



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 43



Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

9. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**9. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE
UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 43

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Prof. Dr.-Ing. Bernd W. Zastrau

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 65 68
Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer
Korrekturen: Angela Heller
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan
Titelfoto: Sabine Wellner, bearbeitet von Sven Hofmann

Diese Publikation gibt es auch Open Access auf www.qucosa.de.

Redaktionsschluss: 31. August 2017

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, 21. September 2017

ISSN 1613-6934

Inhalt

Vorwort <i>Silke Scheerer, Torsten Hampel</i>	5
Willy Gehler als Protagonist der experimentellen Bauwerksuntersuchung <i>Oliver Steinbock</i>	7
Das Potenzial thermo-mechanischer Messungen für die Werkstoffcharakterisierung <i>Volker Wetzke, Franziska Pannasch</i>	23
Detektierung von Betonschäden an schwer zugänglichen Bauwerken mittels Thermografie <i>Helena Eisenkrein-Kreusch, Florian Bavendiek</i>	39
Messtechnische Bewertung des Zustandes des spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahles des U-Bahnhofs Poccistraße in München <i>Hermann Weiher, Katrin Runtemund, Christian Glomp</i>	49
Baubegleitende Zustandsüberwachung von Brücken <i>Max Käding, Marc Wenner, Steffen Marx</i>	63
Messtechnische und teilweise fotooptische Erfassung von Formänderungen an ertüchtigtem und nicht ertüchtigtem Bruchsteinmauerwerk unter Labor- und Praxisbedingungen <i>Sabine Koch, Axel Dominik, Jessica Klinkner, Clara-Maria Nocker, Domenika Baroness von Kruedener, Pascale Dominik</i>	75
Untersuchungen im Rahmen der geplanten Ertüchtigung zweier Pfeiler des St.-Marien-Doms Zwickau <i>Michael Kühn, Peter Schöps</i>	93
Bewertung der Restlebensdauer von Spannbetonbrücken durch Koppelfugenmonitoring an Praxisbeispielen <i>Dirk Sperling, Hauke Schmidt</i>	113
Ludwig-Erhard-Anlage Frankfurt a. M. – Belastungsversuche zum Nachweis der Tragfähigkeit historischer Rippendecken <i>Peter Braun, Gunter Hahn, Gerd Kappahn, Edyta Wünsch</i>	123
Durchführung von Belastungsversuchen an einbetonierten Ankerschienen in Spannbetonbindern <i>Marco Tschötschel, Bente Ebsen</i>	135
Der Löwenhof in Dortmund – Experimentelle Statik zum Erhalt historischer Eisenbetondecken <i>Martin Gersiek, Marc Gutermann, Friedhelm Löschmann, Marcus Patrias</i>	143

Sportstätten mit weitgespannten Hallendächern – Sicherstellung der Tragfähigkeit unter Schneelast durch bauwerksdiagnostische Untersuchungen, Nachrechnung, Belastungsuntersuchung und Monitoring <i>Robert Herold, Elke Reuschel, Peter Bauer</i>	157
Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke <i>Gregor Schacht, Jens Piehler, Erik Meichsner, Steffen Marx</i>	169
Erweiterte Strukturabbildung von Brücken mit adaptiven mathematischen Modellen zur Lösung aktueller noch ungelöster Probleme <i>Klaus Brandes, Petra Kubowitz, Werner Daum, Detlef Hofmann, Frank Basedau</i>	183
Messtechnische Bewertung der dynamischen Tragfähigkeitsreserven eines Probenbühnenbodens der Semperoper Dresden <i>Tino Kühn, Marcus Hering, Heiko Wachtel, Sabine Wellner</i>	189
Untersuchungen des Otto-Mohr-Laboratoriums an historischer Bausubstanz in und um Dresden <i>Sabine Wellner, Silke Scheerer, Torsten Hampel</i>	207
Übersicht KID-Hefte	215

Messtechnische Bewertung der dynamischen Tragfähigkeitsreserven eines Probefühnenbodens der Semperoper Dresden

Tino Kühn¹, Marcus Hering², Heiko Wachtel³, Sabine Wellner⁴

Zusammenfassung: Die Semperoper Dresden ist bekannt für ihren jährlich im Februar stattfindenden Opernball mit viel Prominenz aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Eingeleitet wird dieser mit der Vorstellung der jährlichen Debütanten, welche mit diesem Akt in diesen erlauchten Kreis eingeführt werden sollen. Doch 2017 war alles ganz anders. Nach umfangreichen Umbaumaßnahmen an der Probefühne konnte diese nicht im geplanten Umfang für diese Feier freigegeben werden. Die speziellen Anforderungen an die Tragfähigkeit der Deckentragwerke für derartige Tanzveranstaltungen konnten nicht nachgewiesen werden. Das Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden wurde beauftragt, das dynamische Verhalten der Struktur messtechnisch zu erfassen und das Tragverhalten abzuschätzen. Der Nachweis gelang und sieben Tage vor der Veranstaltung wurde die Sperrung des Gebäudes hierfür von den Behörden aufgehoben.

Summary: Measurement of the dynamic load bearing capacity of a dance stage at Semperoper Dresden. The Semperoper Dresden is famous for its annual opera ball in February, with a lot of prominent from politics, business and science. It is opened with the introduction of the annual debutants which are to be introduced into this illustrious circle with this act. But in 2017, everything was quite different. After extensive conversion work on stage, this could not be released to the planned extent for this celebration. The special requirements for the load carrying capacity of the deck structures for such dance events could not be demonstrated by the structural engineers. The Otto Mohr Laboratory of the TU Dresden was commissioned to analyse the dynamic behaviour of the structure by means of measuring technology and to estimate the bearing behaviour. The proof was obtained and the authorities reverse the closure of the building almost seven days before the event started.

1 Experimentelle Analyse und Vorgehensweise

Für die dynamische Bewertung der Tragfähigkeitsreserven des Probefühnenbodens wurden dynamische Kennwerte messtechnisch ermittelt. Hierfür war als erstes die Bestimmung eines statischen Referenzlastfalles notwendig. Dies ist mit Hilfe einer entsprechenden statischen Deckenbelastung realisierbar. Aus der statischen Durchbiegung der Deckenunterseite bei bekannter Last lässt sich recht einfach eine statische Deckensteifigkeit ableiten und auf einen gewissen Schädigungsgrad bzw. auf eine entsprechende Rissbildung schließen. Hieraus lässt sich eine gewisse Degradation im numerischen Modell durch eine einfache Reduzierung der Elastizitätskennwerte berücksichtigen.

1 M.Sc., Institut für Massivbau, TU Dresden

2 Dipl.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

3 Otto-Mohr-Laboratorium, TU Dresden

4 Dipl.-Ing. (FH), Otto-Mohr-Laboratorium, TU Dresden

Für die Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften der Decke wurden in einem weiteren Arbeitspunkt modale Kennwerte durch eine definierte Impulsanregung der Rohdecke bestimmt. Die charakteristischen Eigenfrequenzen wurden dazu messtechnisch an verschiedenen Stellen erfasst. Daraus lassen sich sowohl die strukturellen Gesamtdämpfungen der Rohdecke als auch die Übertragungsfunktionen des Gesamtsystems ermitteln.

Für die Bewertung verschiedener Anregungsspektren wurden als Nächstes unterschiedliche Belastungsszenarien messtechnisch erfasst. Sie ermöglichen die Bewertung der auftretenden spektralen Lasten in Abhängigkeit von Personengewicht, Schrittgeschwindigkeit, Personenanzahl und Bodenaufbau. Die Herausforderung dabei war, das Übertragungsverhalten des speziellen Bühnenbodenaufbaus in geeigneter Weise zu erfassen, da der Ansatz der reinen Rohdeckeneigenschaften zu konservativ wäre. Hierfür wurden wiederum Beschleunigungen auf dem Fußboden auf der Anregungsseite und auf der Reaktionsseite für verschiedene spektrale Belastungsszenarien erfasst. Aus diesen wurde das modale Übertragungsverhalten in einem relevanten Frequenzbereich als normierter Lastfall abgeleitet.

Aus einer rein messtechnischen Sicht waren hierfür folgende Kenngrößen zu erfassen:

- ☐ Statische Verschiebung Stahlbetondecke Unterseite,
- ☐ Bestimmung der statischen Deckensteifigkeit,
- ☐ Ableitung der maximalen statischen Traglastreserven,
- ☐ Dynamische Verschiebung bei einmaliger Impulsbelastung.

Realisiert werden konnte dies durch den Einsatz

- ☐ eines Infrarotvibrometers zur direkten berührungslosen Bestimmung der Verschiebungen und Geschwindigkeiten der Deckenunterseite und
- ☐ von 3 Beschleunigungsaufnehmern auf der Deckenoberseite, im Randbereich und auf der Rohdeckenunterseite zur Bestimmung der Belastungsspektren.

Die Anordnung der geplanten Messstellen ergibt sich aus einer numerischen Modalanalyse unter Berücksichtigung der vier relevantesten Moden. Die Anregung der Decke erfolgte jeweils an den Punkten der maximal zu erwartenden Durchbiegungen.

2 Experimentelle Ergebnisse – statische Durchbiegung

Zur Abschätzung der statischen Deckensteifigkeit wurde die Decke punktuell an der Position der maximalen Durchbiegung mit Massen von bis zu 450 kg beansprucht. Bild 1 zeigt die Ergebnisse der Messung bei einer Masse von ca. 240 kg während der Abnahme der Massen. Die maximale Verschiebung beträgt in diesem Fall 0,019 mm, was in etwa einer Ersatzsteifigkeit von 125 kN/mm entspricht.

- ☐ Beanspruchung: 240 kg
- ☐ Durchbiegung: 0,019 mm
- ☐ Ersatzsteifigkeit: 125 kN/mm

Berücksichtigt man den leichten Versatz von der Belastungsstelle zur Messstelle, liegen die im Vorfeld ermittelten analytischen Annahmen der Durchbiegungen mit 0,0188 mm in einem realistischen Bereich und bedürfen keiner Korrektur.

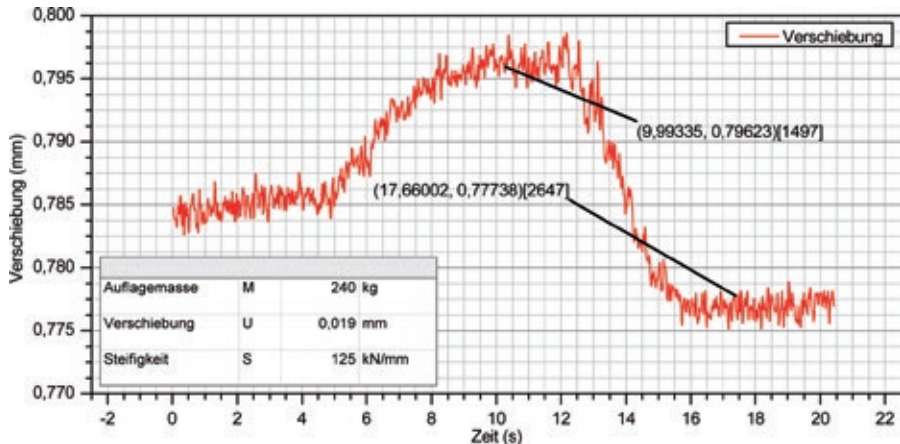


Bild 1: Bestimmung der statischen Deckenverschiebung in Deckenmitte Grafik: Tino Kühn

3 Experimentelle Ergebnisse – dynamische Kennwerte

Für die Ermittlung der dynamischen Eigenschaften der Decke wurden die charakteristischen Kennwerte durch eine definierte Impulsanregung bestimmt. Die Anregung erfolgte idealerweise von oben aus ca. 30 cm Höhe mit einer Masse von ca. 80 kg. Diese recht simple Methode hat gegenüber einer Impulshammeranregung oder der klassischen Abszellanregungen den Vorteil, genügend Energie bei entsprechender breitbandiger Anregung in das System einzuleiten.

Die Belastungsdaten für diesen Impuls ergeben sich wie folgt:

- ☐ Fallmasse: ca. 80 kg
- ☐ Fallhöhe: 30 cm
- ☐ Energie: 235 J
- ☐ Impuls: 194 Ns
- ☐ Beschleunigung (gemessen): ca. 10 g
- ☐ Abgeleitete Ersatzkraft: 7,8 kN

Analyse der Rohdaten und Plausibilitätsprüfung

Bild 2 zeigt exemplarisch das Beschleunigungssignal an der Deckenunterseite für den Bereich der Deckenmitte (schwarz) und den Randbereich der Decke (rot). Bild 3 zeigt die mit dem Vibrometer gemessenen Verschiebungen in Deckenmitte. Sie dienen im Folgenden einer kurzen Plausibilitätsprüfung für die Beschleunigungssignale.

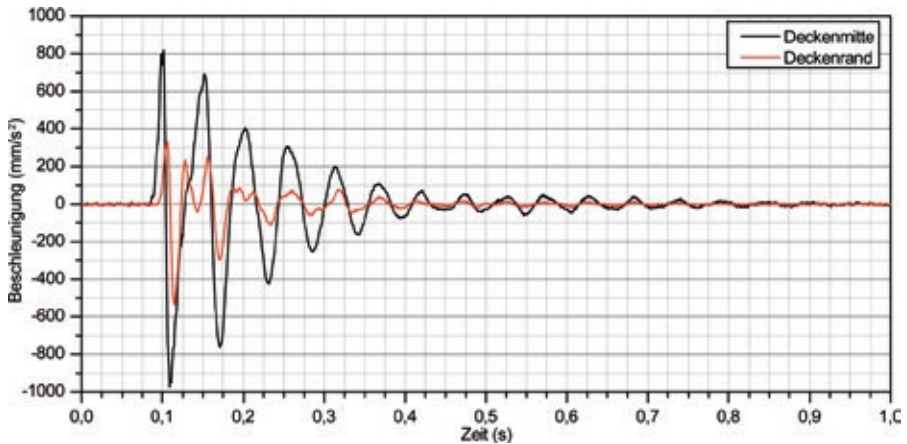


Bild 2: Impulsantwort der Beschleunigungen an der Deckenunterseite

Grafik: Tino Kühn

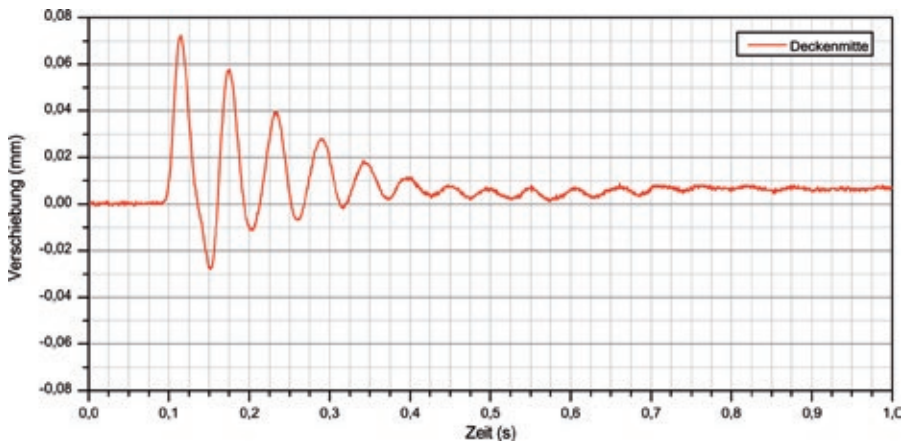


Bild 3: Impulsantwort der Verschiebungen an der Deckenunterseite in Feldmitte

Grafik: Tino Kühn

Die Integration der Beschleunigungen liefert bekanntermaßen Geschwindigkeiten. Die zusätzlichen Integrationskonstanten wurden aus den Randbedingungen nachfolgend bestimmt. Sie können als Offset betrachtet werden, um die physikalischen Systemanforderungen nach der Integration zu erfüllen.

- ☐ Konstante, Beschleunigung Deckenmitte: 5,2 mm/s
- ☐ Konstante, Beschleunigung Deckenrand: -3,1 mm/s

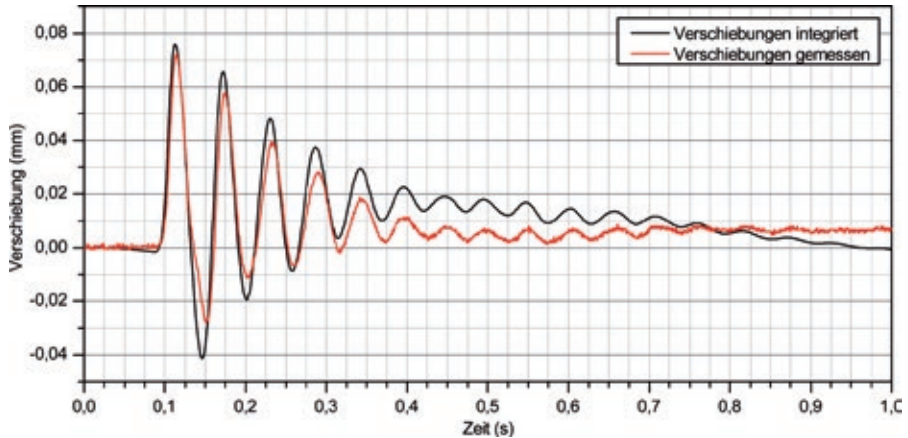


Bild 4: Vergleich der Verschiebungsmessung mit verschiedenen Messmethoden

Grafik: Tino Kühn

Die erneute Integration liefert die Verschiebungen mit den bekannten Problemen einer Mehrfachintegration. Die Integrationskonstanten lauten für diesen Schritt:

- ☐ Konstante, Geschwindigkeit Deckenmitte: 0,0065 mm/s
- ☐ Konstante, Geschwindigkeit Deckenrand: 0,0496 mm/s

Deren Ermittlung ist mit dieser einfachen Methode und bei längerer Messdauer allerdings nicht ausreichend, um physikalisch sinnvolle Verläufe zu bestimmen. Im betrachteten Zeitbereich von wenigen Millisekunden ist diese Methodik allerdings völlig ausreichend und liefert die Verschiebungen entsprechend.

Bild 4 stellt die mit dem Vibrometer direkt gemessenen Verschiebungen und die integrierten Beschleunigungswerte gegenüber. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Amplituden im relevanten Betrachtungsbereich, was die Plausibilität der Messdaten und des Versuchsaufbaus bestätigt. Es ist beachtenswert, dass es sich hierbei um Verschiebungsmessungen von wenigen hundertstel Millimetern handelt, die korrekt reproduziert werden konnten.

4 Ableitung der dynamischen Systemeigenschaften – Bestimmung der strukturellen Dämpfung der Rohdecke

Die Bestimmung der proportionalen Dämpfungskennwerte erfolgt klassischerweise anhand der abklingenden Beschleunigung, in unserem Fall innerhalb eines relevanten Zeitbereiches von ca. 0,5 s. Bild 5 veranschaulicht diese bekannte Methode anhand der Maximalwerte der Amplituden aus welchen sich nachfolgend alle relevanten Größen, vorerst für den ersten Eigenmode, ableiten lassen.

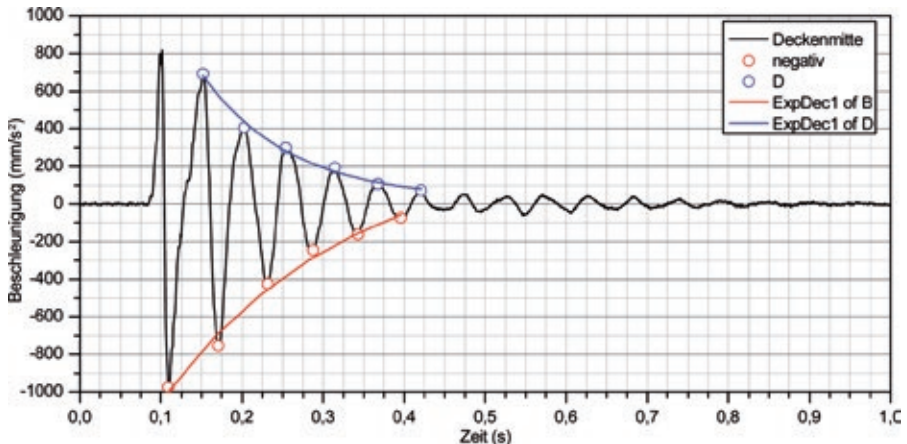


Bild 5: Abklingen der Beschleunigung in Deckenmitte

Grafik: Tino Kühn

Eine alternative Methodik zum klassischen Selektieren der Datenmaxima stellt Gleichung (1) dar. Ein nichtlineares Kurvenfitting ermöglicht die direkte Bestimmung der relevanten Parameter auf Basis folgender analytischer Annahme einer gedämpften Sinusfunktion:

$$y = y_0 + Ae^{\frac{-x}{\tau}} \sin\left(\pi \frac{x - x_c}{w}\right) \quad (1)$$

Das daraus abgeleitete Signal zeigt Bild 6 (rot). Es ist ersichtlich, dass sich damit eine deutlich objektivere Charakteristik der Dämpfung ableiten lässt. Für die nachfolgenden Schritte sollen die Ergebnisse beider Methoden parallel verglichen werden.

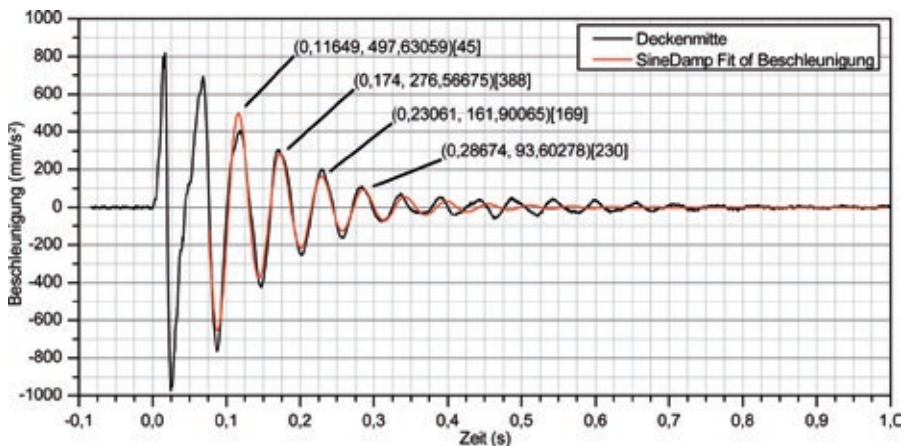


Bild 6: Gedämpfte Schwingung, Messsignal mit Fit der analytischen Sinusfunktion

Grafik: Tino Kühn

4.1 Bestimmung Logarithmisches Dekrement

Das logarithmische Dekrement Λ ist ein Maß für das Dämpfungsverhalten frei schwingender Systeme. Es lässt sich direkt mit Gleichung (2) aus den jeweils aufeinanderfolgenden Amplituden gleicher Richtung wie folgt ableiten.

$$\Lambda = \ln \frac{a(t)}{a(t+1)} \quad (2)$$

Für eine gewisse statistische Absicherung wurden die Werte jeweils einheitlich aus den ersten sechs Beschleunigungsmaxima abgeleitet. Die Angabe der Standardabweichungen erfolgt jeweils in Klammern. Die Abweichungen untereinander entstehen durch die real vorliegende nichtlineare Dämpfung.

- ☐ logarithmisches Dekrement klassisch $\Lambda = 0,4837$ (0,1477)
- ☐ logarithmisches Dekrement fit $\Lambda = \mathbf{0,5587}$ (0,0213)

4.2 Bestimmung des Dämpfungsgrades D

Der Dämpfungsgrad ermittelt sich mit Gleichung (3):

$$D = \frac{\Lambda}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \Lambda^2}} \quad (3)$$

- ☐ Dämpfungsgrad klassisch $D = 0,0735$ (0,0207)
- ☐ Dämpfungsgrad fit $D = \mathbf{0,0847}$ (bei Annahme einer linearen Dämpfung)

Es handelt sich um ein stark gedämpftes System mit nichtlinearen Dämpfungseigenschaften. Nichtlineare Dämpfungen sollen allerdings im weiteren Verlauf nicht behandelt werden, weshalb die linearisierten Werte herangezogen werden.

4.3 Bestimmung von charakteristischen Frequenzen f_d

Die Ableitung der charakteristischen (gedämpften) Frequenzen erfolgt für das gedämpfte System im Frequenzbereich. Hierbei gilt die Annahme einer freien Schwingung. Bild 7 zeigt exemplarisch das Spektrum der Impulsantwort. Die charakteristischen Frequenzen lassen sich für die Deckenmitte und den Randbereich mit ca. 18 Hz für Mode 1 und für Mode 2 bei ca. 34 Hz definieren.

- ☐ Frequenz klassisch $f_d = 18,0741$ Hz (1,2477)
- ☐ Frequenz fit $f_d = \mathbf{17,86}$ Hz (bei Annahme einer linearen Dämpfung)

4.4 Bestimmung der Eigenfrequenz f_0

Die Dämpfungsverschiebung der Eigenfrequenzen lässt sich wie folgt ausdrücken (Gleichung 4) und ermöglicht die Ableitung von Eigenfrequenzen des Systems aus den vorliegenden gedämpften Frequenzen.

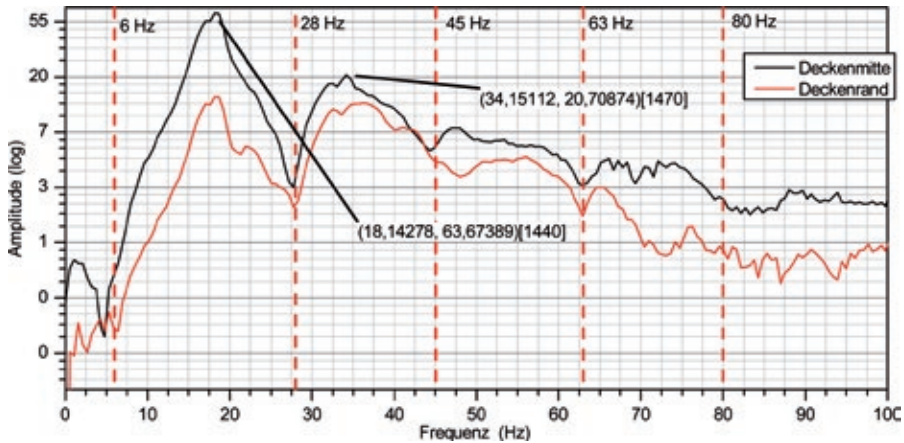


Bild 7: Spektrum der Beschleunigungen nach Impulsanregung

Grafik: Tino Kühn

$$f_0 = \frac{f_d}{\sqrt{1-D^2}} \quad (4)$$

- ☐ Eigenfrequenz klassisch $f_0 = 18,1$ Hz (1,3)
- ☐ Eigenfrequenz fit $f_0 = 17,91$ Hz (bei Annahme einer linearen Dämpfung)

Die Verschiebung der Eigenfrequenz infolge Dämpfung ist im vorliegenden Falle äußerst gering und sollte keinen weiteren Einfluss haben.

4.5 Bestimmung von höhermodalen Kennwerten

Bild 8 enthält zusätzlich die Grenzen der vier charakteristischsten Frequenzbereiche. Diese dienen nachfolgend zur Separation der vier ersten Moden. Die Breite des Bandes ist abhängig von der modalen Dämpfung. Je größer die Dämpfung desto größer die Frequenzverschiebungen und umso breiter die einem Mode zuzuordnenden Bereiche. In Bild 8 sind die Bereiche für die einzelnen Moden separiert. Damit ist es möglich, die entsprechenden modalen Grundfrequenzen und die modalen Dämpfungen zu bestimmen. Die Frequenzbereiche werden nachfolgend als die vier ersten Eigenmoden bezeichnet. Ob diese wirklich den untersten Eigenmoden zugeordnet werden können, ist nicht sicher, da Zwischenmoden ähnlicher Frequenzbereiche mit dieser Methode nicht erfasst werden können. Hierfür wäre eine umfangreiche Modalanalyse mit deutlich mehr Messstellen erforderlich.

Tabelle 1 fasst die modalen Kennwerte des Systems zusammen, aus denen sich das Gesamtsystem modellieren lässt.

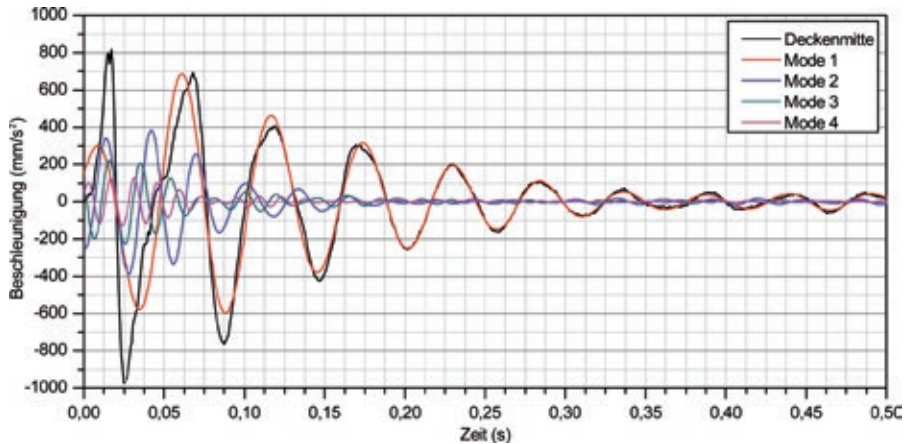


Bild 8: Zeitbereich der Beschleunigungen nach modaler Zerlegung

Grafik: Tino Kühn

Tabelle 1: Dynamische Kennwerte nach modaler Zerlegung

Mode	Frequenz f_d (s ⁻¹)	Frequenz f_0 (s ⁻¹)	Log. Dekrement (-)	Dämpfungsgrad (-)
Mode 1	18,07	18,11	0,39	0,06
Mode 2	35,71	35,79	0,41	0,06
Mode 3	53,57	53,73	0,50	0,08
Mode 4	71,43	71,60	0,45	0,07

4.6 Bestimmung der Übertragungsfunktion für das Gesamtsystem

Die Bestimmung der Systemübertragungsfunktion auf modaler Ebene erfolgt für eine Kraftanregung üblicherweise nach

$$V(f_e, f_0, D) = \frac{1}{\sqrt{(1 - n^2)^2 + (2 \cdot D \cdot n)^2}} \quad (5)$$

unter Zuhilfenahme der Frequenzverhältnisse

$$n(f_e, f_0) = \frac{f_0}{f_e} \quad (6)$$

Bild 9 stellt die damit ermittelten modalen Systemverstärkungsfaktoren in Abhängigkeit der Frequenzverhältnisse für die unterschiedlichen Dämpfungsgrade dar. Neben den ermittelten

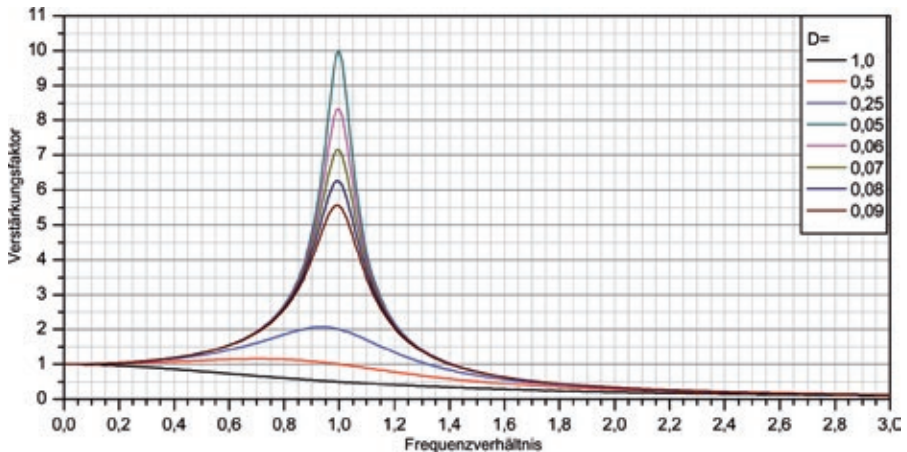


Bild 9: Relative Verstärkungsfaktoren für unterschiedliche Dämpfungsgrade

Grafik: Tino Kühn

modalen Dämpfungsgraden wurden zur besseren Visualisierung der Zusammenhänge die Verstärkungen um die Dämpfungsgrade $D = 1$, $D = 0,5$ und $D = 0,25$ ergänzt.

Die Berücksichtigung multipler Eigenfrequenzen erfolgt durch modale Superposition im Frequenzbereich. Bild 10 zeigt das somit ermittelte Systemverhalten anhand der Verstärkungsfaktoren im relevanten Messbereich bis ca. 100 Hz. Es sind jeweils die ersten vier Eigenmoden des Systems sowie das Ergebnis deren Überlagerung dargestellt.

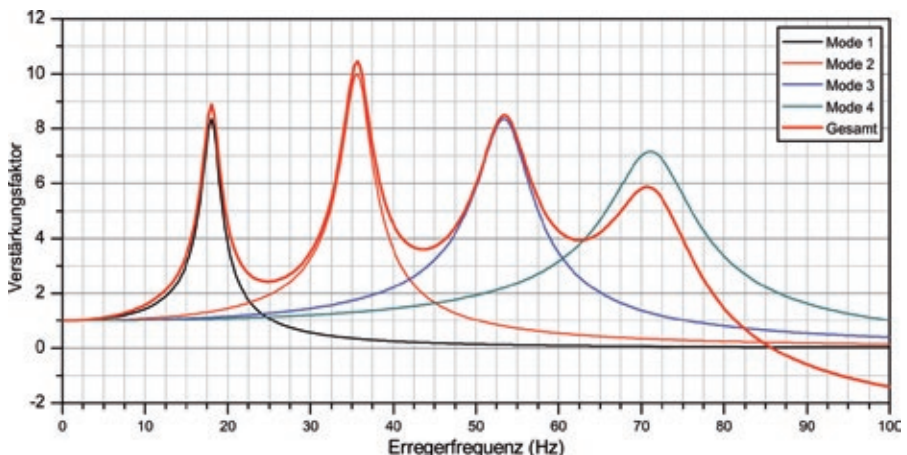


Bild 10: Verstärkungsfaktoren des Systems mit modaler Überlagerung

Grafik: Tino Kühn

Bei einer breitbandigen Anregung werden höhere Moden relevant. Deutlich zu erkennen sind die Resonanzfälle, bei denen bei einer harmonischen Anregung mit Verstärkungen bis ca. dem 10-Fachen gerechnet werden muss. Ab ca. 80 Hz wirkt das Gesamtsystem dämpfend und die Anregungsamplituden werden nicht weiter überhöht. Damit ist das dynamische System vollständig beschrieben.

5 Experimentelle Ergebnisse dynamischer Übertragungsfunktionen

Die Beurteilung einer vertikalen Transferfunktion ist Gegenstand dieses Abschnittes. Sie dient der Beurteilung der Dämpfungsaufbauten auf der Rohdecke und der Abschätzung der Reaktion beliebiger Anregungsspektren. Die Anregung erfolgte in diesem Falle von oben durch einen Impuls/Sprung mit einer Amplitude von ca. 5 g und einer Masse von ca. 80 kg. Bei bekannter Masse und bekannten Anregungs- und Reaktionsspektren lässt sich die entsprechende Übertragungsfunktion in Form einer spektral aufgelösten Dämpfung angeben. Bild 11 zeigt den Zeitverlauf der Beschleunigungen anregungsseitig (oben) und für die beiden Messstellen an der Deckenunterseite.

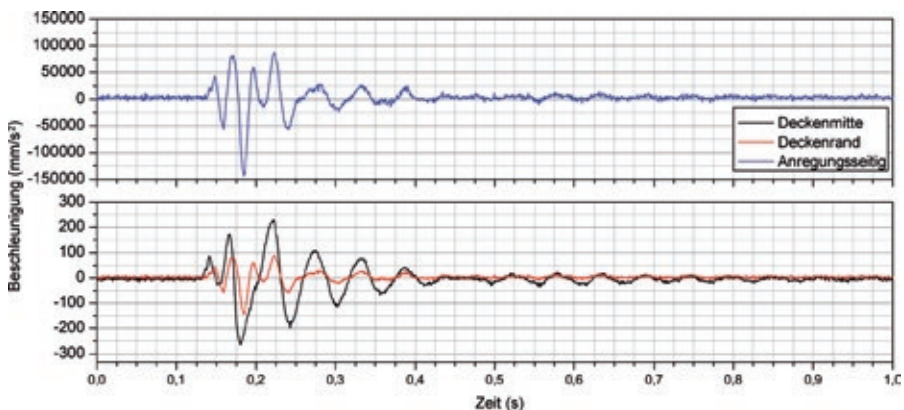


Bild 11: Beschleunigungen der Anregung und Reaktion bei Impulsanregung

Grafik: Tino Kühn

Die Transformation in den Frequenzbereich liefert für die Deckenmitte das Amplitudenspektrum der Anregung und Reaktion. Eine verbesserte Beurteilung liefert die Darstellung der Amplitude in Dezibel (db), siehe Bild 12. Der Randbereich der Decke wird in diesem Falle nicht mitbetrachtet.

Das Verhältnis beider ergeben die spektralen Übertragungsfaktoren des Deckenaufbaus bei Impulsanregung entsprechend Bild 13. Die maximale Dämpfung ergibt sich bei ca. 18 Hz mit einer Dämpfung von ca. 3 db. Rot dargestellt ist eine geglättete Variante, die physikalisch sinnvoller erscheint als die stark streuenden Werte in schwarz.

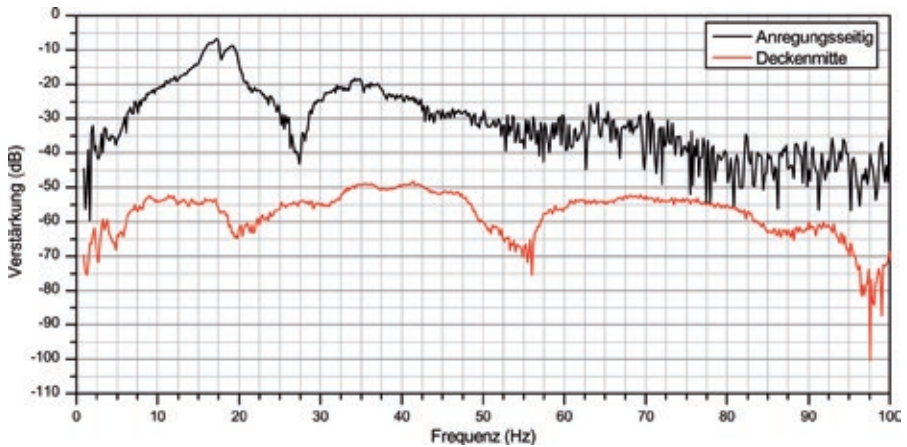


Bild 12: Spektren der Beschleunigungen in dB

Grafik: Tino Kühn

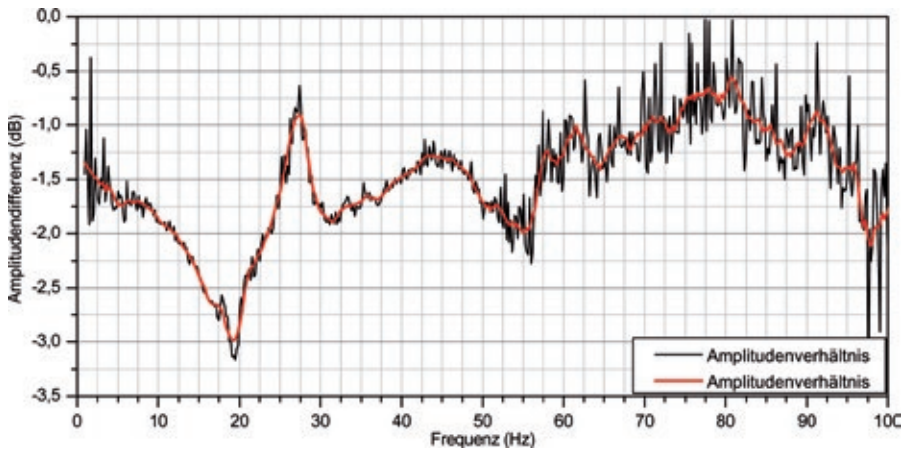


Bild 13: Spektrale Übertragungsfunktion in dB

Grafik: Tino Kühn

Eine Art prozentuale spektrale Amplitudenreduktion stellt Bild 14 dar, womit die Dämpfung der Amplituden gegebenenfalls einfacher beurteilt werden können. Beim Maximum der Dämpfung ergibt sich daraus eine Reduktion der Amplitude auf ca. $1/300$ der Anregung. Höherfrequente Erregungen werden immerhin noch mit bis zu $3/10$ der Amplitude reduziert. Allerdings sind diese Bereiche nicht mehr wirklich relevant.

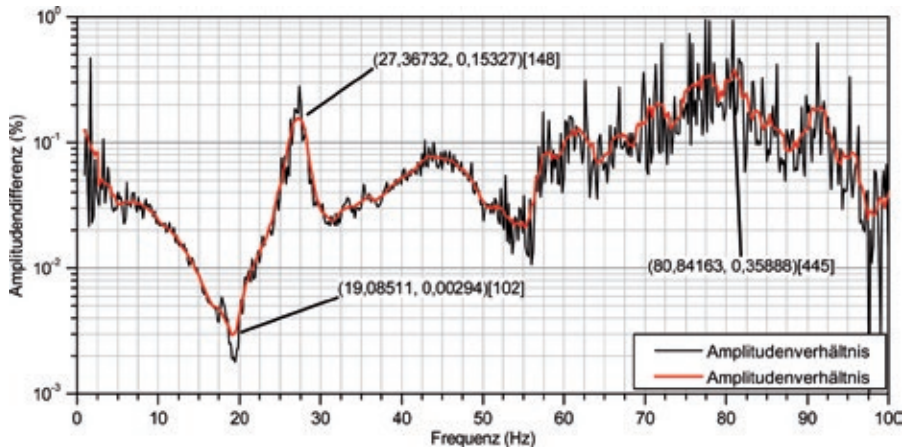


Bild 14: Spektrale Übertragungsfunktion in prozentualer Form

Grafik: Tino Kühn

6 Experimentelle Ergebnisse zu den dynamischen Erregerspektren

Abschließend wurden Anregungsformen analysiert, die als Eingangsgrößen für das System in Frage kommen können. Die Aufzeichnung der realen Beanspruchungsspektren einer Tanzveranstaltung war leider nicht möglich.

6.1 Anregungen definierter Einzelimpulse

Für die Beurteilung von rhythmischen Aktivitäten von Personengruppen gibt es nur wenige Angaben. Die AISC [1] definiert als Limit für das Wohlbefinden maximale Beschleunigungen von ca. 3,5 g des Effektivwertes der Schwingungen (ca. 70 % der Amplitude). Andere Quellen geben maximale Schwinggeschwindigkeiten von ca. 20 m/s an, welche im vorliegenden Falle mit maximal 8 m/s nicht erreicht werden. Allerdings gelten diese Annahmen nur für permanente Erregungen und sind somit nicht wirklich anwendbar bzw. zu konservativ formuliert für den vorliegenden Fall. Die folgenden Messdaten dienen entsprechend nur als Anhaltswerte für eine entsprechende Bewertung der physiologischen Empfindlichkeiten.

Bild 15 zeigt den Zeitverlauf für drei verschiedene Anregungen, aus denen sich wesentliche Kenngrößen ableiten lassen. Das normale Laufen einer Person bewirkt eine wiederkehrende Impulsanregung (vgl. auch Bild 16) mit kurzer Beanspruchungsdauer und einer gewissen Schrittfrequenz. Die statistische Kombination der Einzelimpulse lässt eine Abschätzung einer asynchronen Beanspruchung durch eine Vielzahl von Personen zu. In Ermangelung an Messdaten hierzu lässt diese Methode eine Abschätzung der dynamischen Beanspruchung bei der geplanten Tanzveranstaltung zu. Synchrone Aktivitäten müssten allerdings frequenzabhängig getrennt betrachtet werden; allerdings zeigt sich auch, dass die Frequenzen, die zu einer deutlichen Lastüberhöhung führen würden, in der Realität nicht durch die Anregung von Personen erreicht werden können.

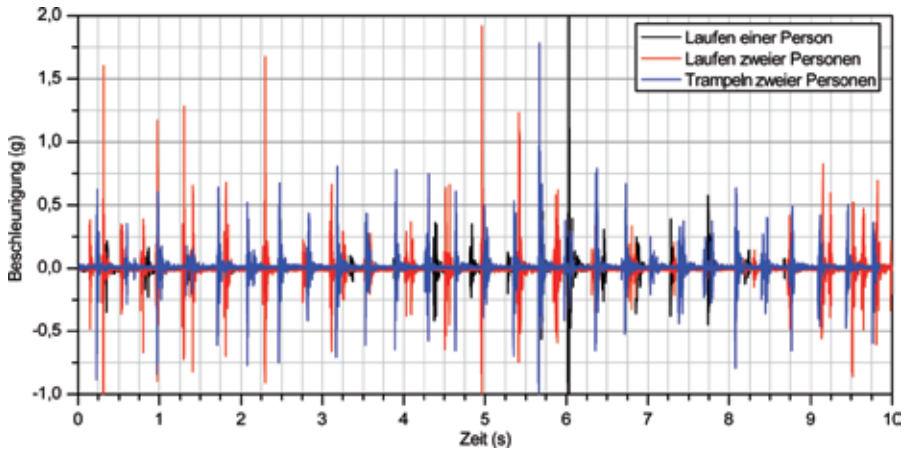


Bild 15: Zeitverlauf der Anregungsbeschleunigungen für verschiedene Erregerszenarien

Grafik: Tino Kühn

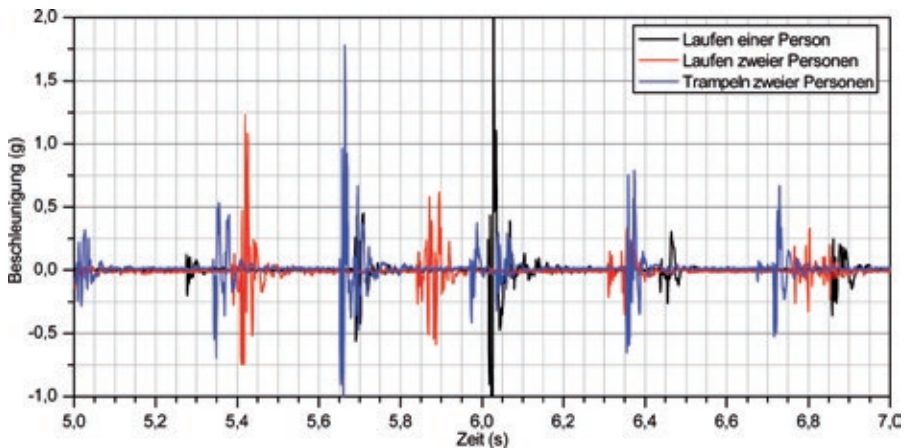


Bild 16: Zeitverlauf der Anregungsbeschleunigungen, skalierte Detailansicht

Grafik: Tino Kühn

Die Tabelle 2 fasst die Ergebnisse der drei Messungen jeweils mit Mittelwert und Standardabweichung zusammen. Aus der Schrittfrequenz und der notwendigen Ausschwingzeit lässt sich ein Gleichzeitigkeitsfaktor bestimmen, ab dem Resonanz auftreten kann. Im Falle des einfachen Laufens einer Person lässt sich dieser für die vorliegende Decke mit ca. 40 bestimmen. Unter der Voraussetzung einer asynchronen Beanspruchung ist ein Resonanzfall mit entsprechender Amplitudenverdoppelung erst ab 40 Personen wahrscheinlich. Je geringer

die Ausschwingdauer bzw. je geringer die Schrittfrequenz ist, desto seltener tritt das Ereignis einer Überlagerung der Impulse auf.

Die dynamische Kraftamplitude beträgt ca. 0,172 kN bei einer Einzelperson. Der dynamische Lastüberhöhungsfaktor liegt entsprechend bei ca. 1,2 – also eine Erhöhung um ca. 20 % im Vergleich zu einer statischen Beanspruchung. Aus der Kombination von Gleichzeitigkeit und dynamischer Lastüberhöhung lässt sich eine relative Lastüberhöhung je Person von ca. 0,005 bestimmen. Für die angestrebten 200 Personen erhält man unter der Voraussetzung einer nicht synchronen dynamischen Beanspruchung einen dynamischen Lastüberhöhungsfaktor von 2,1 für eine normale Schrittbelastung und ca. 3,5 für eine massivere Belastung in Form eines asynchronen „Trampelns“.

6.2 Willkürliche Anregung

Abschließend wurde eine willkürliche Art der Anregung über eine Messdauer von 160 s aufgezeichnet. Die nachfolgenden Diagramme geben die entsprechenden Daten für die Verschiebungen und Beschleunigungen der einzelnen Messstellen und ihrer Spektren wieder. Die Anregung erfolgte durch 4 Personen, wobei entsprechend Bild 17, Bild 18 und Bild 19 die Last schrittweise gesteigert wurde und anschließend die Struktur synchron und asynchron beansprucht wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Anregung in etwa einer Punktlast von 4 Personen/m² mit je 80 kg entspricht.

Die maximalen Wegamplituden von ca. 0,1 mm (Bild 17) ergaben sich bei starker Beanspruchung durch starkes Springen, was so bei einer entsprechenden Veranstaltung nicht vorkommen wird. Wesentlicher ist allerdings die spektrale Antwort im Bereich der Eigenfrequenzen der Decke. Es kann gezeigt werden, dass die Wegamplituden bei einer derartigen Anregung aufgrund der starken Dämpfung des Deckenaufbaus in einem Bereich von ca. 1/1000 mm liegen und selbst bei einer deutlichen Laststeigerung unkritisch sein sollten, vgl. Bild 19.

Bild 18 stellt die Beschleunigungen an der Deckenunterseite dar. Die maximalen Beanspruchungen liegen hier im Bereich von 80 mg bzw. entsprechenden 800 mm/s². Vergleicht man dies mit der Einzelimpulsantwort aus Bild 2, ist demgegenüber keine Laststeigerung zu verzeichnen. Es liegen offenbar keine Resonanzfälle bei der angestrebten synchronen Beanspruchung.

*Tabelle 2: Kennwerte der unterschiedlichen Impulsbeanspruchungen
(Mw = Mittelwert, Stabw = Standardabweichung)*

	Wert	Schritt- frequenz (Hz)	Ausschwing- dauer (s)	Gleich- zeitigkeit (Ts/Ta)	Ampli- tude (g)	Kraft (kN)	Ersatz- lastfaktor (-)	Lastüberhöhung	
								1 Pers.	200 Pers.
								(-)	(-)
Laufen 1 Person	Mw	2,27	0,06	39,69	0,22	0,172	1,2	0,005	2,1
	Stabw	0,29	0,00	5,28	0,14	0,108	0,1	0,003	0,6
Laufen 2 Personen	Mw	4,93	0,06	86,64	0,77	0,603	1,8	0,015	3,9
	Stabw	3,68	0,00	65,19	0,49	0,384	0,5	0,014	2,8
Trampeln 2 Personen	Mw	2,83	0,06	49,52	0,61	0,475	1,6	0,012	3,5
	Stabw	0,31	0,00	6,45	0,28	0,220	0,3	0,006	1,1

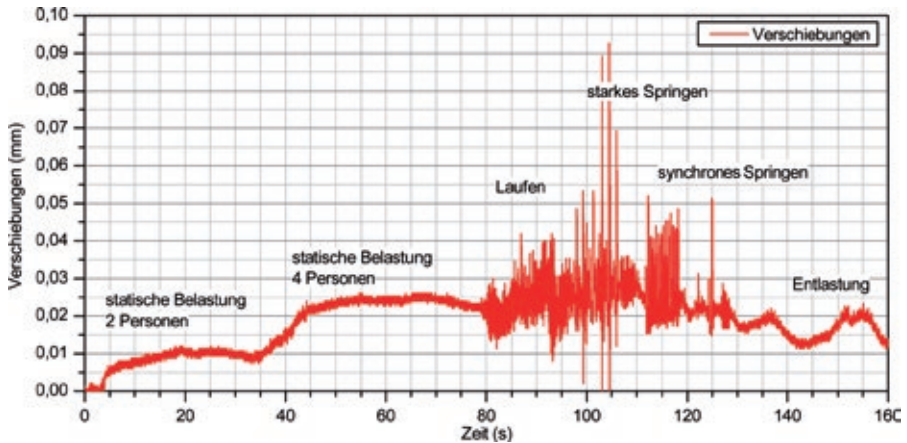


Bild 17: Verschiebungen der Deckenunterseite

Grafik: Tino Kühn

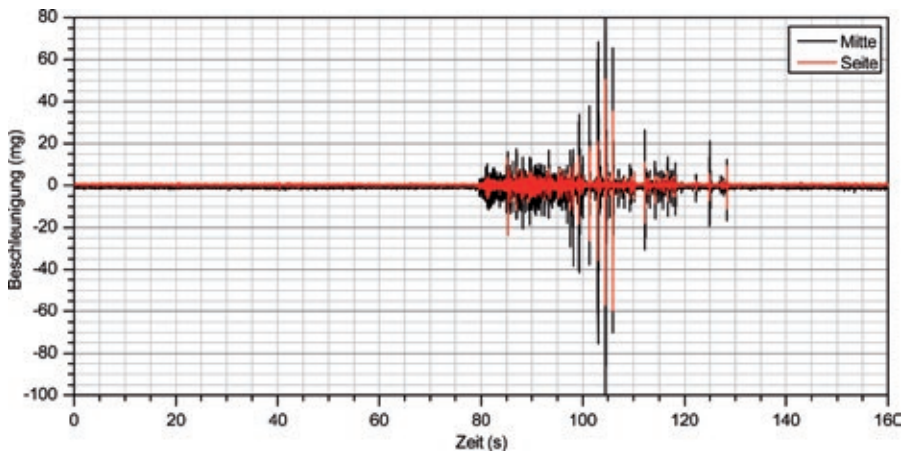


Bild 18: Beschleunigung und Spektrum der Beschleunigung an der Deckenunterseite

Grafik: Tino Kühn

chung vor, was mit der Höhe der Gleichzeitigkeitsfaktoren entsprechend begründet werden kann.

Die Amplituden der Anregungen in Bild 19 liegen durchschnittlich bei ca. 0,5 g, bei starken Sprüngen bei maximal ca. 3 g und beim Versuch eines synchronen Springens bei ca. 1 g (Bild 19). Die Anregungen erfolgen in einem Frequenzbereich bis ca. maximal 10 Hz. Es ist deshalb unwahrscheinlich, dass die geplante Veranstaltung zu einem Überschreiten der Tragfähigkeit des Systems führen wird.

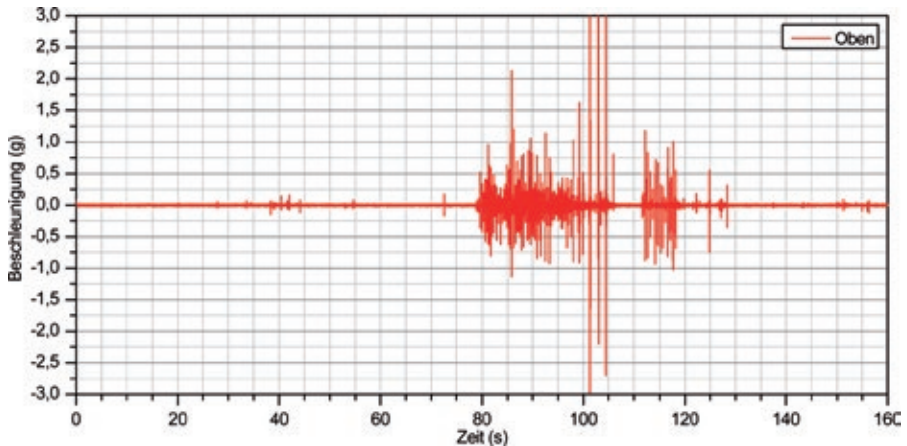


Bild 19: Beschleunigung und Spektrum der Beschleunigung an der Oberseite/Anregung

Grafik: Tino Kühn

7 Zusammenfassung

Die Bewertung der Tragfähigkeit des vorliegenden Deckensegmentes erfolgte anhand der ermittelten Lastüberhöhung entsprechend Bild 10. Die hierfür notwendige Übertragungsfunktion wurde aus den messtechnisch erfassten dynamischen Eigenschaften für verschiedene Belastungsszenarien ermittelt und die Vorgehensweise hierfür detailliert dargestellt.

Für synchrone Beanspruchungen von größeren Personengruppen auf Tanzflächen sind entsprechende Erregerfrequenzbereiche zu definieren, welche beispielsweise mit den Spektren in Bild 18 gegeben sind. Eine verbindliche Norm hierfür gibt es allerdings nicht. Ji und Ellis [2] geben hierfür allerdings folgende Erfahrungswerte an:

- ☐ Gruppenanregungen: 1,5–2,8 Hz
- ☐ Individuelle Anregungen: 1,5–3,5 Hz

Die Beanspruchungsdichte wird von Bachmann und Ammann [3] wie folgt angegeben:

- ☐ Aerobic oder Gymnastik: 0,25 Personen/m², ca. 0,2 kN
- ☐ Tanzveranstaltungen: 2 Personen/m², ca. 1,6 kN

Diese Werte decken sich im Wesentlichen mit den ermittelten Schrittfrequenzen und können so für die Bemessung angesetzt werden.

Messtechnisch konnte keine Laststeigerung durch synchrone Beanspruchungen bzw. Resonanzen festgestellt werden. Für beliebige asynchrone Beanspruchungen wurden entsprechend der ermittelten Schrittfrequenzen und Abklingzeiten systembedingte Gleichzeitigkeits- und Laststeigerungsfaktoren ermittelt, die bei einer statistischen Betrachtung auf beliebige

Personengruppen übertragbar sind. Für die angestrebte Anzahl von 200 Personen beträgt demnach die dynamische Laststeigerung an der Deckenoberseite beim normalen Laufen ca. das 2,08-Fache und bei starker Beanspruchung durch ein „Trampeln“ ca. das 3,48-Fache der statischen Beanspruchung. Für eine reduzierte „aktive“ Personenanzahl von ca. 100 Personen verringern sich diese Werte auf etwa 1,54 bzw. 2,24. Diese Werte reduzieren sich entsprechend der transversalen Übertragungsfunktion des Deckenaufbaus um bis zu -3 db im kritischen Frequenzbereich der ersten Eigenfrequenz (18 Hz) des Deckensegmentes und sind für dessen dynamische Anregung nahezu unerheblich.

Bild 10 verdeutlicht die Verstärkungsfaktoren des gesamten Deckensegmentes. Für individuelle Beanspruchungen bis 3,5 Hz beträgt die dynamische Verstärkung das ca. 1,06-Fache der Amplitude. Bei einer synchronen Amplitude von ca. 1,6 kN nach Bachmann und Ammann [3] liegen diese noch deutlich unterhalb der statisch bemessenen Tragfähigkeit von 4,0 kN/m². Gleiches gilt beim konservativen Ansatz der ermittelten Lastüberhöhungsfaktoren von ca. 1,54 und 2,24 über diesen gesamten Frequenzbereich.

Es konnte somit gezeigt werden, dass durch die üblichen Beanspruchungen einer Tanzveranstaltung an der Decke keine Schäden durch Überschreiten der Tragfähigkeit entstehen können.

Literatur

- [1] Murray, T. M.; Allen, D. A.; Ungar, E. E.: Floor vibrations due to human activity. In: AISC/CISC (Eds.): Steel Design Guide Series 11, 2. Aufl., 2003.
- [2] Ji, T.; Ellis, B. R.: Floor vibration induced by dance-type loads: theory. The Structural Engineer 72 (1994) 3, S. 37–44.
- [3] Bachmann, H.; Ammann, W.: Vibration in Structures: Induced by Man and Machines. In: IABSE (Ed.): Structural engineering documents 3e, 1987.
- [4] DIN 4150-1:2001-06: Erschütterungen im Bauwesen – Teil 1: Vorermittlung von Schwinggrößen.
- [5] DIN 4150-2:1999-06: Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.
- [6] DIN 4150-3:2016-10: Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkung auf bauliche Anlagen.
- [7] DIN 45669-1:2010-09: Messung von Schwingungsimmissionen – Teil 1: Schwingungsmesser – Anforderungen und Prüfungen.
- [8] DIN 45669-2:2005-06: Messung von Schwingungsimmissionen – Teil 2: Messverfahren.