

Ist Hüpfen wirklich so schlimm? – Untersuchung und Ertüchtigung der MDCC-Arena in Magdeburg

M. Mistler, Baudynamik Heiland & Mistler GmbH, Bochum, D

Abstract

Die MDCC-Arena ist ein Fußballstadion in Magdeburg, der Landeshauptstadt von Sachsenanhalt, Deutschland und wird hauptsächlich vom 1. FC Magdeburg genutzt. Das Stadion wurde 2006 eröffnet und bot Platz für bis zu 25.500 Zuschauer. Im Jahr 2016 wurden Schäden an der Nordtribüne der MDCC-Arena festgestellt, was die Stadt Magdeburg dazu veranlasste, die Konstruktion baudynamisch untersuchen zu lassen. Messungen während des Spielbetriebs zeigten, dass das rhythmische Hüpfen der Fans die Tribüne zu Schwingungen mit Beschleunigungen von über 5 m/s^2 anregen. Die zugehörigen Wegamplituden konnten visuell sehr deutlich wahrgenommen werden, weil sie im cm-Bereich lagen. Die rechnerische Untersuchung ergab, dass die Beschleunigungen sogar noch deutlich größer hätten ausfallen können, wenn die Hüpf Frequenz der Fans nur leicht variiert hätte. Da die baudynamische Gebrauchstauglichkeit damit nicht mehr sichergestellt war, hatte sich die Stadt, die Fans und der FCM kurzfristig auf ein Hüpfverbot geeinigt, um die restlichen Heimspiele der Spielsaison im Jahr 2016 noch stattfinden lassen zu können. Parallel dazu wurde eine Ertüchtigungsmaßnahme erarbeitet und umgesetzt, bei der gleichzeitig die Nordtribüne von einer Sitzplatz- zu einer Stehplatztribüne umgebaut wurde, so dass die Arena nun Platz für bis zu 30.000 Zuschauer hat.

Der Vortrag stellt die durchgeführten messtechnischen Schwingungsuntersuchungen vor, die an der Nordtribüne der MDCC Arena durchgeführt worden sind, und vergleicht die Messergebnisse mit den rechnerischen Untersuchungen, um die in der VDI2038-1 angegebenen Lastansätze für personeninduzierte Anregungen zu verifizieren. Außerdem wird gezeigt, welche Parameter und Modell-Randbedingungen darüber hinaus maßgebenden Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben. Abschließend werden die Ertüchtigungsmaßnahmen vorgestellt, die im Bereich der MDCC-Nordtribüne umgesetzt wurden, sowie die Ergebnisse der Abschlussmessungen nach Umsetzung diese Maßnahmen.

Ist Hüpfen wirklich so schlimm? – Untersuchung und Ertüchtigung der MDCC-Arena in Magdeburg

Dr.-Ing. **Michael Mistler**, Baudynamik Heiland & Mistler GmbH, Bochum,
www.baudynamik.de

1. Ausgangssituation

Die MDCC-Arena ist ein Fußballstadion in Magdeburg, der Landeshauptstadt von Sachsen-Anhalt, und wird hauptsächlich von dem Fußballverein „1. FC Magdeburg“ (FCM) genutzt, der derzeit in der 2. Bundesliga spielt. Die MDCC-Arena wurde 2006 eröffnet und bot Platz für bis zu 25.500 Zuschauer. Die Tribünenkonstruktion (vgl. Bild 1) ist eine übliche Stahlbeton-Fertigteilkonstruktion (Betongüte B45), bestehend aus

- zweifeldrigen Zahnbalken,
 - ausgebildet als Gerbräger mit Stützenabständen von 8,8 m und 13,8 m
 - Querschnitt des Zahnbalkens: 120 x 60 cm²
 - Rasterabstand der Zahnbalken $d = 10,6$ m
- Tribünenstufen,
 - ausgebildet als 3stufiges Faltragwerk mit einer Spannweite von 10,3 m
 - Sitzplatztiefe und -abstand: 80 cm und 50 cm
 - Dicke der Setz- bzw. Trittstufe: 12 cm bzw. 15 cm

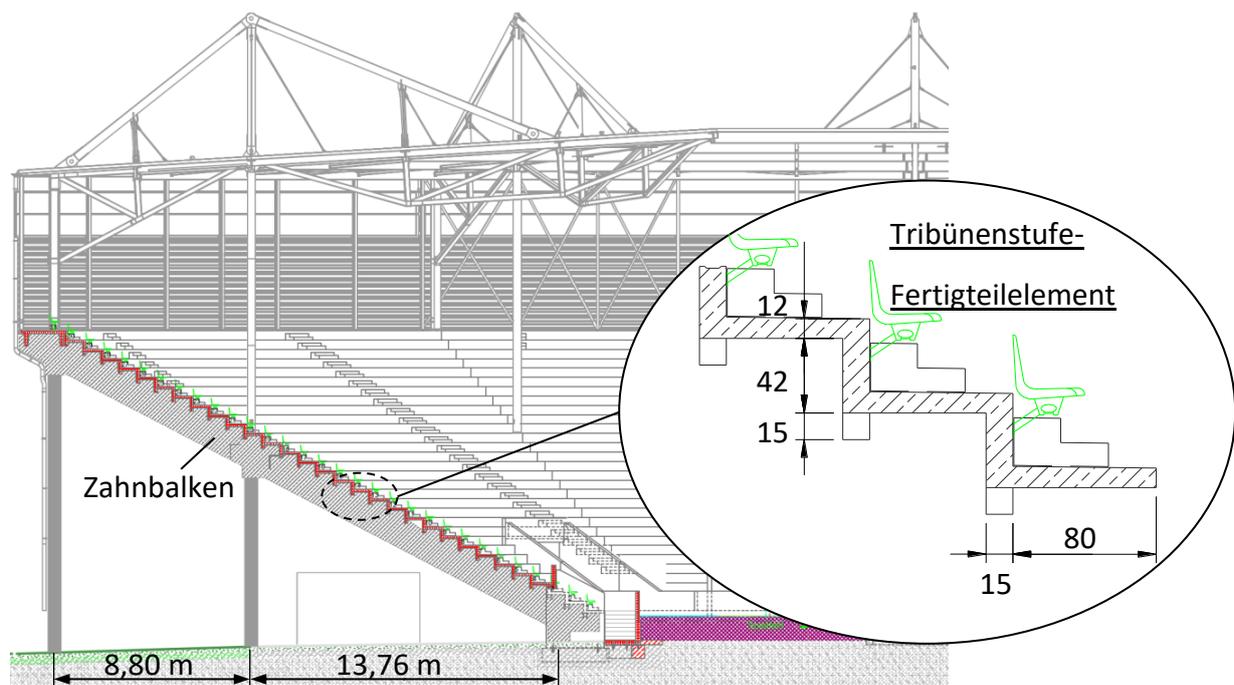


Bild 1: Tribünenkonstruktion der MDCC-Arena Magdeburg

Die ursprünglichen Zuschauerränge der MDCC-Arena wurden ausschließlich als Sitztribünen konzipiert.

2. Messtechnische Untersuchung während einem Fußballspiel vor Umbau

Im Bereich der Nordtribüne, wo die Fanszene beheimatet ist („Block U“), traten einige Jahre nach Eröffnung mehrfach so große Schwingungen während Fußballspielen auf, dass diese nicht nur fühlbar waren, sondern sogar visuell wahrgenommen werden konnten. Dies veranlasste die Stadt Magdeburg dazu, die Konstruktion in baulastdynamischer Hinsicht untersuchen zu lassen. Im Jahr 2016 wurde die Nordtribüne während eines Spiels des 1. FC Magdeburg gegen Hansa Rostock messtechnisch untersucht.

Sowohl an den Zahnbalcken als auch an den Tribünenstufen wurden insgesamt 14 Sensoren an unterschiedlichen repräsentativen Stellen installiert. In Tribünenmitte, wo die größten Schwingungen erwartet wurden, wurde zusätzlich zu den Schwingamplituden auch die Einsenkung über den gesamten Spielverlauf mit entsprechender Vor- und Nachlaufzeit gemessen. Damit war es möglich, die maximalen Schwingamplituden zu messen, die Modalformen zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu identifizieren und die quasistatische Einsenkung infolge Personenbelastung zu verfolgen.

In Tabelle 1 sind die identifizierten Eigenfrequenzen in unterschiedlichen Belastungssituationen aufgelistet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Eigenfrequenz mit zunehmender Zuschauerermenge sinkt. Ohne Zuschauer beträgt die 1. Eigenfrequenz $f_e = 4,6$ Hz, bei voller Besetzung beträgt die Eigenfrequenz $f_e = 4,0$ Hz. Der gleiche Effekt kann bei der 2. Eigenfrequenz beobachtet werden. Die zugehörige modale Dämpfung wurde anhand mehrerer Ausschwingversuche ohne Zuschauer im Mittel zu $D = 4,3$ % bestimmt.

#	Eigenfrequenz [Hz]			Beschreibung der Modalform
	leere Tribüne	halb besetzt	volle Tribüne	
1	4,6	4,3	4,0	Biegeschwingung des Zahnbalckens und der Tribünenstufe des unteren Rangs
2	6,3	6,2	5,5 - 6,0	Biegeschwingung im Bereich des oberen Rangs
3	6,9	Nicht genau identifizierbar		Mehrwellige Eigenformen der Tribünenstufen (oben, mittig und unten)

Tabelle 1: Eigenfrequenzen [Hz]

Während des Spiels wurden die maximalen Schwingwerte erwartungsgemäß in Tribünenmitte (Mitte Zahnbalcken im unteren Rang, Mitte Tribünenstufe) festgestellt, wo auch die 1. Eigenform die größten Amplituden aufweist. In Bild 3 ist der Beschleunigungszeitverlauf dieser Referenzstell während der 1. Halbzeit dargestellt.

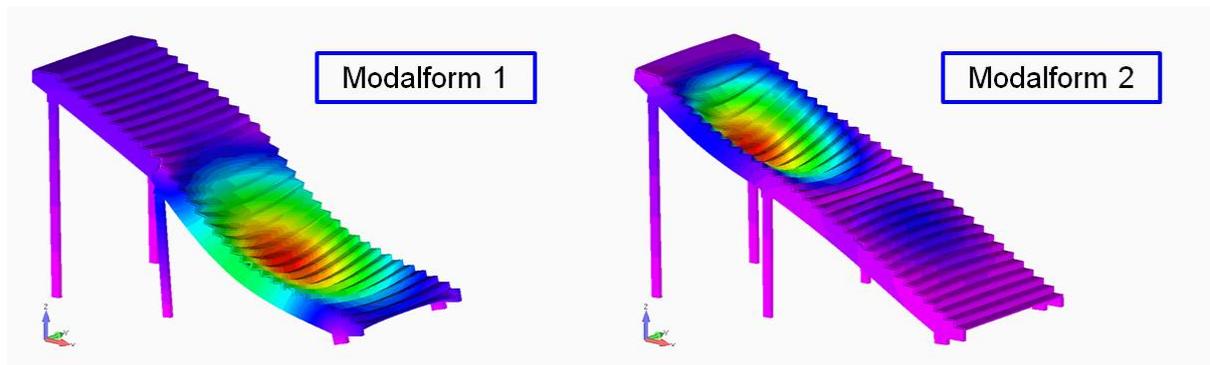


Bild 2: 1. und 2. Modalformen

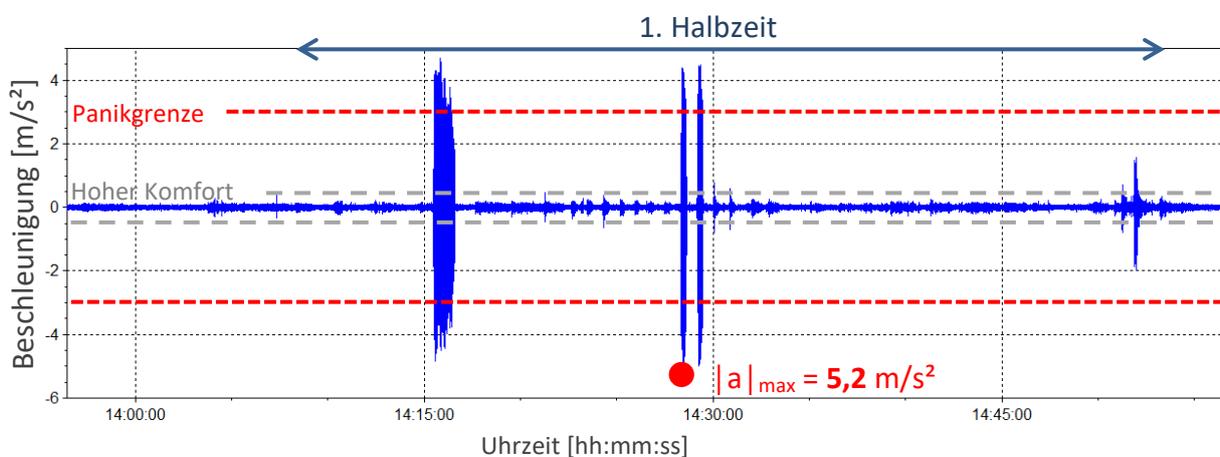


Bild 3: Beschleunigungszeitverlauf während der 1. Halbzeit

Während dieses Spiels betrug der Maximalwert der Beschleunigung $5,2 \text{ m/s}^2$. Dieser Wert liegt deutlich über dem zulässigen Wert von $a = 3,0 \text{ m/s}^2$ gemäß VDI2038-2 [2] und kann auch als „Panikgrenze“ bezeichnet werden. Bemerkenswert ist auch, dass die Schwingamplituden ansonsten mit $a < 0,5 \text{ m/s}^2$ (= hoher Komfort gemäß [2]) sehr niedrig sind, obwohl die Fans sich ständig bewegt und meistens gesungen haben. Nur zu einzelnen Zeitpunkten steigen die Beschleunigungen sehr plötzlich an und sind genauso schnell wieder niedrig. Eine „Einschwing- oder „Ausschwingphase“ scheint es nicht zu geben. Genau dies entspricht auch dem Eindruck, den man vor Ort gewonnen hat.

Dieses Phänomen hat mehrere Gründe. Der wichtigste Grund hierfür ist, dass nur bei bestimmten Fanliedern der Hüpfrythmus so war, dass die doppelte Hüpf Frequenz mit der Eigenfrequenz der Konstruktion in etwa zusammenfiel. Während der Phase mit den größten Amplituden war eine Hüpf Frequenz von $f_{\text{Hüpf}} = 1,88 \text{ Hz}$ messbar. Aufgrund der impulsförmigen Anregung geben die Personen ebenfalls dynamische Lastanteile in den jeweils Vielfachen der Grundfrequenz ab, vgl. FFT im Bild 4.

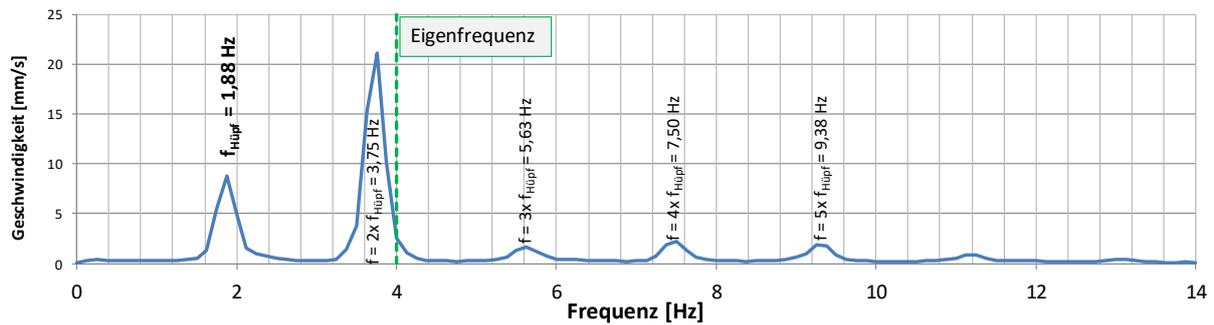


Bild 4: Schmalbandspektrum während der Hüpfphase mit der Grund-Anregungsfrequenz und deren Vielfachen

Ein weiterer Grund liegt darin, dass in den Phasen ohne Hüpfen die Konstruktion durch die vielen Personen eine mehr als doppelt so hohe Dämpfung aufweist. Die Konstruktion lässt sich somit durch Hüpfen einzelner Personengruppen fast nicht anregen. Die rechnerischen Analysen zeigen, dass der sprunghafte Anstieg der Schwingungen nur dadurch zu erklären ist, dass beim Hüpfen aller Personen die Konstruktion nur noch die Dämpfung ohne Personen von ca. 4,3 % aufweist. Hinzu kommt der sogenannte Lock-In-Effekt, der dazu führt, dass sich alle den Schwingungen anpassen müssen und die Synchronität noch weiter ansteigt.

Die Frequenzanalyse in Bild 4 zeigt auch, dass die größten spektralen Amplituden bei der doppelten dieser Hüpf Frequenz auftreten, also bei $2 \times 1,875 \text{ Hz} = 3,75 \text{ Hz}$. Die Ursache der großen Schwingungen ist somit ein Resonanzeffekt durch die Anregung in der doppelten Hüpf Frequenz. Dies lässt darauf schließen, dass die Beschleunigungen noch größer werden würden, wenn die Zuschauer mit einer geringfügig höheren Frequenz gehüpft und die Eigenfrequenz exakt getroffen hätten. Nichtsdestotrotz ist die gemessene Beschleunigung weit über der Panikgrenze, und die erfasste Situation beinhaltet ein sicherheitsrelevantes Risiko.

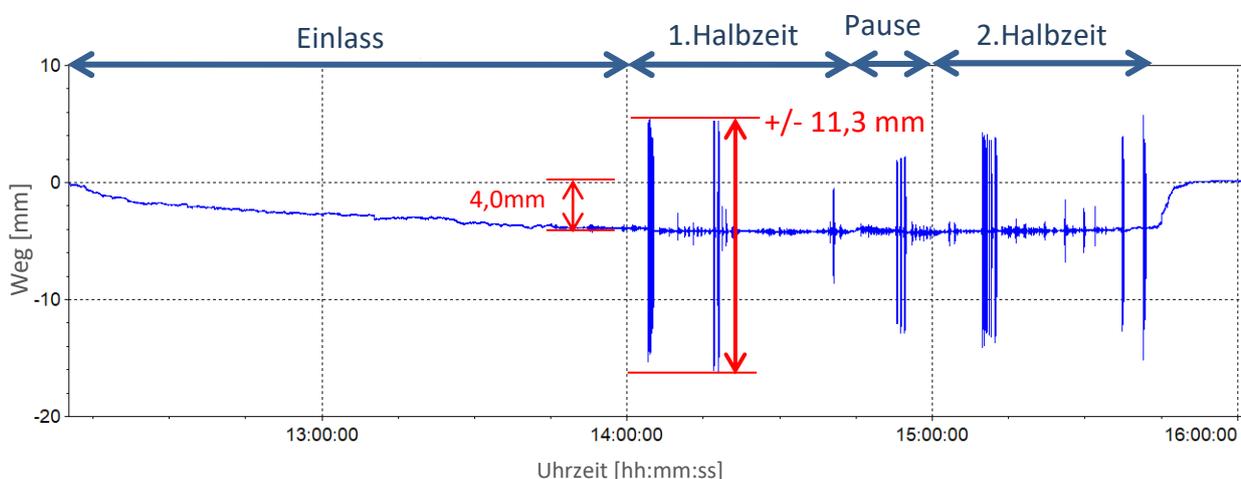


Bild 5: Zeitschrieb der Wegmessung über gesamten Messzeitraum

In Bild 5 ist die Wegmessung über den Zeitraum vor Einlass bis zum Spielende zu sehen. Gut zu erkennen ist zum einen die quasistatische Einsenkung infolge der Zuschauer mit einer maximalen Einsenkung von 4,0 mm sowie die dynamischen Bewegungen von etwa +/- 11,3 mm während den kritischen Hüpfvorgängen, die auch deutlich visuell wahrgenommen werden konnten.

3. Rechnerische Simulation

Zwecks Verifizierung der Messungen sowie zur Simulation und Bewertung schwingungsreduzierender Maßnahmen wurde ein räumliches Rechenmodell eines repräsentativen Tribünenabschnitts mittels der Finiten-Elemente-Methode generiert. Neben den Fertigteilstufenelementen, die als räumliches Faltnetz abgebildet werden, sind auch die Zahnbalken inklusive der „Zähne“ sowie die Stützen im Modell berücksichtigt. Aufgrund der Symmetrie zum nächsten Tribünenabschnitt werden die Zahnbalken nur mit halber Biegesteifigkeit angesetzt.

Mit diesem Modell lassen sich die maßgebenden Eigenfrequenzen und die zugehörigen Modalformen sehr gut abbilden. Es können die in Tabelle 1 bereits angegebenen Eigenfrequenzen bei unterschiedlichen Belastungssituationen exakt nachgerechnet werden.

An dieser Stelle sei aber darauf hingewiesen, dass eine Ersatzberechnung anhand der Tribünenstufe als Einfeldträger ohne Berücksichtigung der Weichheit des Zahnbalkens zu wesentlich höheren Eigenfrequenzen führen würde, die nicht der Realität entsprechen, vgl. Bild 6.

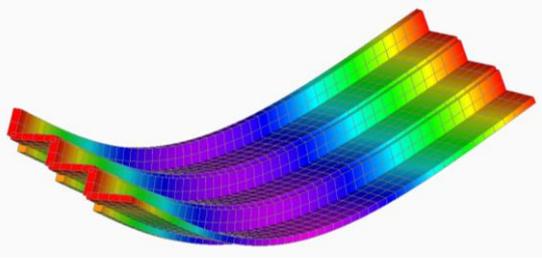
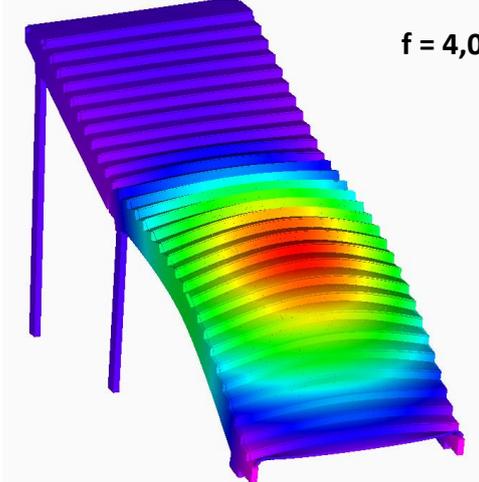
Tribünenstufe als Einfeldträger fest und gelenkig gelagert	Räumliches Gesamtmodell
<p style="text-align: right;">f = 6,4 Hz</p> 	<p style="text-align: right;">f = 4,0 Hz</p> 

Bild 6: Vergleich der berechneten Eigenfrequenzen einer Tribünenstufe, modelliert als Einfeldträger, und des räumlichen Gesamtmodells

Des Weiteren ist bei der Modellierung darauf zu achten, dass die Steifigkeit der Stahlbeton-Konstruktion im Zustand II (gerissen) berücksichtigt wird. Im vorliegenden Fall wurde für das Stufenelement eine Reduktion des E-Moduls um 50 % angesetzt, da dies auch anhand von Messungen an Einzelementen ermittelt werden kann. Beim Zahnbalen ist die Reduktion infolge Zustand II wesentlich kleiner (ca. 90 %).

Zur Berechnung der maximalen Schwingbeschleunigungen und Schwingwege wurden die Lastansätze für die hüpfenden Personen gemäß VDI 2038-1 [1] verwendet. Für die Grund-Anregungsfrequenz (= Hüpfrequenz) wurde ein Last-Koeffizient von $2,1 - 0,15 \times f_{\text{Hüpf}}$ und ein Synchronisationsfaktor von 0,7 [-] angesetzt, für den dynamischen Lastanteil in der doppelten Hüpfrequenz entsprechend ein Last-Koeffizient von $1,9 - 0,35 \times f_{\text{Hüpf}}$ und ein Synchronisationsfaktor von 0,5 [-].

Die berechneten Maximalwerte der Schwingamplituden sind in Bild 7 in Abhängigkeit der Hüpfrequenz dargestellt.

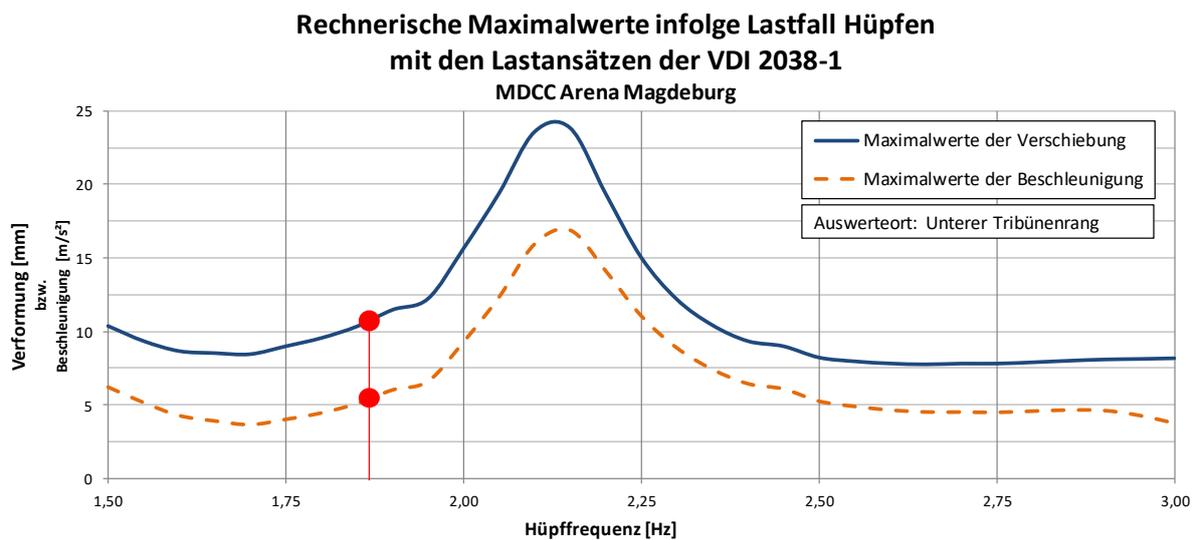


Bild 7: Berechnete Maximalwerte der Schwingamplituden im unteren Rang der Tribüne

Die prognostizierten Werte im Bereich der Hüpffrequenz von 1,88 Hz stimmen sehr gut mit dem tatsächlich gemessenen Maximalwert überein (10,9 mm im Vergleich zu 11,3 mm gemessen bzw. 5,5 m/s² im Vergleich zu 5,2 m/s²). Diese gute Übereinstimmung zeigt, dass die Ansätze der VDI 2038 geeignet sind, um den Maximalwert im Lastfall Hüpfen gut bestimmen zu können. Allerdings zeigt die Berechnung auch, dass bei einer höheren Hüpffrequenz die Schwingamplituden noch größer geworden wären.

Da bei Beschleunigungen, die größer als die Erdbeschleunigung von 9,81 m/s² sind, mit abhebenden Kräften in der Fertigteile-Konstruktion und weiteren Sekundäreffekten zu rechnen wäre, würde das Tragwerk versagen, bevor die berechneten Extremwerte im Hüpffrequenz-Bereich 2,0 Hz – 2,3 Hz gemäß Bild 7 tatsächlich eintreten würden.

4. Ertüchtigungsmaßnahme

Die beschriebenen Untersuchungen zeigten, dass die baulastdynamische Gebrauchstauglichkeit der Tribünenkonstruktion der MDCC Arena nicht gewährleistet war. Zum einen stellten die großen Beschleunigungswerte ein sicherheitsbedenkliches Szenario dar (Panik). Darüber hinaus konnte auch die Standsicherheit bei höheren Hüpf Frequenzen nicht mehr sichergestellt werden. Dementsprechend musste kurzfristig gehandelt werden. Auch wenn eine vollständige Sperrung der Arena im Gespräch war, haben sich die Stadt, die Fans und der FC Magdeburg für die Durchsetzung eines Hüpfverbotes als kurzfristige Maßnahme ausgesprochen, vgl. Bild 8. Bei Zuwiderhandlung wäre das Spiel abgebrochen worden.



Bild 8: Kurzfristige Lösung: Hüpfverbot; langfristig: Einbau zusätzlicher Zahn balken aus Stahl

Als langfristige Lösung kam natürlich nur eine Tragwerksertüchtigung in Frage. Gleichzeitig sollte dann die Tribüne von einer Sitzplatz- zu einer Stehplatztribüne umgebaut werden, um die Kapazität der Arena auf 30.000 Zuschauer zu erhöhen. Dafür war eine deutliche Steifigkeitserhöhung der Tribünenkonstruktion notwendig. Schlussendlich hat man sich dafür entschieden, zwischen jedem Bestands-Zahn balken einen Hohlkastenträger aus Stahl mit gevoutetem Querschnitt (Fischbauchträger) als Einfeldträger mit beidseitiger Auskrugung zu montieren, um die Stützweiten der Stufen zu halbieren. Die zusätzlichen Stützen wurden aus Stahlbeton ausgeführt. Für jede Stufe wurde auf dem Stahlträger eine eigene justierbare Unterstützungsvorrichtung montiert. Außerdem wurden die Spannweiten der vorhandenen Stahlbeton-Zahn balken verkürzt, indem das untere Auflager wandartig durch eine Betonscheibe nach innen verlängert wurde.

Für den Umbau der Sitz- zur Stehtribüne wurden die Sitze demontiert und auf den 80 cm tiefen Stufen leichte Zwischenstufen aus einer Blechkonstruktion eingebaut, um möglichst wenig zusätzliche Masse zu generieren.

Die Konstruktion wurde baulastdynamisch so ausgelegt, dass im Worst-Case-Szenario die Beschleunigung nicht größer als 3 m/s^2 sein sollte.

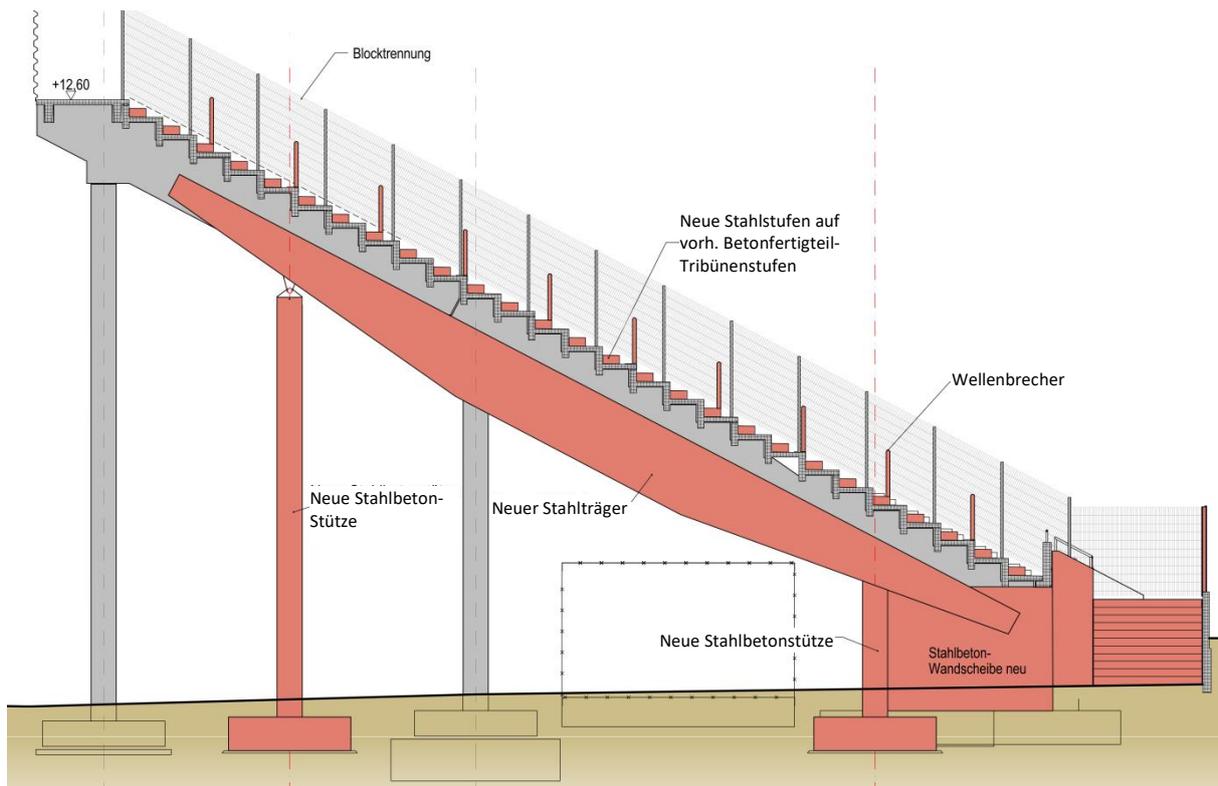


Bild 9: Ertüchtigte Nordtribüne der MDCC-Arena als Stehplatztribüne

5. Nachmessung

Eine Nachmessung wurde im Oktober 2019 während eines Fußballspiels des 1 FC Magdeburg gegen Hansa Rostock durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die 1. Eigenfrequenz auf 7,3 Hz (ohne Zuschauer) bzw. 6,7 Hz (mit Zuschauer) durch die Ertüchtigungsmaßnahme angehoben werden konnte. Während dem Spiel traten Schwingamplituden von +/- 1 mm bzw. Beschleunigungen bis $a = 1,6 \text{ m/s}^2$ auf. Auch hierbei zeigt eine rechnerische Nachauswertung, dass die Beschleunigungen bei höheren Hüpf Frequenzen noch hätten größer werden können. Aber selbst in der Worst-Case-Situation würden die Werte unterhalb des Zielwertes von $3,0 \text{ m/s}^2$ liegen, vgl. Bild 10.

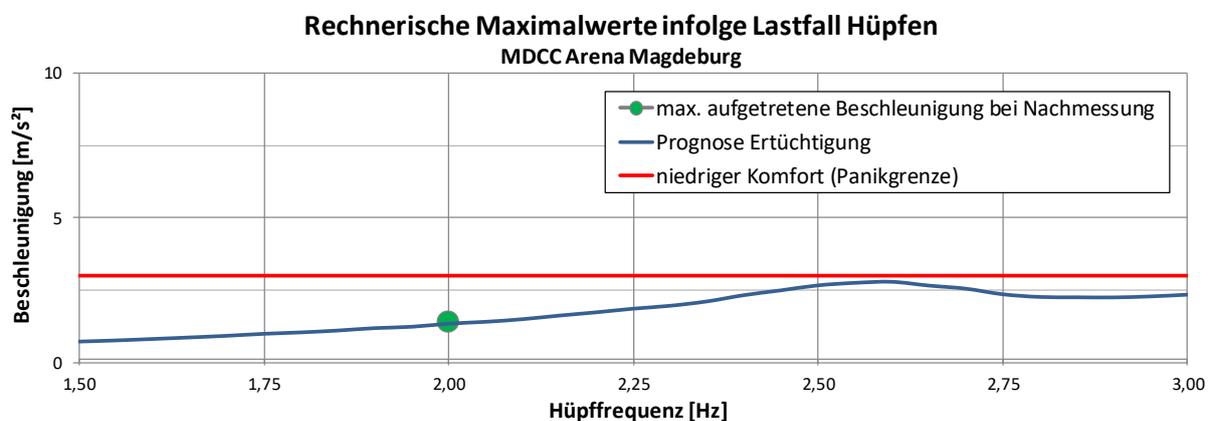


Bild 10: Berechnete Maximalwerte der Schwingamplituden im unteren Rang (analog zu Bild 7)

Fazit

Die Untersuchung zeigt, dass Schwingungen infolge Zuschauerhüpfen nicht unterschätzt werden dürfen, auch wenn der kritische Resonanzfall nicht immer eintreten muss oder erst nach Jahren eintritt - wie im vorliegenden Fall. Die Untersuchung zeigt auch, dass die Lastansätze der VDI2038 die dynamische Einwirkung einer großen hüpfenden Zuschauermenge ausreichend genau beschreibt. Allerdings ist es wichtig, das gesamte räumliche Tragwerksverhalten einer Tribünenkonstruktion zu berücksichtigen und die modale Dämpfung im Lastfall Zuschauerhüpfen nicht zu überschätzen, da sie weitestgehend der Dämpfung ohne Zuschauer entspricht. Eine Ersatzuntersuchung an einem einzelnen Stufenelement ohne Berücksichtigung der Weichheit des Zahnbalkens reicht nicht aus, da dieses Ersatzsystem wesentlich höhere Eigenfrequenzen im Vergleich zur Realität aufweist.

- [1] VDI2038 (06/2012): Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen.
Blatt1: Grundlagen – Methoden, Vorgehensweisen und Einwirkungen.
- [2] VDI2038 (01/2013): Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen.
Blatt 2: Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messungen, Beurteilung und Minderung.