

BACHELORARBEIT

Experimentelle und modellbasierte Untersuchung eines vibroakustischen Messverfahrens zur Bestimmung der Kraftstoffmenge in kryogenen Was- serstofftanks für Flugzeuge

Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

vorgelegt am 25. Februar 2025
Valentin Weinig

Betreuer: M.Sc. Adrian Winter
Erstprüfer: Prof. Dr. Kay Kochan
Zweitprüfer: Prof. Dr. Thomas Netzel

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**
Department
Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht experimentell und modellbasiert ein vibroakustisches Messverfahren zur Bestimmung der Kraftstoffmenge in kryogenen Wasserstofftanks für Flugzeuge. Flüssiger Wasserstoff (LH2) hat das Potenzial in zukünftigen Flugzeugen als klimaneutraler Treibstoff eingesetzt zu werden. Die präzise Messung des Füllstandes stellt jedoch eine technologische Herausforderung dar, da herkömmliche Methoden unter den extremen thermodynamischen Bedingungen von LH2 an ihre Grenzen stoßen. In dieser Arbeit wird ein nicht-invasives vibroakustisches Verfahren analysiert, das auf der Messung der strukturellen Resonanzfrequenzen des Tanks basiert. Hierzu werden numerische Simulationen in COMSOL multiphysics durchgeführt, um die Wechselwirkungen zwischen der Tankstruktur und dem eingefüllten Medium zu modellieren. Ergänzend dazu werden experimentelle Untersuchungen an einem Testaufbau mit verschiedenen Füllständen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Korrelation zwischen der Füllmenge und der Verschiebung der Resonanzfrequenzen.

Abstract

This thesis presents an experimental and model-based investigation of a vibroacoustic measurement method for determining the fuel quantity in cryogenic hydrogen tanks for aircrafts. Liquid hydrogen (LH2) is a promising zero-emission energy carrier for future aviation. However, precise fuel level measurement is a significant technological challenge, since conventional methods are limited under the extreme thermodynamic conditions of LH2. This study analyzes a non-invasive vibroacoustic approach that relies on measuring the structural resonance frequencies of the tank. Numerical simulations using COMSOL Multiphysics are conducted to model the interactions between the tank structure and the contained fluid. In addition, experimental investigations are performed on a test setup with varying fill levels. The results demonstrate a clear correlation between the fuel level and the shift in resonance frequencies.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
Liste der Symbole	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Luftfahrtforschungsprojekt PRECISE	2
2 Stand der Technik	3
2.1 Messmethoden zur Bestimmung von Fluidmassen	3
2.2 Eigenschaften von Tanksystemen, Tank Designs und herkömmlicher Luftfahrtkraftstoffe	6
2.3 Eigenschaften von Wasserstoff	9
2.4 Patente zur vibroakustischen Füllstandsmessung	12
2.5 Vorherige Arbeiten zur modellbasierten Untersuchung vibroakustischer Füllstandsmessungen	13
3 Theoretische Grundlagen	15
3.1 Messprinzip der vibroakustischen Füllstandsmessung	23
4 Numerische Modellbildung	25
4.1 Tankmodell	26
5 Experimentelle Validierung	29
5.1 Ziele und Methoden einer experimentellen Validierung	29
5.2 Messreihen	30
6 Auswertung	33
6.1 Auswertemethode 1: Frequenzgang	34
6.2 Auswertemethode 2: Impulsantwort	37

6.3	Vergleich der Auswerteverfahren	41
6.4	Simulation mit LH2 und GH2	42
7	Zusammenfassung	46
8	Ausblick	48
	Literatur	50
	Anhang	53

Abbildungsverzeichnis

2.1	invasive Messverfahren	3
2.2	Querschnitt eines kapazitiven Rohrsensors.	4
2.3	nicht invasive Messverfahren	5
2.4	Funktionen des Kraftstoffsystems nach ATA Kapitel 28	6
2.5	Kraftstofftanks in konventionellen Flugzeugkonfigurationen	7
2.6	Schematische Darstellung der Ausdehnungsrate von Wasserstoff	11
2.7	Wasserstofftankkonfiguration im hinteren Rumpfsegment	12
2.8	Schematische Darstellung des vibroakustischen Messverfahrens	13
3.1	gedämpftes Feder-Masse-System	15
3.2	Einfluss der Masse auf die Frequenzantwort eines Einmassenschwingers	20
3.3	Einfluss der Dämpfung auf die Frequenzantwort eines Einmassenschwingers	21
3.4	Schematische Darstellung der Fourier Transformation	21
3.5	Einfluss der Masse auf Antwort im Zeitbereich	22
3.6	Einfluss der Dämpfung auf die Antwort im Zeitbereich	23
4.1	3D Tankmodell aus COMSOL multiphysics. Frontansicht links und Seitenansicht rechts.	26
4.2	physikalischen Eigenschaften des Tanks in der Simulation	27
5.1	Seitenansicht des Tanks im Gestell mit Wasser	32
6.1	Experimentelle Daten aus den fünf Messdurchläufen für den leeren Tank	33
6.2	experimentelle Daten für alle Füllstände	34
6.3	simulative Daten für alle Füllstände	34
6.4	Resonanzfrequenzverschiebung für die 1. und 2. Resonanzstelle	36
6.5	Impulsantwort aus den Simulationsdaten	38
6.6	Impulsantwort aus den experimentellen Daten	38
6.7	abfallende Kurve aus den experimentellen Daten	40
6.8	abfallende Kurve aus den Simulationsdaten	40
6.9	Simulationsdaten für den leeren und 10% Füllung Tank mit LH2 und GH2	43
6.10	Impulsantwort aus den Simulationsdaten für Wasserstoff	44
6.11	abfallende Kurve für Wasserstoff	44

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich von Integral Tanks und Nicht-Integral Tanks	8
2.2	Eigenschaften von Flugkraftstoffen aus dem konventionellen Betrieb	9
2.3	Eigenschaften Wasserstoff im Vergleich mit Wasser und Luft	10
4.1	Eigenschaften der Materialien und Fluide	28
5.1	verwendete Messtechnik und Tools	31
6.1	Ergebnisse der Peak-Picking-Methode für die Simulation und Experiment	35
6.2	generische Gleichungen für die Resonanzfrequenzverschiebung	37
6.3	Ergebnisse aus den abfallenden Kurven für die Simulation und Experiment	39
6.4	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	41
6.5	Materialeigenschaften von LH2 und GH2	43
6.6	Ergebnisse der Auswertung für LH2 und GH2	45
1	Messdaten und Auswertungsskripte	53

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
H ₂ O	Wasser
ARINC	Aeronautical Radio Incorporated
LuFo	Luftfahrtforschungsprojekt
ATA	Air Transport Association
AVGAS	Aviation Gasoline
CS	Certification Specification
LH ₂	Liquid Hydrogen
GH ₂	Gaseous Hydrogen
Abb	Abbildung
Tab	Tabelle
Gl	Gleichung

Liste der Symbole

Symbol	Bedeutung
p_0	Referenzdruck
ρ	Dichte
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
$F(t)$	Erregerkraft
$F'(t)$	Antwort
F	Kraft in Newton
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
i_1	spezifische Gravität Luft
i_2	spezifische Gravität Wasser
F_{Feder}	Federkraft
k	Federsteifigkeit
x	Auslenkung
$F_{\text{Dämpfer}}$	Dämpferkraft
c	Dämpfungskonstante
\dot{x}	Geschwindigkeit
F_0	Amplitude der Kraft
\cos	Cosinus
Ω	Kreisfrequenz der Anregung
t	Zeit
\ddot{x}	Beschleunigung
x_h	Lösung der homogenen Gleichung
x_p	Partikularlösung
\hat{x}	Amplitude der Auslenkung
e	Eulerzahl

D	Dämpfungsgrad
ω_0	Eigenkreisfrequenz
ϕ_0	Phasenwinkel
\hat{x}_c	Amplitude der Kosinusschwingung
\hat{x}_s	Amplitude der Sinusschwingung
\ddot{q}	Beschleunigung der Nennform
\dot{q}	Geschwindigkeit der Nennform
q	Auslenkung der Nennform
\hat{u}	Amplitude der Anregung
\ddot{z}	komplexe Beschleunigung
\dot{z}	komplexe Geschwindigkeit
z	komplexe Auslenkung
j	komplexes Argument
\hat{z}_p	komplexe Amplitude der Partikularlösung
\hat{z}	komplexe Amplitude \hat{F} Amplitude der Erregungskraft
\hat{F}/c	statisches Auslenkungsverhältnis
$G(j)$	komplexer Frequenzgang
$F(\Omega)$	Kraftanregung im Frequenzbereich
$G(t)$	komplexer Frequenzgang im Zeitbereich
$G(\Omega)$	komplexer Frequenzgang im Frequenzbereich
$X_p(\Omega)$	komplexe Antwort im Frequenzbereich
π	Kreiszahl
d_a	äußerer Durchmesser des Tanks
d_i	innerer Durchmesser des Tanks
a	Beschleunigung
l	Länge des Tanks
h_{fill}	Füllhöhe im Tank
V	Gesamtvolumen des Tanks
ν	Querkontraktionszahl
E_{XT}	E-Modul von Plexiglas XT
η	Isotropischer Verlustfaktor
$\eta_{d,\text{H}_2\text{O}}$	dynamische Viskosität von Wasser
η_{d,LH_2}	dynamische Viskosität von flüssigem Wasserstoff

η_{d,GH_2}	dynamische Viskosität von gasförmigem Wasserstoff
η_{b,H_2O}	Bulk Viskosität von Wasser
ρ_{H_2O}	Dichte von Wasser
c_{H_2O}	Schallgeschwindigkeit in Wasser
c_{LH_2}	Schallgeschwindigkeit in flüssigem Wasserstoff
c_{GH_2}	Schallgeschwindigkeit in gasförmigem Wasserstoff
k_{H_2O}	Wärmeleitfähigkeit von Wasser
C_{p,H_2O}	Wärmekapazität von Wasser
γ_{Luft}	Isentropenexponent von Wasser
γ_{LH_2}	Isentropenexponent von flüssigem Wasserstoff
γ_{GH_2}	Isentropenexponent von gasförmigem Wasserstoff
$\eta_{d,Luft}$	dynamische Viskosität von Luft
$\eta_{b,Luft}$	Bulk Viskosität von Luft
ρ_{Luft}	Dichte von Luft
c_{Luft}	Schallgeschwindigkeit in Luft
k_{Luft}	Wärmeleitfähigkeit von Luft
k_{LH_2}	Wärmeleitfähigkeit von flüssigem Wasserstoff
k_{GH_2}	Wärmeleitfähigkeit von gasförmigem Wasserstoff
$C_{p,Luft}$	Wärmekapazität von Luft
C_{p,LH_2}	Wärmekapazität von flüssigem Wasserstoff
C_{p,GH_2}	Wärmekapazität von gasförmigem Wasserstoff
γ_{H_2O}	Isentropenexponent von Luft
R^2	Bestimmtheitsmaß
S	Sensitivität

1 Einleitung

Die Luftfahrtindustrie muss sich einigen Herausforderungen stellen, um ihren Beitrag zum Klimawandel zu reduzieren und die Ziele des Green Deals der Vereinten Nationen zu erreichen, der eine klimaneutrale Zukunft anstrebt. Die Entwicklung neuer Technologien, die den Übergang zu emissionsarmen oder emissionsfreien Antriebssystemen ermöglichen, spielt dabei eine wesentliche Rolle. Wasserstoff ist ein vielversprechender Energieträger, da bei seiner Verbrennung keine CO₂-Emissionen freigesetzt werden und er im kryogenen Zustand eine hohe gravimetrische Energiedichte aufweist. Insbesondere im Luftfahrtsektor, wo Gewicht und Energieeffizienz von entscheidender Bedeutung sind, könnte Wasserstoff ein vielversprechender Energieträger sein [1].

1.1 Motivation

Für den sicheren und effizienten Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff in zukünftigen Flugzeugen sind innovative Technologien erforderlich, um den Betrieb der kryogenen Tanks präzise zu überwachen. Die exakte Bestimmung der Kraftstoffmasse, sowohl in gegenwärtigen als auch in zukünftigen Flugzeugen, wird dabei eine entscheidende Rolle spielen. Jede zusätzliche Masse, die transportiert wird, hat einen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch des Flugzeugs. Die Bestimmung der Kraftstoffmenge in kryogenen Wasserstofftanks stellt eine technologische Herausforderung dar, da die niedrigen Temperaturen von flüssigem Wasserstoff (13.9K – 33.18K) und die physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffs herkömmliche Messtechniken aus der Luftfahrt an ihre Grenzen bringen. Die genaue Bestimmung der Kraftstoffmenge ist jedoch von entscheidender Bedeutung, um den sicheren Betrieb und die Reichweite der Flugzeuge zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang wird von der Aeronautical Radio Incorporated (ARINC) ein Standard für Messtechnik gefordert, der die Kraftstoffmenge bestimmt. Gemäß dem ARINC611-Standard ist eine Messgenauigkeit von mindestens 1% erforderlich [2].

In der vorliegenden Arbeit wird die experimentelle und modellbasierte Untersuchung eines vibroakustischen Messverfahrens erörtert, das im Rahmen des Luftfahrtforschungsprojekts PRECISE entwickelt wird und dazu dient, die Kraftstoffmenge in zukünftigen Flugzeugen zu

bestimmen. Im Vergleich zu herkömmlichen Messtechniken zeichnet sich diese Messmethode durch ihren nicht-invasiven Charakter aus, was bedeutet, dass sämtliche Messtechnik außerhalb des Tanks operiert. Dies ist insbesondere im Hinblick auf kryogene Tanks von Relevanz, da eine Tankwanddurchführung sowie die Notwendigkeit einer Wartung des Tanks vermieden werden können. Die vorliegende Arbeit trägt zur Entwicklung sicherer und effizienter Messtechnik für den Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt bei [3].

1.2 Luftfahrtforschungsprojekt PRECISE

Das Luftfahrtforschungsprojekt (LuFo) PRECISE, welches von 2023 bis 2026 durchgeführt wird, fokussiert sich auf die Erforschung und Entwicklung innovativer Sensorsysteme für kryogene Wasserstofftanks in der Luftfahrt. Die Zielsetzung von PRECISE umfasst mehrere Aspekte, die eine umfassende Herangehensweise an die Entwicklung eines zulassungsfähigen Sensorsystems für kryogene Wasserstofftanks beinhalten. Eine zentrale Aufgabe des Projekts besteht in der Identifizierung der Anforderungen, die an ein Sensorsystem gestellt werden, das für den Einsatz in kryogenen Wasserstofftanks geeignet ist. Dabei wird der Fokus auf die Gewährleistung der Zulassungsfähigkeit gelegt, um die Erfüllung der strengen Vorschriften der Luftfahrtindustrie sicherzustellen. Ein weiteres Ziel besteht in der Entwicklung von Modellen, die das Verhalten der Sensortechnologie in kryogenen Wasserstofftanks während verschiedener Betriebsphasen prognostizieren können. Diese Modelle sollen die komplexen thermodynamischen und mechanischen Bedingungen in Wasserstofftanks abbilden und die Grundlage für Designentscheidungen und Optimierungen liefern. Im Rahmen des Projekts werden Prototypen von Sensoren entwickelt und gefertigt, die die im Projekt erarbeiteten Anforderungen und Modellvorhersagen umsetzen. Diese Prototypen dienen sowohl als Prüfobjekte für experimentelle Untersuchungen als auch als Grundlage für die Weiterentwicklung hin zu marktfähigen Produkten. Ein weiterer Fokus des Projekts liegt auf der Analyse und Bewertung der ökologischen Auswirkungen der verschiedenen Sensorkonzepte. Dies umfasst die Auswahl umweltfreundlicher Materialien und Herstellungsverfahren sowie die Betrachtung des Lebenszyklus der Technologien [4].

2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden die aktuell genutzten Messmethoden zur Füllstandserfassung mit ihren jeweiligen Einsatzgebieten dargestellt. Dabei wird zwischen invasiven und nicht-invasiven Verfahren unterschieden. Des Weiteren werden ausgewählte Eigenschaften von Flüssigwasserstoff vorgestellt und die Herausforderungen aufgezeigt, die sich aus dessen Einsatz in zukünftigen Flugzeugkonfigurationen ergeben.

2.1 Messmethoden zur Bestimmung von Fluidmassen

Die Ermittlung der Fluidmasse in Tanks ist von signifikanter Relevanz für die Luft- und Raumfahrt, um eine präzise Überwachung des Treibstoffvorrats zu gewährleisten und die Sicherheit sowie Effizienz von Missionen zu gewährleisten. Zu diesem Zweck werden verschiedene invasive Messverfahren eingesetzt [4].

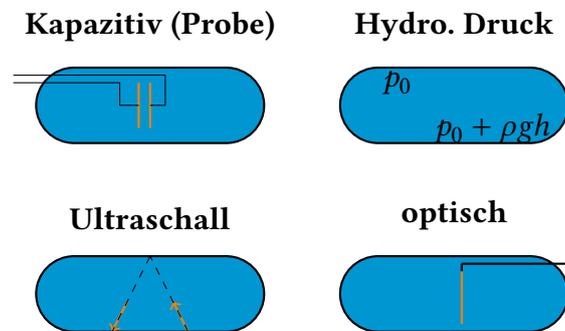


Abbildung 2.1: invasive Messverfahren

Das kapazitive Messverfahren nutzt die Änderung der elektrischen Kapazität zur Bestimmung des Füllstands eines Fluids. Hierbei wird ein Kondensator in den Behälter integriert, vgl. Abb. 2.2, dessen Kapazität von der Dielektrizitätskonstante des umgebenden Mediums abhängt. Da Flüssigkeiten und Gase unterschiedliche Dielektrizitätskonstanten aufweisen, führt eine

Veränderung des Füllstands zu einer messbaren Kapazitätsänderung. Durch Kalibrierung kann somit der genaue Füllstand und in Kombination mit bekannten Behältergeometrien die Fluidmasse und Dichte ermittelt werden. In der Luftfahrt wird dieses Verfahren aufgrund seiner hohen Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit eingesetzt, um den Treibstoffstand in Tanks präzise zu überwachen [4].

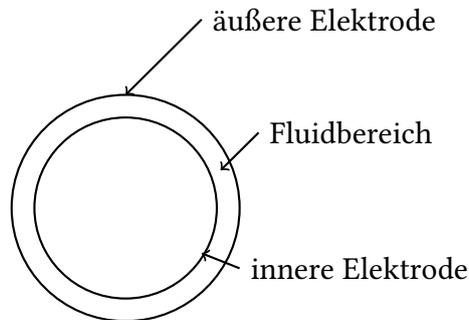


Abbildung 2.2: Querschnitt eines kapazitiven Rohrsensors.

Das ultraschallbasierte Messverfahren, vgl. Abb. 2.1, basiert auf der Laufzeitmessung von Ultraschallwellen, die im Behälter ausgesendet und reflektiert werden. Ein Ultraschallsensor sendet Schallwellen aus, die an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Gas reflektiert werden. Die Zeit, die der Schall für den Hin- und Rückweg benötigt, ist proportional zur Entfernung der Grenzfläche vom Sensor. Durch Kenntnis der Schallgeschwindigkeit im Medium kann der Füllstand bestimmt werden. Dieses Verfahren ist berührungslos und eignet sich daher für Anwendungen, bei denen eine Kontamination des Fluids vermieden werden muss. In der Raumfahrt wird es beispielsweise zur Überwachung von Flüssigkeitsständen in schwer zugänglichen oder hermetisch abgeschlossenen Tanks eingesetzt [5].

Optische Messverfahren, vgl. Abb. 2.1, nutzen die Wechselwirkung von Licht mit dem Fluid zur Bestimmung des Füllstands. Ein häufig eingesetztes Prinzip ist die Totalreflexion: Ein Lichtstrahl wird in einen transparenten Stab eingekoppelt, der in den Behälter ragt. Trifft der Lichtstrahl auf die Grenzfläche zwischen Stab und Fluid, ändert sich der Reflexionsgrad in Abhängigkeit vom Brechungsindex des Fluids. Durch Detektion des reflektierten Lichts kann somit der Füllstand ermittelt werden. Optische Verfahren zeichnen sich durch ihre hohe Präzision und schnelle Ansprechzeit aus und werden in der Luftfahrt zur Überwachung von Flüssigkeitsständen in verschiedenen Systemen eingesetzt [6].

Das druckbasierte Messverfahren, vgl. Abb. 2.1, nutzt den hydrostatischen Druck, der durch die Flüssigkeitssäule im Behälter erzeugt wird. Ein Drucksensor wird am Boden des Behälters installiert und misst den Druck, der proportional zur Höhe der Flüssigkeitssäule ist. Unter

Berücksichtigung der Dichte des Fluids kann somit der Füllstand und die gesamte Fluidmasse berechnet werden [7].

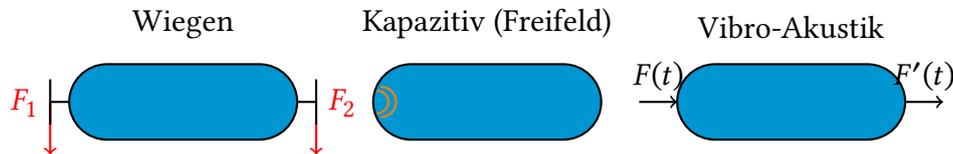


Abbildung 2.3: nicht invasive Messverfahren

Das Wiegeverfahren, vgl. Abb. 2.3, basiert auf der Messung des Gesamtgewichts eines Tanksystems, um die Fluidmasse zu bestimmen. Dabei wird die Masse des Behälters und des enthaltenen Fluids mithilfe von präzisen Wägezellen erfasst. Anschließend wird durch Abzug des bekannten Eigengewichts des Tanksystems die Masse des Fluids berechnet. Wägezellen messen die durch das Gewicht verursachte mechanische Deformation. Diese Deformation wird in ein elektrisches Signal umgewandelt, das proportional zur aufgebrachten Last ist. Hochpräzise Sensoren können hierbei auch kleinste Gewichtsänderungen erfassen [8].

Die kapazitive Freifeldmessung, vgl. Abb. 2.3, ist ein weiteres nicht-invasives Verfahren, das auf die Unterschiede in den dielektrischen Eigenschaften zwischen Flüssigkeiten und Gasen zurückgreift. Im Gegensatz zu invasiven kapazitiven Sonden wird bei dieser Methode ein elektrisches Feld um die Außenseite des Behälters herum erzeugt, ohne direkten Kontakt mit dem Fluid. Die kapazitive Freifeldmessung eignet sich besonders für Tanksysteme, bei denen eine berührungslose Überwachung erforderlich ist, wie etwa bei kryogenen Treibstoffen oder aggressiven Chemikalien. Das Verfahren ist unempfindlich gegenüber der Schwerkraftverteilung, was es für Anwendungen in der Schwerelosigkeit prädestiniert [9].

Das Verfahren, welches in dieser Arbeit untersucht wird, ist das vibroakustische Verfahren, vgl. Abb 2.3. Dabei muss unterschieden werden in aktive¹- und passive² Vibro-Akustische Verfahren. In dieser Arbeit wird das aktive Vibro-Akustische Verfahren untersucht. Es zählt zu den nicht invasiven Verfahren und bietet einige Vorteile gegenüber invasiven Verfahren [10].

¹Das aktive Verfahren beinhaltet bspw. einen elektrodynamischen Shaker, der mithilfe eines Signalgenerators angeregt wird.

²Das passive Verfahren nutzt bspw. externe Schallquellen wie Turbinengeräusche, um den Tank zu Schwingungen anzuregen.

2.2 Eigenschaften von Tanksystemen, Tank Designs und herkömmlicher Luftfahrkraftstoffe

Das Kraftstoffsystem eines Flugzeugs umfasst gemäß Air Transport Auxiliary (ATA)-28 alle wesentlichen Komponenten, die für die sichere und effiziente Lagerung, Verteilung, Entsorgung sowie Überwachung des Kraftstoffs erforderlich sind, vgl. Abb. 2.4 [11].

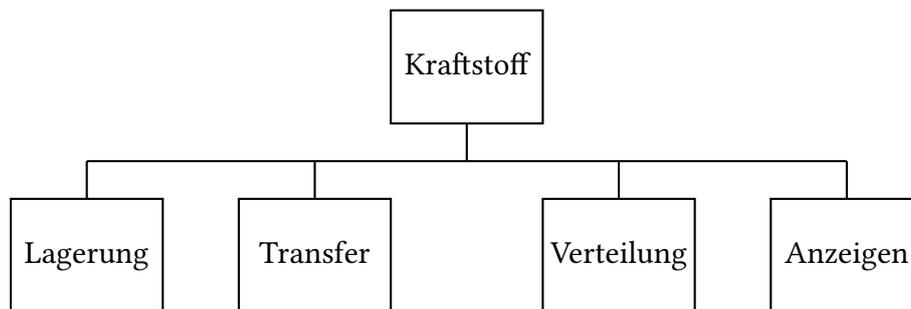


Abbildung 2.4: Funktionen des Kraftstoffsystems nach ATA Kapitel 28

Ein zentraler Bestandteil des Systems ist die Kraftstoffaufbewahrung. Diese umfasst die Tanks, vgl. Abb. 2.5, sowie Komponenten zur Tankbelüftung, die Oberflügelbetankungsstützen und die Verschlüsse. Die ordnungsgemäße Speicherung des Kraftstoffs in den Tanks gewährleistet nicht nur die strukturelle Stabilität des Flugzeugs, sondern auch den sicheren Betrieb unter unterschiedlichen Flugbedingungen [12].

Ebenso bedeutend ist die Kraftstoffverteilung. Diese Funktion wird durch eine Reihe von Bauelementen ermöglicht, die den Transport des Kraftstoffs zwischen verschiedenen Komponenten des Systems sicherstellen. Dazu gehören Rohrleitungen, Pumpen, Ventile sowie Bedienelemente. Für Notfälle oder andere besondere Betriebsbedingungen ist das System mit einer Einrichtung zum Kraftstoffschnellablassen ausgestattet. Diese Komponente ermöglicht es, im Bedarfsfall überschüssigen Kraftstoff während des Fluges sicher abzulassen, um beispielsweise das Landegewicht zu reduzieren. Abschließend enthält das Kraftstoffsystem auch Komponenten zur Anzeige von Kraftstoffparametern. Diese Bauelemente dienen der Überwachung und Steuerung des Kraftstoffs, indem sie wichtige Parameter wie Menge, Temperatur und Druck des Kraftstoffs anzeigen. Diese Informationen sind für die Flugbesatzung unerlässlich, um den Betrieb des Flugzeugs effizient und sicher zu überwachen [13].

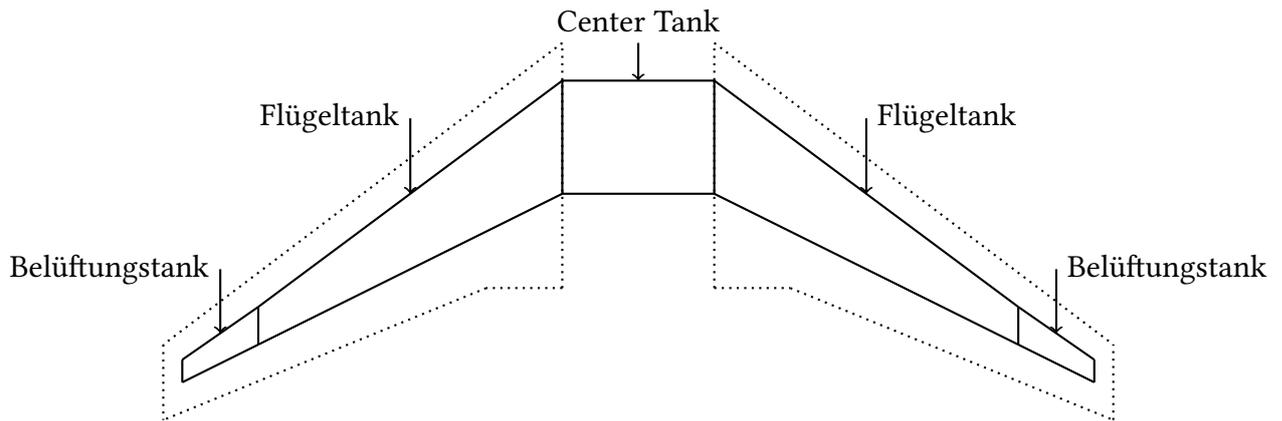


Abbildung 2.5: Kraftstofftanks in konventionellen Flugzeugkonfigurationen

Im Bezug auf das Tank Design muss in Integral Tanks und Nicht-Integral Tanks unterschieden werden, vgl. Tab. 2.1. Integral Tanks, auch strukturintegrierte Tanks genannt, sind ein fester Bestandteil der Flugzeugstruktur. Dabei werden Hohlräume in tragenden Strukturelementen, wie den Flügeln oder dem Rumpf, direkt als Kraftstoffbehälter genutzt. Die Struktur des Tanks übernimmt somit sowohl die Lastaufnahme als auch die Funktion der Kraftstoffspeicherung [12], [13].

Integral-Tanks weisen mehrere charakteristische Eigenschaften auf. Eine ihrer größten Vorteile ist die Raumeffizienz, da sie keinen separaten Tank benötigen und somit den nutzbaren Raum des Flugzeugs maximieren. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Gewichtsersparnis, da die Tankstruktur direkt in die Flugzeugstruktur integriert ist und somit das zusätzliche Gewicht eines eigenständigen Tanks entfällt. Allerdings bringt diese Bauweise auch Herausforderungen mit sich, insbesondere in Bezug auf die Wartungskomplexität. Reparaturen und Inspektionen gestalten sich schwieriger, da der Tank fest in die Struktur integriert ist, was vor allem bei Leckagen oder strukturellen Schäden problematisch sein kann. Zudem ist eine sorgfältige Dichtekontrolle erforderlich, da der Tank zuverlässig abgedichtet sein muss, um ein Auslaufen zu verhindern und strukturelle Schäden durch Korrosion auszuschließen [12], [13].

Nicht-Integral Tanks, auch strukturunabhängige Tanks genannt, sind eigenständige Behälter, die in das Flugzeug eingebaut, jedoch nicht Teil der tragenden Struktur sind. Sie können abnehmbar oder fest eingebaut sein und werden oft in kleineren oder speziellen Flugzeugen verwendet [12], [13].

Nicht-Integral-Tanks zeichnen sich durch mehrere spezifische Eigenschaften aus. Ein entscheidender Vorteil ist ihre Flexibilität, da sie je nach Bedarf entfernt oder ausgetauscht werden

können. Dies ist besonders nützlich für spezielle Missionen oder wenn Wartungsarbeiten durchgeführt werden müssen. Zudem erleichtert die Bauweise die Wartung, da der Tank nicht in die Flugzeugstruktur integriert ist. Dadurch sind Inspektionen, Reparaturen und ein Austausch unkomplizierter möglich. Allerdings bringen Nicht-Integral-Tanks auch Nachteile mit sich. Einer davon ist der Gewichtsachteil, da separate Tanks das Gesamtgewicht des Flugzeugs erhöhen, was wiederum die Nutzlast und Effizienz beeinträchtigen kann [12], [13].

Tabelle 2.1: Vergleich von Integral Tanks und Nicht-Integral Tanks

Merkmal	Integral Tanks	Nicht-Integral Tanks
Raumnutzung	sehr effizient	limitiert
Wartung	aufwendig	einfach
Gewicht	gering	hoch durch zusätzliche Struktur
Bauweise	Teil der Flugzeugstruktur	separater Behälter

In Tab. 2.2 sind typische physikalische Größen von konventionellen Kraftstoffen auf Erdölbasis aufgeführt. Der Flammpunkt ist eine wesentliche sicherheitstechnische Eigenschaft von Kraftstoffen, die angibt, bei welcher Temperatur sich die Dämpfe eines Kraftstoffs in Gegenwart einer Zündquelle entzünden können. Durch den relativ hohen Flammpunkt von JET A1, vgl. Tab. 2.2, ist dieser Kraftstoff bei normalen Umgebungstemperaturen und Druckverhältnissen als vergleichsweise sicherer Kraftstoff einzustufen. Erst bei höheren Temperaturen besteht die Gefahr einer Selbstentzündung, was im Betrieb berücksichtigt werden muss. Die Unterschiede im Flammpunkt zwischen JET A1 und AVGAS 100LL sind auf die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der beiden Kraftstoffe zurückzuführen. JET A1 enthält längerkettige Kohlenwasserstoffe, die schwerer verdampfen und somit erst bei höheren Temperaturen zündfähige Dämpfe bilden. AVGAS hingegen besteht aus leichteren, kurzkettigen Kohlenwasserstoffen, die eine wesentlich höhere Flüchtigkeit aufweisen und somit auch bei niedrigeren Temperaturen zur Zündung neigen. In der Luftfahrt hat der Flammpunkt eine besondere Bedeutung für die Sicherheitsvorgaben. Kraftstoffe mit einem höheren Flammpunkt wie JET A1 bieten ein geringeres Brandrisiko während des Betankens und der Lagerung. Allerdings sind auch hier technische Maßnahmen wie die Belüftung der Tanks und die Minimierung von Funkenquellen essenziell, um mögliche Brand- oder Explosionsgefahren zu vermeiden [14], [15].

Tabelle 2.2: Eigenschaften von Flugkraftstoffen aus dem konventionellen Betrieb

	AVGAS 100LL (Flugbenzin)	JET A1 (Kerosin)
Heizwert	42.5 MJ/kg	43.5 MJ/kg
Dichte	720 kg/m ³	810 kg/m ³
Dampfdruck	500 hPa	10 hPa
Flammpunkt	-40 °C	38 °C

Der Heizwert eines Kraftstoffs gibt die Energiemenge an, die pro Masseneinheit bei vollständiger Verbrennung freigesetzt wird. Dabei wird dieser Wert auch als spezifischer Energiegehalt oder spezifische Wärmekapazität bezeichnet und spielt eine entscheidende Rolle für die Effizienz und Leistung eines Antriebssystems. Je höher der Heizwert, desto mehr Energie kann aus einer bestimmten Menge des Kraftstoffs gewonnen werden [13].

Der Dampfdruck ist eine weitere wichtige physikalische Größe von Luftfahrtkraftstoffen. Der Dampfdruck gibt an, bei welcher Temperatur und welchem Druck ein Stoff beginnt, in den gasförmigen Zustand überzugehen. Kraftstoffe mit einem hohen Dampfdruck neigen stärker dazu, bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen zu verdampfen. Dies erhöht das Risiko der Blasenbildung im Kraftstoffsystem, insbesondere bei hohen Umgebungstemperaturen oder bei niedrigen Drücken, wie sie in großen Flughöhen auftreten können. Dieser Prozess führt zur Bildung von Gasblasen im Kraftstoffsystem, was die Zufuhr des Kraftstoffs zu den Triebwerken erheblich stören oder sogar vollständig unterbrechen kann. Dieser Zustand wird als Vapor Lock bezeichnet und stellt eine erhebliche Gefahr für den sicheren Betrieb eines Flugzeugs dar. Ein Vapor Lock kann insbesondere während des Starts oder bei hohen Außentemperaturen auftreten [12], [13], [16].

Für das vibroakustische Verfahren spielt die Dichte eine entscheidende Rolle. Die Dichte des Fluids im Tank hat einen direkten Einfluss auf die Resonanzfrequenzen der Tankstruktur, vgl. Gl. 3.29. Die Dichte von LH2 ist etwa 10% der Dichte von AVGAS 100LL und 9% der Dichte von JET A1, vgl. Tab. 2.3.

2.3 Eigenschaften von Wasserstoff

Jegliche Elemente auf der Erde existieren entweder als Gas, Flüssigkeit oder Festkörper. Die Mehrheit aller Elemente verändert seinen Aggregatzustand mit Temperatur und Druckänderungen. Allgemein, kann ein Gas verflüssigt werden, indem die Temperatur gesenkt wird. Wird die Temperatur weiter abgesenkt, bildet sich aus der Flüssigkeit ein Festkörper. Wird

der Druck erhöht, kann ein Gas bei deutlich höheren Temperaturen verflüssigt werden. Der Übergang von der Flüssigphase in die Gasphase wird als Sieden bezeichnet und von der Flüssigphase in die Festphase als Gefrieren. Daraus folgt, dass jedes Element eine Siedetemperatur und eine Gefriertemperatur besitzt. Die Kehrseite von den Zustandsänderungen ist einmal Kondensation (von Gas zu Flüssig) und Schmelzen (von Fest von Flüssig). Die Siede- und Gefriertemperaturen werden im allgemeinen auf den absoluten Nullpunkt von $0K$ oder $-273.15^{\circ}C$ bezogen. Das ist die Temperatur, bei der die Bewegung der Moleküle stoppt [17].

Wasserstoff hat den zweitniedrigsten Siede- und Schmelzpunkt aller Elemente. Wasserstoff ist flüssig unter dem Siedepunkt von $20K(-253^{\circ}C)$ und fest unter dem Schmelzpunkt von $14K(-259^{\circ}C)$, bei Atmosphärendruck von $1bar$. Jegliche Temperaturen tiefer als $200K(-73^{\circ}C)$ werden als kryogene Temperaturen bezeichnet. Demzufolge findet sich in der Literatur der Terminus kryogener Wasserstoff für flüssigen Wasserstoff [18], [19].

Der Siedepunkt ist ein kritischer Parameter für Kraftstoffe. Der Kraftstoff muss bei einer Temperatur kleiner als dem Siedepunkt gelagert werden, damit der Kraftstoff flüssig gelagert werden kann. Flüssige Kraftstoffe benötigen weniger Platz zur Speicherung, welches vorteilhaft in Flugzeugen ist. Wasserstoff kann als bedrucktes Gas oder in kryogener Form gelagert werden, damit der Wasserstoff flüssig ist. Bei Wasserstoff steigt der Siedepunkt maximal auf $-240^{\circ}C$ an bei $13bar$. Daher findet man in der Literatur, bezogen auf Flugzeuge, üblicherweise die Herangehensweise den Wasserstoff kryogen zu Lagern [1].

Tabelle 2.3: Eigenschaften Wasserstoff im Vergleich mit Wasser und Luft

	LH2	GH2	Wasser	Luft
Dichte	70.8 kg/m^3	0.08375 kg/m^3	1000 kg/m^3	1.225 kg/m^3
spez. Volumen	$0.014 \text{ m}^3/\text{kg}$	$11.9 \text{ m}^3/\text{kg}$	$0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$	$0.8163 \text{ m}^3/\text{kg}$

Wasserstoff hat die kleinste atomare Masse von allen bekannten Elementen und dadurch auch die geringste Dichte im gasförmigen sowie im flüssigen Zustand. Die Dichte gibt an, wie viel Masse pro Einheitsvolumen ein Element enthält. Die Dichte wird immer für eine bestimmte Temperatur und einen bestimmten Druck angegeben, da beide Parameter direkten Einfluss auf die Kompaktheit der Moleküle haben. Setzt man die Dichte ins Verhältnis zu einem Referenz Element erhält man die spezifische Gravität. Als Referenz wird die Dichte von Luft und Wasser genutzt, demzufolge haben Luft und Wasser eine spezifische Gravität von 1. Gase die einen Wert größer eins haben sind dann schwerer als Luft. Ein Wert kleiner eins sagt aus, dass das Gas leichter ist als Luft. Gasförmiger Wasserstoff hat eine Dichte von 0.08375 kg/m^3 , vgl. Tab. 2.3 [17].

Daraus folgt für die spezifische Gravität i :

$$i_1 = \frac{\rho_{\text{GH}_2}}{\rho_{\text{Luft}}} = \frac{0.08375 \text{ kg/m}^3}{1.225 \text{ kg/m}^3} = 0.0683 \quad (2.1)$$

Das bedeutet, dass die Dichte von gasförmigem Wasserstoff 7% der Dichte von Luft entspricht. Gleiches gilt für flüssigen Wasserstoff (LH2) im Vergleich zu Wasser:

$$i_2 = \frac{\rho_{\text{LH}_2}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{70.8 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.0708 \quad (2.2)$$

Daraus folgt, dass die Dichte von flüssigem Wasserstoff ungefähr 7% der Dichte von Wasser entspricht. Für einen Kraftstoff hat LH2 im Vergleich zu JET A1 eine deutlich geringere Dichte. Aufgrund der deutlich größeren volumetrischen Energiedichte von LH2 im Vergleich zu GH2, ist es unumgänglich, dass Wasserstoff in der kryogenen Form gelagert werden muss, denn flüssiger Wasserstoff hat eine 845 mal größere Dichte als gasförmiger Wasserstoff, vgl. Tab. 2.3.

Außerdem wird bei Betrachtung der Ausdehnungsrate von flüssigem Wasserstoff zu gasförmigem Wasserstoff deutlich, dass eine Lagerung von gasförmigem Wasserstoff, im Bezug auf neue Tanks für Flugzeuge, nicht realisierbar ist, vgl. Abb. 2.6. Daraus geht hervor, dass gasförmiger Wasserstoff ein 848-faches größeres Volumen beansprucht als flüssiger Wasserstoff.

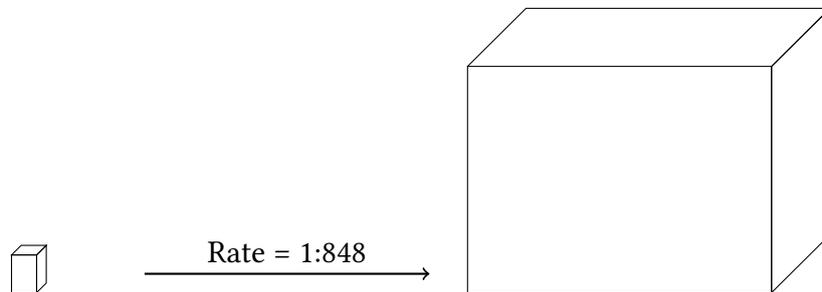


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Ausdehnungsrate von Wasserstoff

Aufgrund der Eigenschaften von Wasserstoff und der Methode den Wasserstoff kryogen zu lagern, ergeben sich neue Tankkonfigurationen für neue Flugzeugkonzepte. In der Literatur findet man Hinweise, dass die Wasserstofftanks im hinteren Rumpfsegment installiert sind, zum Beispiel hinter dem Druckschott der Kabine, vgl. Abb. 2.7 [17]. Wird bspw. eine Flugzeugkonfiguration mit zwei Triebwerken betrachtet, so müssen auch mindestens zwei Tanks vorhanden sein. Aus den Zulassungsvorschriften der CS25 (Certification Specification) geht hervor, dass jedes Triebwerk von einem unabhängigen Tank gespeist werden muss [17], [20].

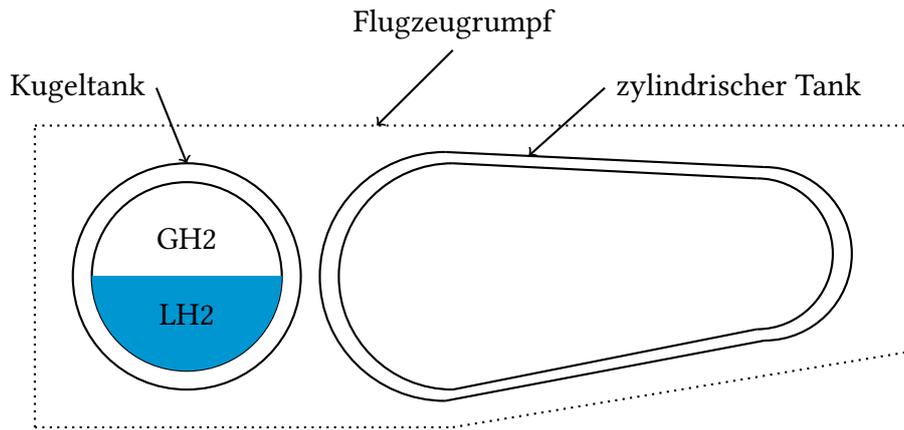


Abbildung 2.7: Wasserstofftankkonfiguration im hinteren Rumpsegment

2.4 Patente zur vibroakustischen Füllstandsmessung

In diesem Kapitel werden Patente zur Bestimmung der Füllmenge innerhalb eines Tanks mithilfe des vibroakustischen Messverfahrens vorgestellt.

Das „Acoustic Volume Indicator“ Patent [21], beschreibt ein nicht invasives Messverfahren zur Bestimmung des Volumens über einen akustischen Volumenindikator. Dieser misst das flüssige und gasförmige Volumen innerhalb eines Tanks. Die Tankwand wird zur Vibrationen gebracht und mit einem Detektor wird die Vibration der Tankwand gemessen. Ein Prozessor verarbeitet die Vibrationsdaten und konvertiert diese in Frequenzdaten. Diese Frequenzdaten werden dann mit charakteristischen Tankfrequenzen verglichen. Das gemessene Volumen wird anschließend auf einem Videomonitor dargestellt in Form von Leuchtdioden, die für ein bestimmtes Volumen in % aufleuchten. Die Software ist außerdem mit einem Alarm bei zu hohem oder zu niedrigem Volumenstand ausgestattet [21].

Das zweite Patent „Filling Level Monitoring Device for a Fluid Gas Container, Hydrogen Tank and Aircraft Comprising such Hydrogen Tank“ [3], beschreibt ebenfalls ein nicht invasives Messverfahren zur Bestimmung der Fluidmasse. Das Verfahren nutzt einen Schwingungserreger, eine Signalquelle, einen Prozessor, ein Indikator für den Füllstand und mindestens einen Beschleunigungsaufnehmer, vgl. Abb. 2.8 [3].

Die Vibrationen von dem Schwingungserreger und der Signalquelle werden gekoppelt, um mehrere Frequenzkomponenten im Tank zu erhalten. Sensoren messen die Schwingungen innerhalb des Tanks. Der Prozessor führt eine Spektralanalyse vom Input Signal und den Schwingungssignalen von den Sensoren durch und extrahiert aus diesen die Resonanzfrequenzen des Tanks. Der Füllstands Indikator berechnet den Füllstand im Tank mithilfe

der Resonanzfrequenzen und einem räumlichen Signal von einem Beschleunigungssensor. Zusätzlich werden die Ergebnisse mit Referenzdaten verglichen und korreliert [3].

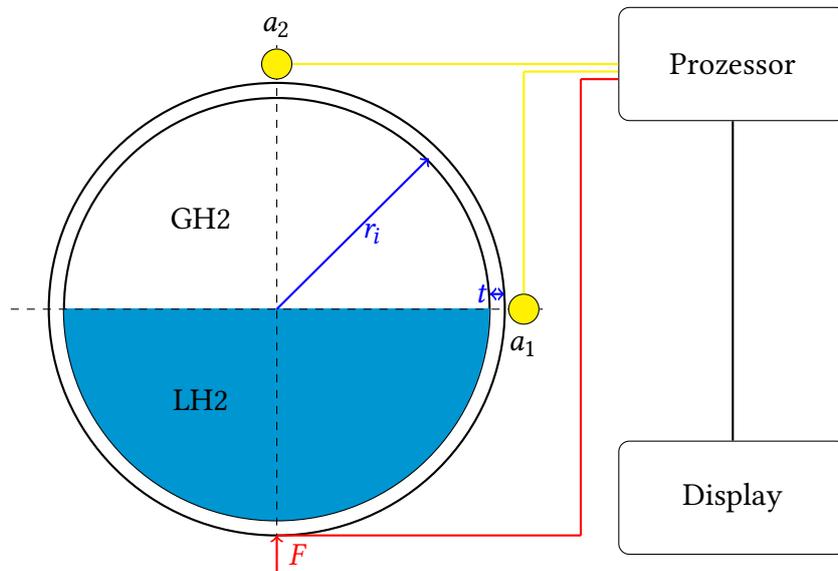


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung des vibroakustischen Messverfahrens

2.5 Vorherige Arbeiten zur modellbasierten Untersuchung vibroakustischer Füllstandsmessungen

In einer vorherigen Arbeit wurde das vibro-akustische Messverfahren mithilfe eines vereinfachten Simulationsmodells analysiert. Die Simulationen wurden mit der Software COMSOL Multiphysics durchgeführt. Eine der wesentlichen Vereinfachungen bestand in der Modellierung des Fluids im Tank. Anstelle einer vollständigen fluiddynamischen Kopplung wurde das Fluid über einen sogenannten „Added Mass“-Knoten in den Definitionen des Modells berücksichtigt. In dieser Methode wird das Fluid im Modell lediglich als zusätzliche Masse eingebracht, ohne eine akustische Wechselwirkung zwischen den Schallwellen im Fluid und den Tankwänden zu simulieren. Diese Vorgehensweise führte zu einer erheblichen Reduzierung der Rechenzeit, da auf eine komplexe Kopplung der multiphysikalischen Wechselwirkungen verzichtet werden konnte. Ein weiterer Faktor zur Beschleunigung der Simulation war die Vereinfachung des Meshings. Durch die geringere Anzahl an Finite-Elementen im Modell konnte die Rechenzeit signifikant verkürzt werden, ohne dass die grundlegenden Ergebnisse der Analyse beeinträchtigt wurden. Darüber hinaus wurde in der Simulation lediglich ein einzelnes Fluid (LH2), berücksichtigt. Die Verwendung nur eines Fluids vereinfachte die Modellstruktur erheblich und reduzierte die physikalische Komplexität der Berechnungen.

Diese Entscheidung ermöglichte es, die Berechnung schneller und effizienter durchzuführen, während dennoch die grundlegenden Eigenschaften des Messverfahrens analysiert werden konnten [22].

Zusammenfassend war die Arbeit durch ein Kompromiss zwischen Modellvereinfachungen und der notwendigen physikalischen Genauigkeit gekennzeichnet. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für diese Arbeit. In dieser Arbeit wird die Kopplung zwischen Schallwellen und Strukturverhalten über einen multiphysikalischen Knoten in COMSOL erweitert. Durch diese Erweiterung werden das Fluid und die Wechselwirkung zwischen der Tankstruktur und Fluidbewegung realisiert.

3 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für das Vibro-Akustische Messverfahren mithilfe eines Feder-Masse-Systems erläutert.

Ein Feder-Dämpfer-Masse-System ist ein klassisches mechanisches Modell zur Untersuchung von Schwingungen und dynamischen Systemen. Es findet in vielen technischen und physikalischen Sachverhalten seine praktische Anwendung. Es besteht aus einer Feder, einem Dämpfer und einer Masse. In diesem Fall wird das System durch eine äußere Kraft F zu Schwingungen angeregt, vgl. Abb. 3.1. Die Masse wird durch eine Feder mit einer Federkonstante k und einem Dämpfer mit der Dämpfungskonstante c beeinflusst. Die Gewichtskraft wird vernachlässigt [23].

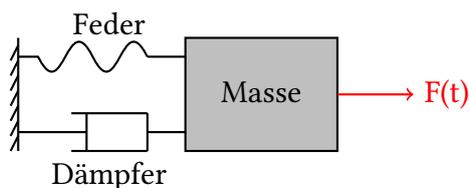


Abbildung 3.1: gedämpftes Feder-Masse-System

Die Feder ist ein elastisches Element, das gemäß dem Hook'schen Gesetz eine rückstellende Kraft auf die Masse erzeugt, die proportional zur Auslenkung $x(t)$ der Masse aus ihrer Ruhelage ist, vgl. Gl. 3.1:

$$F_{\text{Feder}} = -kx \tag{3.1}$$

Dabei ist k die Federkonstanten mit der Einheit N/m, welche die Steifigkeit der Feder beschreibt. Eine größere Federkonstante bedeutet, dass für eine bestimmte Auslenkung mehr Kraft aufgewendet werden muss.

Der Dämpfer stellt ein viskoses Element dar, dass eine geschwindigkeitsabhängige Kraft erzeugt. Diese Dämpfungskraft ist proportional zur Geschwindigkeit der Masse:

$$F_{\text{Dämpfer}} = -c\dot{x} \quad (3.2)$$

Dabei ist c die Dämpfungskonstante mit der Einheit Ns/m und gibt an, wie stark die Bewegungsenergie der Masse durch den Dämpfer dissipiert wird. Der Dämpfer reduziert die Amplitude der Schwingung und beeinflusst das Schwingungsverhalten je nach Dämpfungsgrad.

Die äußere harmonische Anregungskraft hat die Form:

$$F(t) = F_0 \cos(\Omega t) \quad (3.3)$$

Dabei ist F_0 die Amplitude der Kraft und Ω die Kreisfrequenz der Anregung in rad/s . Diese Kraft sorgt dafür, dass das System aus seiner Ruhelage gebracht wird und Schwingungen ausführt.

Im Folgenden wird die Bewegungsgleichung des Systems unter der Annahme, dass die Bewegung nur entlang einer Achse stattfindet, für die Bewegung der Masse aus der Summe aller wirkenden Kräfte gemäß dem zweiten Newton'schen Gesetz gebildet werden:

$$m\ddot{x} = -kx - c\dot{x} + F(t) \quad (3.4)$$

Diese inhomogene lineare gewöhnliche Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten beschreibt die Dynamik des Systems. Die Lösung dieser Gleichung besteht aus zwei Teilen.

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad (3.5)$$

Mit $x(t)$ als allgemeine Lösung, $x_h(t)$ als Lösung der zugehörigen homogenen Gleichung und einer speziellen Lösung der inhomogenen Gleichung $x_p(t)$ (Partikularlösung). Die Lösung der homogenen Gleichung $x_h(t)$ beschreibt die freie Schwingung eines gedämpften Systems.

$$x_h(t) = \hat{x} e^{-D\omega_0 t} \cos(\omega_0 t - \phi_0) \quad (3.6)$$

Mit D als Dämpfungsgrad des Systems, ω_0 als Eigenkreisfrequenz und ϕ_0 als Phasenwinkel zwischen Anregung und Antwort. Die freie Schwingung klingt aufgrund der Dämpfung über der Zeit ab und es bleibt nur noch die Partikularlösung $x_p(t)$ erhalten, solange die Erregung wirkt. Aus diesem Grund wird die Partikularlösung auch als Lösung im eingeschwungenen Zustand bezeichnet. Für die Lösung der Partikularlösung wird der folgende Ansatz gewählt:

$$x_p(t) = \hat{x}_c \cos(\Omega t) + \hat{x}_s \sin(\Omega t) \quad (3.7)$$

Die Wahl des Ansatzes basiert auf dem Hintergrund, dass bei einer erzwungenen Schwingung eines gedämpften Systems die Antwort phasenverschoben ist zur Anregung. Die Amplituden \hat{x}_c und \hat{x}_s müssen nun berechnet werden. Dafür wird eine Nennform für die Bewegungsgleichung des Systems aufgeführt.

$$\ddot{q} + 2D\omega_0\dot{q} + \omega_0^2 q = \omega_0^2 \hat{u} \cos(\Omega t) \quad (3.8)$$

Als nächstes wird der Ansatz für die Partikularlösung nach der Zeit zweimal abgeleitet.

$$\dot{x}_p(t) = \frac{dx_p}{dt} = -\Omega \hat{x}_c \sin(\Omega t) + \Omega \hat{x}_s \cos(\Omega t) \quad (3.9)$$

$$\ddot{x}_p(t) = \frac{d\dot{x}_p}{dt} = -\Omega^2 \hat{x}_c \cos(\Omega t) - \Omega^2 \hat{x}_s \sin(\Omega t) \quad (3.10)$$

Die Zeitableitung Gl. 3.9 und Gl. 3.10 sowie Gl. 3.8 werden in die Nennform Gl. 3.8 eingesetzt. Außerdem wird mit ω_0^2 geteilt

$$0 = \left[-\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2 \hat{x}_c + 2D\frac{\Omega}{\omega_0} \hat{x}_s + \hat{x}_c - \hat{u} \right] \cos(\Omega t) + \left[-\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2 \hat{x}_s - 2D\frac{\Omega}{\omega_0} \hat{x}_c + \hat{x}_s \right] \sin(\Omega t) \quad (3.11)$$

Daraus können zwei Gleichungen für die beiden unbekanntenen Amplituden \hat{x}_c und \hat{x}_s gebildet werden.

$$\hat{x}_c = \frac{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4D^2 \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2} \hat{u} \quad (3.12)$$

$$\hat{x}_s = \frac{2D\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)}{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4D^2 \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2} \hat{u} \quad (3.13)$$

Die Schwingungsamplitude \hat{x}_p lautet somit:

$$\hat{x}_p = \sqrt{(\hat{x}_c^2 + \hat{x}_s^2)} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4D^2 \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}} \hat{u} \quad (3.14)$$

Damit ist die Lösung im eingeschwungenen Zustand gefunden und lautet:

$$x_p(t) = \hat{x}_p \cos(\Omega t - \phi) = \hat{u} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4D^2 \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}} \cos(\Omega t - \phi) \quad (3.15)$$

Als nächstes wird eine Alternativlösung für die Bewegungsgleichung des Feder-Dämpfer-Masse-Systems aufgezeigt. Diese wird für die Auswerteverfahren in dieser Arbeit von Bedeutung sein. Dafür wird die Bewegungsgleichung (Gl. 3.4) in den komplexen Zahlenraum überführt:

$$\ddot{z} + 2D\omega_0\dot{z} + \omega_0^2 z = \omega_0^2 \hat{u} e^{j\Omega t} \quad (3.16)$$

Die allgemeine Lösung wird analog zu Gl. 3.5 definiert, mit $z_h(t)$ als Lösung der homogenen Gleichung und $z_p(t)$ als Lösung der speziellen inhomogenen Gleichung:

$$z(t) = z_h(t) + z_p(t) \quad (3.17)$$

Es wird wieder ein „Ansatz vom Typ der Rechten Seite“ für die Lösung der komplexen Differentialgleichung gewählt:

$$z_p(t) = \hat{z} e^{j\Omega t} \quad (3.18)$$

$$\dot{z}_p(t) = j\Omega \hat{z}_p e^{j\Omega t} \quad (3.19)$$

$$\ddot{z}_p(t) = (j\Omega)^2 \hat{z}_p e^{j\Omega t} \quad (3.20)$$

Nach Einsetzen des komplexen Ansatzes in Gl. 3.16 folgt:

$$[(j\Omega)^2 + 2D\omega_0(j\Omega) + \omega_0^2] \hat{z}_p(t) e^{j\Omega t} = \omega_0^2 \hat{u}_p e^{j\Omega t} \quad (3.21)$$

Als nächstes wird die Gl. 3.21 nach $\hat{z}_p(t)$ umgeformt, durch ω_0^2 geteilt und die komplexe Rechenvorschrift $j = -1$ angewendet. Daraus folgt für die komplexe Amplitude:

$$\hat{z}_p(t) = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)\right)^2 + j2D\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)} \hat{u} \quad (3.22)$$

Mit der komplexen Amplitude kann nun die Partikularlösung für die komplexe Differentialgleichung (Gl. 3.16) bestimmt werden. Vorher wird die komplexe Amplitude noch mit dem konjugiert komplexen Nenner erweitert, um einen reellen Nennerausdruck zu erzeugen. Für die Erregeramplitude \hat{u} wird das statische Auslenkungsverhältnis \hat{F}/c geschrieben. Daraus folgt dann für die komplexe Amplitude:

$$\hat{z}_p(t) = \frac{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right) - j2D\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)}{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4D^2\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2} \frac{\hat{F}}{c} \quad (3.23)$$

Der Ausdruck für die komplexe Amplitude (Gl. 3.23) wird nun in den Ansatz (Gl. 3.18) eingesetzt und liefert dann die Partikularlösung für (Gl. 3.16). Davor wird noch die komplexe Übertragungsfunktion (Frequenzgang) aufgestellt. Diesen erhält man durch Division von \hat{F} in (Gl. 3.23). Der Frequenzgang ist das Verhältnis der komplexen Amplituden von Antwort und Erregung.

$$G(j) = \frac{1}{c} \frac{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right) - j2D\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)}{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4D^2\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2} = \frac{\hat{z}_p}{\hat{F}} \quad (3.24)$$

Somit kann die Partikularlösung mit Frequenzgang und Phasenwinkel angegeben werden durch:

$$z_p(t) = \hat{z}_p e^{j\Omega t} = \hat{F} |G(j)| e^{j(\Omega t - \phi)} \quad (3.25)$$

Abschließend wird die Lösung als reelle Lösung dargestellt. Dafür muss eine Realteilbildung aus (Gl. 3.25) erfolgen:

$$x_p(t) = \text{Re}[z_p(t)] = \hat{F} |G(j)| \cos(\Omega t - \phi) \quad (3.26)$$

Die Lösung über den Frequenzgang gilt als eine Grundlage für die Auswerteverfahren. Im Folgenden wird mithilfe von Matlab der Einfluss einer Massenänderung und einer Dämpfungsänderung im Bezug auf die Frequenzantwort und das Schwingungsverhalten dargestellt. Für das vibroakustische Messprinzip spielt die Änderung der Masse und der Dämpfung eine entscheidende Rolle. Die Änderung der Masse bewirkt, dass sich die Resonanzfrequenzen verschieben, vgl. Gl. 3.29. Eine Erhöhung der Masse bewirkt, dass die Resonanzfrequenzen zu tieferen Frequenzen wandern, vgl. Abb. 3.2. Bei der Betrachtung des Masseinflusses im Frequenzbereich wurde die Dämpfung konstant gehalten. Daher steigen die Amplituden mit steigender Masse an [23], [24].

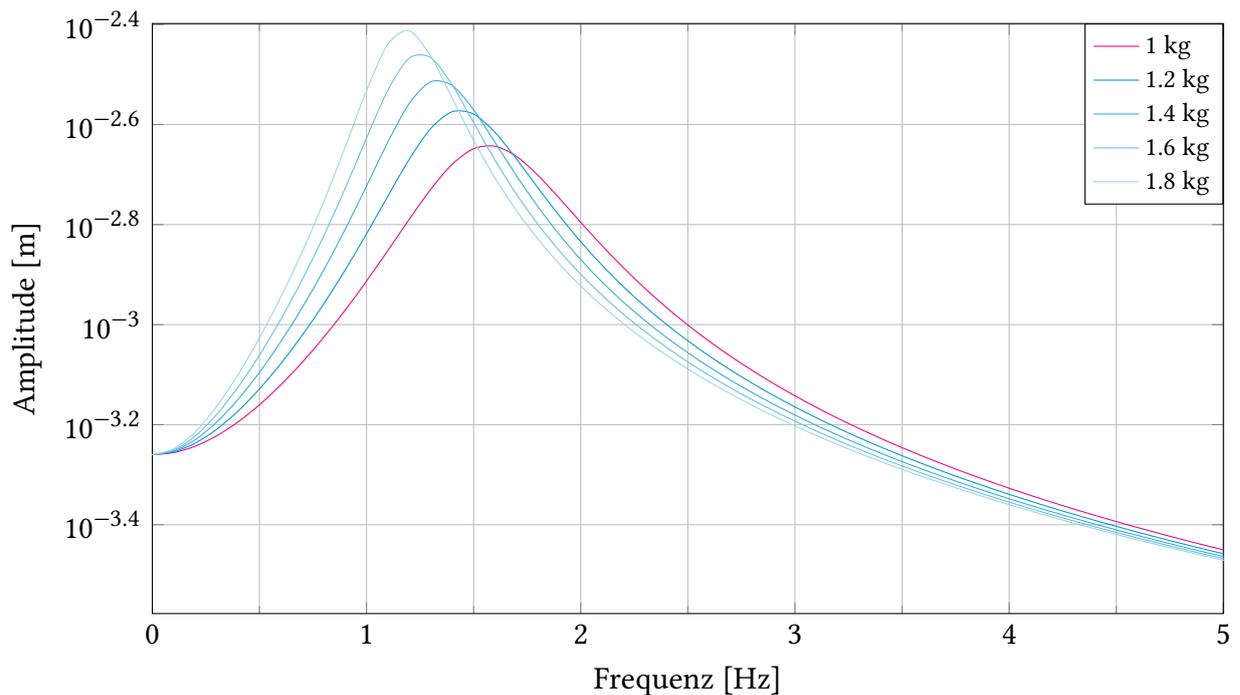


Abbildung 3.2: Einfluss der Masse auf die Frequenzantwort eines Einmassenschwingers

Wird die Dämpfung in einem System erhöht, dann wirkt sich das direkt auf die Amplitudenstärke aus. Mit steigender Dämpfung sinkt die Amplitudenstärke ab. Dieses Verhalten wird in Abb. 3.3 dargestellt. Das sind zwei wichtige Aspekte im Bezug auf das Vibro-Akustische Messverfahren. Eine steigende Masse bewirkt ebenso auch eine steigende Dämpfung im System [23], [24].

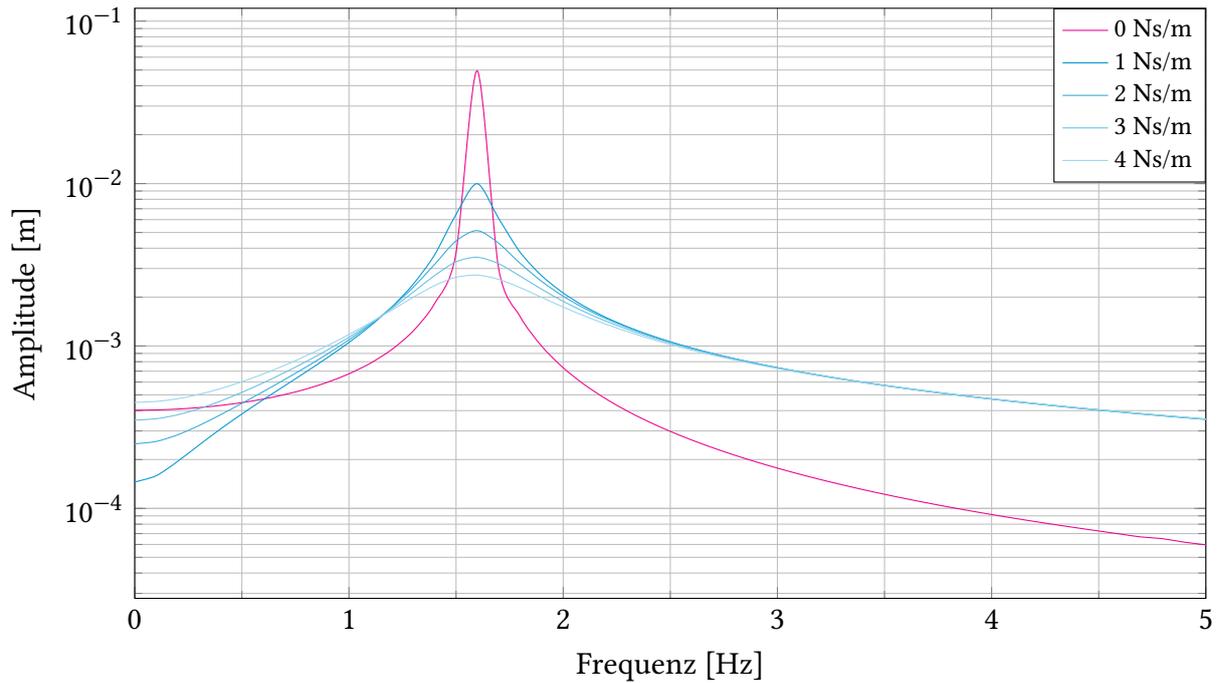


Abbildung 3.3: Einfluss der Dämpfung auf die Frequenzantwort eines Einmassenschwingers

Eine weitere Grundlage beschreibt ein alternatives Auswerteverfahren. Dafür werden mithilfe der Fourier Transformation die Informationen aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich überführt, vgl. Abb. 3.4. Im Folgenden wird dieses vorgestellt [23], [24].

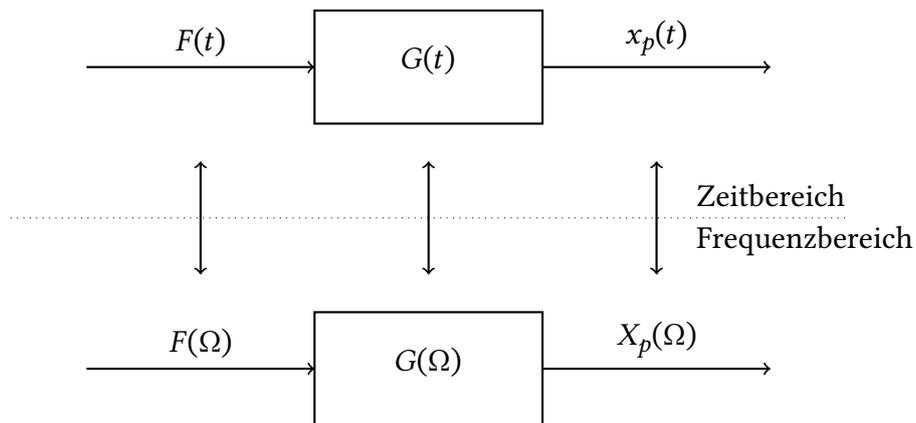


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Fourier Transformation

Der Frequenzgang und die Impulsantwort lassen sich über die Fourier Transformation in ein

direktes Verhältnis. Somit kann aus einem zeitabhängigem Signal ein frequenzabhängiges Signal generiert werden. Es ist auch möglich Frequenzinformationen in den Zeitbereich zu überführen. Das wird über die Inverse Fourier Transformation ermöglicht. Für die Auswertverfahren in dieser Arbeit ist diese Beziehung von zentraler Bedeutung. Die Beziehung zwischen dem Zeitbereich und dem Frequenzbereich wird nachfolgend über die Gleichungen 3.27 und 3.28 beschrieben [23], [24].

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.27)$$

Die Gleichung 3.27 beschreibt die Fourier Transformation des Zeitbereichs zum Frequenzbereich. Die Rücktransformierte (Inverse Fourier Transformation) kann durch folgende Gleichung beschrieben werden [23], [24]:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} dt \quad (3.28)$$

Ein weiteres Auswertverfahren benutzt die Informationen aus dem Zeitbereich. Im Folgenden sollen mithilfe des Einmassenschwingers die Effekte von Dämpfungsänderungen und Masseänderungen erläutert werden. Betrachtet man den Zeitbereich, dann hat eine Erhöhung der Masse eine Verschiebung der Auslenkung zu einem späteren Zeitpunkt t zur Folge. In Abb. 3.5 wird dies dargestellt. Der Grund für die ebenfalls ansteigende Amplitudenstärke ist, dass bei der Massenbetrachtung die Dämpfung als konstant angenommen wurde. [23], [24]

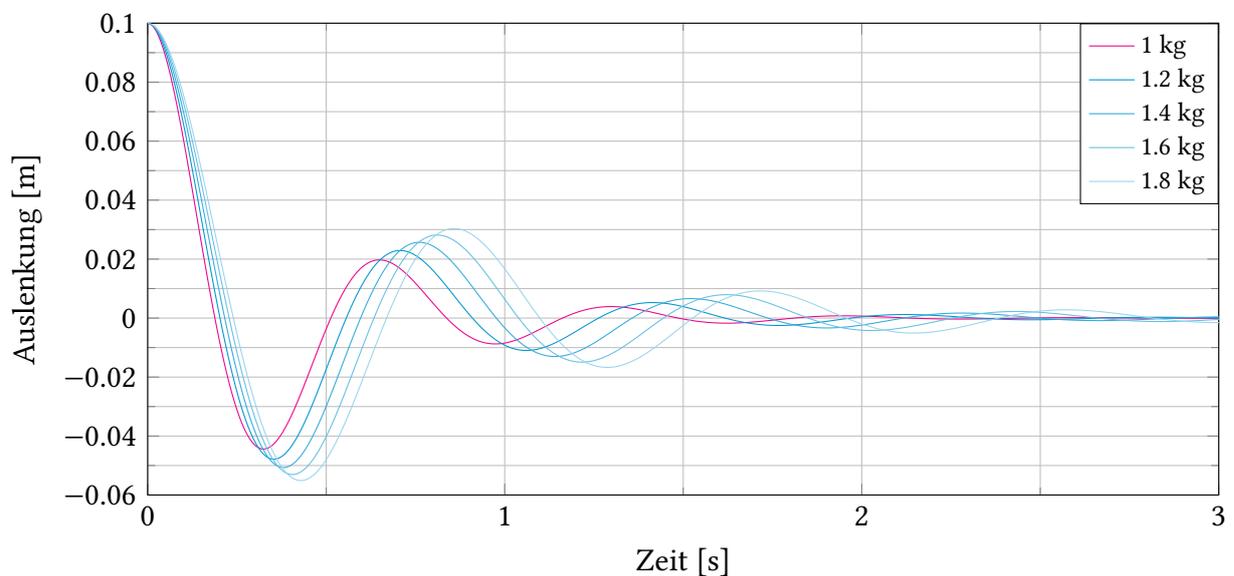


Abbildung 3.5: Einfluss der Masse auf Antwort im Zeitbereich

Wie auf den Frequenzbereich hat auch die Dämpfung einen Einfluss auf die Schwingung im Zeitbereich. Eine Erhöhung der Dämpfung bewirkt, dass die Amplitudenstärke abnimmt, vgl. Abb. 3.6.

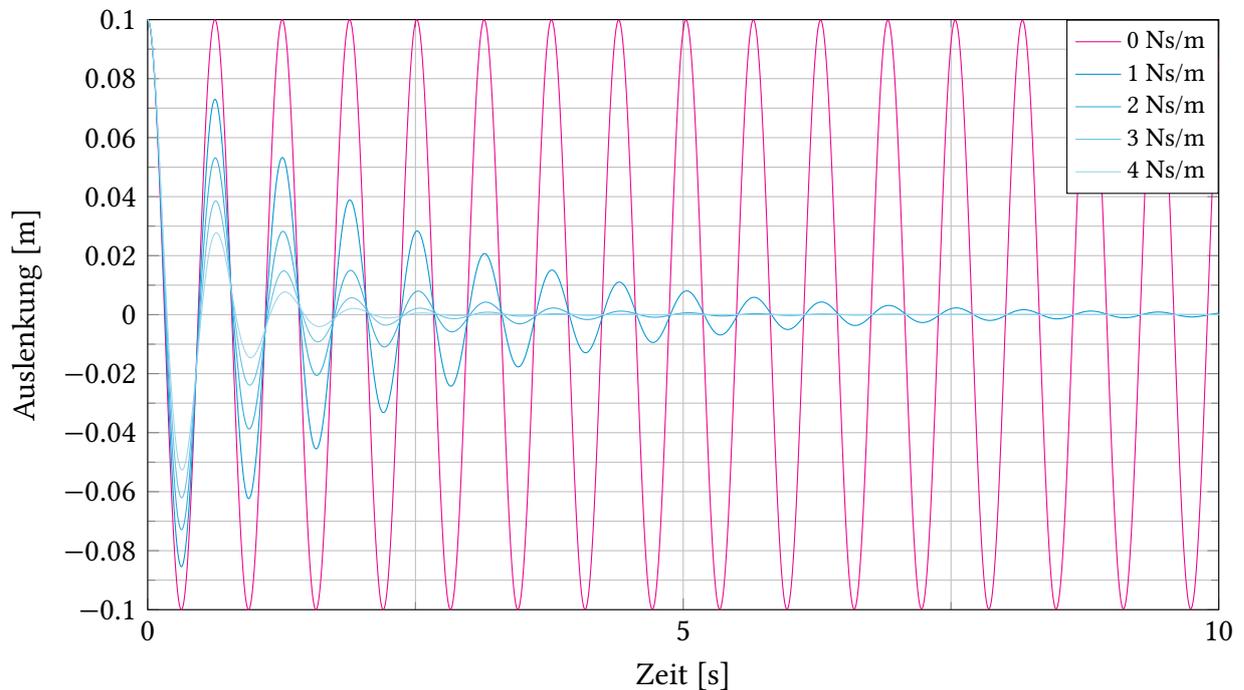


Abbildung 3.6: Einfluss der Dämpfung auf die Antwort im Zeitbereich

3.1 Messprinzip der vibroakustischen Füllstandsmessung

Die Nutzung der strukturellen Resonanz eines Tanks zur Bestimmung der enthaltenen Fluidmasse stellt eine innovative Messmethode dar. Diese Technik basiert auf der Beobachtung und Analyse der natürlichen Frequenzen und zugehörigen Modenformen eines physikalischen Systems, die durch Änderungen der Fluidmasse beeinflusst werden. Jedes physikalische Objekt weist charakteristische natürliche Frequenzen und zugehörige Modenformen auf. Diese Eigenschaften werden von den Materialeigenschaften, der Geometrie, der Masse und den Randbedingungen (z. B. der Art der Befestigung oder Aufhängung) des Objekts bestimmt. Der Tank bildet dabei ein schwingungsfähiges System, dessen Schwingungsverhalten sich durch äußere und innere Einflüsse, wie die Fluidmasse, verändern kann. Die im Tank befindliche Fluidmasse beeinflusst das dynamische Verhalten des Tanksystems, vgl. Kap. 3. Änderungen der Fluidmasse führen zu einer Verschiebung der natürlichen Frequenzen der Schwingung, insbesondere in denjenigen Moden, die auf die Fluidverteilung empfindlich reagieren. Diese Frequenzverschiebungen sind proportional zur Masse und Verteilung des Fluids innerhalb

des Tanks und können durch präzise Mess- und Analysetechniken erfasst werden [25], [26].

Die Methode analysiert die akustische Resonanz von flüssigkeitsgefüllten Tanks. Dieses Verfahren nutzt das Schwingungsverhalten des Tanksystems in Kombination mit der akustischen Resonanz, um Rückschlüsse auf die Masse und Verteilung der enthaltenen Flüssigkeit zu ziehen. Die Methode basiert auf der Beobachtung, dass die natürlichen Frequenzen eines Systems durch Masseänderungen beeinflusst werden. Ähnlich wie im klassischen Masse-Feder-System ist die Eigenfrequenz eines schwingenden Systems durch die Gleichung [26]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.29)$$

gegeben, wobei k die Federsteifigkeit und m die Masse darstellt. Für einen flüssigkeitsgefüllten Tank führt eine Änderung der Fluidmasse m zu einer charakteristischen Verschiebung der Eigenfrequenz. Diese Verschiebung ist ein direktes Maß für die im Tank befindliche Flüssigkeitsmenge. Das vibroakustische Verfahren macht sich diese Abhängigkeit zunutze, indem es die Frequenzverschiebungen präzise misst und zur Abschätzung der Fluidmasse verwendet. Hierbei werden Schallwellen oder Vibrationen in den Tank eingeleitet, und die resultierenden Resonanzfrequenzen werden mithilfe von Sensoren erfasst. Die gemessenen Frequenzen werden anschließend mit theoretischen Modellen oder vorherigen Kalibrierungsmessungen verglichen, um die Masse und Verteilung des Fluids zu bestimmen [27], [28], [29].

Dieses Verfahren findet bereits Anwendung in der Raumfahrt, wo es unter anderem für die Kraftstoffmessung eingesetzt wird [30]. In der Literatur existiert Forschung zu dem vibroakustischen Verfahren [31]. Die „National Aeronautics and Space Administration“ (NASA) hat 1971 Forschungen zu einem resonanzbasierten Messverfahren durchgeführt [31].

4 Numerische Modellbildung

Die numerische Modellbildung hat sich in den Ingenieurwissenschaften zu einem wichtigen Werkzeug entwickelt. Dabei werden reale physikalische Systeme durch mathematische Modelle beschrieben und mithilfe numerischer Methoden simuliert. Die Ansätze ermöglichen es, einfache sowie auch komplexe multiphysikalische Prozesse, die analytisch schwer lösbar sind, rechnergestützt zu untersuchen. Eine Softwarelösung auf diesem Gebiet ist COMSOL multiphysics. Diese Software stützt sich auf die Finite-Elemente-Methode [32].

Numerische Modelle sind Repräsentationen physikalischer Systeme, die bspw. durch Differentialgleichungen formuliert werden. Die Finite-Elemente-Methode ist eine der am weitesten verbreiteten numerischen Technik zur Lösung dieser Gleichungssysteme. Die Methode ermöglicht die Diskretisierung eines kontinuierlichen Problems in eine endliche Anzahl von Elementen und Knotenpunkten, wodurch die mathematischen Gleichungen auf ein numerisch lösbares Format übertragen werden. Zum Beispiel wird ein Bauteil oder eine Fluidströmung so in viele kleine miteinander verbundene Elemente aufgeteilt. Innerhalb eines jeden Elements wird eine Näherung für die gesuchten physikalischen Größen berechnet. In einer Fluidströmung können das bspw. der Druck, die Temperatur oder die Geschwindigkeit der Strömung sein. Die resultierenden Gleichungssysteme werden dann durch numerische Verfahren oder mithilfe von direkten Lösungsverfahren gelöst. In dieser Arbeit wird die Finite-Elemente-Methode verwendet, um die Beschleunigung an einem bestimmten Punkt eines schwingungsfähigen Systems zu bestimmen, aufgrund einer äußeren Anregung [32].

COMSOL multiphysics ist eine speziell auf die multiphysikalische Modellbildung ausgelegte Softwareplattform. Die aktuelle Version bietet eine Vielzahl von Funktionen. Dazu zählen Bereiche wie die Strukturmechanik und Mechanik, Fluidmechanik, Elektromagnetismus, Thermodynamik und Wärmeleitung, Chemische Reaktionen und Transportprozesse. In dieser Arbeit werden die Funktionen der Strukturmechanik genutzt, um das Schwingverhalten eines Plexiglas Zylinders zu untersuchen, der nach und nach mit Wasser gefüllt wird. Trotz der Leistungsfähigkeit numerischer Modelle und Softwaretools wie COMSOL multiphysics sind mit ihrer Anwendung auch Herausforderungen verbunden, bspw. die numerische Stabilität und Konvergenz der Lösungen insbesondere bei stark gekoppelten oder nichtlinearen Systemen [33].

4.1 Tankmodell

Die Simulation erfolgt unter der Annahme einer stationären Zustandsanalyse. Zeitabhängige Veränderungen der Systemparameter werden vernachlässigt, sodass vereinfacht von einem stabilen Gleichgewichtszustand ausgegangen wird. Alle relevanten Größen, wie Kräfte und Momente, werden als zeitlich konstant angenommen. Die Effekte von Schwappen im Wasserstofftank werden in der Simulation nicht berücksichtigt. Schwappen beschreibt die Bewegung der Flüssigkeit im Tank, die dynamische Belastungen auf den Tank und eine Verschiebungen des Schwerpunkts der Fluidmasse im Tank verursachen kann. Die Ausklammerung dieser Effekte erlaubt eine Konzentration auf statische Zustände im Tank, wodurch die Modellierung und Analyse vereinfacht werden. Zusätzlich wird der Roll- und Nickwinkel konstant bei 0° gehalten. Diese Vereinfachungen ermöglichen eine Untersuchung der Auswirkung anderer Parameter wie die Masse, ohne dass die Simulation durch Nick- oder Rollbewegungen beeinflusst wird [34].

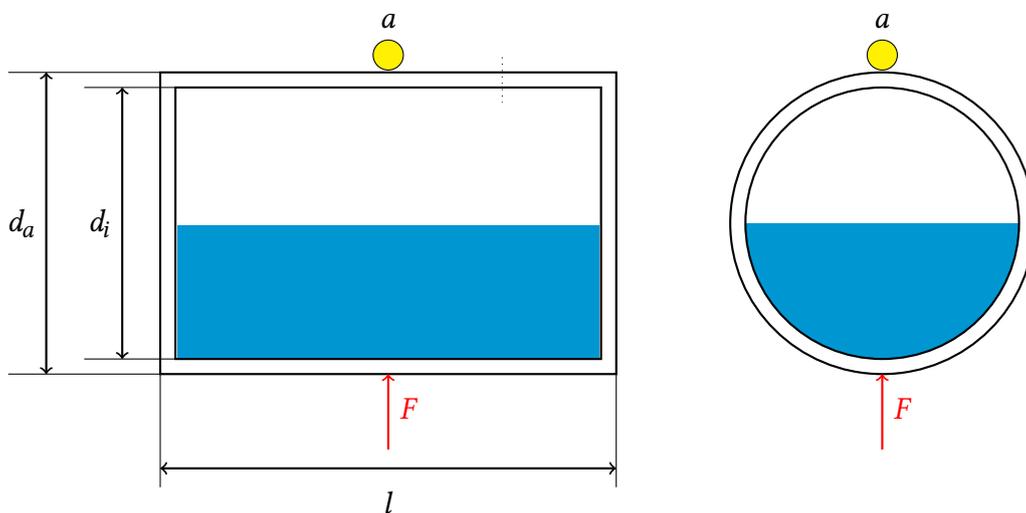


Abbildung 4.1: 3D Tankmodell aus COMSOL multiphysics. Frontansicht links und Seitenansicht rechts.

Das Tankmodell, vgl. Abb. 4.1 beinhaltet folgende physikalische Eigenschaften, vgl. Abb. 4.2. Das untersuchte System besteht aus einem zylindrischen Tank und zwei Endkappen aus dem gleichen Material (PLEXIGLAS XT), vgl. Tab. 4.1, dessen Geometrie und Materialeigenschaften in der Software nachgebildet wurden. Für die Diskretisierung des Modells wurde ein adaptives Netz mit einer hohen Elementdichte gewählt, um die Genauigkeit der Simulationsergebnisse sicherzustellen. Dies wurde über ein „user-defined mesh“ in COMSOL realisiert mit dem Elementgrad „Finer“. Daraus ergibt sich in der Simulation eine Anzahl von 125874 Freiheitsgraden. Die Rechendauer der Simulation für einen Füllstand beträgt ca. 4

Stunden. Die physikalischen Gleichungen, die dem Modell zugrunde liegen, umfassen die Bewegungsgleichungen der Dynamik sowie materialabhängige Eigenschaften wie Dämpfung und Steifigkeit. Für die Modellierung wurde angenommen, dass das Tankmaterial isotrop und linear-elastisch ist. Die Kopplung verschiedener physikalischer Effekte, wie z. B. Druckakustik und Struktur, konnte durch die multiphysikalischen Simulationsmöglichkeiten in COMSOL abgebildet werden. Die Anregung des Systems wurde an der Unterseite des Tanks zentrisch, d. h. genau in der Mitte der Basisfläche, appliziert, vgl. Abb. 4.1. Die Messung der dynamischen Reaktion erfolgte an der Tankoberseite, vgl. Abb. 4.1. Der Sensorpunkt wurde ebenfalls zentrisch in der Mitte der Deckfläche platziert. Die numerische Auswertung der Simulation konzentriert sich auf die vertikale Beschleunigung im Bereich dieses Messpunktes. Dabei wurden sowohl die Frequenz als auch die Amplitude der Schwingungen analysiert. Das Loch für die Befüllung des Tanks auf der Tankoberseite ist mit einer künstlichen Domain in COMSOL nachgebaut worden. Diese imitiert das Loch in der Simulation [35].

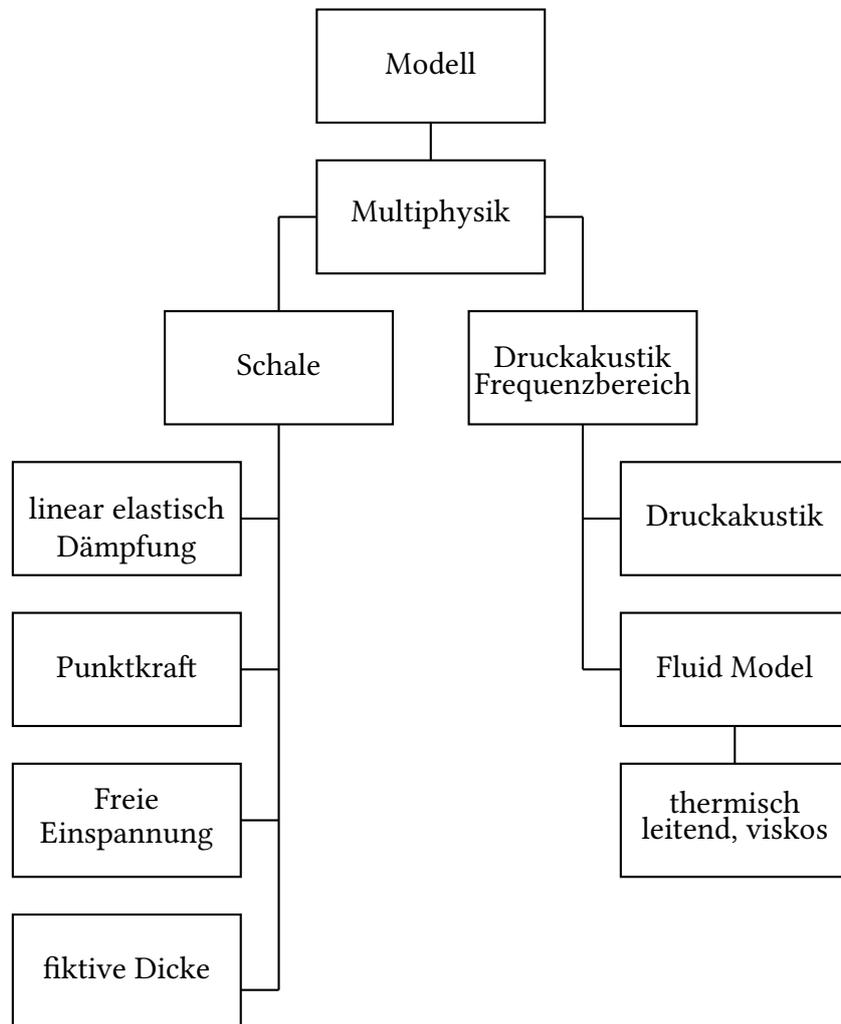


Abbildung 4.2: physikalischen Eigenschaften des Tanks in der Simulation

Tabelle 4.1: Eigenschaften der Materialien und Fluide

Parameter	Bezeichnung	Wert
Tankgeometrie		
Tanklänge [m]	l	0.2
innerer Tankdurchmesser	d_i	0.094
äußerer Tankdurchmesser [m]	d_o	0.1
Füllhöhe [m]	h_{fill}	0 - 0.094
Gesamtvolumen [l]	V	0.2124
Meshing		
Elemente	-	39396
min Qualität	-	0.1921
durchschnittliche Qualität	-	0.06569
PLEXIGLAS XT		
Dichte [kg/m^3]	ρ_{PXT}	1190
E-Modul [GPa]	E	3.2
Querkontraktionszahl [-]	ν	0.35
Isotropischer Verlustfaktor [-]	η	0.10
Wasser		
Dichte [kg/m^3]	$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	1000
dynamische Viskosität [Pa s]	$\mu_{\text{d,H}_2\text{O}}$	10E-3
Bulk Viskosität [Pa s]	$\mu_{\text{b,H}_2\text{O}}$	2.47E-3
Schallgeschwindigkeit [m/s]	$c_{\text{H}_2\text{O}}$	1480
Wärmeleitfähigkeit [W/m K]	$k_{\text{H}_2\text{O}}$	0.598
Wärmekapazität [J/kg K]	$C_{\text{p,H}_2\text{O}}$	4184
Isentropenexponent [-]	$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$	1
Luft		
Dichte [kg/m^3]	ρ_{Luft}	1.225
dynamische Viskosität [Pa s]	$\mu_{\text{d,Luft}}$	1.81E-5
Bulk Viskosität [Pa s]	$\mu_{\text{b,Luft}}$	1.35E-5
Schallgeschwindigkeit [m/s]	c_{Luft}	343.2
Wärmeleitfähigkeit [W/m K]	k_{Luft}	0.026
Wärmekapazität [J/kg K]	$C_{\text{p,Luft}}$	1.012
Isentropenexponent [-]	γ_{Luft}	1.4

5 Experimentelle Validierung

In der Forschung und Entwicklung spielt die experimentelle Validierung eine zentrale Rolle bei der Überprüfung wissenschaftlicher Hypothesen. Die Validierung beschreibt den Prozess, durch den überprüft wird, ob ein theoretisches Modell, eine Methode oder eine technische Lösung tatsächlich den realen Gegebenheiten entspricht. Experimentelle Verfahren dienen dabei als Brücke zwischen der Theorie und Praxis. Ein zentraler Aspekt der experimentellen Validierung besteht in der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus einer Simulation. Eine Simulation gilt als experimentell validiert, wenn die Ergebnisse aus beiden Teilen sehr ähnliche Ergebnisse erzielen. Dazu gehört, dass sich die Abweichung zwischen Simulation und Experiment in einem kleinen Rahmen aufhält [36].

In dieser Arbeit soll eine Simulation mit einem Experiment validiert werden. Die Tankgeometrie besteht aus mehreren Einzelteilen, welche miteinander verklebt werden. Normalerweise wird eine Modalanalyse für jedes einzelne Bauteil durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Tankmodell als komplette Baugruppe betrachtet und analysiert. Einzig die Trends der Resonanzfrequenzen sind in dieser Arbeit von Bedeutung und werden mit der Simulation verglichen, vgl. Kap. 6 [37].

5.1 Ziele und Methoden einer experimentellen Validierung

Die Überprüfung der Modellgenauigkeit ist ein wesentliches Ziel der experimentellen Validierung und besteht darin, die Präzision und Anwendbarkeit theoretischer Modelle zu überprüfen. Es geht darum festzustellen, ob die Annahmen eines Modells den beobachtbaren Phänomenen entsprechen. Die Validierung zielt darauf ab, die praktische Umsetzbarkeit und Verlässlichkeit von Technologien, Prototypen und Verfahren zu gewährleisten. Dies umfasst die Überprüfung der Leistungsfähigkeit unter verschiedenen Bedingungen sowie die Identifikation potenzieller Schwachstellen. Durch die experimentelle Validierung können neue Erkenntnisse generiert werden und bestehende Modelle oder Theorien angepasst oder erweitert werden. Im Fall von Diskrepanzen zwischen theoretischen Vorhersagen und den

empirischen Ergebnissen sind Forschende in der Lage, die Ursachen dieser Abweichung zu analysieren und neue Hypothesen zu formulieren. Ein weiteres Ziel der experimentellen Validierung besteht darin, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Ergebnisse müssen unabhängig von der ausführenden Person unter denselben Bedingungen stets ähnliche Resultate liefern [38].

Die Methoden der experimentellen Validierung umfassen unter anderem die direkte Messung. Diese ist eine häufig genutzte Methode der Validierung und beinhaltet die direkte Messung relevanter physikalischer Größen. Hierbei ist entscheidend, dass die Messverfahren präzise und zuverlässig sind sowie eine möglichst geringe Fehlertoleranz aufweisen. In vielen Fällen werden validierte Referenzsysteme herangezogen, um die Ergebnisse neuer Experimente zu überprüfen. Diese Methode ist besonders nützlich, um die Genauigkeit neuer Modelle in Bezug auf etablierte Standards zu bewerten. Je nach der Fragestellung kann zwischen statischen und dynamischen Tests unterschieden werden. Statische Tests beziehen sich auf eine Überprüfung von Strukturen oder Modellen in einem festen Zustand, während dynamische Tests das Verhalten eines Systems über die Zeit hinweg oder unter wechselnden Bedingungen analysieren [36], [37].

Obwohl die experimentelle Validierung ein zentraler Bestandteil der wissenschaftlichen Methodik ist, gibt es auch Herausforderungen und Grenzen, die zu berücksichtigen sind. Eine der größten Schwierigkeiten besteht darin, komplexe Systeme vollständig zu erfassen und alle Einflussfaktoren zu kontrollieren. Insbesondere in interdisziplinären Forschungsfeldern können unerwartete Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Variablen auftreten, die die Validierung erschweren. Darüber hinaus können experimentelle Methoden zeit- und kostenintensiv sein, was die Anwendbarkeit in bestimmten Kontexten einschränken kann. Ein weiterer limitierender Faktor ist die Unsicherheit bei der Interpretation der Ergebnisse. Selbst bei sorgfältiger Durchführung von Experimenten können Messfehler, methodische Verzerrungen oder unvollständige Modelle dazu führen, dass die Validität der Ergebnisse eingeschränkt ist [37], [38].

5.2 Messreihen

Die Messreihen für das Vibro-Akustische Messverfahren wurden im Akustiklabor der HAW Hamburg durchgeführt, bei einer Temperatur im Raum von 20°C , ein Luftdruck von 1013hPa und eine Luftfeuchtigkeit von 50%. Für die Durchführung und den Aufbau des Versuchstandes wurde folgendes Equipment verwendet, vgl. Tab. 5.1.

Tabelle 5.1: verwendete Messtechnik und Tools

Bezeichnung	Verwendung
Tankzusammenbau	
Plexiglas Zylinder	Tankmittelteil
Plexiglas Endkappen	Verschluss des Plexiglas Zylinders
TESA Haken	Aufhängung für den Tank im Gestell
Acryfix 1R 0192 Acrylkleber	Verbindungselement für Tankmittelteil und Endkappen
BOSCH PSR 1200 Li-2	Bohrung durch Tankwand zum Befüllung/Ablassen
Gestellzusammenbau	
item24 Profil 6 30x30	Gestellkonstruktion
Nutensteine	Befestigungselement für die Haken im Gestell
Schraubhaken	Aufhängungspunkt für Tank im Gestell
Winkelsatz 6 30x30	Verbindungselement für Gestell
Messtechnik	
Brüel und Kjaer Hand-Held-Analyzer Typ 2250/2270	Messgerät
Shaker TMS K2004E01	Schwingungserreger
Shakerstab 2110G06	Verbindungselement zwischen Shaker und Tank
Brüel und Kjaer Typ B 4508 Accelerometer (einachsige)	Beschleunigungsaufnehmer
PeakTech 30MHz Arbitraty Waveform Generator 410S	Signalgeber für den Shaker
Harz	Befestigung des Accelerometers am Tank
M4 Mutter	Verbindungselement zwischen Shakerstab und Tankwand

Im Folgenden wird die Durchführung der Messungen beschrieben. Diese gliedert sich in die Vorbereitung der Geräte, den Messvorgang sowie die abschließende Datensicherung.

Für die Vorbereitung wird der Tank mithilfe von Gummiseilen in das Gestell gehängt und mit der Messtechnik verbunden, vgl. Abb. 5.1. Die Messung wird gestartet und der Shaker führt einen linearen Frequenzsweep von 1Hz bis 1000Hz innerhalb von 10s durch. Jede Messung hat eine Dauer von 20s. Die interne Software des Hand-Held-Analyzers wandelt das elektrische Zeitsignal des Beschleunigungssensor über die Fourier Transformation in Frequenzinformationen um und stellt diese auf dem Display dar. Dadurch können während der Messung die Ergebnisse gesehen werden. Nach den zwei Durchläufen des Shakers ist die Messung vorbei und die Messdaten werden mithilfe der mitgelieferten Software von Brüel und Kjaer via USB Kabel exportiert.

Diese systematische Vorgehensweise stellt sicher, dass die Ergebnisse für alle Messreihen unter vergleichbaren Bedingungen erfasst werden.

Eine Messung beinhaltet fünf Messreihen. Die Messungen wurden für den leeren Tank und für den gefüllten Tank, mit den Füllständen 10%, 20%, 30%, 40%, 50% und 60% durchgeführt.

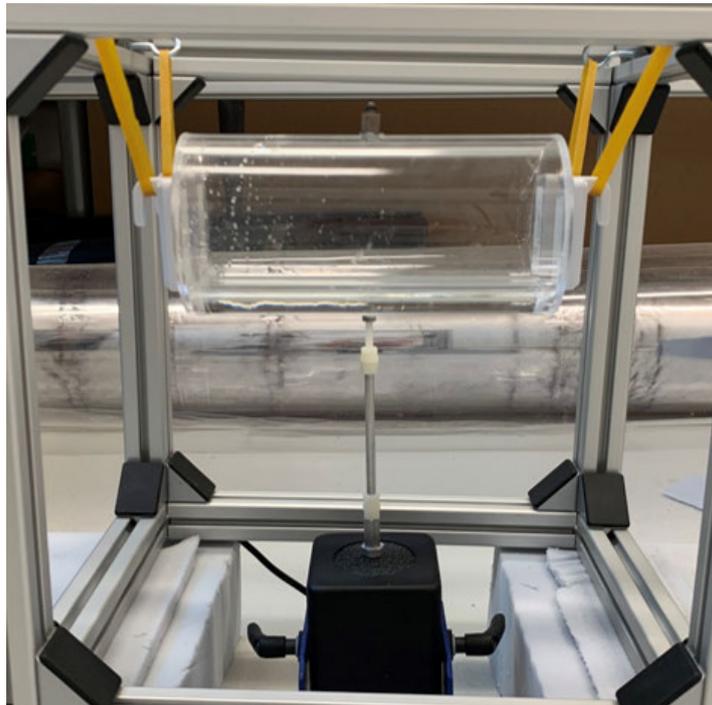


Abbildung 5.1: Seitenansicht des Tanks im Gestell mit Wasser

6 Auswertung

Zu Beginn der Auswertung wurden die einzelnen Messreihen der individuellen Füllstände aus dem Experiment gemittelt und die Standardabweichung bestimmt. Als Beispiel wurden die experimentellen Daten des leeren Tanks herangezogen. Für diese wurde der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt, vgl. Abb. 6.1.

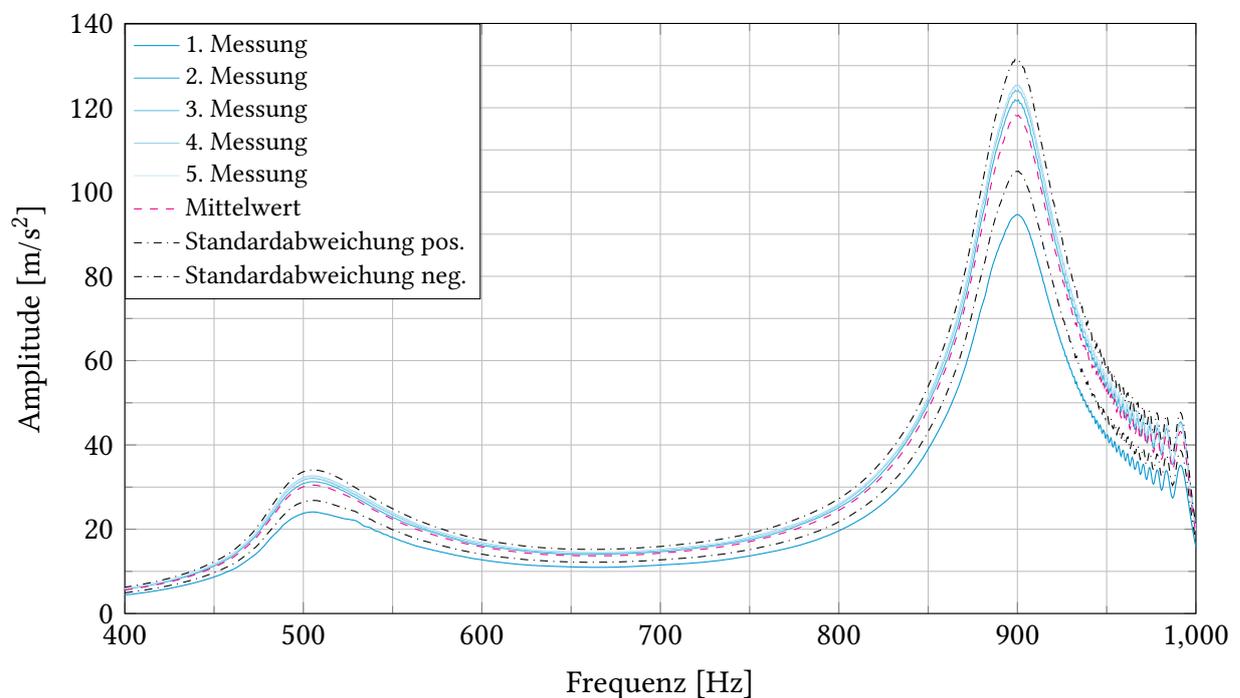


Abbildung 6.1: Experimentelle Daten aus den fünf Messdurchläufen für den leeren Tank

Die Bildung von Mittelwert und Standardabweichung der Messreihen wurde für alle Füllstände aus dem Experiment durchgeführt, vgl. Abb. 6.2. Aus dieser ist deutlich zu erkennen, dass ab einem Füllstand von 40% eine dritte Resonanzstelle in dem Frequenzband erscheint. In den Auswertemethoden wird sich auf die erste und zweite Resonanzstelle beschränkt. Die Daten aus der Simulation werden in Abb. 6.3 für alle Füllstände dargestellt.

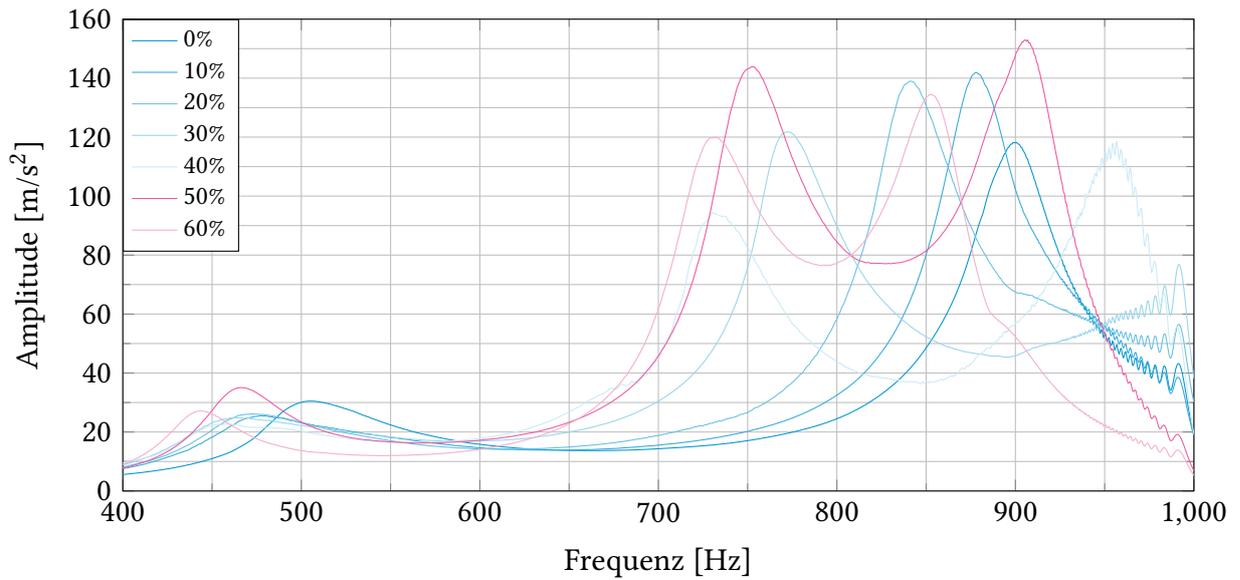


Abbildung 6.2: experimentelle Daten für alle Füllstände

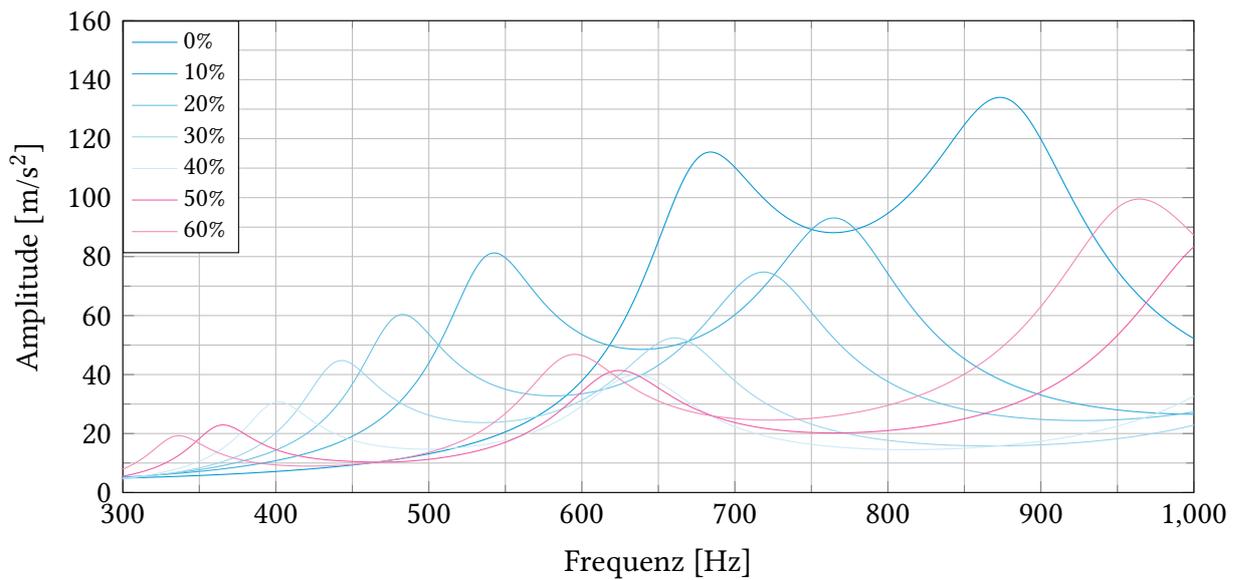


Abbildung 6.3: simulative Daten für alle Füllstände

6.1 Auswertemethode 1: Frequenzgang

Eine erste Auswertemethode wird mithilfe des Frequenzgangs des Systems ausgeführt. In dieser Arbeit wird die Peak-Picking-Methode verwendet, um die Resonanzfrequenzen des

Systems für unterschiedliche Füllstände zu identifizieren. Ziel ist es, die Veränderungen der Resonanzfrequenzen bei steigender Füllhöhe systematisch zu analysieren. Diese Methode basiert auf der Detektion lokaler Maxima in der gemessenen Übertragungsfunktion. In Tab. 6.1 sind die Ergebnisse für die Simulation und das Experiment für die erste und zweite Resonanzstelle zusammengetragen. Bei Betrachtung der Ergebnisse aus der Simulation ist bei beiden Resonanzstellen eine Wanderung des Peak-Punktes zu erkennen. Die Amplitude nimmt mit steigender Fluidmasse ab, was durch die steigende Dämpfung zu erklären ist, vgl. Kap. 3. Die Abnahme der Frequenz ist auf die steigende Masse im System zurückzuführen. Das ist durch die Gl. 3.29 zu erklären, vgl. Kap. 3. Bis auf die zweite Resonanzstelle für den Füllstand 60%, wo die Amplitude etwas ansteigt, spiegeln die Ergebnisse aus dem Peak-Picking für die simulativen Daten das erwartete Ergebnis wieder, welche in der Theorie in Kap. 3 beschrieben ist.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Peak-Picking-Methode für die Simulation und Experiment

Füllstand [%]	1. Resonanz [m/s^2]	Frequenz [Hz]	2. Resonanz [m/s^2]	Frequenz [Hz]
Simulation				
0	115.45	683.75	133.99	873.12
10	81.24	542.50	93.11	765.00
20	60.38	483.12	74.76	718.75
30	44.75	443.12	52.43	660.62
40	30.75	401.88	39.91	635.62
50	22.91	365.62	41.39	624.38
60	19.27	336.88	46.84	595.00
Experiment				
0	30.47	504.38	118.21	900.62
10	25.52	476.88	141.85	878.12
20	26.14	472.50	139.00	841.25
30	24.87	463.12	121.74	772.50
40	22.71	457.50	94.27	730.00
50	35.06	466.86	143.86	752.50
60	27.11	444.38	119.98	731.88

Bei der Betrachtung der experimentellen Daten lässt sich ein ähnliches Verhalten für die erste Resonanzstelle betrachten. Die Amplituden sinken mit steigendem Füllstand und die

Frequenzen sinken mit steigender Masse. Allerdings steigt ab einem Füllstand von 50% die Amplitude und der Frequenzwert über den Wert von 40% Füllung an. Mit weiter steigendem Füllstand sinkt die Amplitude und die Frequenz jedoch wieder ab. Gleiches gilt auch für die zweite Resonanzstelle, wobei bei 10% Füllstand der Amplitudenwert über den vom leeren Tank ansteigt. Außerdem ist zu beobachten, dass die Amplitudenwerte nur einen geringen Gradienten über die Füllstände haben im Vergleich zu den simulierten Amplituden. Diese Schwankung in den Amplitudenwerten ist darauf zurückzuführen, dass keine Modalanalyse vom Tank durchgeführt wurde, um somit sukzessive die Modellparameter anzupassen. Der Gradient hingegen ist deutlich größer bei der Frequenzverschiebung der experimentell ermittelten Peaks. Dieser zeigt einen deutlichen Trend, dass die Frequenzen mit steigender Masse zu tieferen Frequenzen wandern. In Abb. 6.4 sind die Trends der Frequenzverschiebung zwischen der Simulation und dem Experiment dargestellt.

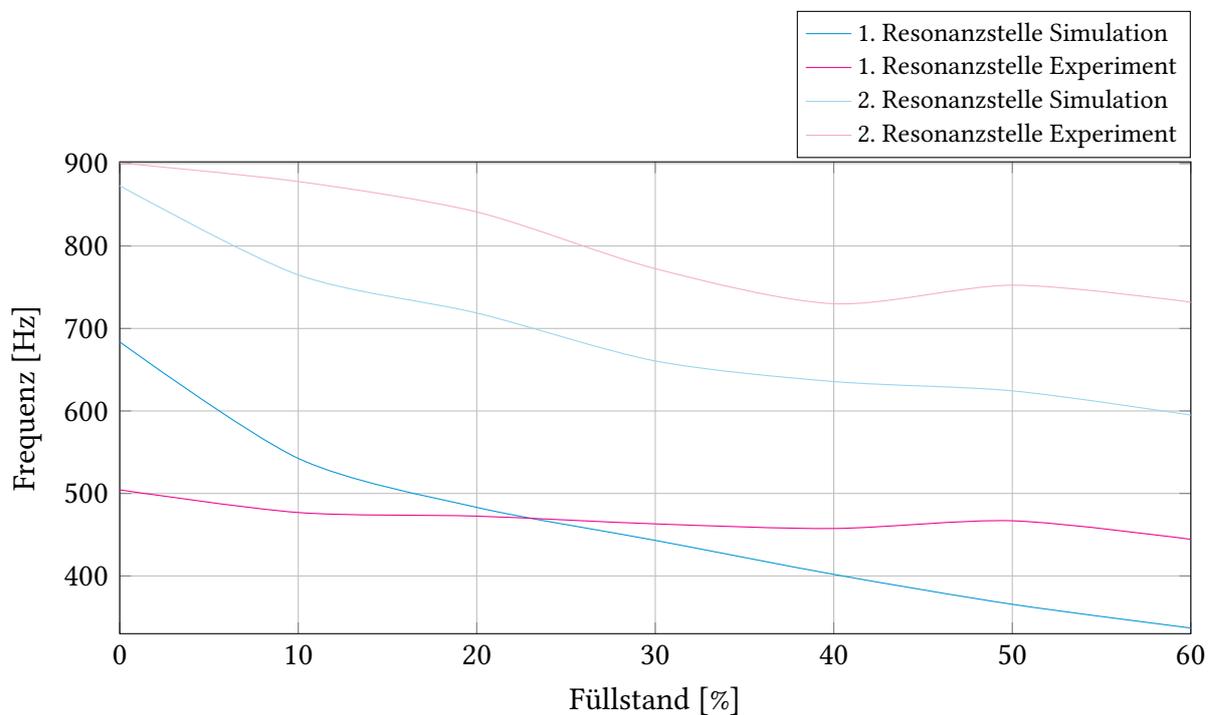


Abbildung 6.4: Resonanzfrequenzverschiebung für die 1. und 2. Resonanzstelle

Mithilfe der Trends, die aus den Kurvenverläufen der Simulation und des Experiments abgeleitet wurden, konnten entsprechende Trendlinien mithilfe von Excel generiert werden. Die Wahl des Polynomgrades bezieht sich auf die Verläufe der Kurven in Abb. 6.4. Diese Trendlinien werden durch allgemeine mathematische Gleichungen beschrieben, die eine analytische Berechnung der Frequenzverschiebung der Resonanzstellen ermöglichen, vgl. Tab. 6.2. Im Folgenden werden diese Gleichungen detailliert vorgestellt, wobei eine Differenzierung zwischen den aus der Simulation gewonnenen und den experimentell bestimmten

Ergebnissen vorgenommen wird. Die analytische Beschreibung der Frequenzverschiebung erfolgt dabei auf Grundlage der ermittelten funktionalen Zusammenhänge und ermöglicht eine präzise Vorhersage der Resonanzverschiebung in Abhängigkeit von relevanten physikalischen Parametern. Es ist zu beachten, dass die hergeleiteten Gleichungen spezifisch für die betrachtete Geometrie des Tanks, das verwendete Material sowie die Art und Weise der Anregung des Systems gelten. Änderungen dieser Parameter können zu Abweichungen führen, sodass eine Anpassung oder erneute Bestimmung der Trendgleichungen erforderlich sein kann. In den hergeleiteten Gleichungen wird die Variable x als Maß für den Füllstand in % verwendet. Dadurch kann die Abhängigkeit der Resonanzfrequenzverschiebung direkt in Abhängigkeit des Füllstandes beschrieben werden.

Tabelle 6.2: generische Gleichungen für die Resonanzfrequenzverschiebung

Resonanzstelle	Gleichung	R ²
Simulation		
1.	$y = 0.9423x^4 - 17.542x^3 + 119.07x^2 - 387.2x + 967.96$	0.9997
2.	$y = -0.547x^5 + 10.929x^4 - 82.46x^3 + 298.15x^2 - 570.55x + 1217.3$	0.9989
Experiment		
1.	$y = -0.0923x^4 + 0.4184x^3 + 5.4396x^2 - 40.77x + 549.46$	0.9877
2.	$y = -1.1363x^4 + 20.125x^3 - 117.75x^2 + 223.65x + 773.39$	0.9831

6.2 Auswertemethode 2: Impulsantwort

Bei Verwendung der Impulsantwort zur Analyse der ermittelten Daten wird der komplexe Frequenzgang durch eine inverse Fourier Transformation in den Zeitbereich transformiert. In Matlab wird das mit der Funktion „ifft“ durchgeführt, vgl. Codeblock 6.2, als Beispiel für die Inverse Fourier Transformation der Simulationsdaten und experimentellen Daten des leeren Tanks. Die Impulsantworten für die Simulationsdaten und experimentellen Daten werden in Abb. 6.5 und Abb. 6.6 dargestellt.

Codeblock 6.1: Inverse Fourier Transformation in Matlab

```

1 %Impulsantwort aus Simulationsdaten und experimentellen Daten
2 Sim_impulse_empty = ifft(Sim_complex_amplitude_empty);
3 Exp_impulse_empty = ifft(Exp_amplitude_empty);

```

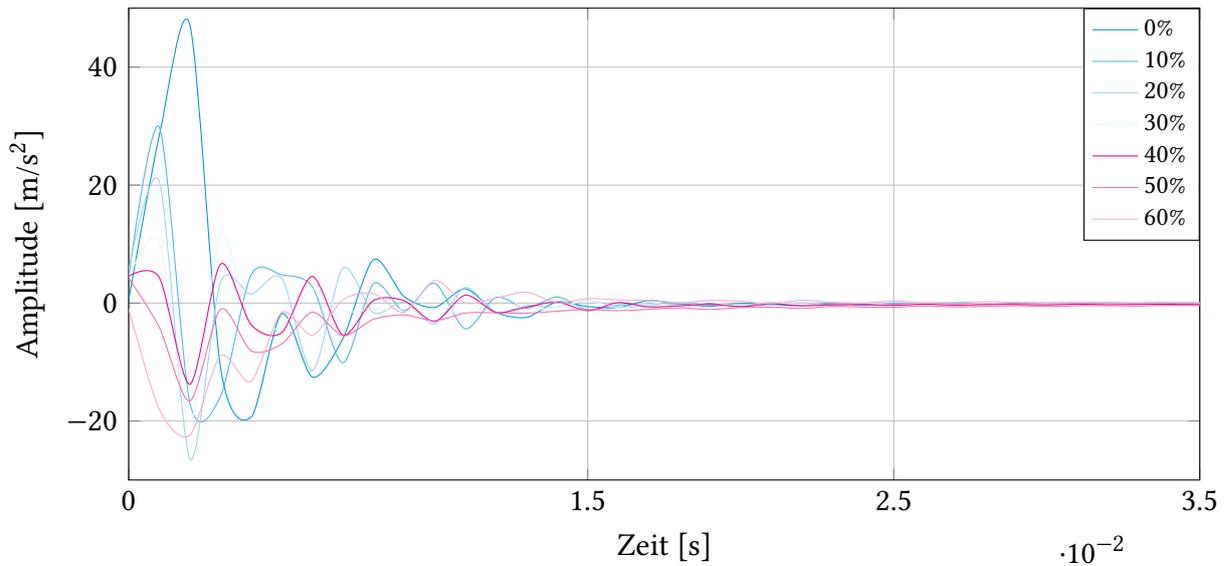


Abbildung 6.5: Impulsantwort aus den Simulationsdaten

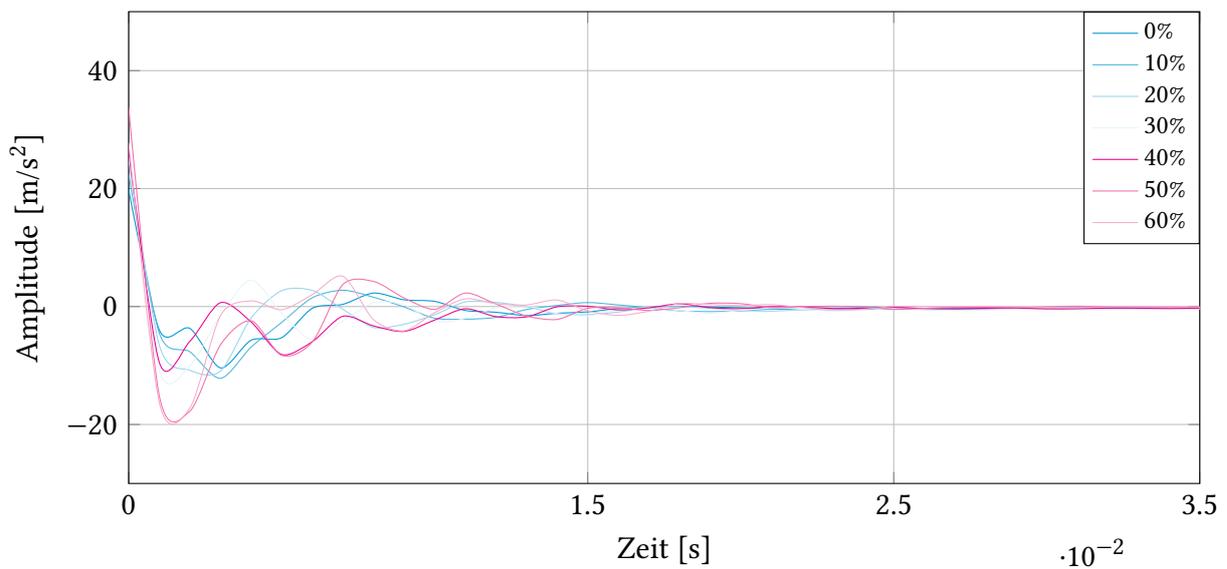


Abbildung 6.6: Impulsantwort aus den experimentellen Daten

Bei Betrachtung von Abb. 6.5 ist deutlich zu erkennen, dass die Amplitudenstärke mit steigendem Füllstand abnimmt. Dies ist auf die steigende Dämpfung durch den Anstieg der Fluidmasse im Tank zurückzuführen, vgl. Kap. 3. Allerdings zeigen die Ergebnisse aus Abb. 6.6, für die experimentellen Daten, einen gegenläufigen Trend, d.h., dass mit steigender Fluidmasse die Dämpfung sinkt. Dies steht im Widerspruch mit den theoretischen Grundlagen aus Kap. 3. Diesen Trend gilt es weiter zu untersuchen.

Im Folgenden wird mit den jeweiligen Impulsantworten weitergearbeitet. Zunächst werden die einzelnen Werte quadriert, der Betrag gebildet und anschließend einzeln aufsummiert. Die Betragsbildung erfolgt in Matlab mit der „abs“ Funktion, während die Aufsummierung mit der „cumsum“ Funktion durchgeführt wird, vgl. Codeblock 6.3. Schließlich werden die neuen Daten für die Simulation und das Experiment aufgetragen. Im Rahmen dieses Prozesses werden sogenannte abfallende Kurven im Dezibelbereich erzeugt, anhand derer eine valide Aussage über den Abbau der Schwingungsenergie getroffen werden kann, vgl. Abb. 6.7 und Abb. 6.8. Zu diesem Zweck wird der Startwert für jeden Füllstand sowie der Wert an dem Punkt, an dem die Kurve nahezu horizontal verläuft, gewählt. Die Ergebnisse der abfallenden Kurven für den Startwert und den Vergleichswert nach 0.015s sind in Tab. 6.3 gelistet.

Codeblock 6.2: Quadrierung und Aufsummierung der Impulsantworten

```

1 % Elementweise Quadrierung der Impulsantworten aus Simulationsdaten und
2 % Experiment
3
4 Sim_impulse_empty_sqr = abs(Sim_impulse_empty).^2;
5 Exp_impulse_empty_sqr = abs(Exp_impulse_empty).^2;
6
7 cumulativeSum_Sim_empty = cumsum(flip(Sim_impulse_empty_sqr));
8 cumulativeSum_Sim_empty = flip(cumulativeSum_Sim_empty);
9 cumulativeSum_Exp_empty = cumsum(flip(Exp_impulse_empty_sqr));
10 cumulativeSum_Exp_empty = flip(cumulativeSum_Exp_empty);

```

Tabelle 6.3: Ergebnisse aus den abfallenden Kurven für die Simulation und Experiment

Zeit [s]	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Simulation							
0	35.81dB	32.49dB	30.30dB	27.20dB	25.16dB	28.08dB	31.30dB
0.015	16.53dB	11.88dB	11.88dB	10.26dB	12.53dB	19.13dB	19.97dB
Experiment							
0	30.08dB	31.40dB	31.96dB	31.70dB	31.86dB	34.65dB	33.14dB
0.015	24.97dB	26.42dB	26.81dB	26.15dB	26.25dB	29.48dB	28.12dB

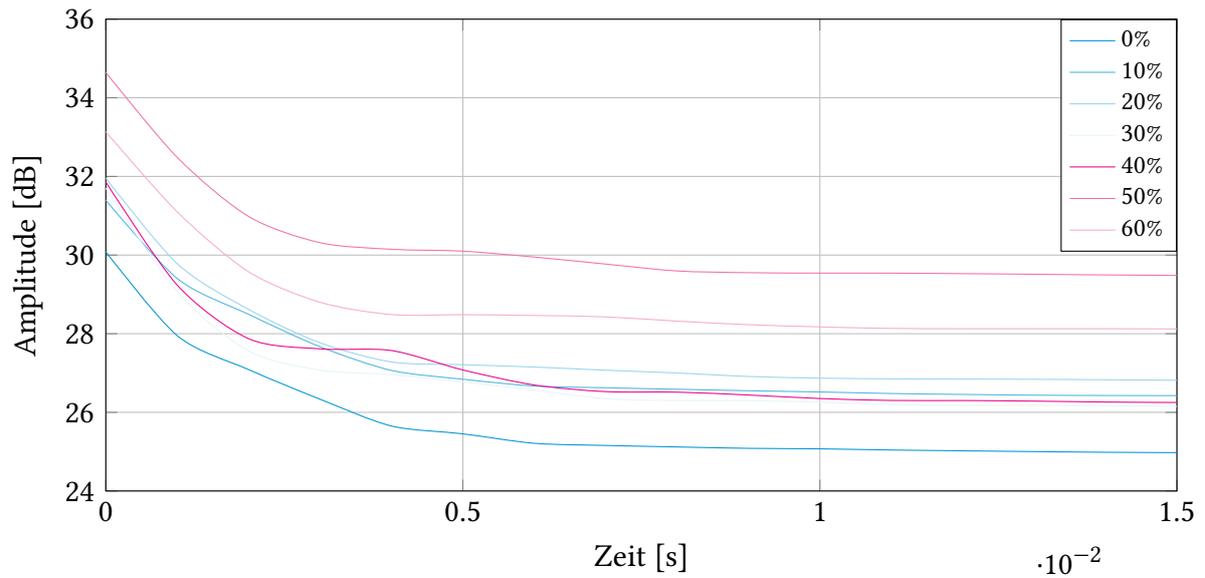


Abbildung 6.7: abfallende Kurve aus den experimentellen Daten

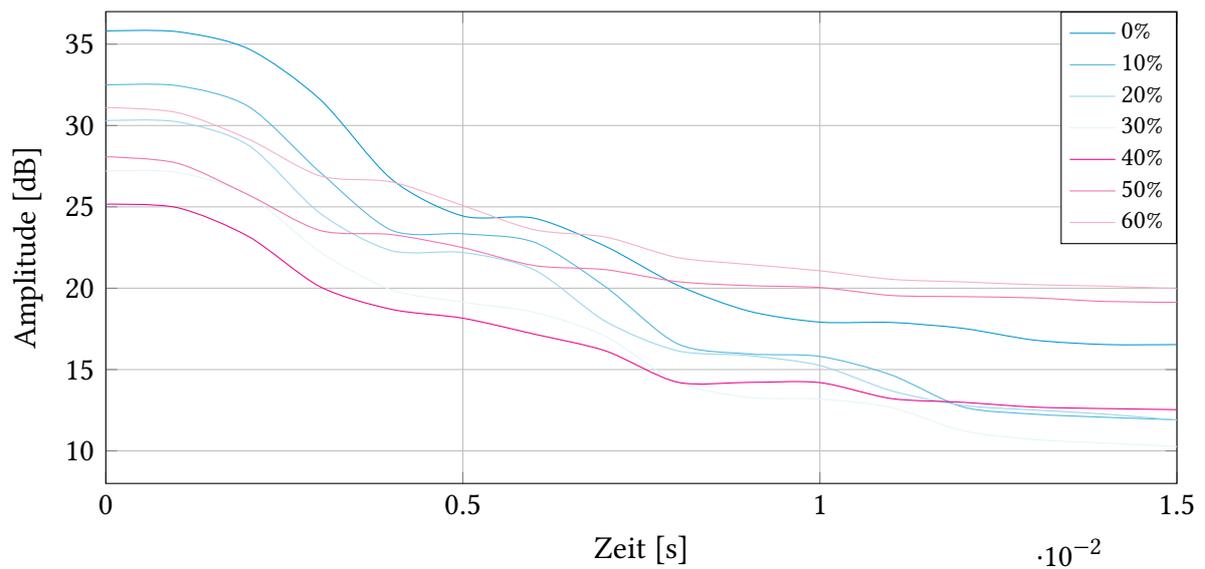


Abbildung 6.8: abfallende Kurve aus den Simulationsdaten

Bei der Betrachtung von Abb. 6.8 ist zu erkennen, dass die Amplitude bei $t = 0s$ mit steigendem Füllstand abnimmt. Ab dem Füllstand 50% steigt die Amplitude jedoch über den Wert der Amplitude für 30% Füllstand an. Bei weiterer Erhöhung des Füllstandes steigt die Amplitude weiter an. Außerdem verschiebt sich der Zeitpunkt t , für die Abnahme der Amplitude um etwa $20dB$, mit steigendem Füllstand zu einem späteren Zeitpunkt t . Daraus geht hervor, dass der Abbau der Schwingungsenergie abhängig vom Füllstand des Tanks ist. Für die

experimentellen Daten, vgl. Abb. 6.7 ist ein anderer Trend zu beobachten. Mit steigendem Füllstand steigt die Amplitude für den Zeitpunkt $t = 0s$ geringfügig an. Außerdem ist zu erkennen, dass das reale Tanksystem die Schwingungsenergie deutlich langsamer abbaut als in der Simulation.

6.3 Vergleich der Auswerteverfahren

In diesem Kapitel werden die beiden Auswerteverfahren Impulsantwort und Frequenzgang systematisch miteinander verglichen. Ein Maß für die Bewertung ist eine Sensitivitätsanalyse. Diese wird für beide Auswerteverfahren für jeden Füllstand durchgeführt und dann werden die Ergebnisse miteinander verglichen. Eine Sensitivitätsanalyse untersucht, wie empfindlich ein System oder ein Messverfahren auf Änderungen seiner Eingangsgrößen reagiert. In diesem Fall wird analysiert, wie stark sich die Ergebnisse der Impuls- und Frequenzantwort mit unterschiedlichen Füllständen verändern. Ziel ist es, die Robustheit und Genauigkeit der beiden Verfahren zu bewerten. Diese Analyse lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$S = \frac{\text{Startwert} - \text{Endwert}}{\text{Fuellstand}(\text{Endwert})} \quad (6.1)$$

Aus Gl. 6.1 wird ein Einzahlwert erzeugt. Die Ergebnisse für die beiden Auswerteverfahren sind in Tab. 6.4 dargestellt.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Auswerteverfahren	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Simulation							
Impulsantwort [dB]	-	206.1	92.1	56.46	31.57	17.9	18.88
	1. Resonanz	2. Resonanz					
Frequenzgang [Hz]	578.11	463.53					
Experiment							
Impulsantwort [dB]	-	49.8	25.75	18.5	14.02	10.34	8.36
	1. Resonanz	2. Resonanz					
Frequenzgang [Hz]	100	281.23					

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse wird deutlich, dass es einige Unterschiede zwischen den beiden Auswerteverfahren gibt. Das Verfahren der Impulsantwort

zeigt bei geringen Füllständen eine deutlich höhere Sensitivität als bei größeren Füllständen. Dies gilt sowohl für die Simulationsdaten als auch für die experimentellen Daten. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die einzige Sensorposition auf der Oberseite des Tanks in der Mitte sein. Bei niedrigen Füllständen können sich die reflektierten Signale aufgrund des größeren freien Volumens stärker ausbreiten und sind dadurch empfindlicher gegenüber Veränderungen. Mit steigendem Füllstand wird das Medium dichter gepackt, wodurch sich die Signalausbreitung verändert und die Sensitivität abnimmt. Allerdings ist festzustellen, dass die Abnahme der Sensitivität mit zunehmendem Füllstand stetig geringer wird, was auf eine Stabilisierung des Systems hindeuten könnte.

Bei der Frequenzgangauswertung zeigt sich, dass in der Simulation die erste Resonanzstelle sensitiver ist als die zweite Resonanzstelle, während im Experiment das Gegenteil der Fall ist. Diese Unterschiede lassen sich durch die experimentellen Randbedingungen sowie die Materialeigenschaften erklären. In der Simulation werden idealisierte Materialparameter verwendet, während in der Realität Streuungen und Inhomogenitäten auftreten können. Des Weiteren sind die realen Dämpfungsverhältnisse im Experiment anders als in der Simulation modelliert. Dies kann einen Beitrag zu den Unterschieden in der Sensitivität leisten. Außerdem sind die experimentellen Bedingungen, insbesondere die Position des Sensors, im direkten Einfluss auf die Erfassung der Resonanzen. Zudem können im Experiment externe Einflüsse wie Vibrationen, und andere Störquellen vorhanden sein, die sich auf die Resonanzmoden auswirken können. Des Weiteren könnten bei höheren Füllständen stärkere nicht-lineare Effekte auftreten, die in der Simulation möglicherweise nicht vollständig berücksichtigt werden.

6.4 Simulation mit LH2 und GH2

In diesem Kapitel wird der Einfluss von flüssigem (LH2) und gasförmigem Wasserstoff (GH2) auf das Messsystem untersucht. Diese Analyse erfolgt im Rahmen einer Simulation, bei der die Materialparameter entsprechend den physikalischen Eigenschaften von LH2 und GH2 angepasst sind. Ziel ist es, die Auswirkungen der Substitution von Wasser und Luft durch LH2 und GH2 auf die Resonanzstellen zu quantifizieren und zu bewerten. Der Wechsel von Wasser und Luft zu Wasserstoff bringt signifikante Änderungen in den relevanten Materialeigenschaften mit sich, insbesondere in Bezug auf Dichte, Schallgeschwindigkeit und Dämpfung, vgl. Tab. 6.5. Diese Parameter beeinflussen maßgeblich das akustische Verhalten des Systems und damit die Position sowie die Verschiebung der Resonanzstellen. Flüssiger Wasserstoff hat eine deutlich geringere Dichte und die Schallgeschwindigkeit ist geringer als von Wasser, wodurch eine Verschiebung der Resonanzstellen erwartet wird. Gasförmiger Wasserstoff unterscheidet sich hingegen stark von Luft in Bezug auf Dichte und akustische

Impedanz, was ebenfalls eine Verschiebung der Resonanzstellen zur Folge haben kann. Außerdem können die unterschiedlichen Dämpfungseigenschaften von flüssigem und gasförmigen Wasserstoff Einfluss auf die Breite und Intensität der Resonanzpeaks haben. In Abb. 6.9 sind der leere Tank und mit 10% Füllstand dargestellt. In diesem ist eindeutig zu erkennen, dass die Resonanzverschiebung deutlich geringer ausfällt als bei Wasser und Luft.

Tabelle 6.5: Materialeigenschaften von LH2 und GH2

Fluid	ρ [kg/m ³]	μ_d [Pa s]	c [m/s]	γ [-]	C_p [J/kgK]	k [W/mK]
LH2	71.10	134.89E-7	1094	1.41	9.52	0.098
GH2	1.2815	11.28E-7	363	1.84	11.89	0.016

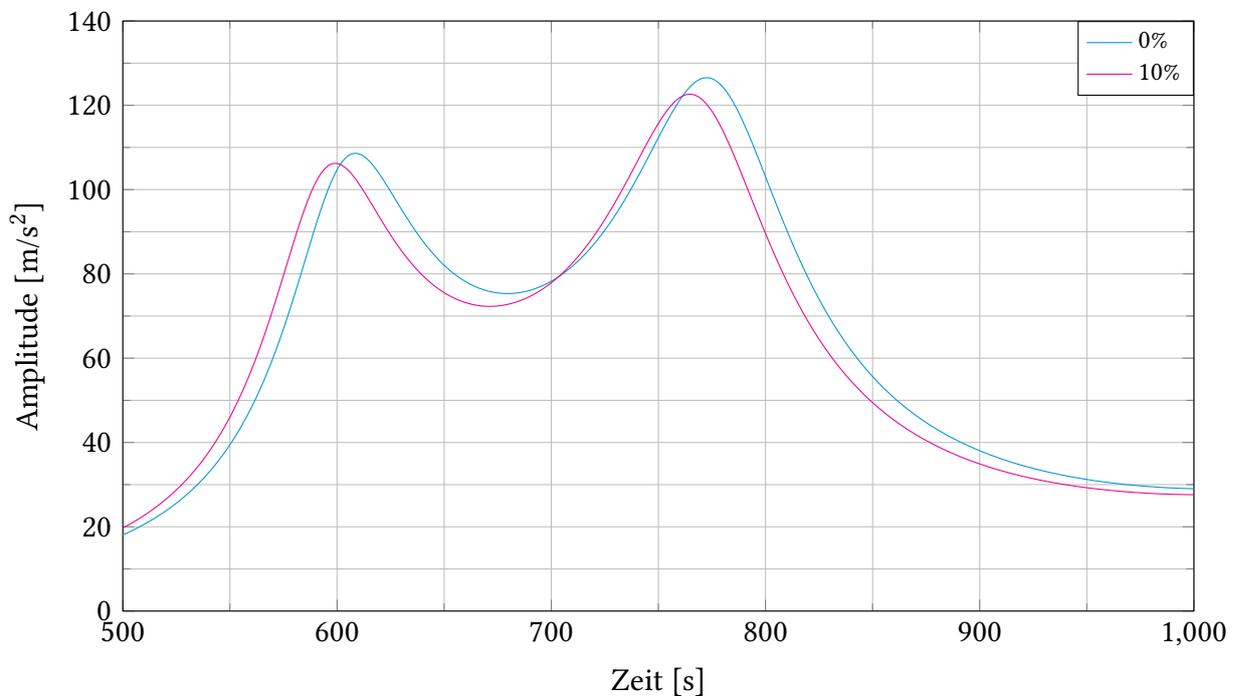


Abbildung 6.9: Simulationsdaten für den leeren und 10% Füllung Tank mit LH2 und GH2

Aus Abb. 6.9 geht hervor, dass die Resonanzfrequenzverschiebung bei steigendem Füllstand deutlich geringer ausfällt als für die Fluide Wasser und Luft. Die Substitution von Wasser und Luft zu LH2 und GH2 hat außerdem auch Einfluss auf die Informationen im Zeitbereich und die damit verbundene Auswertemethode über die Impulsantwort, vgl. Abb. 6.10 und Abb. 6.11.

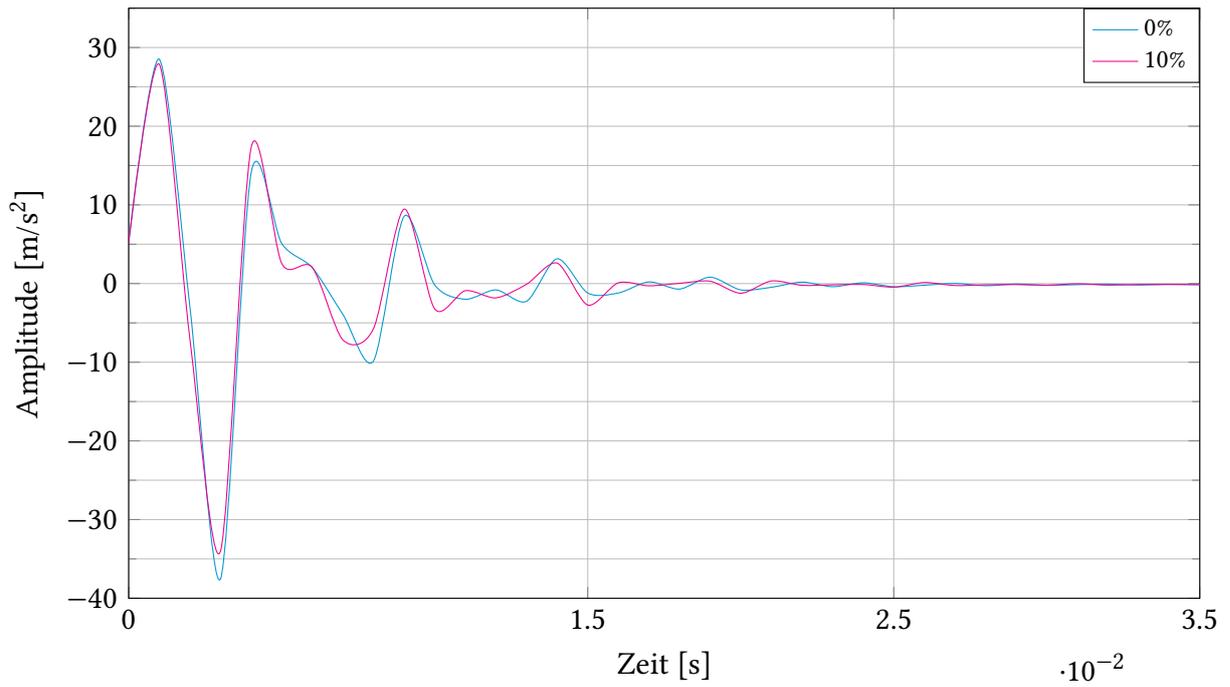


Abbildung 6.10: Impulsantwort aus den Simulationsdaten für Wasserstoff

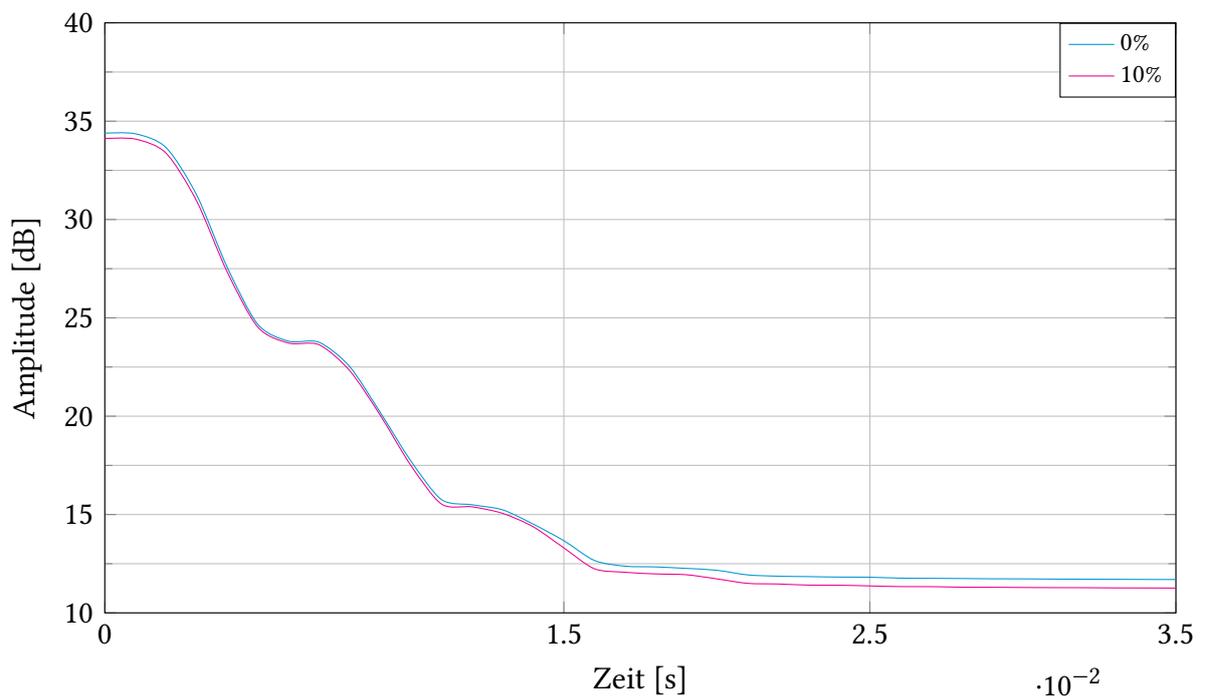


Abbildung 6.11: abfallende Kurve für Wasserstoff

Bei Betrachtung von Abb. 6.10 wird weiterhin der Unterschied zwischen den Fluiden deutlich. Eine Erhöhung des Füllstandes für das Wasserstoffsystem zeigt eine deutlich geringere Änderung der Amplituden im Schwingverhalten. Dieses Verhalten wirkt sich direkt auf die abfallenden Kurven aus. Aus Abb. 6.11 wird dieser Sachverhalt erneut deutlich. Die Unterschiede zwischen den Füllständen im Bezug auf den Abbau der Schwingungsenergie sind deutlich geringer als bei Wasser und Luft. Bei der Analyse der ersten Resonanzfrequenz im Frequenzgangauswerteverfahren lässt sich erkennen, dass die erste Resonanz empfindlicher auf Änderungen des Füllstands reagiert als die zweite Resonanzstelle, vgl. Tab. 6.6. Dieses Verhalten zeigt eine Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen für Wasser und Luft. Im Gegensatz dazu zeigt sich im Auswerteverfahren auf Basis der Impulsantwort, dass die Sensitivität mit zunehmendem Füllstand ansteigt. Dies steht im Widerspruch zu den Simulationsergebnissen mit Wasser und Luft, bei denen die Sensitivität mit steigendem Füllstand abnimmt.

Tabelle 6.6: Ergebnisse der Auswertung für LH2 und GH2

Füllstand [%]	1. Resonanz [m/s^2]	Frequenz [Hz]	2. Resonanz [m/s^2]	Frequenz [Hz]
Frequenzgang				
0	108.60	608.75	126.55	772.50
10	106.22	599.38	122.63	764.38
Sensitivität	23.8	93.7	39.2	81.2
Impulsantwort				
Zeit [s]	Füllstand 0%	Füllstand 10%		
0	34.39dB	34.12dB		
0.035	11.70dB	11.26dB		
Sensitivität	-	228.6		

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Untersuchung eines vibroakustischen Messverfahrens zur Bestimmung der Füllmenge in kryogenen Wasserstofftanks für Flugzeuge. Diese Forschung hat sowohl technologische als auch anwendungsbezogene Relevanz, da Wasserstoff als alternativer Kraftstoff für die Luftfahrt zunehmend in den Fokus rückt. Die präzise Messung der Kraftstoffmenge in kryogenen Tanks stellt jedoch eine große Herausforderung dar, insbesondere aufgrund der extrem niedrigen Temperaturen und der speziellen physikalischen Eigenschaften von flüssigem Wasserstoff (LH₂).

Ein zentrales Ziel dieser Arbeit war es, ein nicht-invasives Messverfahren zu entwickeln und dessen Leistungsfähigkeit experimentell sowie numerisch zu validieren. Die Nutzung eines vibroakustischen Ansatzes bietet den Vorteil, dass keine direkten Sensoren im Tank erforderlich sind, was die strukturelle Integrität des Tanks erhält. Die Untersuchungen basieren auf der Simulation physikalischer Modelle mit COMSOL multiphysics sowie experimentellen Validierungen an einem Testaufbau.

Das vibroakustische Verfahren basiert auf der Analyse der Resonanzfrequenzen der Tankstruktur. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass eine Korrelation zwischen der Füllmenge und den Schwingungseigenschaften besteht. Die Resonanzfrequenz verschiebt sich zu tieferen Frequenzen mit zunehmender Füllhöhe, was als Grundlage für die Füllmengenbestimmung genutzt werden kann. Dennoch sind einige Unsicherheiten bei der Messgenauigkeit und der Sensitivität der Methode vorhanden, insbesondere in Bezug auf Variationen der Tankgeometrie und den Umgebungsbedingungen. Besonders in realen Flugbedingungen können Vibrationen durch Triebwerke oder Luftströmungen die Messergebnisse verfälschen. Eine Herausforderung besteht daher darin, das Messverfahren so zu optimieren, dass es robuste Ergebnisse auch unter variierenden Umweltbedingungen liefert. Für weitergehende Untersuchungen ist daher eine Modalanalyse des Tanks zu empfehlen, die hier in dieser Arbeit aus Zeitgründen nicht möglich war. Jedoch konnten dafür die Trends aus den Ergebnissen interpretiert werden, die vielversprechende Hinweise ergeben.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung legen nahe, dass das vibroakustische Messverfahren eine vielversprechende Technologie für die Füllmengenmessung in Wasserstofftanks sein kann. Es bietet insbesondere für die Luftfahrt einen Vorteil, da es eine nicht-invasive und

potenziell zuverlässige Methode darstellt. In zukünftigen Arbeiten sollten jedoch die experimentellen Messungen unter realitätsnäheren Bedingungen getestet werden, bspw. unter variierenden Druck- und Temperaturverhältnissen sowie mit Wasserstoff als Fluid, um die Praxistauglichkeit weiter zu bestätigen.

Ein weiterer Forschungsansatz könnte die Kombination dieses Messverfahrens mit anderen Sensortechnologien sein. Hybridlösungen, die vibroakustische Messungen mit kapazitiven Verfahren kombinieren, könnten die Messgenauigkeit weiter verbessern und gleichzeitig die Robustheit gegenüber Störfaktoren erhöhen.

Zusammenfassend zeigt die Arbeit, dass das vibroakustische Messverfahren ein vielversprechender Ansatz für die Bestimmung der Füllmenge in kryogenen Wasserstofftanks ist. Die experimentellen und numerischen Analysen bestätigen die grundsätzliche Machbarkeit der Methode, weisen jedoch auch auf bestehende Herausforderungen hin, insbesondere hinsichtlich der Messgenauigkeit und der Anfälligkeit für externe Störungen. Zukünftige Forschungen sollten sich darauf konzentrieren, die Sensitivität des Verfahrens zu optimieren, dessen Anwendbarkeit auf verschiedene Tankdesigns zu erweitern, die Skalierbarkeit zu untersuchen und das Verhalten des Messsystems in verschiedenen Flugphasen zu untersuchen.

8 Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass das vibroakustische Messverfahren eine vielversprechende Möglichkeit zur Bestimmung der Füllmenge in kryogenen Wasserstofftanks darstellt. Um die Genauigkeit und Praxistauglichkeit der Methode weiter zu verbessern, sind jedoch weiterführende Forschungsarbeiten notwendig.

Ein wesentlicher Aspekt zukünftiger Arbeiten ist die Erweiterung des Simulationsmodells in COMSOL multiphysics. Bisher wurde das Modell unter statischen Bedingungen betrachtet, jedoch spielen in realen Luftfahrtanwendungen dynamische Temperatur- und Druckverhältnisse eine entscheidende Rolle, bspw. bei Entnahme von Wasserstoff aus dem Tank. Die extrem niedrigen Temperaturen von flüssigem Wasserstoff (LH₂) sowie die Druckänderungen während verschiedener Betriebsphasen beeinflussen das Schwingungsverhalten des Tanks. Daher sollte das numerische Modell um eine thermodynamische Kopplung erweitert werden, die es ermöglicht, den Einfluss von Temperaturgradienten und Druckschwankungen auf die Resonanzfrequenzen des Tanks zu analysieren. Dies würde eine realistischere Simulation der Betriebsbedingungen in einem Flugzeug ermöglichen und somit die Genauigkeit der Vorhersagen verbessern.

Ein weiterer Forschungsansatz ist die Untersuchung doppelwandiger Tank-Strukturen. Diese bieten die optimalsten Eigenschaften, um Wasserstoff flüssig zu lagern. Für eine detaillierte Analyse sollte zunächst eine Modalanalyse der Tankstruktur durchgeführt werden, um die Eigenfrequenzen und Modenformen des Tanks unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu bestimmen. Diese Ergebnisse könnten dann genutzt werden, um die Modellparameter in der Simulation gezielt anzupassen und ein optimiertes Sensorkonzept für die vibroakustische Messung zu entwickeln.

Ein weiterer kritischer Faktor ist die Art der Tankeinspannung. Bisher wurde der Tank im Testaufbau in einem Gestell mit Gummiseilen aufgehängt, um experimentelle Messungen durchzuführen. Zukünftige Untersuchungen sollten daher analysieren, wie der Tank im Prüfstand am besten eingespannt werden kann, um eine realistische Nachbildung der Bedingungen im Flugzeug zu gewährleisten. Hierbei sind verschiedene Szenarien denkbar. Die starre Einspannung könnte in einer realen Flugzeugstruktur schwer umsetzbar sein, da thermische Expansion und mechanische Belastungen berücksichtigt werden müssen. Die elastische

Lagerung könnte eine realistischere Nachbildung eines Flugzeugintegraltanks ermöglichen, indem sie die tatsächlichen Schwingungsmoden weniger beeinflusst. Die realistischste Lösung wäre eine direkte Integration des Tanks in die Flugzeugstruktur als Integralbauteil. Dies erfordert jedoch eine detaillierte Analyse der strukturellen Wechselwirkungen mit der Flugzeugstruktur, um Schwingungsresonanzen zu vermeiden. Für eine praxisnahe Simulation könnte das COMSOL-Modell um reale Befestigungsszenarien erweitert werden, sodass verschiedene Befestigungsmechanismen getestet und ihre Auswirkungen auf die Messgenauigkeit untersucht werden können.

Die Weiterentwicklung des numerischen Modells mit dynamischen Umgebungsbedingungen, die Untersuchung doppelwandiger Tankgeometrien und die detaillierte Analyse der Tank-einspannung sind entscheidende Schritte, um das vibroakustische Messverfahren für den praktischen Einsatz in der Luftfahrt weiterzuentwickeln. Diese Anpassungen werden dazu beitragen, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Füllstandsmessung zu verbessern und eine bessere Integration der Technologie in zukünftige Wasserstoffflugzeuge zu ermöglichen.

Literatur

- [1] D. Debney, „ZERO-Carbon Emission Aircraft Concepts“, *Aerospace Technology Institute*, Nr. FZO-AIN-REP-0007, 2022, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://www.ati.org.uk/>.
- [2] A. Alekseev, „Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff“, *Wasserstoff-Leitprojekte TransHyDe*, 2023. DOI: [10.5445/IR/1000155199](https://doi.org/10.5445/IR/1000155199).
- [3] T. Meyerhoff, H. Geisler, L. Zoghaib, G. Schramm und K. Crosby, „Filling Level Monitoring Device for a Fluid Gas Container, Hydrogen Tank and Aircraft Comprising such Hydrogen Tank“, US 2023/0366720 A1, 2023.
- [4] K. Kochan, V. Weinig, O. Burkhardt und J. Unteutsch, „Modellbasierte Entwicklung Kapazitiver Füllmengenmesssysteme für Flüssigwasserstofftanks in Flugzeugen“, *HAW Hamburg*, 2023, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://hdl.handle.net/20.500.12738/16454>.
- [5] P. Mess, „Füllstand“, *Profi Mess GmbH*, 2023, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://www.profi-mess.com/deutsch/pdfs/Fuellstand.pdf>.
- [6] V. Dovgal, „Optische Messmethoden zur Untersuchung der internen Strukturveränderung in Papier während der Trocknung“, *TU Darmstadt*, 2014, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4121/1/diss_final.pdf.
- [7] P. Fend, „Leitfaden für die Hydrostatische Füllstandsmessung“, *Baumer*, 2020, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: https://media.baumer.com/mamfile_1824759.pdf.
- [8] J. Rottmeier, „Statische und dynamische Gewichtsermittlung in Fahrzeugen und Maschinen zur Futterernte“, *Technische Universität München*, 1996, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1509129/1509129.pdf>.
- [9] D. Wang, „FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications“, *Texas Instruments*, 2014, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://www.ti.com/>.
- [10] K. M. Crosby, N. J. Williams, R. J. Werlink und E. A. Hurlbert, „Modal Propellant Gauging: High-resolution and non-invasive gauging of both settled and unsettled liquids in reduced gravity“, *69th International Astronautical Congress (IAC)*, 2018. DOI: [10.1016/j.actaastro.2019.01.050](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.01.050).

- [11] S. International, „Guidance for the Design and Installation of Fuel Quantity Indicating Systems (FQIS),“ *SAE International*, 2022. DOI: [10.4271/AIR5691B](https://doi.org/10.4271/AIR5691B).
- [12] K. Kochan, „Flugzeugsysteme Vorlesungsskript,“ *HAW Hamburg*, 2023.
- [13] D. Scholz, „Kraftstoffsystem ATA 28,“ *HAW Hamburg*, 2025, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/materialFS/FS_Skript_7-Kraftstoffsystem.pdf.
- [14] N. Bullerdiek u. a., „Einsatz von Multiblend JET A-1 in der Praxis,“ *TUHH*, 2019, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Download/Extern/DEMO-SPK_Endbericht_final.pdf.
- [15] Petron, „Petron Aviation Gasoline 100LL,“ *Petron*, 2006, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://www.petron.com/wp-content/uploads/2018/09/MSDS-Petron-AVGAS-100LL.pdf>.
- [16] D. Scholz, „Flugmechanik Vorlesungsskript,“ *HAW Hamburg*, 2025, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/MaterialFM1.html>.
- [17] I. Ebinger, „Thermodynamik Vorlesungsskript,“ *HAW Hamburg*, 2023.
- [18] J. W. Leachman, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello und E. W. Lemmon, „Fundamental Equations of State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Orthohydrogen,“ *University of Idaho*, 2009, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=832374.
- [19] R. D. McCarty, J. Hord und H. M. Roder, „Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data),“ *U.S. Department of Commerce/National Bureau of Standards*, 1981, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/MONO/nbsmonograph168.pdf>.
- [20] M. Wagner, „Flugzeugentwurf Vorlesungsskript,“ *HAW Hamburg*, 2025.
- [21] W. B. Young und H. Wai, „Acoustic Volume Indicator,“ US 2010/0218599 A1, 2010.
- [22] V. Weinig, „Modellbasierte Entwicklung eines nicht-invasiven Füllmengenmessverfahrens für Flüssigwasserstofftanks in Flugzeugen,“ *HAW Hamburg*, 2024.
- [23] E. Brommundt und D. Sachau, *Schwingungslehre mit Maschinendynamik*. Teubner, 2008, ISBN: 978-3-8351-0151-7.
- [24] G. Gäbel, „Schwingungslehre und Akustik Vorlesungsskript,“ *HAW Hamburg*, 2022.
- [25] M. Ertl und H. Landes, „Kombinierte Fluid-Struktur-Schwingungen in fluidgefüllten Leistungstransformatoren,“ *DAGA 2011 Düsseldorf*, 2011, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2011/data/articles/000437.pdf.
- [26] P.-O. Mattei, „Multiple Resonances in Fluid-Loaded Vibrating Structures,“ *37th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 2008, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://arxiv.org/abs/0812.1653v1>.

- [27] J. Wehr, N. Lee und M. Janiak, „Modal Propellant Gauging,“ *Carthage College*, 2018. DOI: [10.17307/wsc.v1i1.221](https://doi.org/10.17307/wsc.v1i1.221).
- [28] K. M. Crosby, T. Rundle, K. LeCaptain und R. Werlink, „Modal Propellant Gauging in Low Gravity,“ *Carthage College*, 2018. DOI: [10.2514/6.2016-5533](https://doi.org/10.2514/6.2016-5533).
- [29] T. Petersen, C. Bossong und B. Bartel, „Modal Propellant Gauging in Microgravity,“ *Carthage College*, 2018. DOI: [10.17307/wsc.v1i1.300](https://doi.org/10.17307/wsc.v1i1.300).
- [30] K. M. Crosby, S. Mathe, K. Anderson und A. Bakkum, „Modal Evaluation of Fluid Volume in Spacecraft Propellant Tanks,“ *Carthage College*, 2018. DOI: [10.17307/wsc.v0i0.46](https://doi.org/10.17307/wsc.v0i0.46).
- [31] F. T. Dodge, „Propellant Mass Gauging: Database of Vehicle Applications and Research and Development Studies,“ *Southwest Research Institute, San Antonio, Texas*, 2008, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20080034885/downloads/20080034885.pdf>.
- [32] B. Klein, *Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Springer Vieweg, 1990, ISBN: 978-3-8348-1603-0.
- [33] COMSOL, „COMSOL Multiphysics Reference Manual,“ *COMSOL*, 2025, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf.
- [34] COMSOL, „Structural Mechanics Module User’s Guide,“ *COMSOL*, 2025, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.sme/StructuralMechanicsModuleUsersGuide.pdf>.
- [35] COMSOL, „Acoustics Module User’s Guide,“ *COMSOL*, 2025, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf>.
- [36] J. Wellnitz und M. Gluschke, „Leitlinie zur Methodvalidierung,“ *Umweltbundesamt*, 2005, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2832.pdf>.
- [37] B. R. Pohl, „Experimentelle Validierung eines Georeferenzierungssystems für ein helikoptergestütztes Bodenradarsystem,“ *ETH Zürich*, 2015, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/617068>.
- [38] S. Hummel, C. Betzold, K. Kandasamy und A. Dentel, „Experimentelle Validierung von Simulationsmodellen an einem Hardware-in-the-loop Wärmepumpenprüfstand,“ *ETH Zürich*, 2020, aufgerufen: Feb. 21, 2025. Adresse: https://www.researchgate.net/publication/344437846_Experimentelle_Validierung_von_Simulationsmodellen_an_einem_Hardware-in-the-Loop_Warmepumpenprufstand.

Anhang

Tabelle 1: Messdaten und Auswertungsskripte

Messdaten	Bezeichnung
Exp00-60.xlsx	experimentelle Daten für Wasser und Luft für 0%-60% Füllstand
Sim10-60.csv	simulative Daten für Wasser und Luft für 0%-60% Füllstand
Sim00-Wasserstoff.csv	simulative Daten für LH2 und GH2 für 0% Füllstand
Sim10-Wasserstoff.csv	simulative Daten für LH2 und GH2 für 10% Füllstand
Matlabfile	Beschreibung
Auswertung-abfallende-Kurven.m	Matlabfile für die Auswertung des Experiments und Simulation für Wasser und Luft für die Füllstände 0%-60%
Auswertung-LH2-GH2.m	Matlabfile für die Auswertung der simulativen Daten für LH2 und GH2
Auswertung-mittelung-exp-Daten.m	Matlabfile für die Mittelung und Standardabweichung der experimentellen Daten
Einmassenschwinger.m	Matlabfile für einen Einmassenschwinger, um die Theoretischen Grundlagen zu erklären
Simulationsmodell	Bezeichnung
3D Fluid Structur interaction 4.mph	COMSOL multiphysics Modell

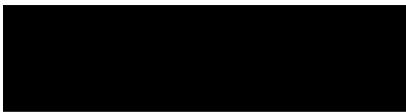
Für die Ausführung der Matlabfiles müssen die jeweiligen Messdaten im gleichen Verzeichnis wie das Matlabfiles liegen. In der Tab. 1 wurden die Dateinamen mit einem Bindestrich anstatt dem runtergestellten Strich geschrieben, da Latex das sonst falsch interpretiert.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

**Experimentelle und modellbasierte Untersuchung eines vibroakustischen
Messverfahrens zur Bestimmung der Kraftstoffmenge in kryogenen
Wasserstofftanks für Flugzeuge**

selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.



Hamburg, 25. Februar 2025