

Probleme weitgespannter Decken unter Fußgänger-Anregung im technischen und rechtlichen Bereich

**Themenschwerpunkt: Bauwerksschwingungen,
 menscheninduzierte Schwingungen**

Dr.-Ing. **Albrecht Burmeister**, DELTA-X GmbH Ingenieurgesellschaft;
Dr. jur. **Wolfgang Breyer**, Breyer Rechtsanwälte

Kurzfassung

Weitgespannte Decken im Bereich von Bürogebäuden und Parkhäusern sind durch Fußgänger relativ leicht anzuregen. In der Regel werden diese Konstruktionen nicht für derartige Anregungen dynamisch untersucht sondern lediglich statisch ausgelegt. Der Beitrag zeigt auf, wie Anregungen durch ortsunabhängige Fußgänger-Einwirkungen zuverlässig rechnerisch ermittelt und einer Bewertung analog den gültigen Regelwerken wie DIN 4150-2 unterworfen werden können. Der Empfehlungscharakter der zitierten Norm stellt eine latente Unsicherheit für den praktisch tätigen Ingenieur dar. Gleichzeitig kann das Problem des Mangel-Vorwurfs mit einer Reihe von Rechtsfolgen entstehen. Auch auf diesen Komplex soll im Rahmen des Beitrages eingegangen werden. Die Tendenz, Tragwerke möglichst weit zu spannen und zu optimieren begründet die Aktualität dieses Themas.

1. Einleitung

Bauwerksschwingungen können in vielen Bereichen als mechanisch beherrschbare Probleme angesprochen werden. Mit modernen numerischen Methoden sind für definierte Konstruktionen mit bekannter Masse-Belegung, Steifigkeit und Anregung zuverlässige Prognosen möglich. Unsicherheiten, die teilweise in Bezug auf Dämpfungseigenschaften bestehen, können mit Hilfe von Grenzfallbetrachtungen praxisgerecht beseitigt werden.

Bei Anregungen durch Fußgänger kann allerdings nur begrenzt von definierten Einwirkungen gesprochen werden. Selbst wenn Hüpfen und mutwillige Anregungen ausgeschlossen werden, bleibt die Belastungszeitfunktion abhängig von individuellen Einflüssen wie beispielweise der Schrittfrequenz. Mit noch größeren Unsicherheiten behaftet, sind die relevante Anzahl der im Deckenbereich zu betrachtenden Fußgänger und deren Bezug zueinander.

Angesprochen sind die Phasenlage der Anregung und die räumliche Zuordnung der Personen untereinander. Bei Fußgänger-Anregungen von weitgespannten Decken steht in der Regel die Auswirkung auf ruhende Menschen im Vordergrund. Die Spürbarkeit der auftretenden Schwingungen stellt eine wichtige Frage dar, wobei sie von einer Reihe von Parametern wie beispielsweise Alter, Geschlecht und Gesundheitszustand abhängig ist. Um die Frage nach in diesem Zusammenhang zulässigen Schwingungen zu beantworten, stehen im Wesentlichen die DIN 4150-2 sowie die VDI-Richtlinie 2057 zur Verfügung.

Weder DIN 4150-2 noch VDI 2057 schreiben Belastungen vor, die zur Bestimmung der Schwingungsgrößen anzusetzen wären. So werden keine Angaben über die Anzahl der beispielsweise gleichzeitig ein Deckenfeld zu Schwingungen anregenden Fußgänger gemacht. In DIN 4150-2 [1]: „werden Anforderungen und Anhaltswerte genannt, bei deren Einhaltung erwartet werden kann, dass in der Regel erhebliche Belästigungen von Menschen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen vermieden werden.“ Weiter führt die zitierte Norm aus, dass „der Mensch in Gebäuden, insbesondere in Wohnungen, so wenig wie möglich wahrnehmbaren Erschütterungen ausgesetzt werden sollte. Wahrnehmbare Erschütterungen sind jedoch nach dem Stand der Technik nicht immer zu vermeiden.“ Der Empfehlungscharakter der Norm und der sich über die Anhaltswerte A_u , A_o , und A_r ergebende Spielraum bedeutet, dass nutzungsbedingte Festlegungen erforderlich sind. Angesprochen sind einerseits die Anhaltswerte A zur Beurteilung der Erschütterungsimmissionen wie auch die für deren Ermittlung anzusetzende, sich gleichzeitig bewegende Anzahl von Personen.

Analoges gilt für VDI 2057 [2], Kapitel 1.1: „Die in dieser Richtlinie getroffenen Festlegungen stützen sich auf die zurzeit bekannten Reaktionen, wie biomechanisches Schwingverhalten des Körpers oder seiner Teilbereiche, akute physiologische Reaktionen (z.B. Muskelaktivität, Kreislaufverhalten), Stärke der individuellen Schwingungswahrnehmung, Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit sowie chronische Gesundheitsschäden. Unter bestimmten Arbeits- und Umgebungsbedingungen können gleiche Schwingungsbelastungen verschiedene Wirkungen haben.“

Um eine Bewertung für unterschiedliche Nutzungsszenarien zu ermöglichen, wird eine Methode vorgeschlagen, bei welcher das zur Diskussion stehende Bauwerk bzw. Bauteil nach der Methode der Finiten Elemente wirklichkeitsnah abgebildet und mit Hilfe von transienten Berechnungen analysiert wird. Betrachtet werden stochastische Anregungen durch mehrere Personen sowie Personengruppen im Gleichschritt. Bei Letzteren ist als wesentlicher Einfluß

die Ortsveränderlichkeit der Belastung zu berücksichtigen (Wanderlast). Aus den im Ergebnis der Analysen erhaltenen Weggrößen werden die in den angesprochenen Regelwerken verwendeten Beurteilungskriterien (Effektivwerte der frequenzbewerteten Beschleunigungen bzw. bewertete Schwingstärken) ermittelt und der Bewertung zu Grunde gelegt. Beispielhaft soll dieses Verfahren anhand einer Fußgängerbrücke diskutiert werden, in welche eine Cafeteria eingebaut werden soll. Somit ergibt sich das Problem der Neubewertung der Brücke für sitzende Personen im Cafeteriabereich bei einer gleichzeitigen Anregung durch gehende Personen im restlichen Brückenbereich. In Abhängigkeit von der Frequenzlage der Brücke, der Anzahl der sie anregenden Personen und deren Verteilung auf der Brücke können Schwingungen erwartet werden, die spürbar bis stark spürbar sind. Problematisch in diesem Zusammenhang wären Behaglichkeits- und Befindlichkeitsstörungen bei den sich im Cafeteria-Bereich aufhaltenden Personen.

Die hier betrachtete Brücke weist eine Stützweite von ca. 55 m auf. Sie besteht aus einer Stahl-Fachwerkkonstruktion mit einer statischen Höhe von ca. 4,50m. Den Untergurt des Fachwerks bildet eine etwa 4,50m breite Stahlbetonplatte, welche gleichzeitig als Verkehrsfläche für die Fußgänger dient. Der Obergurt der betrachteten Brücke besteht aus einem Fachwerkverband. Zur Beurteilung der Brücke als Fußgängerbauwerk gibt beispielsweise Bachmann [3] Frequenzbereiche an, in denen keine Eigenfrequenzen (Resonanzstellen) des Bauwerks liegen sollten. Er unterscheidet hierbei Vertikal-, Horizontal- Längs- und Horizontal-Querschwingungen. Durch diese Frequenzbedingungen kann eine Fußgängerbrücke bewertet werden ohne eine Einwirkungssituation zu unterstellen, d.h. die Bewertung ist von der Anzahl der Personen unabhängig, die sich gleichzeitig auf der Brücke befinden.

2. Berechnungskonzept

Um die zu erwartenden Schwingungen der Brücke mit Hilfe der Finite Elemente Methode zu untersuchen, wird der Untergurt mit Hilfe dreidimensionaler Schalenelemente (shell43) abgebildet. Die Pfosten und Diagonalen, die Obergurte sowie Längs- und Querträger bilden Balkenelemente (beam4 und beam44). Somit wird die Steifigkeit der vorhandenen Konstruktion durch das FE- Modell wirklichkeitsnah wiedergegeben.

Um Bewegungsgrößen zur Ermittlung von Bewertungszahlen (z.B. effektive Beschleunigungen, KB-Werte) zu erhalten, sind weitere Überlegungen erforderlich. Im Zuge der Festlegung einer Beanspruchungssituation werden exemplarisch der Kraft-Zeit-Verlauf einer Gruppe von 5 bzw. 15 auf der Brücke gehenden Personen im Rahmen einer transienten Analyse auf das

Rechenmodell aufgebracht und die Zustandsgrößen (Schwingungsamplitude $u(t)$, Geschwindigkeit $v(t)$ und Beschleunigung $a(t)$) an ausgewählten Stellen (Brückenmitte, im Viertelpunkt der Spannweite) abgegriffen. Aus den so gewonnenen Zeitsignalen werden Bewegungsgrößen nach DIN 4150 [1] und VDI-Richtlinie 2057 [2] ausgewertet (vgl. Bilder 4, 5).

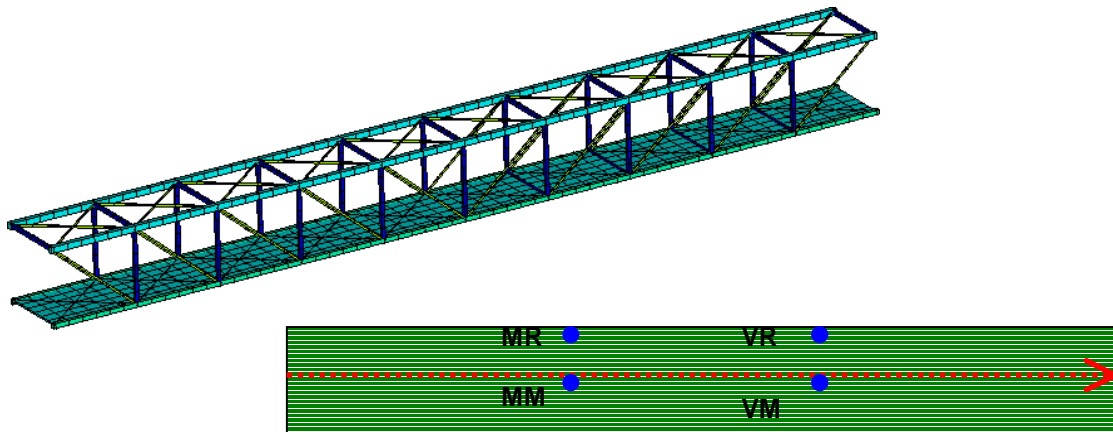


Bild 1: FE-Modell, Auswertepositionen

Bei der Berechnung mit einer Gruppe von 5 Personen wird angenommen, dass sich die Personen im Gleichschritt über die Brücke bewegen. Im Gegensatz hierzu wird bei einer Anzahl von 15 Personen von einer statistischen Verteilung der Personen auf der Brücke ausgegangen. Weiterhin werden die Schrittfrequenzen und die Phasenverschiebungen der Einzelpersonen untereinander zufällig festgelegt. Auf dieser Basis werden anschließend mehrere Berechnungen durchgeführt, um die Sensitivität der Ergebnisse bewerten zu können.

3. Anregung durch Fußgänger

Die Normen [1] und Richtlinien [2] zur Bewertung der Schwingungen enthalten keine Angaben über die der Beurteilung zu Grunde zu legenden Einwirkungen. Gerade im Fall einer Anregung durch Personen können somit keine allgemein verbindliche Szenarien definiert oder Regelwerken entnommen werden. Auch um die Spielräume der Regelwerke zu nutzen und um besondere Aspekte der Mieter zu berücksichtigen, sind Spezifikation seitens des Bauherren erforderlich.

Fünf Personen im Gleichschritt

Die Personengruppe bewegt sich entlang der in Bild 1 eingezeichneten Strecke. Die Personen haben jeweils ein Körpergewicht von 80kg und eine Schrittfrequenz von 2,0Hz bei einer

Schrittweite von etwa 0,80m. Die Frequenz kann der einschlägigen Literatur entnommen werden. Bachmann [3] gibt für gehende Menschen einen Frequenzbereich zwischen 1,3Hz bis 2,4Hz an. Der angesetzte Wert liegt im mittleren Bereich dieses Intervalls.

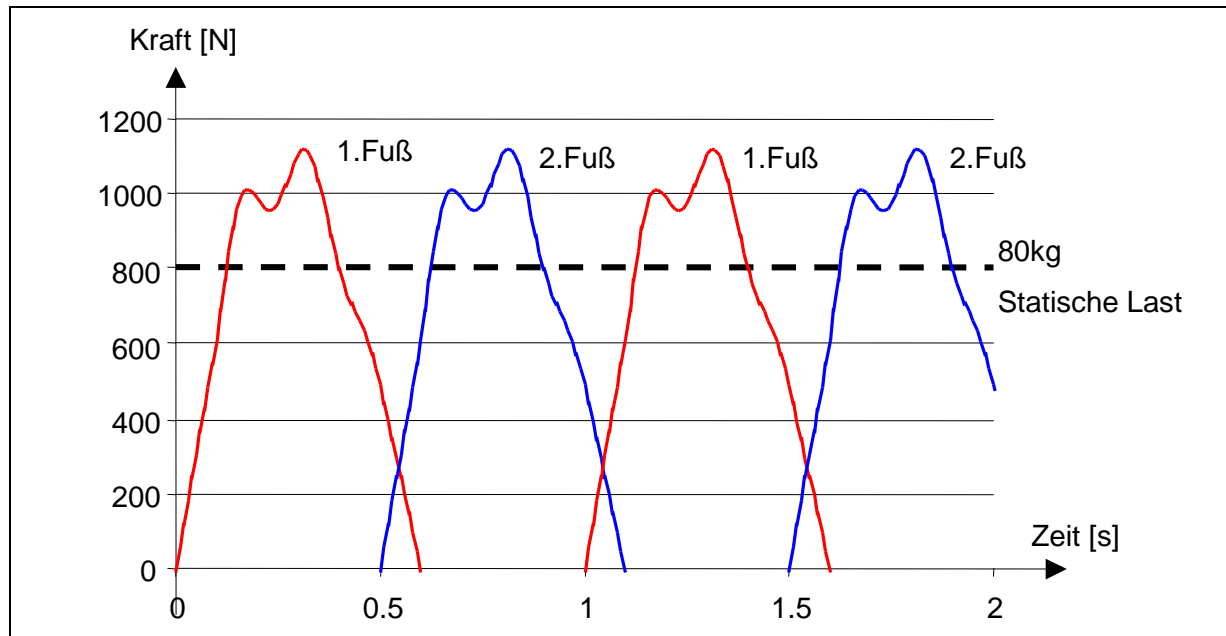


Bild 2: Ansatz der dynamischen Last in der FE-Simulation

Fünfzehn Personen

Da es sich um ein Fußgängerbauwerk handelt, wird der Fall untersucht, dass sich 15 Personen gleichzeitig auf der Brücke aufhalten. Die Eingangsgrößen der Berechnungen werden zufällig bestimmt. Je Variante werden insgesamt 10 Einzelberechnungen durchgeführt und ausgewertet. Zufällig bestimmte Eingangsgrößen sind im Einzelnen:

- Die Orte, an denen sich die Personen zum Beginn und während der Berechnung befinden (bei dieser Analyse verändern die Personen nicht ihre Position sondern „treten auf der Stelle“).
- Die Schrittfrequenz jeder Einzelperson im Intervall zwischen 1,5Hz und 2,5Hz.
- Die Phasenverschiebung der Lastanteile der Personen untereinander.

4. Bewertung nach DIN 4150-2

Die Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen auf Personen in Gebäuden erfolgt auf Grundlage der DIN 4150-2 „Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden“ [1].

Die Brücke stellt von der städtebaulichen Situation her einen Einwirkungsort dar, in dessen Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen und Bürobauten untergebracht sind. Es handelt sich hier nicht um Wohnungen. Auch wäre die Cafeteria kein besonders schutzbedürftiger Einwirkungsort.

Im Folgenden wird daher von Anhaltswerten nach Zeile 2 der Tabelle 1 der Norm ausgegangen. Diese lauten für die Tageszeit:

$$A_u = 0,3 ; A_o = 6,0 ; A_r = 0,15$$

Die Norm unterscheidet hier drei Bereiche:

a) die maximale bewertete Schwingstärke ist kleiner A_u

In diesem Fall sind die Forderungen der Norm eingehalten

b) die maximale bewertete Schwingstärke ist größer A_o

In diesem Fall sind die Forderungen der Norm nicht eingehalten

c) die maximale bewertete Schwingstärke liegt im Intervall zwischen A_u und A_o

In diesem Fall muss die Beurteilungs-Schwingstärke ermittelt werden. Diese bezieht (im Gegensatz zur maximalen bewerteten Schwingstärke) das Verhältnis von Einwirkungs- zu Beurteilungszeit mit in die Bewertung ein. Diese Bewertungs-Schwingstärke muss kleiner als A_r sein, um die Forderung der Norm zu erfüllen.

Für die Nutzung der Brücke als Cafeteria wird die Zeitbewertung nach c) betrachtet, nachdem sich die Besucher der Cafeteria nicht den ganzen Tag auf der Brücke aufhalten. Mit dem Zusammenhang zwischen Einwirkungsdauer und zulässigem KB-Wert lässt sich für eine berechnete, maximale bewertete Schwingstärke KB_{Fmax} eine maximale Einwirkungsdauer bestimmen, bei deren Unterschreitung die Forderungen der Norm eingehalten sind.

Fünf Personen im Gleichschritt

Nach DIN 4150-2 ergibt sich bei einer Anregung durch 5 Personen im Gleichschritt der nachstehende zeitliche Verlauf (Bild 3) der bewerteten Schwingstärke für die Beobachtungsstellen gemäß Bild 1.

Die maximale bewertete Schwingstärke beträgt $KB_{Fmax} = 0.76$ und liegt somit deutlich oberhalb des Grenzwertes von $A_u = 0.3$. Für diesen Fall $KB_{Fmax} > A_u$ sieht DIN 4150-2 eine Bewertung anhand der Beurteilungsschwingstärke KB_{FT} vor. An dieser Stelle kann rückwärts die maximale Einwirkungsdauer bestimmt werden, die sich eine Person unter der berechne-

ten Schwingungssituation an einem 8h-Arbeitstag in der Cafeteria aufhalten darf, um noch die Forderungen der Norm einzuhalten ($KB_{FTT} < A_r = 0,15$). Es wird unterstellt, dass die Person in der übrigen Zeit keinen Schwingungen ausgesetzt ist. Aus der so durchgeführten Zeitbewertung ergibt sich eine maximale Einwirkungszeit von 19 min / 8h

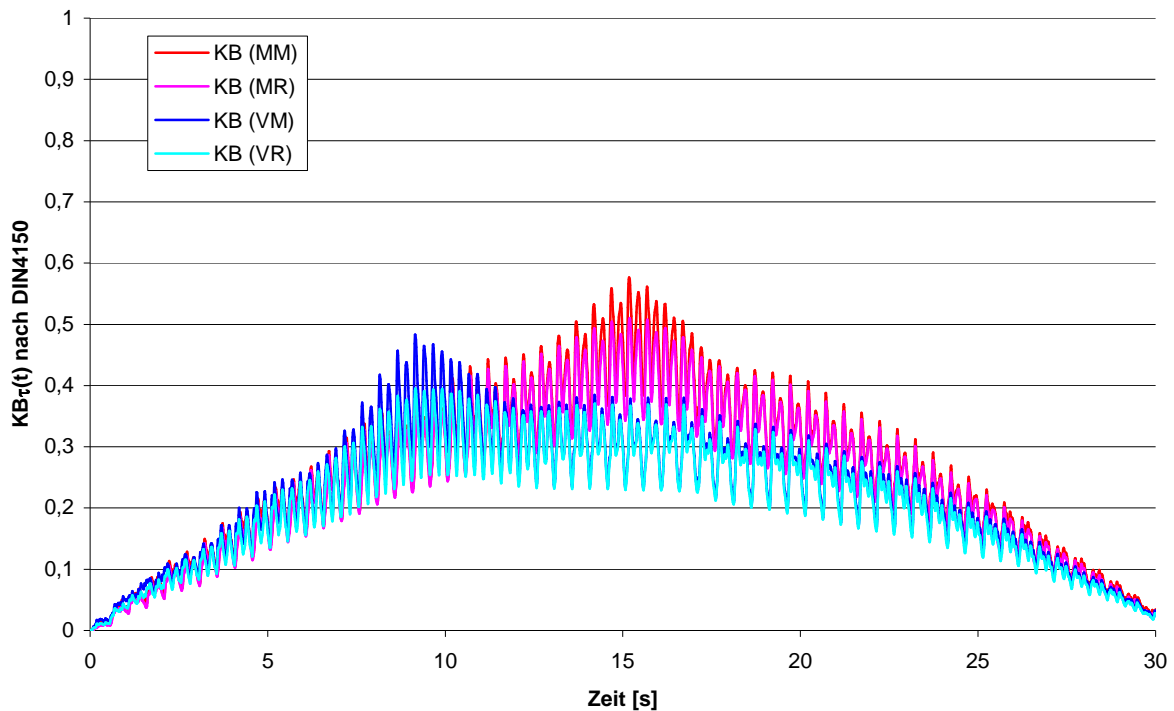


Bild 3: $KB_{\tau}(t)$, 5 Personen im Gleichschritt

Wenn also die Brücke ständig von 5 Personen im Gleichschritt angeregt wird (also ständig ein KB_{Fmax} – Wert von 0,76 vorliegt), dann dürfte sich – die Anwendbarkeit der DIN4150 vorausgesetzt – eine Person höchstens 19 Minuten in der Cafeteria aufhalten. Wenn sich eine Person längere Zeit in der Cafeteria aufhält, dann darf die Brücke insgesamt nicht länger als 19 Minuten mit einem KB_{Fmax} – Wert von 0,76 schwingen.

Statistische Anregung durch fünfzehn Personen

Für die Berechnungen für 15 statistisch verteilte Personen sind nachfolgend zwei typische Zeitverläufe der bewerteten Schwingstärke $KB_{\tau}(t)$ dargestellt.

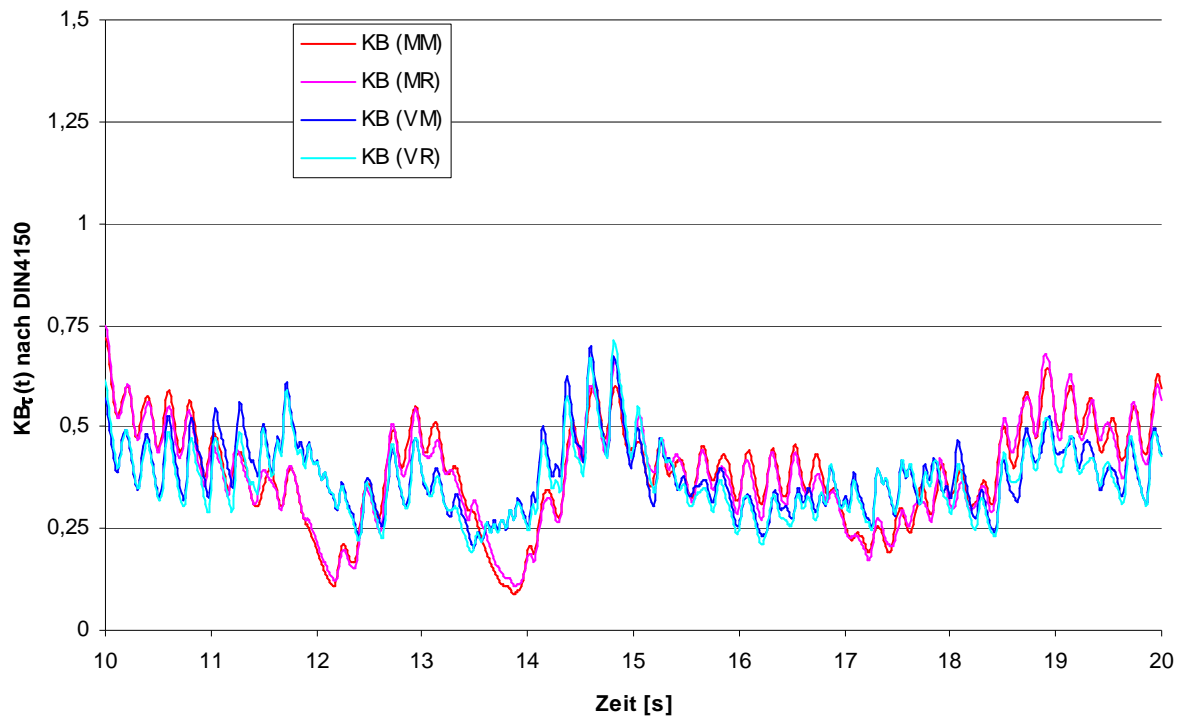


Bild 4: $KB_t(t)$, 15 Personen Zufallsanregung

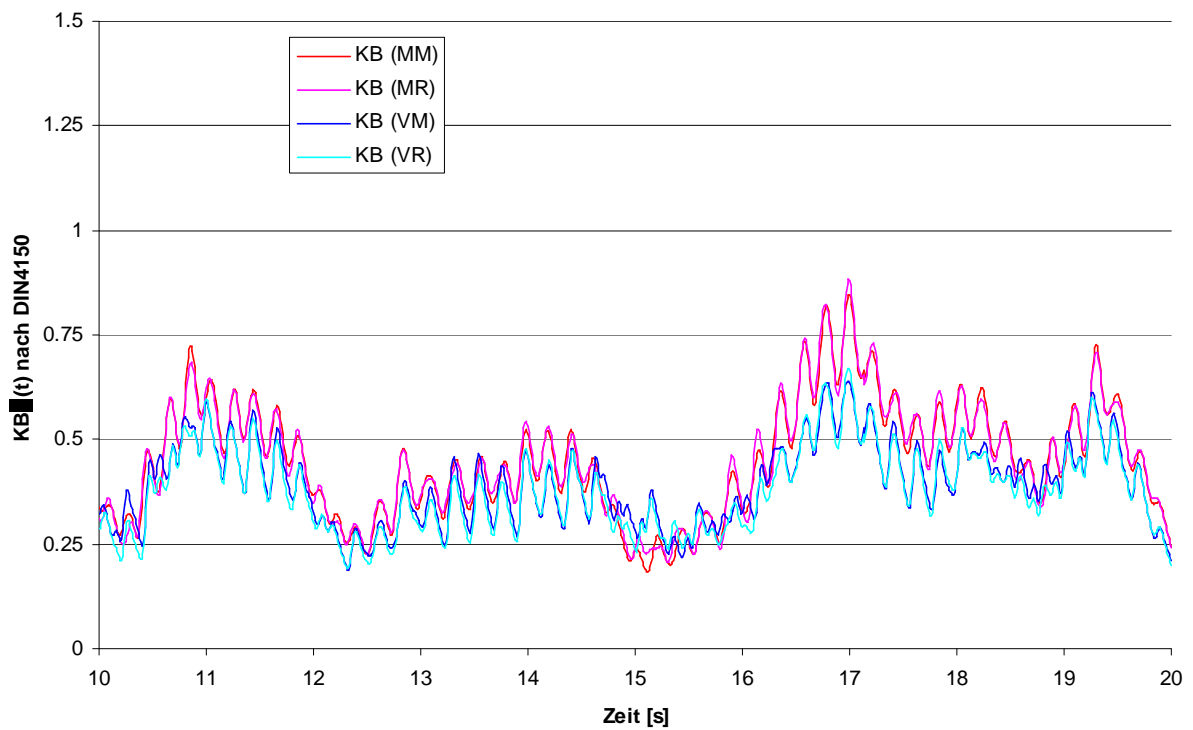


Bild 5: $KB_{II}(t)$, 15 Personen Zufallsanregung

Eine Übersicht die im Rahmen von zehn unterschiedlichen Analysen ermittelten maximalen bewerteten Schwingstärken gibt die nachstehende Tabelle:

Tabelle 1: KB_{Fmax} , 15 Personen, statistisch verteilt

1. Berechnung / KB_{Fmax}	4,17
2. Berechnung / KB_{Fmax}	2,75
3. Berechnung / KB_{Fmax}	1,90
4. Berechnung / KB_{Fmax}	1,94
5. Berechnung / KB_{Fmax}	2,64
6. Berechnung / KB_{Fmax}	3,16
7. Berechnung / KB_{Fmax}	2,65
8. Berechnung / KB_{Fmax}	1,83
9. Berechnung / KB_{Fmax}	3,14
10. Berechnung / KB_{Fmax}	1,42
Durchschnitt / KB_{Fmax}	2,56

Es zeigt sich, dass der Grenzwert der DIN 4150-2 von $A_u = 0.3$ überschritten wird. Analog zu der Vorgehensweise bei einer Anregung durch 5 Personen im Gleichschritt kann eine Bewertung anhand der Beurteilung Schwingstärke KB_{FT} vorgenommen werden. Daraus ergibt sich eine maximale Einwirkungszeit von 16 min / 8h.

Eine analoge Bewertung kann auf der Grundlage der VDI 2057 [2] vorgenommen werden. Aus den mit Hilfe der FE-Analyse berechneten Zeitverläufe der Weggrößen an den Beobachtungsstellen, wird der gleitende Effektivwert $a_{w\tau}(t)$ der frequenzbewertenden Schwingbeschleunigung a_w herangezogen. Aufgrund der sitzenden Personen unter vorwiegend vertikaler Schwingbelastung wird zur Frequenzbewertung der Übertragungsfaktor W_k nach Tabelle 2 der VDI 2057 verwendet. Auf diesem Wege ergeben sich für die beiden betrachteten Szenarien Effektivwerte der Beschleunigung, die über der Wahrnehmungsschwelle von 0.015 m/s^2 liegen. Somit werden die zugeordneten Schwingungen nach VDI 2057 als spürbar einzustufen sein.

Im Ergebnis liegen Bewertungen für definierte und beliebig erweiterbare Einwirkungsszenarien vor. Die schlussendliche Bewertung erfordert allerdings die zusätzlich vorzunehmende Festlegung, inwieweit die betrachteten Szenarien als für die Nutzung repräsentativ anzuse-

hen sind. Im Hinblick auf eine Mängeldiskussion, kann diese Lücke nur durch Abstimmungen und Vereinbarungen zusammen mit dem Nutzer bzw. dem Bauherrn geschlossen werden.

5. Literatur

- [1] DIN 4150 Teil 2: Erschütterungen im Bauwesen – Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Juni 1999
- [2] VDI Richtlinie 2057 Teil 1: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Ganzkörper-Schwingungen, September 2002
- [3] Bachmann, H.: Schwingungsprobleme bei Bauwerken – Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen, IABSE – AIPC – IVBH, Zürich 1987
- [4] British Standard Institution, BS5400, Part 2, Appendix C: „Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges“, 1978
- [5] National Building Code of Canada, NBC 1985, Commentary A, Serviceability Criteria for Deflections and Vibrations“, 1985