

Smart Damping: Digitaler Zwilling der Inerter-basierten Schwingungskontrolle

Samuel Peer¹, Andreas Thöni¹, Thomas Senfter², Franz-Josef Falkner¹

¹Studiengang Mechatronik; MCI – Die Unternehmerische Hochschule

²Studiengang Umwelt-, Verfahrens- & Energietechnik; MCI – Die Unternehmerische Hochschule

Abstract: Gebäude und technische Strukturen sind häufig harmonischen Vibrationsbelastungen ausgesetzt, die insbesondere von Maschinenfundamenten ausgehen. Bei deren Auslegung stellt sich die zentrale Frage einer wirksamen Schwingungsreduktion. Neben der etablierten Schwingungsisolation mittels Sylodyn-/Sylomer-Unterlagen stellt das Inerter-Konzept eine alternative Lösung dar. Ein Inerter transformiert translatorische Schwingungen in Rotationsbewegungen und nutzt das Trägheitsmoment eines Schwungrades zur Reduktion der übertragenen Bodenkraft bis hin zur gezielten Entkoppelung. Die vorliegende Arbeit vergleicht beide Konzepte anhand einer numerischen Simulation eines Schulgebäudes. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Inerter eine größere Bodenkraftreduktion erzielt werden kann, jedoch in einem deutlich engeren Frequenzbereich als bei der klassischen Schwingungsisolation. Zur Bewertung der praktischen Umsetzbarkeit wird zusätzlich ein Demonstrator im Labormaßstab realisiert. Der experimentelle Vergleich offenbart signifikante Abweichungen zwischen Simulation und Versuch sowie konstruktive Herausforderungen bei der Realisierung des Inerter-Konzepts und der Kraftanregung. Die Arbeit leistet einen Beitrag zur Weiterentwicklung digitaler Zwillinge dynamischer, mechanischer Systeme.

Keywords: Inerter, Digitaler Zwilling, Modalanalyse, Simulation

1. EINLEITUNG

Ein anschauliches Praxisbeispiel liefert ein Anregungsproblem in einem Schulgebäude: Im ebenerdigen Waschraum stehen drei Industriewaschmaschinen, die Erschütterungen in die Baustruktur einleiten. Vereinfachend wird diese Anregung als harmonische Kraft angenommen, was für das investigative Ziel dieser Untersuchung ausreichend ist. Infolge dieser periodischen Anregung überschreiten die gemessenen Deckenbeschleunigungen in den angrenzenden Räumen die zulässigen Grenzwerte. Eine suffiziente Reduktion der von den Maschinen eingeleiteten Bodenkraft ist daher notwendig.

Zur Begrenzung dieser Bodenkraft wird das Inerter-Konzept im Rahmen numerischer Simulationen mit der klassischen Schwingungsisolation mittels Sylodyn-/Sylomer-Matten verglichen. Der Vorteil des Inerters liegt in der Nutzung des Massenträgheitsmoments einer Schwungscheibe, wodurch eine gezielte und potenziell stärkere Reduktion der Bodenkraft erzielt werden kann als mit konventionellen Isolationsmaßnahmen. Für den effizienten Einsatz des Inerters ist jedoch exakte Kenntnis der Anregungsfrequenz unabdingbar, weil sich das angestrebte Phänomen der Schwingungsisolation im Frequenzband nur punktuell zeigt. Im Gegensatz dazu weist die klassische Schwingungsisolation eine größere wirksame Frequenzbandbreite auf, der erreichte Reduktionsfaktor der Bodenkraft ist jedoch geringer.

Abweichungen von der Zielerregung können die Wirksamkeit des Inerters deutlich reduzieren, weshalb eine sorgfältige Auslegung sowie eine realitätsnahe Modellierung – etwa im Rahmen eines digitalen Zwillings – von zentraler Bedeutung sind. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit anhand eines realitätsnahen numerischen Modells, ob bei der Auslegung des Maschinenfundaments eine Schwingungsisolation mithilfe eines Inerters gegenüber einer Sylodyn-/Sylomer-Einlage vorzuziehen ist. Beide Konzepte werden numerisch zwischen Maschine und Fundament eingesetzt.

2. METHODIK

Um diese Frage zu beantworten, wird ein numerisches Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) eines öffentlichen Schulgebäudes in ANSYS-Mechanical erstellt und mithilfe einer Modalanalyse die Eigenfrequenzen und Eigenmoden im Frequenzbereich $f \in [1; 30]$ Hz berechnet. Der Aufstellungsort der anregenden Maschine wird im Maximum eines lokalen Biegemodes im Erdgeschoss gewählt. Dieser Aufstellungspunkt wird durch einen Masterfreiheitsgrad (MasterDOF) repräsentiert, an dem eine harmonische Kraftanregung mit einer Kraftamplitude von $F_0 = 1$ kN erfolgt. Nachfolgende modale Reduktion mittels Substructure Generation reduziert die Struktur zu einem modalen Modell. Eine Modifikation im input.dat-File von ANSYS erlaubt eine achsisolierte Anregung normal zum Deckenfeld am MasterDOF sowie anschließendes Exportieren der Massen- und Steifigkeitsmatrizen in MATLAB. Dort werden am MasterDOF zwei zusätzliche Freiheitsgrade (FHG) für das Maschinenfundament und die Maschine angelegt, welche als weitere Kelvin-Voigt-Körper (KVK) modelliert werden. Über eine harmonische Analyse wird danach die vom Maschinenfundament eingeleitete Bodenkraft und korrespondierende Maschinenbewegung berechnet. Danach erfolgt der Vergleich der resultierenden maximalen Beschleunigungen für beide Isolationskonzepte. Da die Anregung im ungünstigen Fall nahe bei der Eigenfrequenz des gewählten Strukturmoden und der Maschinenlagerung liegt, wird die Beschleunigungsantwort für beide Isolationskonzepte bei einer Anregung von 9 Hz verglichen. Wie der Inerter-Mechanismus in der Praxis aussehen kann, wird am Ende der Arbeit anhand eines entwickelten Laborversuchsstandes erörtert.

3. NUMERISCHES MODELL

Wie eingangs erwähnt, bildet ein numerisches Modell eines Schulgebäudes den Ausgangspunkt der Untersuchung. Dieses wird in ANSYS SpaceClaim in ein Mittelflächenmodell überführt und anschließend einer Modalanalyse unterzogen. Die Geometrie hat folgende Abmessungen in Länge, Breite und Höhe: $L = 68\text{ m}$; $B = 55\text{ m}$ und $H = 12\text{ m}$ und wird mit linearen Quadshell-Elementen vernetzt, welche eine Elementgröße von $0,3\text{ m}$ haben. Das Rechenmodell ist nachstehend abgebildet.

B: Modal
Modal
Frequency: N/A
04.03.2026 19:26:13

A Fixed Support
B Fixed Support 2
C Mass_Decke_EG
D Mass_Decke_1OG

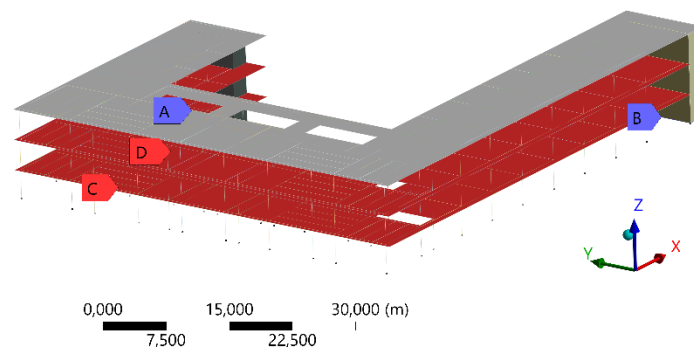


Abbildung 1: Numerisches Flächenmodell des Gebäudes

4. ERGEBNISSE

Aus der Modalanalyse ergibt sich ein geeigneter Frequenzbereich für die Untersuchung bis 30 Hz .

4.1. Modalanalyse der Struktur & lokaler Biegemode

Um eine möglichst effektive Kraftübertragung zu bewerkstelligen, wird aus den errechneten Eigenfrequenzen eine ausgewählt, welche einen möglichst uniaxialen lokalen Biegemode aufweist. Der gewählte Mode hat eine Eigenfrequenz von $f_n \approx 10,15\text{ Hz}$ und ist in nachstehender Grafik abgebildet. Dieser Mode ist für eine vertikale Kraftanregung geeignet, weil das Deckenfeld im Erdgeschoss nahezu ausschließlich Verschiebungen entlang der Z-Achse erfährt.

B: Modal

Lokaler_Biegemode
Type: Total Deformation
Frequency: 10,149 Hz
Unit: m
Max: 0,0034451
Min: 0
04.03.2026 19:53:28

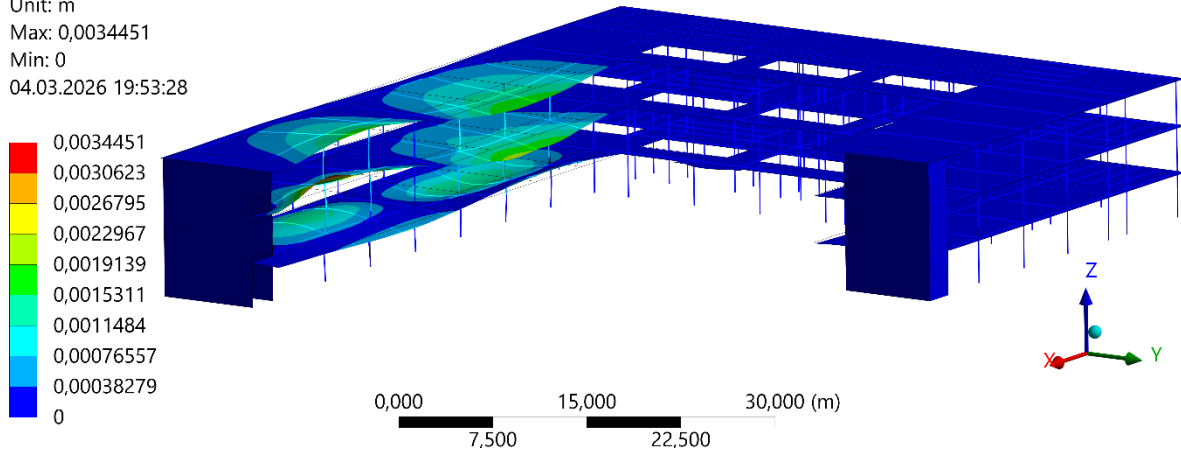


Abbildung 2: Lokaler Biegemode bei 10,149 Hz

Mithilfe der Component Mode Synthesis (CMS) wird innerhalb der Substructure Generation die Struktur zu einer Massen- und einer Steifigkeitsmatrix kondensiert und exportiert (Falkner, 2024). Zudem wird im input.dat-File festgelegt, dass eine Anregung nur in Z-Richtung erfolgt. Die weitere Analyse findet in MATLAB statt. Durch das Vernachlässigen schwach gekoppelter FHG sowie das anschließende Einfügen einer Dämpfungsmatrix wird das Modell vervollständigt. Die Dämpfungsmatrix weist jedem FHG eine Dämpfung von 2% zu. (Möser, 2020)

4.2. Maschinenfundament

Die Maschine und ihr Fundament werden als zusätzliche FHG am MasterDOF-Knoten eingefügt. Das Maschinenfundament besteht aus Beton der Festigkeitsklasse C25/30 und weist eine statische Gesamtmasse von $m_{MF} = 10 \text{ t}$ auf. Für die Maschine wird eine Masse von $m_M = 500 \text{ kg}$ angesetzt. An dieser Maschine findet die harmonische Kraftanregung statt. Für das Maschinenfundament werden die Ersatzfedersteifigkeit $k_{MF} = 2,02\text{E}7 \text{ N m}^{-1}$ und eine Dämpfung von $D_{MF} = 0,02$ angenommen. Im Referenzfall wird aus diesen Parametern ein Ersatz-KVK geschaffen, um die Schwingungsreaktion des reinen Betonfundaments zu berechnen.

4.3. Klassische Schwingungsisolation

Die zwischen Maschine und Fundament verbauten Syldyn-Matten fügen dem Maschinenfundament folgende dynamische Eigenschaften hinzu:

- Ersatzfedersteifigkeit: $k_{\text{syl}} = 3,1E5 \text{ N m}^{-1}$
- Dämpfungskonstante: $d_{\text{syl}} = 1E4 \text{ N s m}^{-1}$
- Dämpfung: $D_{\text{syl}} \approx 10 \%$
- Eigenfrequenz: $f_n = 1 \text{ Hz}$

4.4. Schwingungsisolation mit Inerter

Der Inerter fügt sich in das Modell des KVK als virtuelles Massenelement ein. Er trägt nicht zur statischen, sondern nur zur dynamischen Masse bei. Dieses Element hat die Inerterkonstante b und erweitert den Ein-Masse-Schwinger wie in Abb.3 gezeigt. Daraus resultiert folgende Bewegungsgleichung:

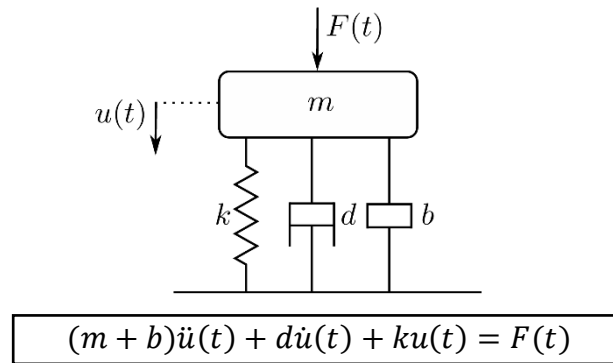


Abbildung 3: Ein-Masse-Schwinger mit Inerter (Peer, 2025)

Die Inerterkonstante berechnet sich aus dem Produkt des Massenträgheitsmoments mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses (Rajiv Tiwari, 2021). Der Inerter wird so dimensioniert, dass sein Arbeitspunkt mit der Anregungsfrequenz der Maschine $f_{\text{AP}} = 9 \text{ Hz}$ zusammenstimmt. Im vorliegenden Fall ergibt sich für die Inerterkonstante $b = 2100 \text{ kg}$. Somit ergibt sich die Reaktion der Substruktur wie nachstehend dargestellt. Alle Betrachtungen finden am FHG der Maschine und der ins Gebäude eingeleiteten Bodenkraft F_B statt. (Peer, 2025)

4.5. Resultierende Bodenkraft

Nachstehend ist die Bodenkraft für jeden der drei untersuchten Fälle geplottet. Die Referenzkurve beschreibt die Bodenreaktion ohne schwingungstilgende Maßnahmen und entspricht dem Praxisfall der starren Verbindung von Maschine, Fundament und Boden. Die Kurve „Inerter“ zeigt ein lokales Minimum im Krafteintrag in die Substruktur bei der jeweiligen Betriebsfrequenz. In der Bodenreaktion der Sylodyn-Isolierung lässt sich ebenfalls eine Verbesserung zeigen.

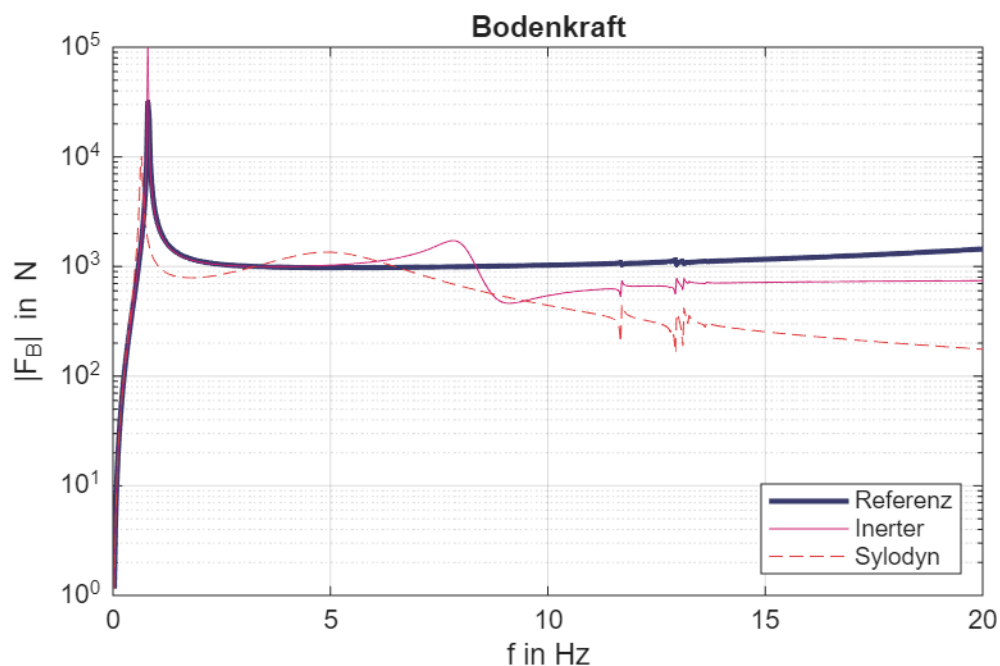


Abbildung 4: Bodenkraftvergleich der unterschiedlichen Isolationskonzepte mit Referenzkurve

Im direkten Vergleich zeigt sich im Arbeitspunkt $f_{AP} = 9$ Hz:

Tabelle 1: Betrag der Bodenkraft im Arbeitspunkt

Isolationskonzept	Bodenkraft in N
Referenz	1011,10
Inerter	466,55
Sylodyn-Einlage	530,70

Der Inerter reduziert die Belastung auf die Substruktur um einen Faktor von 2,16, wodurch die maximale Deckenbeschleunigung in allen Substrukturmoden ebenfalls um 2,16 kleiner wird. Bei den Sylodyn-Einlagen zeigt sich eine Verbesserung um einen Faktor von 1,90 gegenüber der Referenzsituation.

4.6. Maximale Maschinenbeschleunigungen

Der Einfluss der Substruktur macht es jedoch nicht möglich gleichzeitig die Bodenkraft und die Maschinenbeschleunigung zu minimieren. Die zur Anregung korrespondierenden Maschinenbeschleunigungen sind in Abb.5 gezeigt. Beide Isolationskonzepte bewirken im Arbeitspunkt eine signifikante Verschlechterung gegenüber der Referenzsituation.

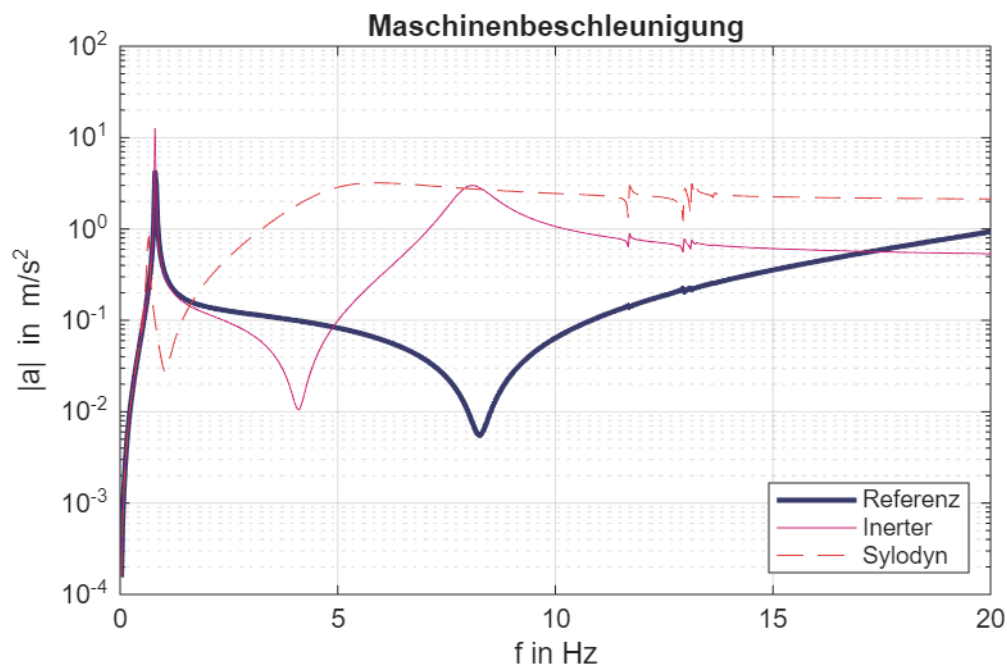


Abbildung 5: Beschleunigungen der Maschine für Isolationskonzepte mit Referenzkurve

Ein direkter Vergleich im Arbeitspunkt ergibt:

Tabelle 2: Betrag der Maschinenbeschleunigung im Arbeitspunkt

Isolationskonzept	Beschleunigung in m s^{-2}
Referenz	0,03
Inerter	1,63
Sylodyn-Einlage	2,59

Für den Inerter zeigt sich, dass die Beschleunigung im Vergleich zum Referenzfall also um das 54,33-fache ansteigt, für die Sylodyn-Einlagen ist Verstärkungsfaktor von 86,33 zu verzeichnen. Falls also das Ziel ist, den Krafteintrag in die Substruktur so gering wie möglich zu halten, heißt dies in der Konsequenz die Maschinenvibrationen erheblich zu steigern.

4.7. Empirische Ergebnisse vom Laborversuchsstand

Alle in diesem Unterkapitel entnommenen Informationen entstammen aus (Peer, 2025). Maßgeblich für die Strukturantwort ist die Bodenkraft. Beim Inerter kann hier die größte Verbesserung erzielt werden. Aufgrund der Unklarheit wie dieser Inerter-Mechanismus in der Praxis funktioniert, wird ein Laborversuchsstand entwickelt, welcher einen Inerter empirisch untersuchbar macht. Der fertige Versuchsstand ist in Abb.6 gezeigt.

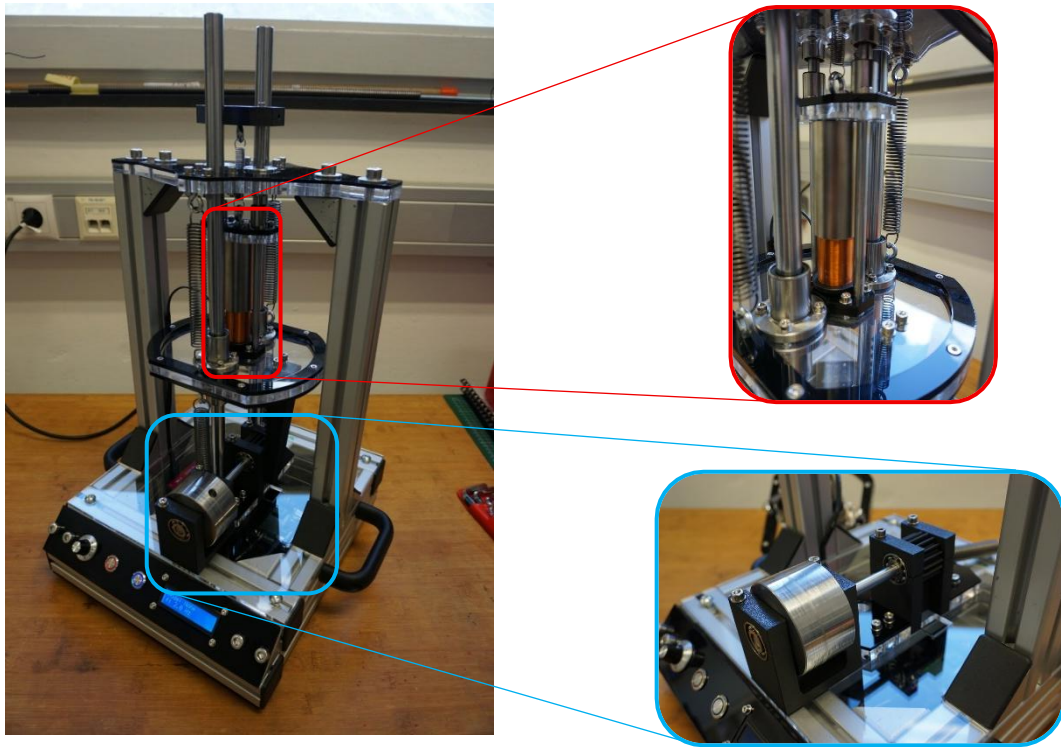


Abbildung 6: Inerterdemonstrator (Peer, 2025)

Die Kraftanregung ist über einen Voice-Coil-Aktuator (VCA) realisiert, welcher im roten Zoom erkennbar ist. Dieser steht auf einer Schwingplatte, die von 4 Federn gehalten ist. Sie fungiert als Maschinenfundament. An der Unterseite dieser Schwingplatte ist eine Zahnstange befestigt, die den Inerter antreibt (blauer Detailausschnitt), welcher starr mit einem Stirnrad an einer Welle dreht. Es gilt $b = 1,22 \text{ kg}$. Die Substruktur wird vom Boden des Versuchsstandes, bzw. dem Labortisch verkörpert. Für dieses System gelten folgende Parameter:

Tabelle 3: Mechanische Kennwerte des Versuchsstandes

Größe	Wert
Schwingende Masse	1,74 kg
Dämpfung	6,47 %
Ersatzfedersteifigkeit	837,58 N m ⁻¹

4.7.1. Gemessene Bodenkraft

Im direkten Vergleich zwischen Messung und Simulation zeigen sich signifikante qualitative und quantitative Abweichungen. Verglichen werden zwei numerische Modelle. Erstens das einfache Ein-Masse-Schwinger Modell wie in Abb.3 und zweitens ein erweitertes Zwei-Masse-Schwinger Modell (SDOF), welches die Dynamik eines Betondeckenfeldes im Untergrund miteinbezieht (2DOF). Dieser zweite KVK wird dem Modell in Abb.3 in Serie geschaltet. Da der VCA lediglich gesteuert und nicht geregelt wird, findet keine harmonische Kraftanregung mit konstanter Amplitude statt. Die tatsächliche Anregungskraft wird gemessen und auch in den Simulationsmodellen angesetzt. Es resultiert die Antwort in Abb. 6

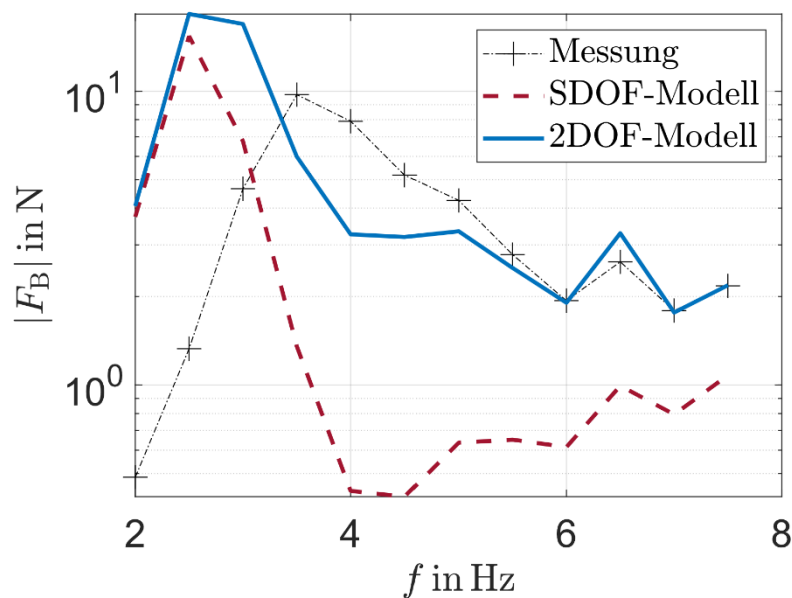


Abbildung 6: Vergleich zwischen Messung und Simulation (Peer, 2025)

Es zeigt sich mit zunehmender Frequenz eine bessere Angleichung an die postulierten Ergebnisse aus dem Zwei-Masse-Schwinger Modell. Bei geringeren Frequenzen ist jedoch weder eine Kohärenz zwischen Simulation und Messung noch das Phänomen der Schwingungsisolierung zu beobachten.

5. DISKUSSION

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen die grundlegenden Stärken und Schwächen des Inerter-Konzepts im Vergleich zur klassischen Schwingungsisolation mit Sylodyn-/Sylomer-Matten. Die numerische Analyse zeigt eine signifikante Reduktion der von der Maschine auf die Substruktur übertragenen Bodenkraft. Am Arbeitspunkt von 9 Hz konnte der Inerter die Belastung um den Faktor 2,16 gegenüber der Referenzsituation reduzieren, während Sylodyn-Einlagen lediglich eine Reduktion um den Faktor 1,90 erreichten. Dies bestätigt die theoretische Erwartung, dass das Trägheitsmoment der Schwungscheibe eine gezielte Entkopplung ermöglicht und die auf das Bauwerk übertragene Kraft punktuell minimiert. Gleichzeitig werden jedoch die Limitationen des Inerters deutlich: Die maximale Maschinenbeschleunigung steigt im Arbeitspunkt erheblich an – beim Inerter auf das 54-fache, bei den Sylodyn-Matten auf das 86-fache der Referenz. Ursache hierfür ist die Dynamik des aktivierten Struktur-Modes und die daraus resultierenden Trägheitskräfte. Die Reduktion der Bodenkraft wird somit durch eine Verlagerung der Schwingungsenergie auf die Maschine selbst erreicht. Dieser Effekt ist bei der praktischen Umsetzung zu berücksichtigen, da erhöhte Maschinenvibrationen potenziell Betriebssicherheit, Lebensdauer der Maschine sowie Arbeitsplatzbedingungen beeinträchtigen können. Wird hingegen die Maschinenbeschleunigung minimiert, steigt entsprechend die Belastung des Untergrunds. Die empirischen Ergebnisse aus dem Laborversuch zeigen zudem, dass die theoretischen Modelle – insbesondere das Kelvin-Voigt-Körper-Modell – die komplexe Dynamik des realen Systems nur begrenzt abbilden. Erst die Erweiterung zu einem Zwei-Masse-Schwinger-Modell, das die Dynamik des Betonfundaments einbezieht, liefert eine eingeschränkte qualitative Übereinstimmung mit den gemessenen Bodenkraftverläufen. Dies unterstreicht die Bedeutung eines realitätsnahen digitalen Zwillings für die Auslegung solcher Systeme. Abweichungen zwischen Simulation und Messung bei niedrigen Frequenzen lassen sich auf konstruktive Nichtlinearitäten, Reibungsdämpfungen sowie die bislang nicht modellierte, unkontrollierte Anregung des Voice-Coil-Aktuators zurückführen. Auch der Versuchsstand selbst weist insbesondere hinsichtlich der Kraftanregung und Bewegungsübertragung weiteres Optimierungspotenzial auf. Bezüglich der praktischen Anwendbarkeit zeigt sich, dass der Inerter in der Simulation bereits zuverlässig funktioniert. Die Umsetzung an realen Maschinenfundamenten, insbesondere als Nachrüstung, ist jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden und daher nur eingeschränkt realistisch. Zudem beeinflusst der im Labor realisierte Inerter lediglich einen Freiheitsgrad; bei multidimensionalen Schwingungsprofilen müsste für jeden Freiheitsgrad ein eigener Mechanismus implementiert werden. Die klassische Schwingungsisolation bietet hier eine größere Robustheit gegenüber variierenden Anregungsfrequenzen, allerdings bei geringerer maximaler Kraftreduktion. Darüber hinaus lassen sich Sylodyn-/Sylomer-Matten vergleichsweise einfach nachrüsten.

Zusammenfassend besitzt das Inerter-Konzept ein hohes Potenzial zur gezielten Reduktion der Bodenkraft, wirkt jedoch nur unter klar definierten Betriebsbedingungen optimal. Eine erfolgreiche Implementierung erfordert eine präzise Abstimmung auf die Anregungsfrequenz sowie eine realitätsnahe Modellierung, die auch nichtlineare Effekte und die Dynamik des Fundaments berücksichtigt. Für Anwendungen, bei denen erhöhte Maschinenvibrationen toleriert werden können und eine punktuelle Entkopplung der Bodenkraft entscheidend ist, stellt der Inerter eine vielversprechende Alternative zur konventionellen Schwingungsisolation dar.

Literaturverzeichnis

Falkner, F.-J. (2024). Component Mode Synthesis. Innsbruck, Tirol, Österreich.

Möser, M. (2020). *Modalanalyse*. Heidelberger Platz 3, Berlin: Springer.

Peer, S. (2025). *Entwicklung, Planung und Umsetzung eines Inerterdemonstrators*. 6020 Innsbruck.

Rajiv Tiwari, Y. M. (2021). *Vibration Engineering and Technology of Machinery, Volume 2*. Singapur: Springer.