

Untersuchungen zum Schwingungsverhalten unter personeninduzierten Lasten für den Neubau der Sporthochschule Köln

Dr.-Ing. **Pieter Moerland**, Arup Deutschland GmbH, Düsseldorf

Dipl.-Ing. **Ali Jashar Babaei**, Arup Deutschland GmbH, Frankfurt

Zusammenfassung:

Die Architektur des geplanten Neubaus der Sporthochschule Köln weist, als besonderes architektonisches Kennzeichen einen großen, weit auskragenden Bereich auf. Neben Aspekten, wie Erdbeben und Deckenschwingungen in Laborbereichen, galt das Hauptinteresse, der dynamischen Untersuchungen in der Entwurfsphase, der möglichen Anfälligkeit dieses auskragenden Bereichs für personeninduzierte Schwingungen. Die erste Eigenfrequenz der Auskragung liegt hierfür im kritischen Bereich. Überschlägige Berechnungen ergaben, dass trotz hoher anzuregender Masse möglicherweise störende Schwingungen auftreten können. Während der bis Januar 2011 stattgefundenen Entwurfsphase, wurde das Gebäudeverhalten mittels numerischer FE-Berechnungen in Sofistik genauer untersucht, um eine realistische Beurteilung des dynamischen Verhaltens zu ermöglichen und um sicher zu gehen, dass auf Einsatz von Dämpfersystemen verzichtet werden kann.

Summary:

The new building of the Sport University in Cologne contains as a special architectural aspect a large cantilevered area. Beside dynamic aspects like seismic behaviour and vibration of laboratory decks with sensitive equipment, in the scheme design the main focus was put on the dynamic behaviour of the cantilevered area under vibration introduced by walking persons. Simple hand calculations showed that despite the presence of a high modal mass, unacceptable accelerations can be expected and use of counter measures would have to be considered. During the scheme design stage until January of 2011 extensive numerical dynamic analyses were carried out in Sofistik with view to a realistic estimation of the dynamic system attitude in order to make sure that use of tune mass dampers can be avoided.

1 EINFÜHRUNG

Die Schwingungsproblematik auf Grund personeninduzierter Lasten, hat sich in den letzten Jahrzehnten verstärkt. Gründe hierfür sind u. A. gestiegene architektonische Ansprüche und hiermit zusammenhängend, der Trend zum „Leichten Bauen“ durch hocheffiziente Konstruktionstechnologien, wie z.B. Verbundbau und die Anwendung hochfester Konstruktionsmaterialien. Vor allem schlanke und leichte Bauwerke neigen dazu, mit der dynamischen Quelle zu schwingen.

Dieser Beitrag behandelt die Thematik des dynamischen Verhaltens unter personeninduzierten Belastungen für die weit auskragende Fachwerkkonstruktion des Neubaus der Sporthochschule Köln. Nach einer kurzen Vorstellung des Projekts werden die angewandten Berechnungsmethoden und die wichtigsten Ergebnisse der hierzu durchgeführten Berechnungen präsentiert. Daran anknüpfend wird die Empfindlichkeit der Ergebnisse für Ungenauigkeiten in der Modellierung diskutiert. Der Beitrag schließt mit einer Beurteilung der Ergebnisse nach Kriterien aus relevanter Literatur ab.

2 PROJEKTDESCHEIBUNG

Der Neubau der Sporthochschule Köln [1] wird als naturwissenschaftlich und medizinisch ausgerichteter Laborbau konzipiert. Er soll auf einem, am nordöstlichen Rand des Campus gelegenen Grundstück am Sportpark Müngersdorf errichtet werden. Das Gebäude umfasst rund 14.000 m² Bruttogeschossfläche, davon werden rund 10.000 m² als Labore genutzt.



Bild 1: Visualisierung des Projekts (Quelle: Kadawittfeldarchitektur [3])

Während sich die unteren drei Geschosse an der Krümmung des angrenzenden Velodroms orientieren, verlaufen das dritte und vierte Obergeschoss geradlinig parallel zur Straßenseite. Dies führt zu einer großen Auskragung dieser Geschosse, siehe Bild 1.

Das Gebäude besteht aus fünf oberirdischen Geschossen und zwei Geschossen unterhalb der Geländeoberkante. Die vertikalen Lasten werden über Stahlbetondecken, sowie die Wandscheiben und Stützen abgetragen. Die horizontalen Lasten werden hauptsächlich von den Gebäudekernen aufgenommen.

Als konstruktiv und wirtschaftlich beste Lösung wurde im Bereich der Auskragung eine Stahlkonstruktion gewählt. In diesem Bereich sind die Decken und der Ausbau gewichtsoptimiert geplant. Aus diesem Grund werden hier Verbunddecken vorgesehen. Die Auskragung wird (Stand Entwurf Januar 2011) durch Stahlfachwerkträger in der Längsrichtung des Gebäudes abgefangen. Diese Fachwerke werden z.T. wieder durch auskragende Querwände getragen, die auf Wände in einem der drei Treppenhäuser aufgelagert sind. Dieses System ist in Bild 2 dargestellt.

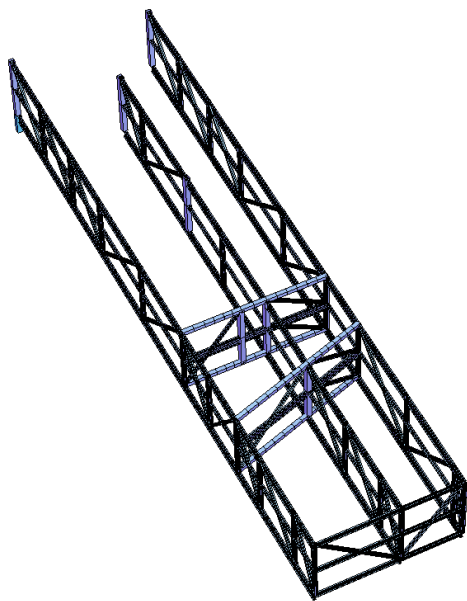


Bild 2: Statisches Teilsystem der Stahlkonstruktion, Stand Januar 2011

Im regulären Bereich des Gebäudes werden konventionelle Flachdeckensysteme vorgesehen, die unter anderem bedingt durch die Architektur, in der Regel auf vier Stützen in Gebäudequerrichtung aufliegen, wie im linken Bereich von Bild 3 zu sehen ist. In diesem Bild 3 sind auch in rot die Auflagerpunkte der Stahlkonstruktion auf dem Betonbau eingetragen. Der Lastabtrag in den Baugrund erfolgt durch eine konventionelle Flachgründung als elastisch gebettete Bodenplatte.

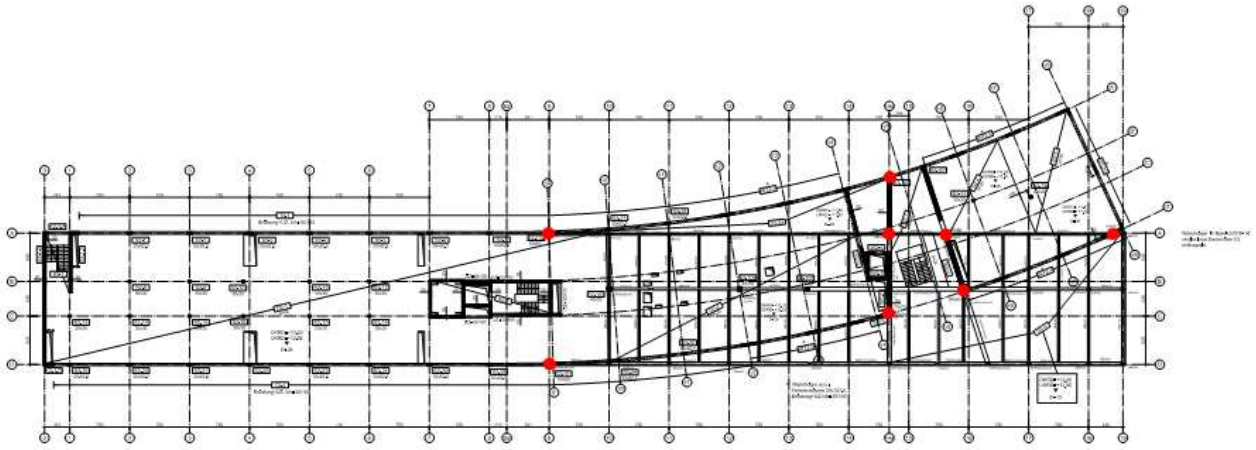


Bild 3: Positionsplan des 2.OG, Stand Januar 2011

3 DYNAMISCHE ANALYSE DES BAUWERKS

3.1 *Überschlägige Berechnung der maßgebenden Beschleunigung*

Im Rahmen des Entwurfs wurde für die Stabilitätsberechnung, die Verformungseinschätzungen, den Lastabtrag und die Gründungsberechnung ein Gesamtrechenmodell in Sofistik entwickelt, siehe Bild 4. Hiermit wurden auch dynamische Analysen durchgeführt. In Bild 5 ist als Ergebnis einer solchen Berechnung die erste für den Kragarmbereich relevante Eigenform dargestellt. Die hierzu gehörige Eigenfrequenz mit alleiniger Berücksichtigung der Eigenlast beträgt $f = 2.3\text{Hz}$. Typische Fußgängerlauffrequenzen liegen zwischen 1.0 und 2.8Hz. Obwohl die Masse sehr hoch scheint, muss man prüfen, wie hoch die zu erwartenden Beschleunigungen in etwa sein können.

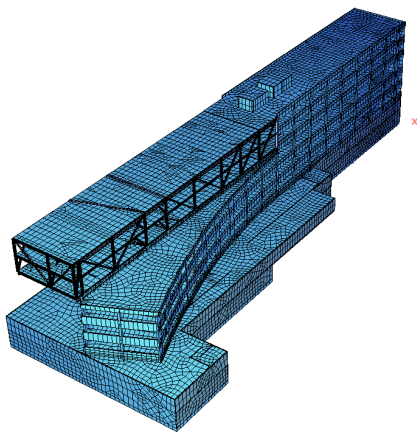


Bild 4: Gesamtrechenmodell

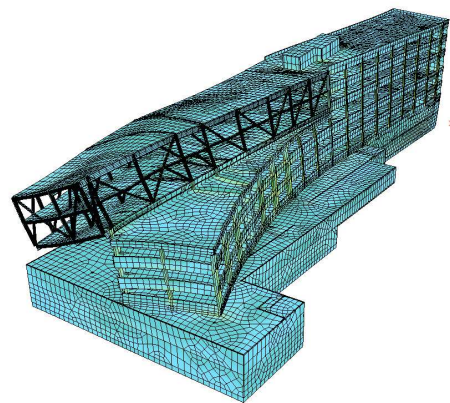


Bild 5: Maßgebende Eigenform des Gesamtrechenmodells mit $f = 2.3\text{Hz}$

Aus der dynamischen Analyse lässt sich, die zu dieser Eigenfrequenz gehörende modale Masse M^* mit etwa 500t bestimmen. Ausgehend von einem dynamischen Lastfaktor (DLF) von etwa 0.4 für die erste Harmonische im Resonanzfall, ein Personengewicht G von 0.8kN und eine Dämpfung ξ von 1%, kann man die maximal auftretende Beschleunigung a folgendermaßen einschätzen:

$$a = DLF * \frac{G}{M^*} * \frac{1}{2\xi} \cong 0.32\% g \quad (1)$$

Mit Beurteilung an Hand der ISO-Kurve (siehe Bild 6) sieht man, dass sich diese grob abgeschätzte Beschleunigung in der Nähe eines kritischen Bereichs befindet und dass eine genauere Betrachtung sinnvoll ist.

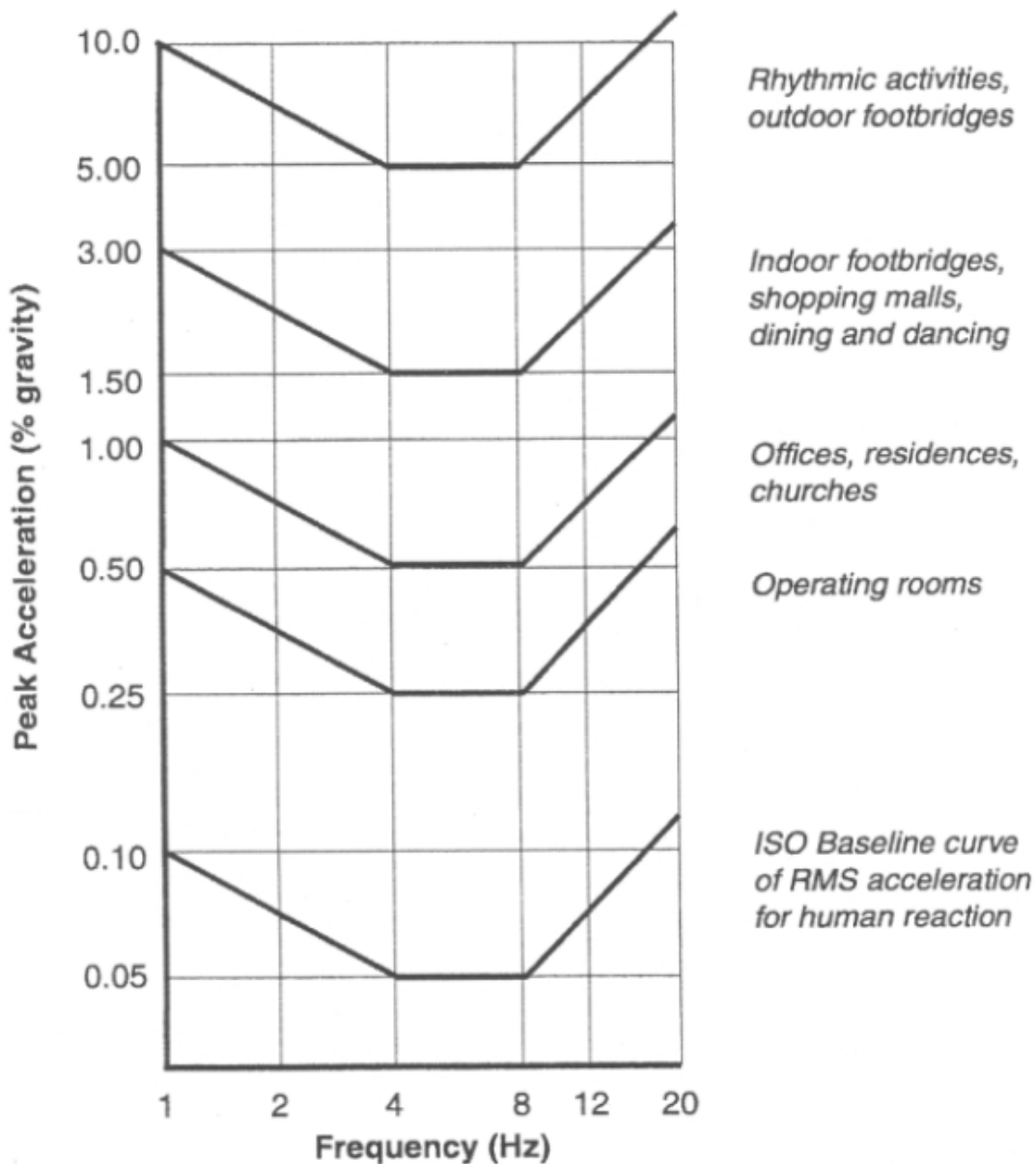


Bild 6: ISO 10137 Einheitskurve für vertikale Beschleunigungen [4],[5]

3.2 Verfeinerung der dynamischen Analysen

Die überschlägige Berechnung setzt voraus, dass sich das System wie ein Einmassenschwinger verhält und dass sich die dynamische Last zeit- und ortsweise vollständig im Schwingungsmaximum befindet. In Wirklichkeit bewegt sich die Last und befindet sich, nur kurzfristig im Schwingungsmaximum einer relevanten Eigenform. Darüber hinaus geht der oben beschriebene Ansatz, von einem eingeschwungenen System in Resonanz aus, wobei die Belastung real nicht lange genug einwirkt, um diesen Zustand zu erreichen. Eine genauere Berechnung der Systemantwort erfordert eine genauere Abbildung der Gebäudekonstruktion und eine genauere Beschreibung der dynamischen Belastung. Die hierzu verwendeten Ansätze werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.3 Modellierung für die genauere Berechnung

Für eine effektive dynamische Analyse des schwingungsempfindlichen Gebäudebereichs, wurde ein Teilmodell der auskragenden Tragstruktur des dritten und vierten Obergeschosses modelliert, wie in Bild 7 zu sehen ist. Dies war hinsichtlich der zeitaufwendigen dynamischen Analyse und der Menge an Berechnungen für die durchzuführende Parameterstudie unabdingbar.

Die Rand- und Übergangsbedingungen der Schnittebene sind gemäß den Empfehlungen aus [6] definiert worden und wurden durch Abgleich der Verformungen und der dynamischen Eigenschaften an das Gesamtmodell feinabgestimmt.

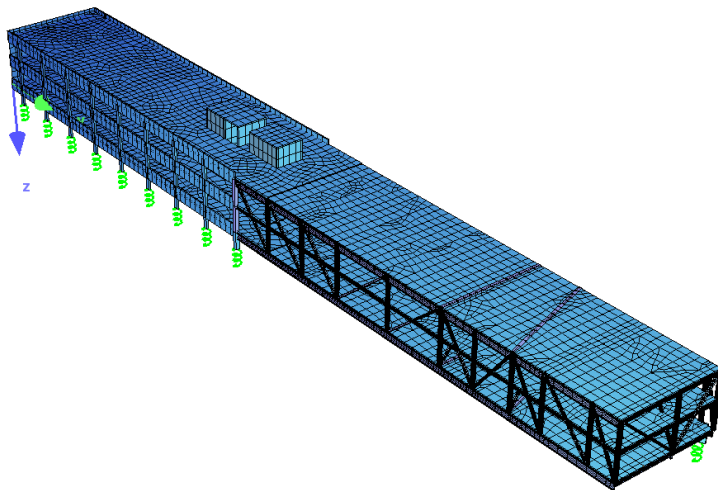


Bild 7: FE-Modell des 3. und 4. Obergeschosses

Bild 8 zeigt die maßgebende Eigenform des Teilmodells unter Berücksichtigung der Eigenlast. Die zugehörige Eigenfrequenz liegt bei $f = 2.42\text{Hz}$.

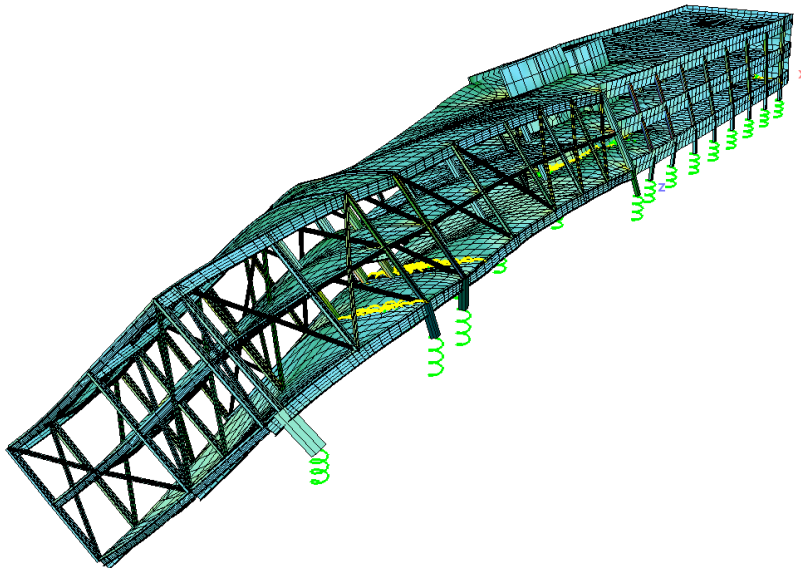


Bild 8: Maßgebende Eigenform des Teilmodells mit $f = 2.42\text{Hz}$

3.4 Lastansätze für die genauere Berechnung

Für die Lastsimulation einer laufenden Person werden die Ansätze nach Bachmann und Seiler-Hüttner zu Grunde gelegt. Beide definieren die Belastung einer gehenden Person als stationäre Belastung $F_p(t)$ durch die Summe der statischen Last und mehrerer harmonischer Schwingungen, wie folgt:

$$F_p(t) = G \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i \sin(2i\pi f_s t - \varphi_i) \right) \quad (2)$$

Hierin sind G das Gewicht der Fußgänger, f_s die Schrittfrequenz, a_i der Lastfaktor und φ_i der Phasenwinkel der jeweiligen Harmonischen der Schrittfrequenz.

Laut Bachmann [7],[8] sind Schrittfrequenzen zwischen 1.4 bis 2.4Hz relevant. Die dazugehörigen dynamischen Lastfaktoren a_i der ersten drei Harmonischen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. In dieser Tabelle sind auch die entsprechenden Faktoren nach der Methode nach Seiler-Hüttner [9] eingetragen. Laut dessen Ansatz sind Schrittfrequenzen zwischen 1.4 – 3.4Hz relevant, und es werden die hierzu gehörenden ersten vier Harmonischen betrachtet.

Ansatz	Schrittfrequenz [Hz]	a ₁		φ ₁	a ₂	φ ₂	a ₃	φ ₃	a ₄	φ ₄
		2.4 Hz	2.0 Hz							
Bachmann	1.4 – 2.4	0.5	0.4	-	0.1	π/2	0.1	π/2	-	-
Seiler-Hüttner	1.4 – 3.4	0.4		π	0.15	- π/3	0.1	π	0.05	- π/3

Tabelle 1 Lastfaktoren und Phasenverschiebung [7],[8],[9]

3.5 Eingabezeilen der Wanderlast

Um eine möglichst realistische Simulation der gehenden Person in der Berechnung mit Sofistik zu erreichen, wurde ein repräsentativer Lastpfad (siehe Bild 9) ermittelt, auf dem sich die Last entlang bewegt.

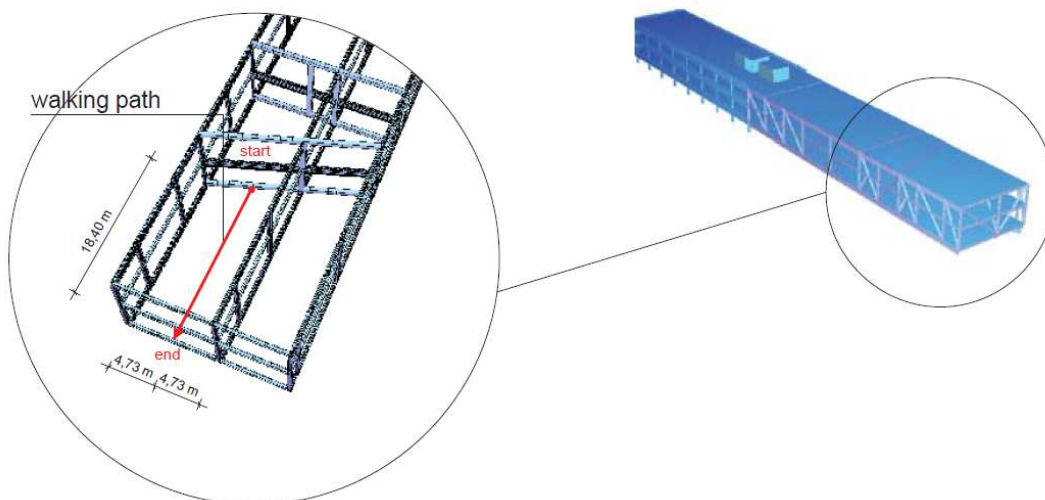


Bild 9: Lastpfad für eine gehende Person mit Anfangs- und Endpunkt

Der Wanderpfad kann als Randelement durch Anfangs- und Endknoten wie folgt definiert werden:

```
+prog sofimsha
kopf
syst rest
$ Beibehaltung altes System
steu rest 2
$ Löschung von Elementlasten, wenn Elemente gelöscht werden
rand 1 bez 'wanderpfad
$ Bezeichnung des Randelements 1
rand 1 2 fitl
$ Definierung des Randelements 1 mit den Anfangsknoten 1 und dem Endknoten 2
ende
```


Die eigentliche Fußgängerbelastung kann programmseitig durch die in Absatz 3.4 vorgestellten Ansätze nach Bachmann bzw. Seiler-Hüttner definiert werden.

Ansatz nach Bachmann:

```
+prog dyna
kopf gehen bachmann
$ Bezeichnung
echo opt vers,velo,acce voll
$ Steuerung Ausgabe
seit unia 6
$ Definierung Einheiten
lf 1; last 1 pz 0.8
$ Definierung Lastfall 1 im Knoten 1 mit der Masse 0.8 kN in globaler Z-
Koordinate
grup - rada #rada radb #radb
$ Definierung Dämpfung
step #nstep #dt
$ Parameter schrittweise Integration
funkt t 0.5 s -0.4 tmin 0 tmax 10
$ Definierung Lastfunktion nach Bachmann mit Periodendauer 0.5sec und
Belastungszeit 10sec
cont nr 1 v 1.5
$ Veränderliche Last entlang des Randelements 1 mit Geschwindigkeit 1.5 m/sec
hist a-z 1 lfsp 100
$ Anforderung Beschleunigungswerte in Knoten 1 in globaler Z-Richtung mit
Speichernummer 100
ende
```

Ansatz nach Seiler-Hüttner:

```
+prog dyna
kopf gehen seiler-hüttner
$ Bezeichnung
echo opt vers,velo,acce voll
$ Steuerung Ausgabe
seit unia 6
$ Definierung Einheiten
lf 1; last 1 pz 0.8
$ Definierung Lastfall 1 im Knoten 1 mit der Masse von 0.8 kN in globaler Z-
Koordinate
grup - rada #rada radb #radb
$ Definierung Dämpfung
step #nstep #dt
$ Parameter der schrittweisen Integration
funkt t 0.5 s 0.4 tmin 0 tmax 10
$ Definierung der Lastfunktion nach Seiler-Hüttner mit Periodendauer 0.5sec
und Belastungszeit von 10sec
cont nr 1 v 1.5
$ Veränderliche Last entlang des Randelements 1 mit Geschwindigkeit 1.5 m/sec
hist a-z 1 lfsp 100
$ Anforderung der Beschleunigungswerte in Knoten 1 in globaler Z-Richtung mit
Speichernummer 100
ende
```

Grafische Ausgabe:

```
+prog dynr
kopf beschleunigungswerte
$ Bezeichnung
seit unia 6
$ Definierung Einheiten
hist 100 a-z 2 1001
$ Grafische Darstellung Beschleunigungswerte in globaler Z-Koordinate des
Knotens 2 mit Farbton 1001
Ende
```

4 DYNAMISCHE ANALYSE DES SYSTEMS

4.1 Ergebnisse und Diskussion der dynamischen Berechnungen

Anhand des Teilmodells wurden die Beschleunigungen im Kragarmbereich für eine gehende Person mittels Zeitschrittanalyse berechnet. Hierbei wurden nur das Eigengewicht sowie die Ausbaulasten der Konstruktion berücksichtigt. Im Referenzmodell wurde die Dämpfung mit 1% [4] angenommen. Um konservative Ergebnisse zu erzielen, wurde die Schrittfrequenz mit der ersten berechneten Eigenfrequenz gleichgesetzt. Berechnungsergebnisse am Endpunkt des Lastpfades sind in Bild 10 dargestellt.

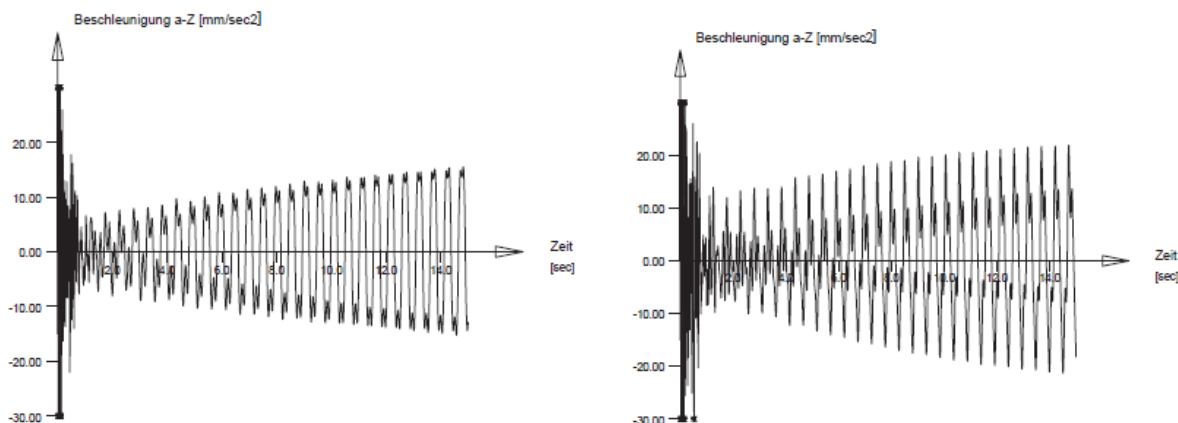


Bild 10: Beschleunigungsverlauf nach Bachmann (links) und Seiler-Hüttner (rechts)

Deutlich ist das gedämpfte Resonanzverhalten zu erkennen. Das Aufschaukeln der Konstruktion wird mit dem Erreichen des Laufweges beendet, würde aber bei einem längeren Laufweg nicht zu relevant höheren Werten führen. Beide gewählte Ansätze zeigen keine großen Unterschiede in den Maximalwerten. Die maximal auftretenden Beschleunigungen liegen bei 22mm/s^2 und damit erwartungsgemäß unterhalb der in der überschlägigen berechneten Werte.

4.2 Ergebnisse und Diskussion der dynamischen Berechnungen

Um mögliche Streuungen im System und um den Einfluss verschiedener Lastansätze auf die maßgebende Systemantwort zu untersuchen, wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Dazu wurden die wichtigsten Systemparameter mit Einfluss auf das dynamische Systemverhalten, d.h. die angesetzte Masse, die Steifigkeit und Dämpfung des Systems variiert. Die Ansätze und festgestellten Einflüsse werden hier kurz erläutert.

Es wurde überprüft, welchen Einfluss eine Erhöhung der anzuregenden Masse durch Berücksichtigung eines Teils der Verkehrslasten auf die Systemantwort hat. Da die Schrittfrequenz in den Untersuchungen mit der durch Massenerhöhung reduzierten ersten Systemeigenfrequenz gleichgesetzt wurde, führt die Massenerhöhung zu weniger konservativen, jedoch realistischeren Ergebnissen.

Für realistische Ansätze zur Systemsteifigkeit bei dynamischen Berechnungen wurden Angaben aus [6] angewandt. Diese sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Man sieht, dass diese Empfehlungen zu einer höheren Systemsteifigkeit und einer höheren ersten Eigenfrequenz führen. Man erkennt aber auch, dass die scheinbar signifikanten Steifigkeitserhöhungen nur eine relativ geringe Eigenfrequenzsteigerung hervorrufen. Die Maßnahme hat einen positiven Effekt bezüglich Beschleunigungswerten, wenn sich die hierdurch erhöhte Eigenfrequenz außerhalb des kritischen Resonanzbereichs der ersten Harmonischen bewegt. Im vorliegenden Fall trifft dies aber nicht zu.

Modell	Vertikale Auflager	Fachwerkdiagonalen	E-Modul [N/mm ²]	Frequenz [Hz]
Statisch	Elastisch	Gelenkig	28300	1.933
Dynamisch	Fest	Biegesteif	38000	2.299

Tabelle 2 Empfehlungen in [6] für Modellierung in dynamischen Berechnungen

Die Dämpfung hat einen großen Einfluss auf die Systemantwort. Die Dämpfung ergibt sich aus der Addition der einzelnen Dämpfungskomponenten [10]: Materialdämpfung, Dämpfung der Verbindungen und der Dämpfung aus der Bettung. Berücksichtigt man nicht-tragende Elemente und die zukünftige Inneneinrichtung, kann man von einer Dämpfung von bis zu 3% ausgehen. Der Effekt auf die Systemantwort ist linear und kann die Beschleunigungen bis zu einem Faktor 3 reduzieren. Der gewählte Ansatz im Referenzmodell ist konservativ.

5 BEURTEILUNG DER ERGEBNISSE

Ziel der durchgeführten überschlägigen Entwurfsberechnungen sowie der danach durchgeführten numerischen Untersuchungen war es, festzustellen, ob personeninduzierte Lasten die Gebrauchstauglichkeit eines Gebäudes einschränken.

Die zulässigen Grenzwerte der dynamischen Strukturantwort für Gebäude und Menschen werden durch verschiedene Normen und Richtlinien geregelt. Am Besten beschreibt die ISO 10137 [4] dieses Phänomen, weil hierin spezifisch auf das Wohlbefinden von Menschen eingegangen wird. In Abhängigkeit von Gebäudefunktion bzw. -typ wird angegeben, welche Beschleunigungen toleriert werden können. Der Vergleichswert der Beschleunigung im Referenzmodell ergibt 22mm/s^2 und liegt somit unterhalb der definierten Grenzlinie.

Die Betrachtung möglicher Ungenauigkeiten im Rechenmodell durch die Variation relevanter Systemparameter stellt sicher, dass das Referenzmodell konservative Werte liefert. Der Ansatz realistischer höherer Massen und Steifigkeiten bewirkt eine niedrigere Systemantwort, die einer eventuellen Überschätzung der Dämpfung entgegenwirkt. Somit sind störende Beschleunigungen auf Grund laufender Personen im Kragarmbereich des Gebäudes nicht zu erwarten. Damit ist sichergestellt, dass Maßnahmen zur Schwingungsreduktion nicht erforderlich sind.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Beurteilungsmethoden für personeninduzierte Lasten basieren meistens auf einfachen dynamischen Berechnungen wie Eigenfrequenzbestimmung an einem vereinfachten Ersatzsystem. Eine genauere Beurteilung kann durch Abschätzung der Strukturantwort, aus der Lastfrequenz und den dynamischen Lastfaktoren stattfinden.

Bei dem vorliegenden Projekt stellte sich durch Vergleich mit genaueren Berechnungen in Sofistik unter Betrachtung der relevanten Systemparameter heraus, dass solche überschlägigen Berechnungen auch für komplexe Systeme funktionieren und damit eine konservative Einschätzung des Systemverhaltens möglich ist.

LITERATUR

- [1] *Arup GmbH*, Vorplanungsbericht Deutsche Sporthochschule Köln Ersatzneubau NAWI-MEDI, August 2010
- [2] *A. J. Babaei*, Untersuchungen zum Schwingungsverhalten einer weit auskragenden Fachwerkkonstruktion unter personeninduzierten Lasten, Diplomarbeit Universität Stuttgart, 2011
- [3] *Kadawittfeldarchitektur GmbH*, Entwurfsplanungsdokumente, Januar 2011
- [4] *ISO 10137 Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*, 2007
- [5] *Ove Arup and Partners*, Vibration Seminar, Arup internal paper, October 2001
- [6] *A. L. Smith, S. J. Hicks, and P. J. Devine*, Design of Floors for Vibration: A New Approach (Revised Edition, February 2009), Steel Construction Institute, Silwood Park, Ascot, Berkshire, 2011
- [7] *H. Bachmann und W. Ammann*, Schwingungsprobleme bei Bauwerken: Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, International Association for Bridge and Structural Engineering, 1987
- [8] *H. Bachmann*, Lebendige Fußgängerbrücken - Eine Herausforderung, Bautechnik 81, S. 227–236, 2004
- [9] *C. Seiler und S. Hüttner*, Ein einheitliches Modell zur Beschreibung von Fußgängerlasten für verschiedene Bewegungsarten - Theorie, experimentelle Messungen und praktische Anwendung, Bauingenieur 79, S. 483–496, 2004
- [10] *C. Petersen*, Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau, München, Maurer Söhne, 2001