

1. Einleitung/Ausgangslage

Die Druckerei Schläfli & Maurer AG in Uetendorf nahm zu Beginn des Jahres 2010 zwei neue Druckmaschinen vom deutschen Hersteller Heidelberger Druckmaschinen AG Typ Speedmaster XL 105 und Speedmaster XL145 in Betrieb. In der Tabelle 1 sind die relevanten technischen Daten der beiden Druckmaschinen aufgelistet.



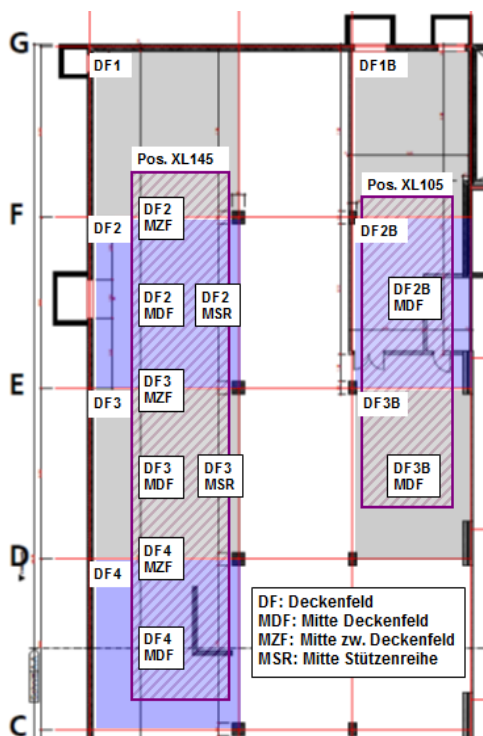
	Speedmaster XL 105	Speedmaster XL145
		
max. Bogenformat	750 mm x 1050 mm	1060 mm x 1450 mm
Druckleistung	18'000 Bogen/h	15'000 Bogen/h
Gewicht total	51 t	168 t
dyn. Kräfte, vertikal	max. 4 % der Gewichtskraft	max. 3 % der Gewichtskraft
Länge, Breite, Höhe	15.3 m, 3.9 m, 2.1 m	29.7 m, 5.8 m, 3.4 m

Tabelle 1: Technische Daten der beiden Druckmaschinen

In der unterkellerten, bestehenden Produktionshalle im Erdgeschoss mit der Fläche von ca. 48 m x 18 m befand sich ursprünglich eine Rotationsdruckmaschine. Die Abbildung 1 zeigt den Grundriss des Untergeschosses sowie die Position der beiden Druckmaschinen (schraffierte Fläche) im Erdgeschoss.



Aufgrund der hohen Gesamtmassen der beiden Druckmaschinen waren umfangreiche Massnahmen zur Verstärkung der Baustatik erforderlich. Es wurden Durchstanzbewehrungen bei den Stützen angebracht und CFK-Lamellen angeklebt. Im Weiteren gehören zu den Umbauarbeiten das Ausbetonieren (inkl. Armierung) von diversen Aussparungen in der Geschossdecke. Vom Hersteller der Druckmaschinen wurde eine hohe Anforderung an die maximal zulässige differentielle Setzung der Geschossdecke zwischen Unter- und Erdgeschoss gestellt.

Auch bezüglich des dynamischen Verhaltens der Geschossdecke wurden hohe Anforderungen gestellt, da die einzelnen Druckwerke und sonstigen Komponenten der Druckmaschinen nur zusammengeschraubt werden und nicht über einen gemeinsamen Stahlrahmen steif miteinander verbunden sind. Die Eigenfrequenzen von Geschossdecken mit den vorliegenden Spannweiten und Deckenstärke liegen typischerweise im Bereich von 10 - 30 Hz. Da die Anregungsfrequenzen der Druckmaschinen ebenfalls in diesem Bereich liegen (je nach Druckgeschwindigkeit 2 - 25 Hz inkl. Schwingungen höherer Ordnung, Herstellerangabe) können bei Übereinstimmung von Anregungsfrequenzen mit Eigenfrequenzen Resonanzen auftreten, die zu einer Verstärkung der Schwingungen auf den Druckmaschinen durch die Geschossdecke führen.

Abbildung 1: Grundriss des Untergeschosses

Dies kann die Druckqualität verschlechtern und wegen der mechanischen Abnutzung die Lebensdauer der Druckmaschinen verkürzen.

Die Gartenmann Engineering AG, 3000 Bern 25, wurde beauftragt, die bauwerksdynamischen Eigenschaften der Geschossdecke zwischen Unter- und Erdgeschoss zu untersuchen. Um zu überprüfen, wie stark die Geschossdecke von den Druckmaschinen in Schwingung versetzt wird, führten wir am 21. Oktober 2009 bauwerksdynamische Messungen durch und erstellten anschliessend eine Prognose für die Schwingungsamplitude für die jeweiligen belasteten Deckenfelder. Die resultierenden Schwingungsamplituden sollen danach beurteilt werden. Eigentliche Richtwerte im Sinne von maximal für die Druckmaschinen zulässige Schwingungsamplituden wurden nicht vorgegeben.

2. Bauwerksdynamische Messungen

Um die Eigenfrequenzen der Geschossdecke zwischen Unter- und Erdgeschoss zu messen, wurde die Geschossdecke punktuell mit einem elektrodynamischen Erreger (auch Shaker genannt) in Schwingung versetzt. Es wurde der APS 400 von APS Dynamics Inc. eingesetzt (siehe Tabelle 2). Insgesamt vier seitlich angebrachte, vertikal bewegliche Gewichtsplatten werden mit Gummibändern in der Mitte des Erregers gehalten. Ein externer Leistungsverstärker versorgt eine elektrische Spule im Innern des Erregers mit einem Wechselstrom, so dass ein Magnetfeld aufgebaut wird. Dieses versetzt die Gewichtsplatten in Bewegung. Als Eingangssignal für den Verstärker wurde eine Sinusfunktion verwendet, deren Frequenz innerhalb von einigen Minuten von 1 Hz auf 50 Hz kontinuierlich hochgefahren wurde.

elektrodynamischer Erreger APS 400	
Gesamtmasse	73 kg
bewegte Masse	31 kg
Frequenzbereich	0.2 – 200 Hz
maximale Kraft	445 N (zw. 1.5 und 10 Hz)
max. Beschleunigung	14.5 m/s ²




Tabelle 2: Technische Daten APS 400

Mit einem Beschleunigungsaufnehmer vom Typ Syscom MS2002+ wurde die Stärke der Anregung und mit einem Geschwindigkeitsaufnehmer vom Typ Syscom MS2003+ gleichzeitig am selben Ort die Reaktion der Geschossdecke auf diese Anregung gemessen. Die Messpositionen sowie die ungefähren zukünftigen Standorte der Druckmaschinen sind im Grundrissplan des Untergeschosses in Abbildung 1 eingezeichnet. Die Messungen wurden zwar im Erdgeschoss, dort wo sich die Druckmaschinen befinden, durchgeführt; für das dynamische Verhalten der Decke zwischen Unter- und Erdgeschoss ist jedoch die statische Konstruktion des Untergeschosses massgebend (die zweite Stützenreihe ist im Erdgeschoss nicht durchgängig).

Der grosse Vorteil beim Bestimmen der Eigenfrequenz mit Hilfe eines elektrodynamischen Erregers im Vergleich zu einer impulsförmigen Anregung besteht darin, dass die Masse der bewegten Gewichte, sowie die Beschleunigung der Anregung bekannt ist. Daraus kann die ins Bauwerk eingeleitete Kraft berechnet werden. Da gleichzeitig auch die Reaktion der Geschossdecke auf diese eingeleitete Kraft gemessen wird, kann die dynamische Steifigkeit bestimmt werden. Folglich ist nicht nur die Eigenfrequenz einer Geschossdecke bekannt, sondern auch die bei einer bekannten Anregungskraft einer Maschine resultierende Schwingungsamplitude. Zudem kann durch die schmalbandige Anregung eine höhere spektrale Energiedichte und somit eine höhere Messgenauigkeit erreicht werden (höheres Signal-to-Noise-Ratio).

3. Auswertung und Prognose der Schwingungsamplitude (Prognose A)

Die Abbildung 2 und die Abbildung 3 zeigen die an verschiedenen Positionen auf den Deckenfeldern gemessenen und korrigierten Resonanzkurven für die beiden Druckmaschinen. Die gemessenen Eigenfrequenzen wurden bezüglich der zusätzlichen Masse durch die Druckmaschinenkomponenten auf dem jeweiligen Deckenfeld und durch das Ausbetonieren der Aussparungen korrigiert (zum Zeitpunkt der Messungen waren die Aussparungen noch nicht zubetoniert). Diese Korrekturfaktoren lagen je nach Position zwischen 0.68 und 0.92. Die CFK-Lamellen waren ebenfalls zum Zeitpunkt der Messung noch nicht angebracht. Diese verändern aber die Steifigkeit und somit die Eigenfrequenzen der Geschossdecke nur unwesentlich (Die Festigkeit der Decke hingegen wird durch die CFK-Lamellen erhöht). Daher wurden keine Korrekturen bezüglich dieser Lamellen vorgenommen.

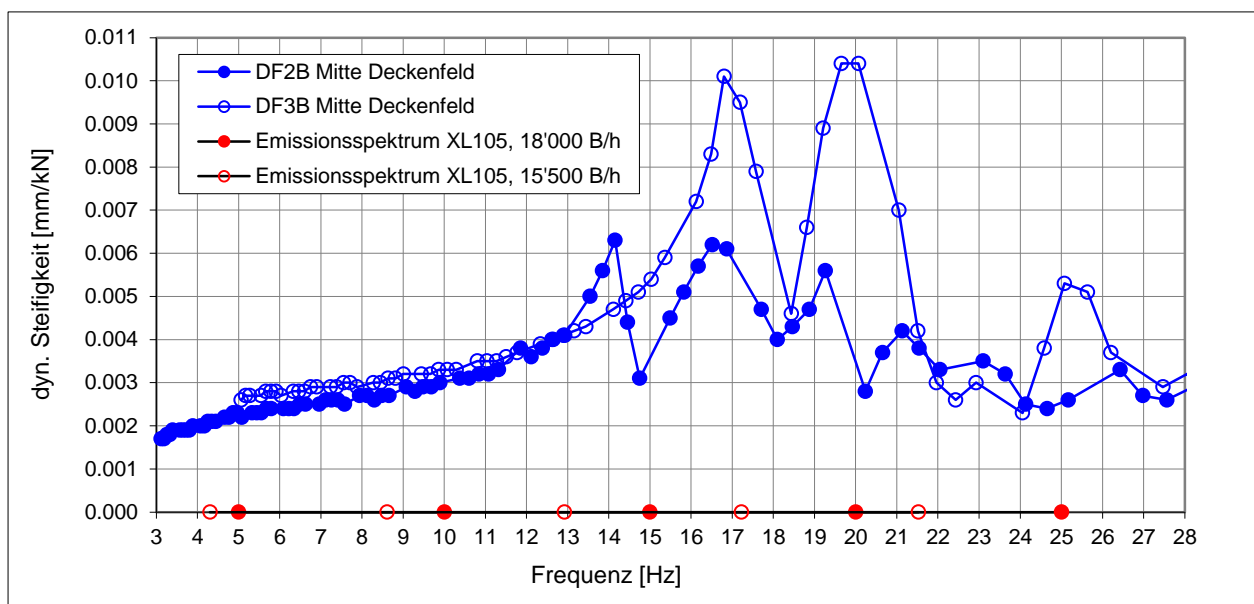


Abbildung 2: Gemessene Resonanzkurven der Geschossdecke für den Standort der Druckmaschine XL105

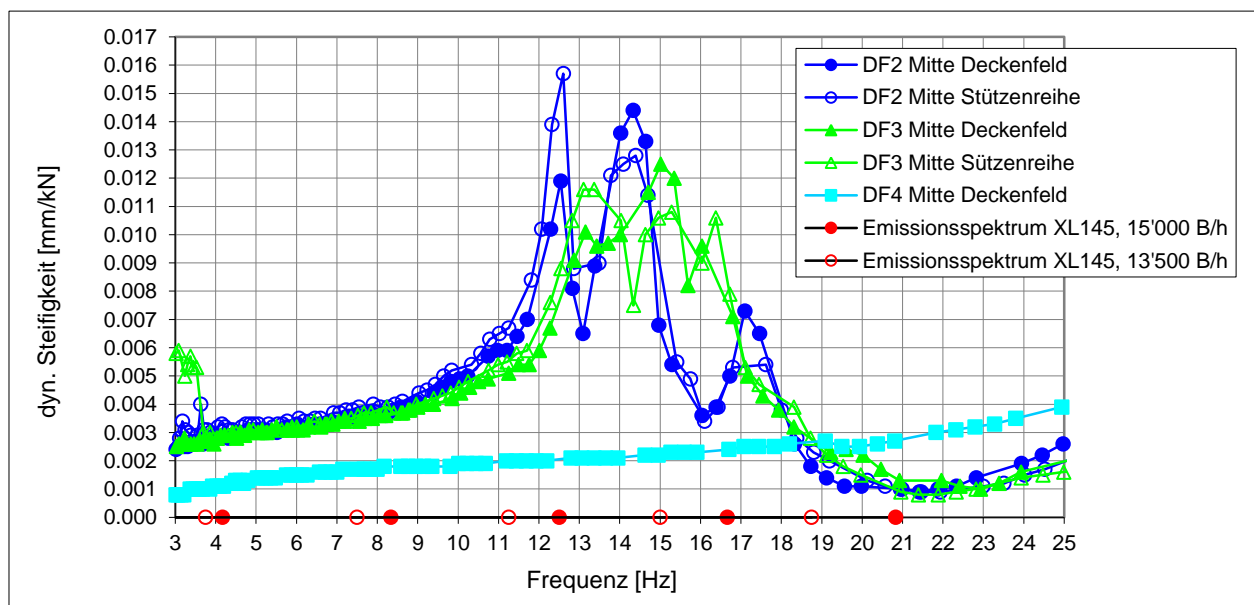


Abbildung 3: Gemessene Resonanzkurven der Geschossdecke für den Standort der Druckmaschine XL145

In den grafischen Darstellungen sind zusätzlich die Emissionsspektren der beiden Druckmaschinen (Herstellerangabe) für jeweils zwei verschiedene Druckgeschwindigkeiten/-leistungen (maximale und übliche Druckgeschwindigkeit in Bogen pro Stunde) eingezeichnet. So werden die Übereinstimmungen zwischen den Anregungsfrequenzen der Druckmaschinen und den Eigenfrequenzen der Geschossdecke grafisch ersichtlich. Bei einigen Positionen stimmen tatsächlich mindestens eine Anregungsfrequenz mit einer Eigenfrequenz überein. Es zeigt sich, dass selbst mit einer reduzierten Druckgeschwindigkeit immer noch Anregungsfrequenzen mit Eigenfrequenzen der Geschossdecke übereinstimmen.

Beim Vergleich der verschiedenen Resonanzkurven fällt auf, dass beim Deckenfeld DF4 im Gegensatz zu den übrigen Resonanzkurven keine Eigenfrequenzen unterhalb von 25 Hz auftreten. Das Deckenfeld DF2B weist zwar Eigenfrequenzen unterhalb von 25 Hz auf, diese sind jedoch weniger ausgeprägt. In beiden Fällen befinden sich Wände unterhalb der Deckenfelder (siehe Abbildung 1), die selbst wenn sie keine tragende Funktion übernehmen - das Schwingungsverhalten der Geschossdecke wesentlich beeinflussen.

Mit der Kenntnis der Emissionsspektren der Druckmaschinen und den dynamisch bei den verschiedenen Anregungsfrequenzen wirkenden Kräften (vgl. Tabelle 1) konnte mit Hilfe der dynamischen Steifigkeit die resultierenden Schwingungsamplituden in vertikaler Richtung berechnet werden (Prognose A). In der Abbildung 4 werden die resultierenden Schwingungsamplituden für jeweils zwei Druckgeschwindigkeiten grafisch gegenübergestellt.

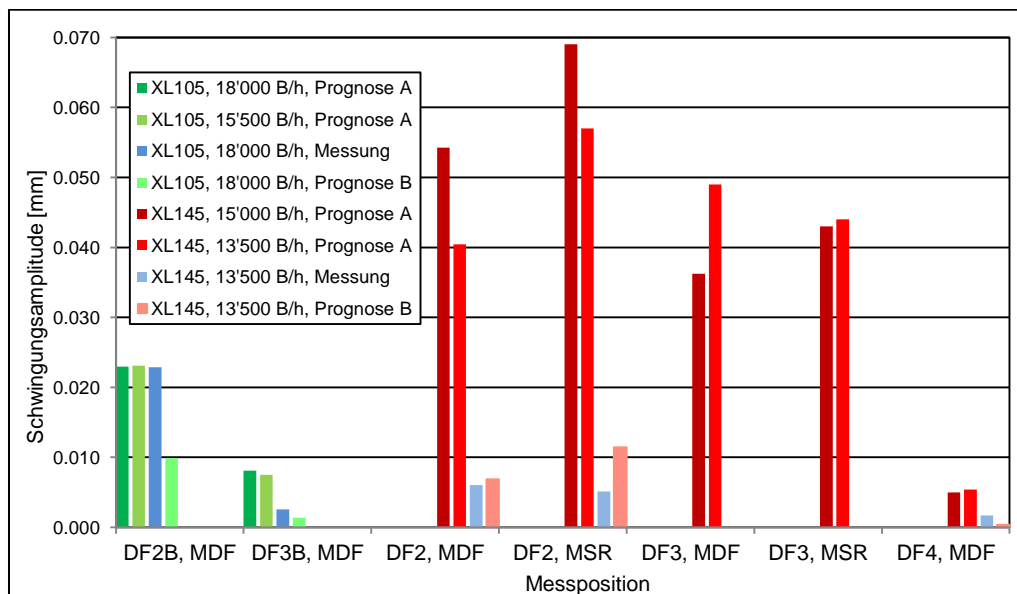


Abbildung 4: Resultierende Schwingungsamplituden (Prognose A: mit Emissionsspektrum gemäss Hersteller, Prognose B: mit gemessenem Emissionsspektrum)

Die verschiedenen Frequenzanteile der zu berechnenden Schwingungsamplitude wurden energetisch (RMS) und nicht arithmetisch addiert, da die Phasen der Unwuchten der einzelnen Walzen zufällig verteilt sein dürften. Die hier ausgewiesenen Schwingungsamplituden treten punktuell an den gemessenen Positionen auf und verstehen sich als Auslenkung der Schwingung aus ihrer Ruhelage bis zur maximalen Auslenkung (0 bis Peak).

Die gemäss Prognose A resultierenden Schwingungsamplituden liegen für die Druckmaschine XL105 unabhängig von der Druckgeschwindigkeit bei 0.023 mm für das Deckenfeld DF2B und bei 0.008 mm für das Deckenfeld DF3B. Bei der grossen Druckmaschine XL145 wurden je nach Position Schwingungsamplituden zwischen 0.005 mm und 0.07 mm prognostiziert. Der Vergleich zwischen der berechneten Schwingungsamplitude beim Deckenfeld DF4 und den übrigen Positionen für die Druckma-

schine XL145 zeigt, dass Resonanzen die Schwingungsamplitude erwartungsgemäss stark beeinflussen.

Diese prognostizierten Schwingungen (Prognose A) stufte der Hersteller der Druckmaschinen als unbedenklich ein. Es seien keine Reduktion der Druckqualität und keine Verkürzung der Lebensdauer der Druckmaschinen in Folge von mechanischen Abnützungen oder dergleichen zu erwarten. Bauliche Massnahmen waren somit nicht erforderlich. Nach der Inbetriebnahme und Justierung der Druckmaschinen liefen die Druckmaschinen einwandfrei und die Druckqualität erfüllt die Erwartungen.

4. Kontrollmessung und überarbeitete Prognose (Prognose B)

Im Sinne einer Qualitätskontrolle unserer Beratung führten wir im Frühjahr 2011 Kontrollmessungen im laufenden Betrieb durch. Wiederum mit Hilfe des Messsystems Syscom MR2002 und einem triaxialen Geschwindigkeitsaufnehmer MS2003+ wurden an einigen zugänglichen Stellen die Schwinggeschwindigkeit auf der Geschossdecke gemessen. Die Abbildung 5 stellt für die Messposition DF2 das gesamte Frequenzspektrum der gemessenen Schwinggeschwindigkeit sowie eine Vergrößerung des Bereichs von 0 bis 25 Hz dar. Zum Vergleich ist auch das vom Hersteller angegebene theoretische Emissionsspektrum für die Druckgeschwindigkeit der Prognose A und die während der Kontrollmessung eingestellten Druckgeschwindigkeit eingezeichnet.

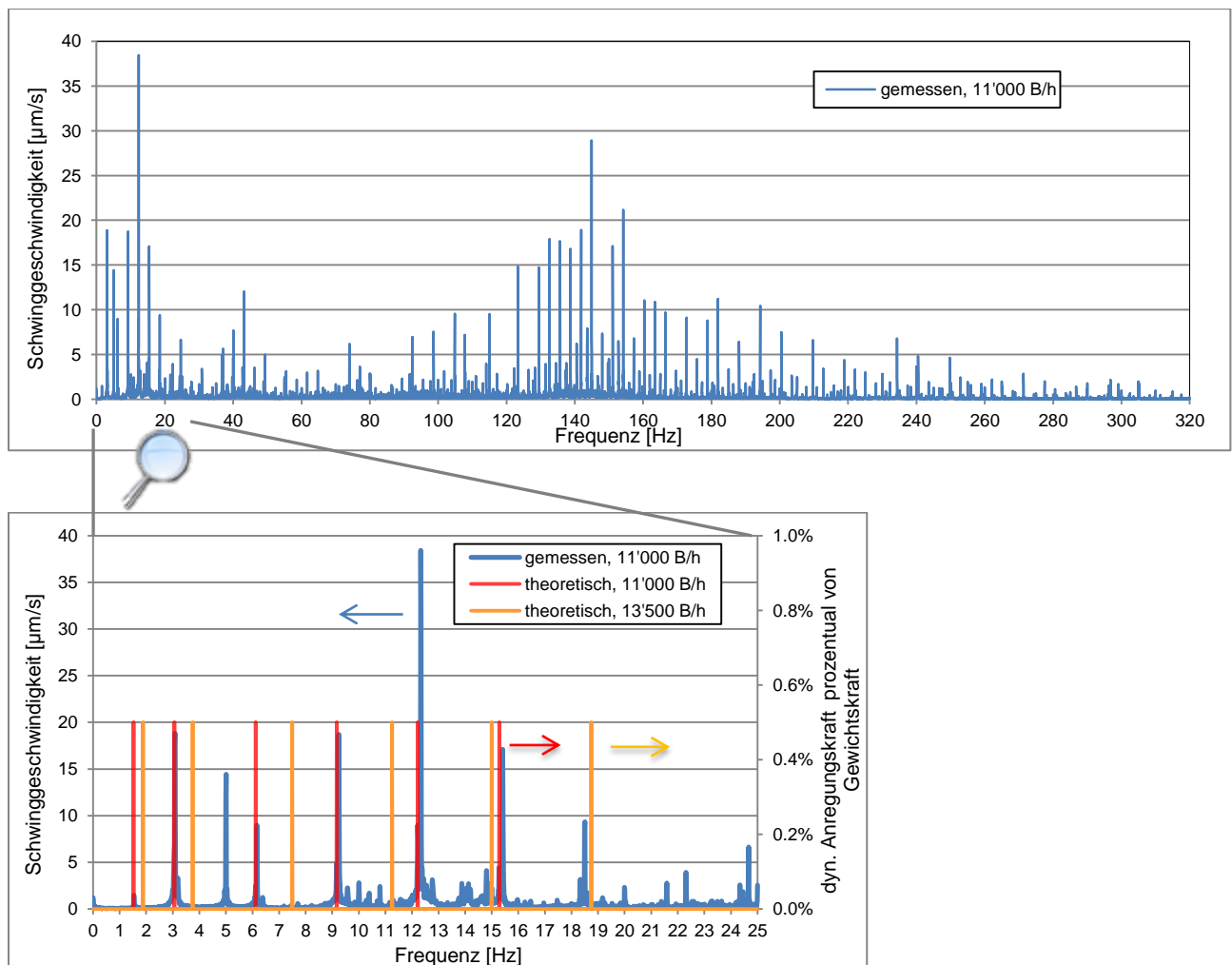


Abbildung 5: Gemessenes und theoretisches Frequenzspektrum der Anregung der Druckmaschine XL145 in der Mitte des Deckenfeldes DF2

Die Kontrollmessung zeigte, dass bei der Druckmaschine XL145 bei allen Position das Emissionsspektrum eine Vielzahl von diskreten Frequenzen auch oberhalb von 25 Hz aufweist (siehe Abbildung 5, oben). Somit wirkt ein relativ hoher Anteil der dynamischen Kräfte bei höheren Frequenzen ausserhalb der Resonanzen der Geschossdecke und folglich wird die Geschossdecke weniger angeregt. Bei der kleineren Druckmaschine XL105 wurde an der Position DF3B ein vergleichbares Frequenzspektrum festgestellt. An der Position DF2B wurde hingegen eine deutlich dominierende Schwingung mit einer Frequenz von 5 Hz gemessen, was der Erwartung und der Annahme für die Prognose A entspricht. Im tiefen Frequenzbereich von 0 bis 25 Hz hingegen stimmt das theoretische Emissionsspektrum sehr gut mit der Messung überein.

Um aus den gemessenen Schwingungsgeschwindigkeiten die Schwingungsamplitude zu erhalten, wurden die Messsignale nach einer vorgängigen Hochpassfilterung mit einer Eckfrequenz von 1 Hz integriert. So konnte die prognostizierte mit der gemessenen Schwingungsamplitude verglichen werden. Die Datenreihe "Messung" in der Grafik der Abbildung 4 zeigt diese gemessenen Schwingungsamplituden. Beim Deckenfeld DF2B stimmt die Prognose A mit der tatsächlich auftretende Schwingungsamplitude überein. Dort entspricht auch das gemessene Emissionsspektrum dem für die Prognose A angenommene Emissionsspektrum. Bei den übrigen Positionen trat keine Überschreitung der prognostizierten Schwingungsamplituden auf (Prognose auf der sicheren Seite). Die Schwingungsamplituden wurden jedoch aufgrund der teilweise deutlich überschätzt.

Um zu überprüfen, ob die Kenntnis des deutlich breiteren Emissionsspektrums zu einer genaueren Prognose geführt hätte, wurde eine einfache rechnerische Korrektur vorgenommen (Prognose B). Es wurde ein Korrekturfaktor als Verhältnis von der Summe über den Frequenzbereich von 0 bis 25 Hz zur Summe über den gesamten Frequenzbereich von 0 bis 320 Hz gebildet. Die Korrekturfaktoren lagen je nach Position zwischen 0.07 und 0.43. Mit Hilfe der Korrekturfaktoren wurden die dynamischen Anregungskräfte reduziert. Die daraus als Prognose B bezeichneten Resultate können der Abbildung 4 entnommen werden. Die so prognostizierten Schwingungsamplituden stimmen wesentlich besser mit den gemessenen Schwingungsamplituden überein.

5. Fazit

Aufgrund der bauwerksdynamischen Schwingungsmessungen mit Hilfe eines elektrodynamischen Erregers kamen wir zum Schluss, dass die Geschossdecke bei der Druckmaschine Speedmaster XL145 bei maximaler Druckleistung an der ungünstigsten Position mit einer Schwingungsamplitude von 0.07 mm und bei der Druckmaschine Speedmaster XL105 mit einer Schwingungsamplitude von 0.02 mm schwingen wird. Die anlässlich der Kontrollmessungen festgestellten Schwingungsamplituden waren bis auf eine Messposition geringer als erwartet. Dies lag am Emissionsspektrum, welches insbesondere bei der Druckmaschine XL145 deutlich mehr Oberschwingungen aufweist (bis ca. 250 Hz) als zum Zeitpunkt der Prognose A angenommen. Bei der Druckmaschine XL105 und dem Deckenfeld DF2B entsprach das angenommene Emissionsspektrum dem gemessenen Emissionsspektrum und daher stimmte die prognostizierte Schwingungsamplitude mit der gemessenen Schwingungsamplitude sehr gut überein.

Es zeigte sich, dass keine baulichen Massnahmen notwendig sind. Seit der Inbetriebnahme laufen die Druckmaschinen einwandfrei und die Druckqualität erfüllt die Erwartungen.

Der Einsatz des elektrodynamischen Erregers ermöglichte die Messung und Charakterisierung des Schwingungsverhaltens der Geschossdecke. Die genaue Kenntnis des Emissionsspektrums ist jedoch ebenso erforderlich und wenn immer möglich sollten zusätzlich zu den dynamischen Messungen am Bauwerk auch Schwingungsmessungen an einer möglichst baugleichen Maschine auf einem starren Fundament erfolgen, um das Emissionsspektrum exakt zu ermitteln.