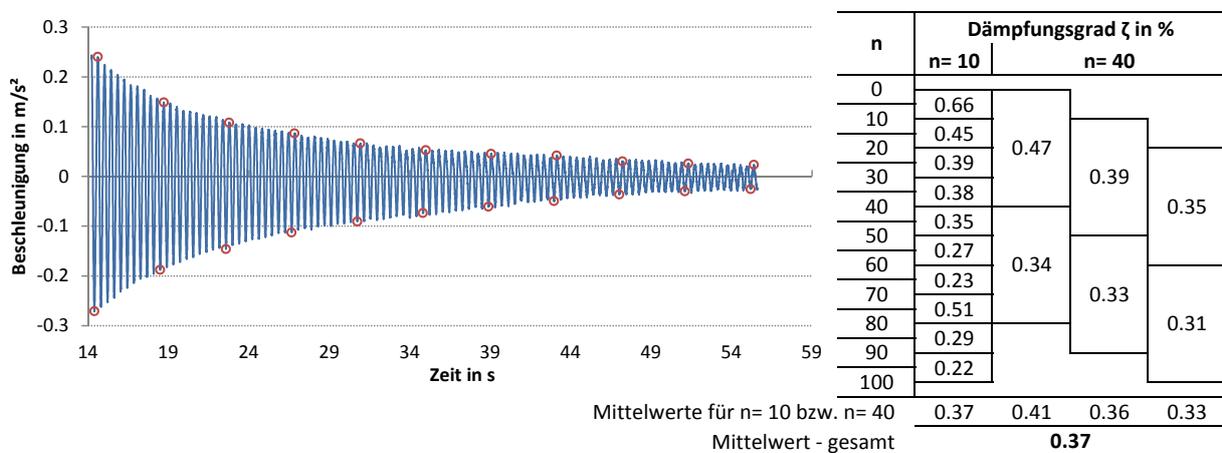
Eigenschwingungen - Tragwerk 5.3 mit Schotteroberbau

Mode	Frequenz in Hz	Dämpfungsgrad in %
1. Biegeeigenform	2.45	1.0
2. Biegeeigenform	3.52	-
1. Torsionseigenform	4.45	0.6
3. Biegeeigenform	4.83	-

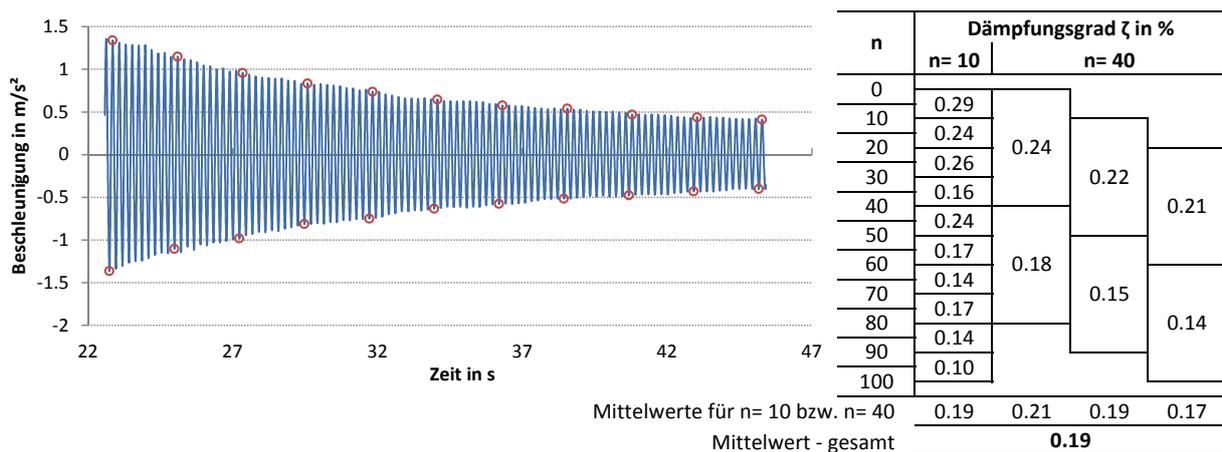
**Tab. 4.6:** Ergebnisse der Richterregermessungen

#### 4.7.4 Ausschwingversuche mit Schotteroberbau

Nach Herstellung des Schotteroberbaus erfolgte die Versuchsdurchführung mit einem statischen Moment  $m_{st} = 13.91$  kgm je Richterregger. Zur Aufzeichnung von Abklingkurven der 1.Biege- sowie Torsionseigenform wurden die Unwucherregger vor dem Freigeben der Struktur sowohl synchron ( $\alpha_P = 0^\circ$ ) als auch phasenverschoben ( $\alpha_P = 180^\circ$ ) betrieben. In Abbildung 4.26 und 4.27 sind die Messergebnisse des Sensors S3 und die Auswertungen der Abklingkurven dargestellt. Für die Berechnung der Dämpfung nach der *Logarithmische-Dekrement-Methode* wurden die ersten 100 Schwingungszyklen mit Stützstellen im Abstand von  $n = 10$  und  $n = 40$  Perioden verwendet. Bildet man hieraus den Mittelwert, liefert das eine Dämpfung  $\zeta = 0.37$  % für die 1.BEF und  $\zeta = 0.19$  % für die 1.TEF.



**Abb. 4.26:** Dämpfungsermittlung nach der *Logarithmische-Dekrement-Methode* für 1.BEF (2.45 Hz); TW 5.3 mit SOB |  $2 \times 13.91$  kgm |  $\alpha_P: 0^\circ$  | AP: 0.50\*L



**Abb. 4.27:** Dämpfungsermittlung nach der *Logarithmische-Dekrement-Methode* für 1.TEF (4.45 Hz); TW 5.3 mit SOB |  $2 \times 13.91$  kgm |  $\alpha_P: 180^\circ$  | AP: 0.25\*L

## 4.8 Zusammenfassung und Diskussion der Versuchsergebnisse

Im Fokus der dynamischen Brückenmessungen steht die Bestimmung von Eigenschwingungen, Eigenformen und Dämpfungswerte der Fahrbahnplatte, sowie die Schaffung von Grundlagen für die wirklichkeitsnahe Untersuchung vergleichbarer Tragwerke. Die Netzwerkbogenbrücken bestehen jeweils aus einem kreisförmigen Bogen, an dem über ein Netz von Hängern eine Fahrbahnplatte befestigt ist. Die Verbundplatte bildet den Obergurt der Querträger und übernimmt neben der Lastableitung zu den Querträgern zugleich eine mitwirkende Funktion als Zugband des Haupttragwerkes. Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich auf die Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Fahrbahnplatte, wodurch keine Aussagen über das Schwingungsverhalten des Gesamttragwerkes (Bögen) getroffen werden können.

Die Identifikation der Eigenschwingungen und Dämpfungen erfolgte durch die Anwendung von Schwingungsmessungen bei erzwungener Anregung durch Unwuchterreger. In den Tabellen 4.7 und 4.8 sind die Ergebnisse der Untersuchungen (Eigenschwingungen und Dämpfungen) am Tragwerk 5.1 und 5.3 für die Situation mit und ohne Schotteroberbau zusammengefasst. Bei

Tragwerk 5.1						
Eigenform	ohne Schotteroberbau			mit Schotteroberbau		
	RV		AV	RV		AV
	EF in Hz	$\zeta$ in %	$\zeta$ in %	EF in Hz	$\zeta$ in %	$\zeta$ in %
1. Biegeeigenform	- <sup>a</sup>	- <sup>a</sup>	-	2.07	1.1	0.3
2. Biegeeigenform	3.62	-	-	3.30	-	-
1. Torsionseigenform	3.80	0.5	0.2 <sup>b</sup>	3.63	0.7	0.2 <sup>b</sup>
3. Biegeeigenform	5.00	-	-	4.33	-	-

Anmerkung. RV = Resonanzversuche ; AV = Auschwingversuche ; EF = Eigenfrequenz in Hz ;  $\zeta$  = Dämpfungsgrad in % ;

<sup>a</sup>Richterregermessungen wurden für die Situation ohne SOB von 3.0 Hz bis 8.5 Hz durchgeführt. Daher konnte Eigenform und Dämpfung nicht bestimmt werden. <sup>b</sup>Dämpfungswerte gerundet auf eine Nachkommastelle

**Tab. 4.7:** Ergebnisse der Richterregermessungen für Tragwerk 5.1 mit und ohne Schotteroberbau

Tragwerk 5.3						
Eigenform	ohne Schotteroberbau			mit Schotteroberbau		
	RV		AV	RV		AV
	f [Hz]	$\zeta$ [%]	$\zeta$ [%]	f [Hz]	$\zeta$ [%]	$\zeta$ [%]
1. Biegeeigenform	2.80	- <sup>b</sup>	0.4 <sup>a</sup>	2.45	1.0	0.4 <sup>a</sup>
2. Biegeeigenform	4.20	-	-	3.52	-	-
1. Torsionseigenform	4.67	1.0	0.2 <sup>a</sup>	4.45	0.6	0.2 <sup>a</sup>
3. Biegeeigenform	5.67	-	-	4.83	-	-

Anmerkung. RV = Resonanzversuche ; AV = Auschwingversuche ; EF = Eigenfrequenz in Hz ;  $\zeta$  = Dämpfungsgrad in % ;

<sup>a</sup>Dämpfungswerte gerundet auf eine Nachkommastelle. <sup>b</sup>Untersuchung ergab keine eindeutig verwertbare Resonanzspitze aus den Richterregermessungen.

**Tab. 4.8:** Ergebnisse der Richterregermessungen für Tragwerk 5.3 mit und ohne Schotteroberbau

Brückentragwerken dieser Bauart ist die Identifikation modaler Parameter aus Richterregermessung schwierig, da sich durch die komplexe Lagerung der Versteifungsträger, die Positionierung der Unwucht am Tragwerk und die Wahl der Unwuchtmassen zahlreiche zusätzliche Randbedingungen ergeben, die das Strukturverhalten maßgeblich beeinflussen. Für die Bestimmung höherer Eigenformen sind Richterregermessungen nur bedingt geeignet, da es sehr schwierig ist, dem Tragwerk die höhere (komplexere) Schwingungsform aufzuzwingen. Die Bestimmung höherer Eigenformen (2. und 3. Torsionseigenform) mittels Richterregermessung war in der vorliegenden Untersuchung aufgrund von Überlagerungen mehrerer Eigenformen nicht eindeutig möglich.

Die Dämpfungsermittlung erfolgte einerseits nach der Bandbreitenmethode auf Basis von Richterregermessungen und andererseits mithilfe von Ausschwingversuchen und Anwendung der Logarithmisches-Dekrement-Methode. Im Hinblick auf die erhaltenen Dämpfungswerte zeigt sich, dass für die unterschiedlichen Untersuchungsmethoden eine große Streuung in den Ergebnissen zu erwarten ist. Die ermittelten Dämpfungen betragen am Beispiel des Tragwerks 5.1 mit Schotteroberbau zwischen 0.3 % und 1.1 % für die 1. Biegeeigenform sowie zwischen 0.2 % und 0.7 % für die 1. Torsionseigenform. Die plausibelsten Ergebnisse für die Dämpfungswerte konnten aus den Ausschwingvorgängen erzielt werden, da sich durch die vorangehende Anregung mit Richterregern in der ersten Biege- und Torsionseigenform sehr gut verwertbare Ausschwingvorgänge einstellten.

Aus dem Vergleich der Auswertungen für die Situationen mit und ohne Schotteroberbau kann keine eindeutige Tendenz hinsichtlich der erhaltenen Dämpfungswerte abgeleitet werden. Die Ausschwingversuche am Tragwerk 5.3 ergaben für beide Ausbaustände gleiche Dämpfungswerte (siehe Tabelle 4.8). Dabei handelt es sich allerdings um Mittelwerte, die für verschiedene Stützstellen innerhalb der ersten 100 Schwingungszyklen ermittelt wurden. Bei genauerer Betrachtung der ausgewerteten Abklingkurven des Tragwerks 5.3 mit SOB (Abb. 4.26 und 4.27) erkennt man im Vergleich zum Ausschwingverhalten ohne SOB (Abb. 4.22 und 4.23) die Tendenz eines nichtlinearen Verhaltens des Schotteroberbaus. Dieses Verhalten ist durch Abklingkurven gekennzeichnet, deren Verlauf stark von der exponentiellen Abnahme bei viskoser Dämpfung abweicht. Daraus resultiert eine nicht konstante Dämpfung, welche mit kleiner werdenden Schwingungsamplituden sinkt (siehe Abb. 4.26 und 4.27).

Die Bestimmung der Dämpfungswerte aus den Amplitudenfrequenzgängen nach der Bandbreitenmethode ist für Resonanzspitzen der ersten Biege- und Torsionseigenform geeignet. Für höhere Eigenformen ist diese Methode nicht aussagekräftig, da sich durch die komplexen Randbedingungen keine verwertbaren Resonanzspitzen einstellen. Grundsätzlich wird für die Anwendung der Bandbreitenmethode eine Schwingungsantwort vorausgesetzt, welche in Resonanz durch die zugehörige Eigenfrequenz eindeutig bestimmt wird. Hier besteht für Resonanzspitzen der ersten Biege- und Torsionseigenform das Problem, dass bei Anregungsfrequenzen knapp über und unter der Resonanzfrequenz das Tragwerk mit einer Überlagerung mehrerer Eigenformen antwortet, und daher tendenziell zu breite Resonanzspitzen ausgewertet werden. Dies ist eine mögliche Erklärung für die Tatsache, dass für die Auswertung der Richterregermessung höhere Dämpfungswerte vorliegen.

# Kapitel 5

## Zusammenfassung

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde das Programm FRF PROCESSING TOOL zur Auswertung von gemessenen Übertragungsfunktionen entwickelt. Die Anwendung ist in MATLAB programmiert und ermöglicht dem Benutzer den Auswertevorgang übersichtlich und mit minimalen Aufwand durchzuführen. Der strukturierte Aufbau des Programms wird durch die Verwendung von insgesamt elf grafischen Benutzeroberflächen (kurz GUI, Graphical User Interface) gewährleistet. Durch Aufteilung der einzelnen Arbeitsschritte in separate Bedienoberflächen wird der Benutzer intuitiv durch den Bearbeitungsvorgang geführt. Zusätzlich wird der Benutzer einerseits durch Warnhinweise bei der Eingabe von unzulässigen Parametern und andererseits durch Fortschrittsanzeigen während Berechnungsprozessen unterstützt. Die Sichtbarkeit der einzelnen Benutzeroberflächen kann über die zentrale Bedienoberfläche `FRFprocTool` gesteuert werden.

Durch die integrierte Schnittstelle können die Daten einzelner Messungen aus einem Basisverzeichnis ins Programm importiert werden. Dabei erfolgt die automatische Kennung der Anregungsfrequenz während der Richterregermessung über die Suffixe der Dateinamen. Im Rechenkern `KernalPanel` erfolgt die Dateiauswahl, die Eingabe der Messparameter und Berechnungseinstellungen. Zusätzlich kann hier die Verwendung eines Bandpassfilters zur Signalaufbereitung gewählt werden. Anschließend erfolgt die Berechnung des Amplitudenfrequenzganges aus den einzelnen Signalen der Messaufzeichnungen. Die ausgewerteten Amplitudenfrequenzgänge werden nach Beendigung des Rechenlaufs in einem eigenen Programmfenster dargestellt. Zur Kontrolle dieser Berechnung kann für jeden Amplitudenwert des Frequenzganges das zugehörige Messsignal im Zeit- und Frequenzbereich über die Benutzeroberflächen `SignalPanel` und `AmpSpecPanel` kontrolliert werden. Falls erforderlich kann hierbei die Optimierung der Signalauswertung einzelner Messungen über das Einschränken des verwendeten Zeitbereichs und durch die Anwendung eines Bandpassfilters erfolgen. Nach Überprüfung der Signalauswertung können im fertiggestellten Amplitudenfrequenzgang einzelne Resonanzspitzen markiert und Dämpfungen nach der Bandbreitenmethode bestimmt werden. Sämtliche Grafikausgaben der einzelnen Benutzeroberflächen können über entsprechende Drop-Down-Menüs wahlweise als Vektor- oder Rastergrafik exportiert werden. Zur Dokumentation der Berechnungen steht über die Benutzeroberfläche `ExportPanel` der Export von Signaldarstellungen im Zeit- und Frequenzbereich als PDF-Datei zur Verfügung. Zusätzlich können die ausgewerteten Amplitudenfrequenzgänge als MS-Excel Datei abgespeichert werden.

Der modulare Aufbau des Programms ermöglicht die Erweiterung einzelner Programmteile ohne die grundsätzliche Funktionalität der Software einzuschränken. Das im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellte Programm ist aufgrund der Gliederung in einzelnen Benutzeroberflächen übersichtlich gestaltet und ermöglicht die Auswertung von gemessenen Übertragungsfunktionen mit minimalen Zeitaufwand.

# Literaturverzeichnis

- [1] H. Axmann, H. Brunner, J. Glatzl, M. Mautner, G. Mayrhofer, T. Petraschek, H. Pircher, C. Stadler, and M. Vill. *Richtlinie für die dynamische Berechnung von Eisenbahnbrücken*. ÖBB Infrastruktur, Ausgabe: 2011-02-01, 2011.
- [2] H. Bachmann and W. J. Ammann. *Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines*. Birkhäuser Verlag, Basel, 1995.
- [3] G. Brandstetter. *Experimentelle Bestimmung der dynamischen Parameter von Eisenbahnbrücken aus Stahl mit Schotteroberbau mittels Output Only Analyse*. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2012.
- [4] A. K. Chopra. *Dynamics of structures*. Prentice Hall, Pearson, 2012.
- [5] R. W. Clough and J. Penzien. *Dynamics of structures*. Computers & Structures, 1995.
- [6] R. R. Craig and A. J. Kurdila. *Fundamentals of Structural Dynamics*. John Wiley & Sons, 2006.
- [7] D. J. Ewins. *Modal Testing. Theory, practice and application*. Research Studies Press LTD, 2000.
- [8] R. Flesch and H. Pacht. *Baudynamik: Praxisgerecht, Band 1: Berechnungsgrundlagen*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1993.
- [9] R. Freymann. *Strukturodynamik: Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch*. Springer-Verlag, 2011.
- [10] L. Fryba. *Dynamics of Railway Bridges*. Thomas Telford, 1996.
- [11] R. Gasch, K. Knothe, and R. Liebich. *Strukturodynamik: Diskrete Systeme und Kontinua*. Springer-Verlag, 2012.
- [12] R. Geier. *Brückendynamik: Schwingungsuntersuchungen von Schrägseilen*. Books on Demand, Norderstedt, 2004.
- [13] C. Handel. *Richtlinie - Dynamische Messung von Eisenbahnbrücken*. Arsenal research, Giefinggasse 2, 1210 Wien, 2007.
- [14] M. Heinlein and O. Einhäuser. Netzwerkbogenbrücken der ÖBB über den Zentralverschiebebahnhof Wien-Kledering, Österreich: Statisch konstruktive Planung der Brücken. *Stahlbau*, 82(5):334–339. doi: 10.1002/stab.201310046, 2013.
- [15] R. Heuer and C. Bucher. Mitschrift und Studienblätter zur Vorlesung Baudynamik, 2012.
- [16] J. Kirchhofer. *Beitrag zur vertiefenden Beschreibung des dynamischen Verhaltens von Eisenbahnbrücken mit Schotteroberbau*. Dissertation. Technische Universität Wien, 2012.

- 
- [17] H. Kramer. *Angewandte Baudynamik: Grundlagen und Praxisbeispiele*. John Wiley & Sohn, 2013.
- [18] T. Kuttner. *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik*. Springer-Verlag, 2015.
- [19] C. S. Lent. *Learning to Program with MATLAB: Building GUI Tools*. John Wiley & Sons, 2013.
- [20] K. Magnus, K. Popp, and W. Sextro. *Schwingungen: physikalische Grundlagen und mathematische Behandlung von Schwingungen*. Springer-Verlag, 2013.
- [21] R. Mahnken. *Lehrbuch der technischen Mechanik - Dynamik: Eine anschauliche Einführung*. Springer-Verlag, 2012.
- [22] K. Meskouris. *Moderne Baudynamik: Modelle, Methoden, Praxisbeispiele*. Ernst & Sohn Verlag, 1999.
- [23] H.-G. Natke. *Baudynamik: Einführung in die Dynamik mit Anwendungen aus dem Bauwesen*. Springer-Verlag, 2013.
- [24] H. G. Natke. *Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse: Identifikation schwingungsfähiger elastomechanischer Systeme*. Springer-Verlag, 2013.
- [25] C. Petersen. *Dynamik der Baukonstruktionen*. Springer-Verlag, 2013.
- [26] W. Schweizer. *MATLAB kompakt: MATLAB and Simulink® examples*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, München, 2013.
- [27] W. Sextro, K. Popp, and K. Magnus. *Schwingungen: Eine Einführung in physikalische Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen*, 2013.
- [28] S. T. Smith. *MATLAB: Advanced GUI Development*. Dog Ear Publishing, Indianapolis, 2006.
- [29] B. Stelzer and G. Dorrer. *Zwei Netzwerkbogenbrücken: Verbindung zwischen Ostbahn und Flughafenschnellbahn in Wien, Österreich: Besonderheiten aus Sicht des Stahlbauers*. *Stahlbau*, 82(5):326–333. doi: 10.1002/stab.201310051, 2013.
- [30] L. Stempniewski and B. Haag. *Baudynamik-Praxis: Mit zahlreichen Anwendungsbeispielen*. Bauwerk Verlag, 2010.
- [31] S. Vöth. *Dynamik schwingungsfähiger Systeme: Von der Modellbildung bis zur Betriebsfestigkeitsrechnung mit MATLAB/SIMULINK®*. Studium Technik. Vieweg, Wiesbaden, 2006.
- [32] B. Weber. *Tragwerksdynamik*. Vorlesungsunterlage. Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, 2002.
- [33] F. Ziegler. *Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper*. Springer-Verlag, 2013.