

Bestimmung baudynamischer Kennziffern mit Hilfe eines dynamischen Erregers

Pascal Fleischer
TROMBIK Ingenieure AG, Zürich

1. EINLEITUNG

Bei der Bearbeitung dynamischer Problemstellungen wird oft auf einen baudynamischen Erreger zurückgegriffen. Ein solcher ‚Shaker‘ wird verwendet, um dynamische Antworten aller Art von Strukturen zu studieren. Seine Anwendungsgebiete in der Bauwerksdynamik betreffen insbesondere Decken, Brücken, Türme aber auch Leitungssysteme und dienen der Ermittlung folgender Grössen:

- Bestimmung der Eigenfrequenzen, -formen, Systemdämpfung
- Ermittlung von Grundlagen für die Berechnung von dynamischen Beanspruchungen
- Ermittlung von Transferfunktionen (Erschütterungsausbreitung)
- Bestimmung der Schwingungsempfindlichkeit von Maschinen und Geräten
- Anregung und Überprüfung von Einzelbauteilen im Labor oder vor Ort
- Erdbebensimulation für Komponenten
- Kalibrierung und Überprüfung von Messsensoren

‚Kleine‘ dynamische Erreger lassen sich in der Praxis flexibel und zuverlässig einsetzen. Nachfolgend wird der Einsatz des Shakers anhand von durchgeführten Untersuchungen vorgestellt.

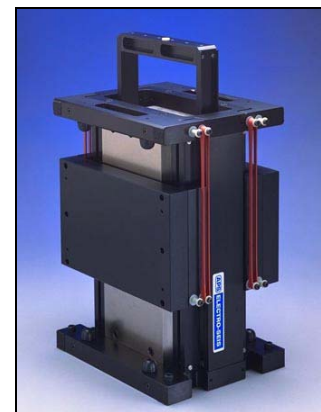
2. GERÄTEKONFIGURATION

Messungen mit einem Shaker werden auch als FVT (Forced Vibration Testing) bezeichnet: Das Tragwerk wird mit einer kontrollierten Kraft angeregt und die Bauwerksreaktion gemessen (erzwungene Schwingungen), dadurch können die Resonanzkurven in den Hauptrichtungen „abgefahren“ werden.

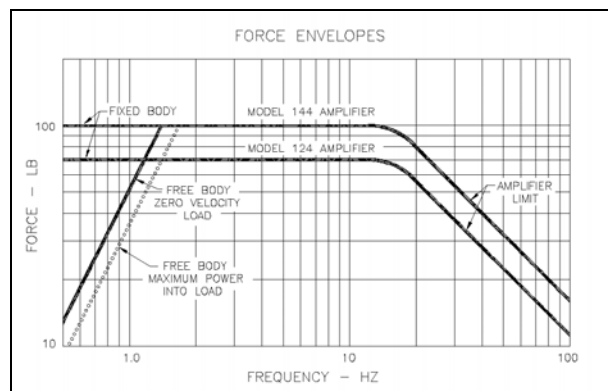
Der verwendete elektrodynamische Erreger kann allein oder in Kombination für die Anregung verschiedenster Strukturen verwendet werden. Über Steuerung des Magnetfeldes kann die Masse bewegt werden und infolge der Trägheitskraft wird die Kraft auf die Struktur übertragen.

Long Stroke Shaker (APS)

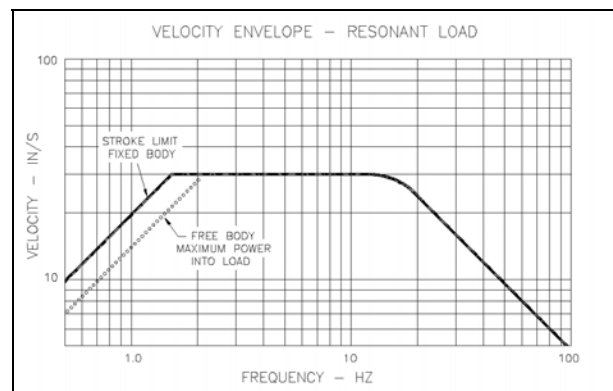
Maximale Kraft 445 N
 Maximale Geschwindigkeit 750 mm/s
 Maximale Auslenkung (Stroke, p-p) 158 mm
 Gesamtgewicht 73 kg
 Abmessungen l x b x h 526 x 314 x 178 mm



Gewichts- platten	Bewegte Masse:	Kleinste Anregungsfrequenz
2	17.9 kg	2.8 Hz
4	30.6 kg	2.2 Hz



Anwendungsbereich: Kraftbegrenzung



Anwendungsbereich: Geschw.begrenzung

Mit einem Frequenzgenerator und einem Leistungsverstärker (verwendeter Verstärker: Dual-Mode Power Amplifiers der Firma APS) werden die Schwingungen, normalerweise im Frequenzbereich bis 50 Hz, erzeugt.

MR2002 (Syscom Instrumens AG), View2002 (Ziegler Consultants)

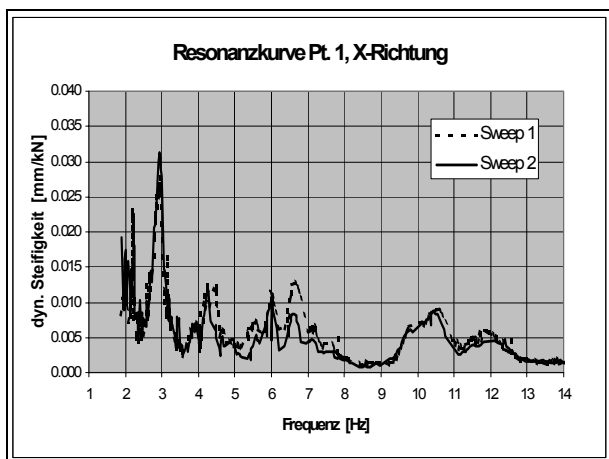
An das zentrale Erfassungsgerät (Recorder) werden über die Verteilbox drei Einzelsensoren angeschlossen. Dem Messkanal 1 wird ein uniaxialer Beschleunigungssensor zugewiesen, welcher mit dem dynamischen Erreger verbunden wird; die Befestigung eines Beschleunigungssensors an die bewegte Masse dient der Bestimmung der dynamischen Kraft. Für die Bestimmung der Resonanzkurve wurden an den Kanälen 2 und 3 uniaxialen Geschwindigkeitssensoren angeschlossen. Diese Kanalbelegung bedingt eine manuelle Umstellung der Recorder-Grundeinstellungen.

Die Auswertungen der Messresultate bzw. die Berechnungen der Resonanzkurven erfolgen direkt über die Software View2002 und werden für die Weiterverarbeitung mit gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen exportiert.

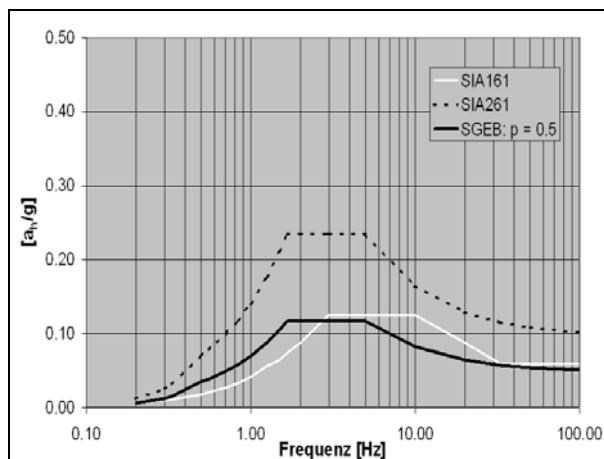
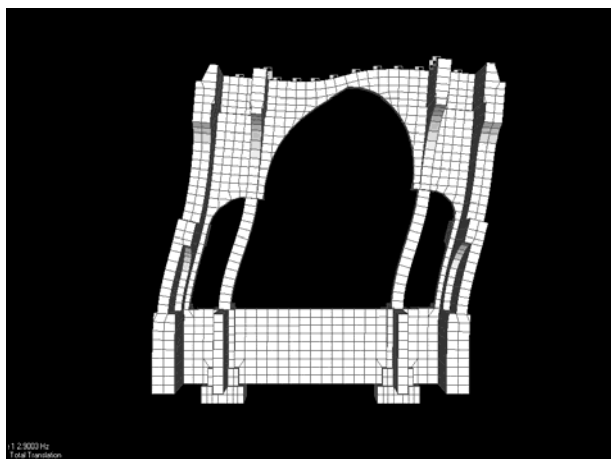
3. Pfarrkirche St. Laurentius, Schaan

Shakermessungen: -> Bestimmung der Eigenfrequenzen

Erste Betrachtungen der Erdbebensicherheit zeigten, dass das Natursteinmauerwerk übermässig beansprucht wird. Die statischen, linearen Berechnungen (Ersatzkraftverfahren) führten zu unzulässig hohen Zugspannungen im Bereich der Öffnungen. Über detaillierte dynamische Untersuchungen für das am meisten gefährdete Bauteil, dem Hauptschiff in Querrichtung, wurde das Mauerwerksverhalten unter Erdbebeneinwirkung genauer studiert: Dreidimensionale Modellierung, nichtlineares Materialverhalten und Zeitverlaufsberechnungen. Dazu war eine Modellkalibrierung über Eigenfrequenzmessungen vor Ort unabdingbar: Die ersten Eigenfrequenzen bestimmen die Erdbebenbeanspruchung massgebend!. Mit Hilfe des Modells wurde das Materialverhalten und die Wirksamkeit allfälliger Erdbebenertüchtigungsmassnahmen genauer studiert und beurteilt.



Die Auswertungen der Messungen am Bauwerk führten auf die erste massgebende Eigenfrequenz von $f_1 = 2,9$ Hz. Die partizipierende Masse dieser Eigenschwingung ist um ein vielfaches grösser als bei den weiteren höheren Eigenformen. Trotzdem mussten diese weiter betrachtet werden: Sie können bei ungenügender Dämpfung stark ange regt werden und das Bauteil selbst, resp. an das Bauteil gekoppelte Elemente gefährden. Die ersten Stützeigenschwingungen beginnen um 25 Hz, die Eigenschwingungen des Trägerrostes in der Dachebene um 9 Hz (Träger in Kirchenquerrichtung), resp. um 16 Hz (Träger in Kirchenlängsrichtung).



4. Feuerwehrgebäude Lenzburg

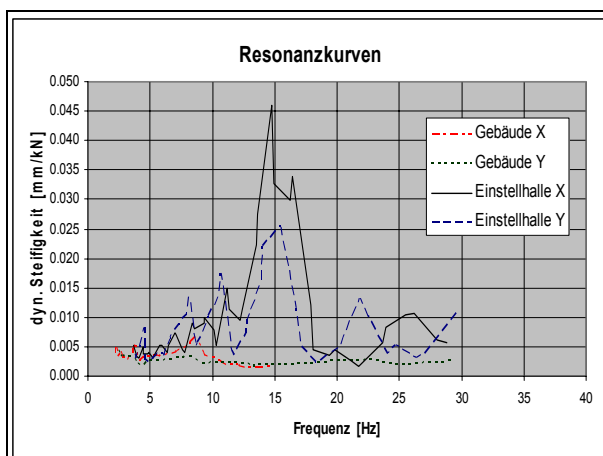
Shakermessungen: -> Bestimmung der Eigenfrequenzen

Das Stadtbauamt Lenzburg entschied sich, das Feuerwehrgebäude bezüglich Erdbbensicherheit gemäss dem BWG-Verfahren (Bundesamts für Wasser und Geologie, neu: Bundesamt für Umwelt - BAFU) überprüfen zu lassen. Das BWG-Verfahren unterscheidet bei der Überprüfung eines Gebäudes und der Ausarbeitung der Ertüchtigungsmassnahmen drei Schritte / Stufe:

- Stufe 1 – Schnellüberprüfung Risikozahlen und Checkliste
- Stufe 2 – Überprüfung mit Fragelisten und einfachen Berechnungen
- Stufe 3 – Beurteilung mit detaillierten Berechnungen

Da die berechnete Risikokennzahl RZPS mit 1'600 über dem Schwellenwert (Grenzwerte im Bundesinventar) lag, aber auch basierend auf der Einteilung des Feuerwehrgebäudes in die BWK III, sieht das BWG-Verfahren eine Sanierungsdringlichkeit 1. Priorität vor und alle 3 Stufen mussten durchlaufen werden.

Die Bearbeitung der BWG-Stufe 3 sieht eine vollständige Gebäudeanalyse vor. Dazu wurden Schwingungsmessungen mit dem Ziel der Bestimmung der massgebenden dynamischen Eigenschaften des Gebäudes durchgeführt, insbesondere der Ermittlung massgebender Eigenfrequenzen und lokaler Amplifikationen. Anhand eines an den Messresultaten kalibrierten, dreidimensionalen FE-Modell-Modells wurde das Verhalten der Gebäudeteile genauer untersucht. Die Überprüfung der Lastabtragung global und lokal erfolgte anhand des Verfahrens statischer Ersatzkräfte.



Die Überprüfungen führten zu zwei Gefährdungsbildern inf. Versagen der Tragstruktur:

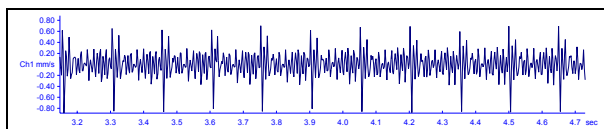
Gefährdete Bauteile, Einsturzursache	Erfüllungsfaktor α_{eff}
Diafragmawirkung Decke, Einstellhalle	0.73
Befestigung Brüstungen, Feuerwehrgebäude (*)	0.31

(*) Die Messungen an den Brüstungselementen zeigten eine starke dynamische Amplifikation. Die Eigenfrequenzen der vorgefertigten Elemente liegen unterhalb 10 Hz und wiesen DMF-Werte (DMF: Dynamic Macnification Factor) von bis 6.0 auf.

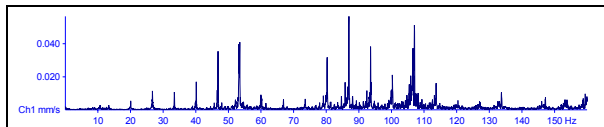
5. Gebr. Böhler & Co. AG, Wallisellen

Shakermessungen: -> Bestimmung der dynamischen Tragstruktureigenschaften an Maschinen-Aufstellungsorten

Im Rahmen des Umbaus „Böhler Stahl AG“ wurde infolge der geplanten Verlegung verschiedener Stahlbearbeitungsmaschinen vom Obergeschoss in das Erdgeschoss die Erschütterungssituation an den Maschinen-Aufstellungsorten genauer untersucht; der für die Stahlbearbeitungsmaschinen vorgesehene Gebäudebereich sollte auf seine erschütterungsmässige Eignung voruntersucht werden. Zu diesem Zweck wurden Vibrationsmessungen mit dem Ziel der Bestimmung der Betriebsamplituden und –frequenzen der Maschinen einerseits und dem Bestimmen der dynamischen Tragstruktureigenschaften am heutigen sowie dem geplanten Aufstellungsort andererseits angeordnet.

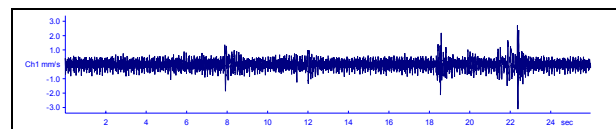


Zeitverlauf (v_{peak} = 1 mm/s)

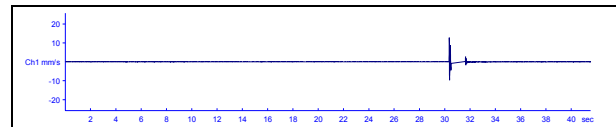


Frequenzspektrum

Maschinenbetrieb (typisches Beispiel)



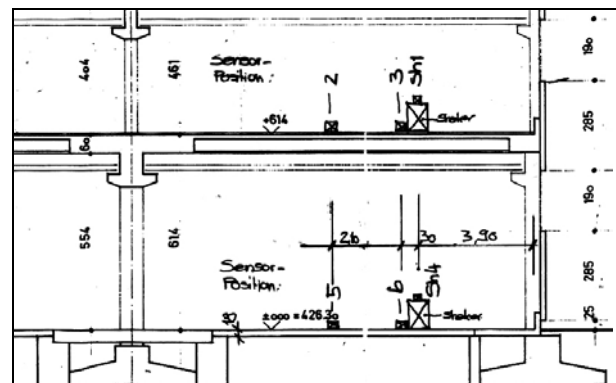
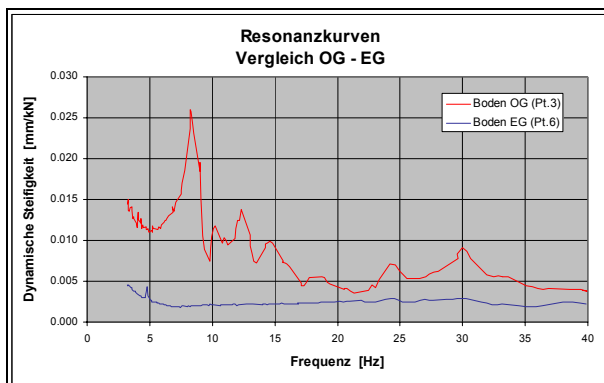
„Vorbeifahrt Stapler“ (v_{peak} = 3 mm/s)



„Stahlblock wenden“ (v_{peak} = 13 mm/s)

Betriebliche Arbeitsprozesse

Die Auswertung der Shakerversuche zeigten für den Boden OG deutlich die Eigenschwingungen der weitgespannten Decke: Die erste massgebende Biegeschwingung der Decke liegt bei 8.3 Hz, weitere konnten bis 30 Hz festgestellt werden. Beim Boden EG sind keine solchen Resonanzzustände feststellbar.

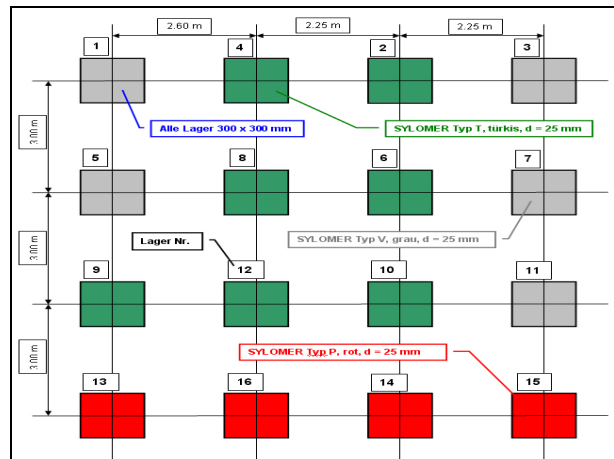
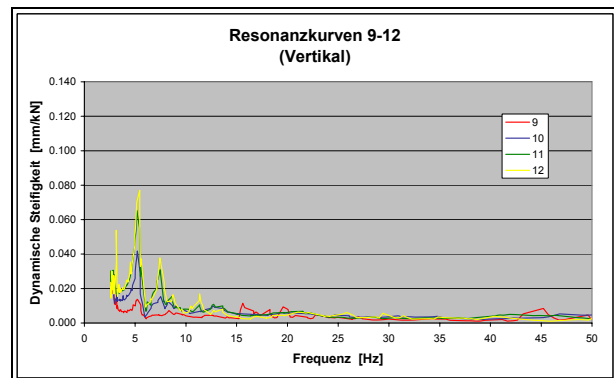
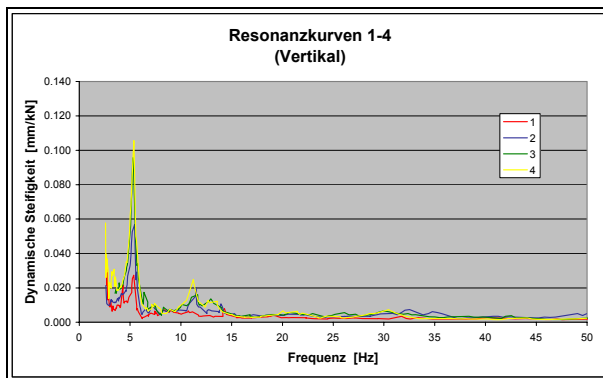


Auch ohne schwingungsisolierende Massnahmen führt der Betrieb der Stahlbearbeitungsmaschinen auf dem „Boden EG“ zu einer deutlichen Verbesserung der Erschütterungssituation. Erschütterungsimmissionen treten jedoch auch auf dem „Boden EG“ auf. Schwingungsempfindliche Maschinen können daher weiterhin in ihrer Funktionstüchtigkeit beeinflusst werden. Diese Aussage gilt für die nicht untersuchten Erschütterungsaspekte „Schäden am Bauwerk“ und „Belästigung des Menschen“ sinngemäss. Eine elastische Bodenlagerung der Maschinen kann basierend auf den Messungen ausgearbeitet werden.

6. Kältezentrale BZ Mülligen

Shakermessungen: -> Bestimmung der dynamischen Tragstruktureigenschaften für die Auslegung der elastischen Lagerung

Im Rahmen eines grösseren Umbaus des Postbetriebszentrums Mülligen werden in der bestehenden Kältezentrale eine grosse Anzahl neuer Wärmepumpen mit den erforderlichen Nebenaggregaten eingebaut. Die Lagerung dieser Maschinen und Aggregate erfolgt auf einem dreidimensionalen, in sich selber steifen Trägerrost, welcher die Funktion einer Lastverteilkonstruktion übernimmt. D.h. die Lasten werden an ganz bestimmten, tragfähigen Punkten auf die bestehende Hallenkonstruktion abgegeben. Durch eine geeignete elastische Lagerung ist die Übertragung der dynamischen Lasten aus Wärmepumpenbetrieb auf die bestehende Hallenkonstruktion soweit wie möglich zu minimieren, damit die bestehende Hallenkonstruktion aus Tragfähigkeitsgründen weitestgehend nur statisch belastet wird. Zusätzlich wird durch die elastische Lagerung eine bestmögliche Erschütterungs- und Körperschalldämmung angestrebt.

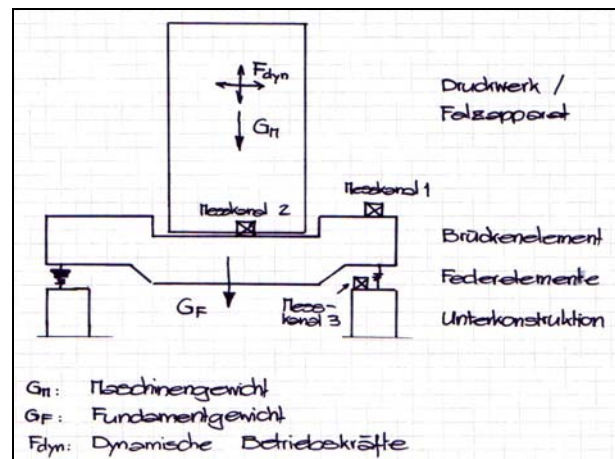
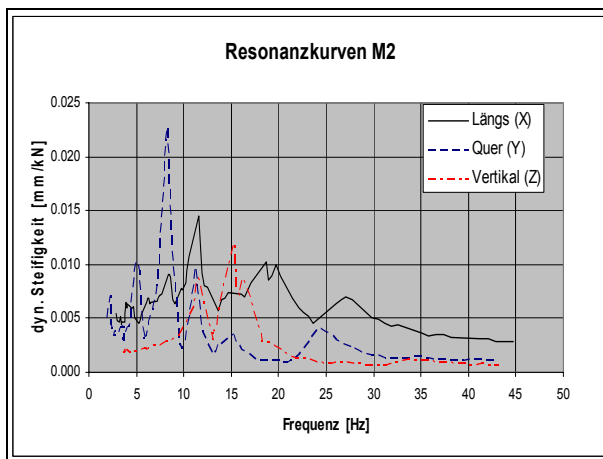


Der Einbau von elastischen SYLOMER-Lagerplatten verschiedener Weichheit wurde ausgearbeitet, um eine bestmögliche Dämmung der Betriebsdrehzahl-Erschütterungen ohne Gefahr einer Resonanz mit der vorherrschenden Decken-Eigenfrequenz zu erreichen. Die sich ergebenden Eigenfrequenzen des gekoppelten Systems Stahlrahmen/Geschossdecke liegen im Bereich von ca. 10 – 15 Hz, d.h. zwischen der vorherrschenden Decken-Eigenfrequenz von ca. 5 Hz und der Betriebsdrehzahl der Kompressoren von rund 25 Hz (Maschinendrehzahlen Wärmepumpen / Kältemaschinen: 1'420 min⁻¹ sowie 1'460 min⁻¹).

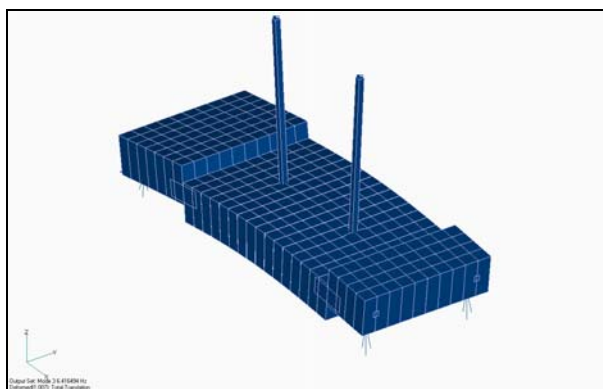
7. Imprimerie Saint-Paul, Freiburg

Shakermessungen: -> Bestimmung des Dämmverhaltens und Ausarbeitung der erforderlichen Ertüchtigung der Federlagerung der Druckmaschinen

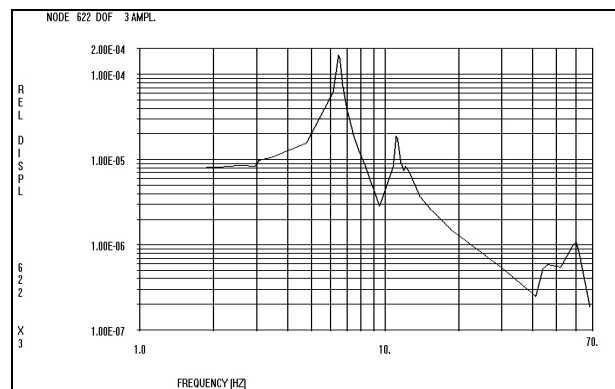
Die „Imprimerie Saint-Paul“ in Freiburg plant eine Erweiterung des bestehenden Druckwerkes. Dadurch werden insbesondere die massgebenden statischen und dynamischen Lasten der Druckwerke vergrößert. Die bestehende Situation sieht eine elastische Lagerung (Schwingungsisolation) der Druckwerke und Falzapparate über Stahlbeton-Brückenelemente vor. Diese Lagerung wird für den geplanten Ausbauzustand beibehalten, musste jedoch auf die neue Belastung ausgelegt und angepasst werden. Zudem wurden im Rahmen dieser Untersuchung die für die notwendige Ertüchtigung der Tragkonstruktion (Brückenelement und Unterbau) dynamischen Übertragungskennwerte ausgearbeitet.



Die Eigenfrequenzen der elastischen Lagerung liegen zwischen 2 und 20 Hz; hochfrequente Lasten werden somit nicht übertragen. Dabei handelt es sich um translatorische und rotatorische Festkörperschwingungen des Brückenelementes. Die erste massgebende Biegeschwingung des Brückenelementes wurde (Messungen bis ca. 40 Hz) nicht gemessen, diese wird somit infolge der hohen Steifigkeit des Brückenelementes über 40 Hz liegen.



Eigenschwingungsformen „Druckwerke“
 $f_3 = 6.4 \text{ Hz}$



Resonanzkurve Lagerung Druckwerke:
Vertikale Anregung

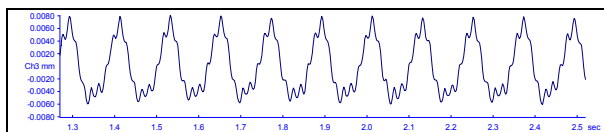
Mit dem ausgearbeiteten Lagerungskonzept für den geplanten Ausbauzustand (Ersatz der Federelemente) wird ein analoges Schwingungsverhalten (Schwingungsamplituden, Kraftübertragung) erreicht.

8. Sammelhefter Supra, Müller-Martini Zofingen

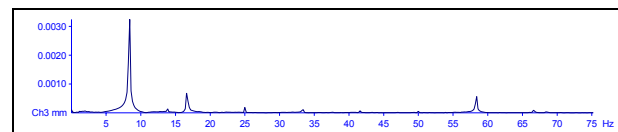
Shakermessungen: -> Abschätzung der dynamischen Kräfte, Auslegungskriterien

Die zur Druckverarbeitungsstrasse gehörenden Maschinen „Supra Kurbelschneider 0426 und Supra Heftmaschine 0430“ der Firma Müller-Martini in Zofingen geben, neben den statischen Belastungen, nicht unerhebliche dynamische Kräfte an die Fundierung ab. Es stellte sich die Frage, welche statischen und dynamischen Anforderungen bezüglich der Fundierung definiert werden müssen, um die Betriebssicherheit der gesamten Maschinenanlage zu gewährleisten. Diesbezügliche Erkenntnisse, bzw. entsprechende Empfehlungen wurden in Form eines Herstelldokumentes mit der Maschine festgehalten.

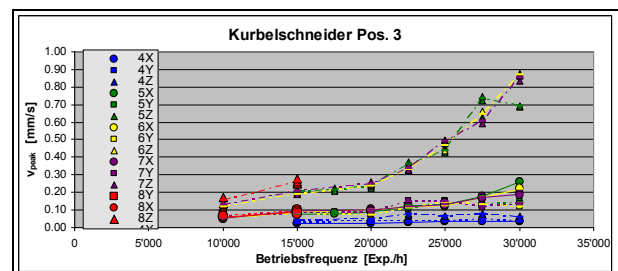
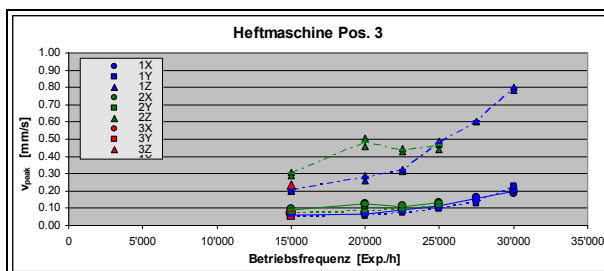
Anhand einer Schwingungsmesskampagne (Betriebsschwingungen und dynamische Systemanalyse) und darauf basierenden numerischen Analysen im Zeitbereich (Modellierung der Kraftfunktion, Sensitivitätsanalysen) wurde diese Fragestellung genauer untersucht. Bei den Betriebsmessungen wurden Arbeitskadenz gemäss Vorgabe des Maschinenherstellers im Bereich 10'000 bis 30'000 Ex/h gemessen. Diese Messungen bei differenzierten Produktionsgeschwindigkeiten des Sammelhefters wurden nach Möglichkeit für unterschiedlichen Blattdicken ausgeführt. Bei Erhöhung der Produktionskadenz wurde eine überproportionale Zunahme der Schwinggeschwindigkeiten in allen Richtungen festgestellt.



Verschiebungen
Beispiel Maschinenbetrieb (Kurbelschneider)



Frequenzspektrum

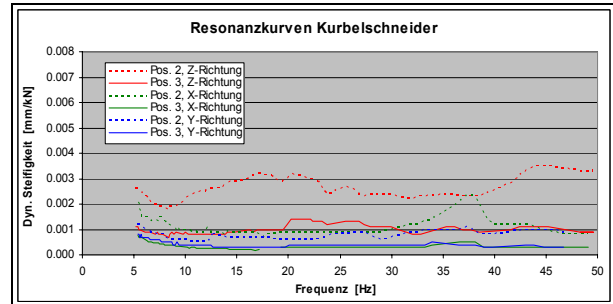
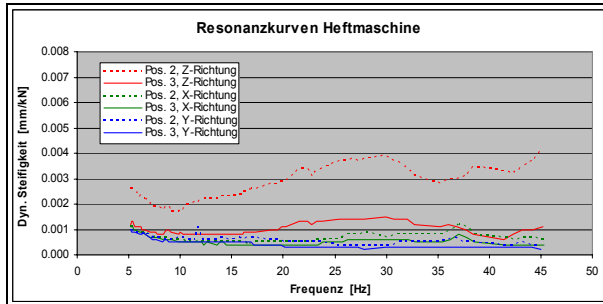


Max. Schwinggeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Produktionsgeschwindigkeit und Blattdicke

Die Auswertungen der Shakerversuche zeigen für den Aufstellungsort keine klaren Resonanzzustände, da der Boden direkt auf dem Baugrund liegt (hohe Systemdämpfung). Die gemessenen Resonanzkurven zeigen folglich einen flachen Kurvenverlauf der dynamischen Steifigkeit. Die horizontalen Resonanzkurven liegen nahe beieinander; die dynamischen in die Fundation eingeleiteten Kräfte übertragen sich somit auf die gesamte Bodenplatte (die in ihrer Ebene belastete Platte wirkt als Scheibe). Vertikal hingegen ist eine Abnahme der Auslenkung mit Abstand zum Shaker erkennbar: Die dynamische Kraft wird lokal über Biegung der relativ dünnen Bodenplatte und Widerstand (Steifigkeit) des Baugrundes abgetragen. Im Bereich der Maschinen-Hauptbetriebsfrequenzen um 8.3 Hz (bei maximaler Produktionskadenz) können folgende Steifigkeiten für vereinfachte Berechnungen verwendet werden:

$$K_{\text{vert.}} = 0.0020 \text{ mm/kN} \Rightarrow 500 \text{ kN/mm}$$

$$K_{\text{hor.}} = 0.0005 \text{ mm/kN} \Rightarrow 2'000 \text{ kN/mm}$$



Die auf die Unterkonstruktion abzugebenden dynamischen Kräfte liegen im Bereich von 10% für die Heftmaschine, respektive im Bereich von 20% für den Kurbelschneider. Eine übermäßige dynamische Beanspruchung der Tragstruktur kann insbesondere bei resonanzähnlichen Zuständen entstehen, d.h. bei zur Erregerfrequenz naheliegenden Eigenfrequenzen der Tragstruktur und ungenügender Systemdämpfung.

Beispiel „Fundationsanforderungen Supra Kurbelschneider 0426“ (Zusammenfassung):

	Richtung	Vertikal	Längs	Quer
Statische Lasten		50.8 kN	-	-
Dynamische Lasten		9.8 kN	5.6 kN	1.8 kN

Grundfrequenz der Unterkonstruktion (alle Richtungen): $f_1 \geq 21.0$ Hz

Die Unterkonstruktion ist somit hoch abzustimmen. Dazu ist bei der Auslegung mindestens eine dynamische Untersuchung der Systemeigenfrequenzen des Gesamtsystems über geeignete Rechenverfahren erforderlich. Eine hohe Systemdämpfung ist wünschenswert.

Bei den Berechnungen wurde die Lagerung der Maschine als gegeben angenommen – d.h. es wurde davon ausgegangen, dass die Maschine immer mit denselben, resp. analogen **Maschinenfüßen** aufgestellt wird. Eine Änderung dieser Abstützungen kann eine Änderung der dynamischen Kräfte zur Folge haben!



Heftmaschine, Shaker „Längs“



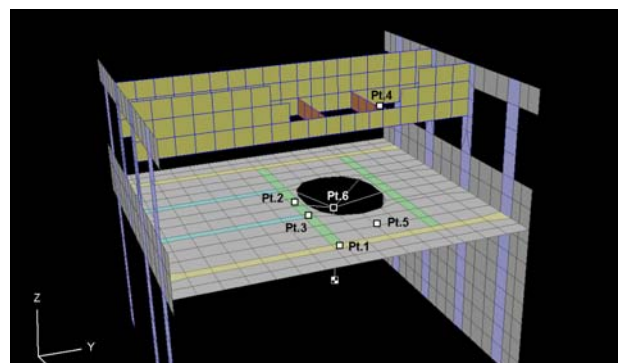
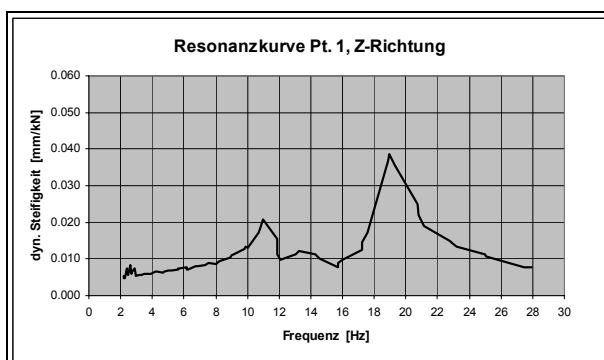
Lagerung Heftmaschine

9. Windkanal RUAG Aerospace, Emmen

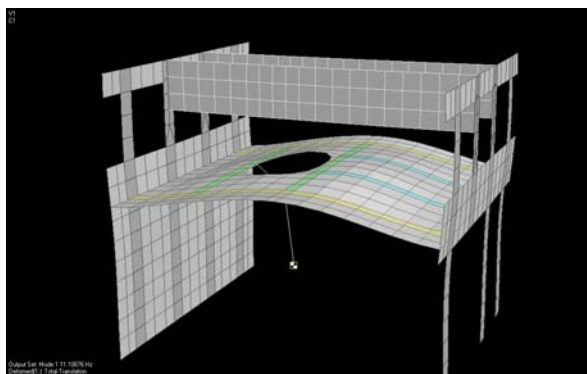
Shakermessungen: -> Dynamische Gebäudeanalyse (Systemidentifikation)

Im schon seit längerer Zeit bestehenden AWTE (Automotive Wind Tunnel Emmen) wurde im Jahr 2000 ein neuer Modellmanipulator (AMM) an der Hallendecke montiert. Dieser neue Manipulator arbeitet zurzeit noch statisch, er ermöglicht in Zukunft aber auch dynamische Modellanregungen (Shakerversuche); das bedeutet, dass die bestehende Windkanaldecke und auch die neue Manipulatorverankerung relativ grossen dynamischen Kräften ausgesetzt werden -> detaillierte Lastvorgaben durch RUAG Aerospace. Die statische und dynamische Überprüfung der Auslegung der Hallen-/Windkanaldecke und der Verankerungen erwiesen sich als ungenügend (Ermüdungsversagen).

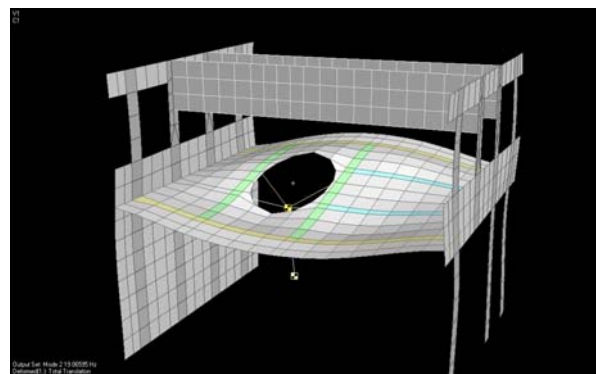
Messungen der heutigen, typischen Schwingungssituation an der bestehenden Gebäudestruktur, d.h. insbesondere der Eigenfrequenzen und der beim heutigen Windkanalbetrieb auftretenden Deformationsamplituden wurden bereits in einer ersten Phase durchgeführt.



Ersten Eigenfrequenzen der Decke liegen im kritischen Bereich bis 30 Hz. Bei diesen Eigenformen sind die Masse des Manipulators sowie die Decke über dem Windkanal massgebend an der Eigenschwingung beteiligt. Die Messungen brachten auch am Modellmanipulator selber Eigenfrequenzen im kritischen Bereich zu Tage, die korrigiert werden mussten. Diese Eigenfrequenzen musste bei der Überprüfung der Decke aber auch der Manipulatorbefestigung berücksichtigt werden.



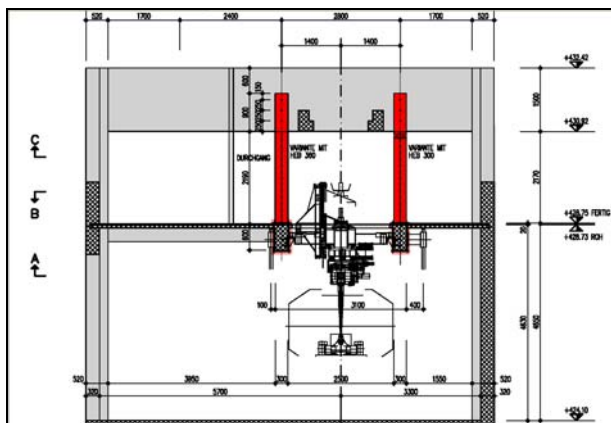
$f_1 = 11,1$ Hz



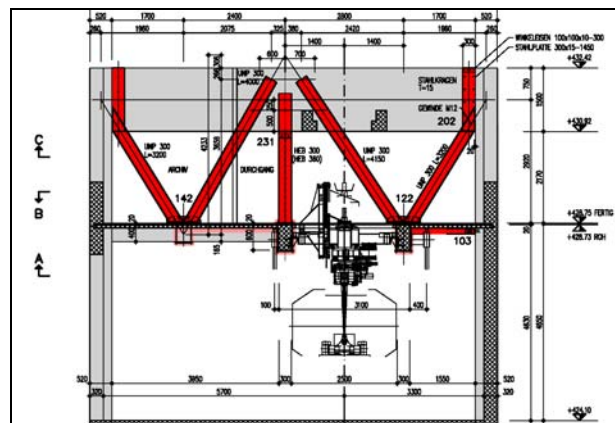
$f_2 = 19,1$ Hz

Ertüchtigungsvarianten mussten basierend auf folgenden Rahmenbedingungen ausgearbeitet werden:

- Tragsicherheit Tragstruktur: Auslegung auf vollen Shaker-Betrieb
- Gebrauchstauglichkeit Shaker-Versuche: Reduktion der Schwingungsamplituden, Anhebung der massgebenden Eigenfrequenzen, Versteifung
- Randbedingungen RUAG: Kosten, Ausfallzeit AWTE, Installationen / Raumverhältnisse, Verschiebeoptionen AMM
- Bauliche Bedingungen: Elementgewichte, Zugang, Verbindungen / Kraftübertragung



Ertüchtigungsvariante 01 „Aufhängung“



Ertüchtigungsvariante 02 „Fachwerk“

Zudem mussten die Varianten bezüglich folgender Gesichtspunkte beurteilt werden können:

- Relativverschiebungen infolge Eigengewicht des Modellmanipulators
- Schwingverhalten der Manipulatorspitze infolge Modellanregung

Dazu wurde die Hallen-/Windkanalstruktur in einem geeigneten Computermodell (Stardyne) abgebildet und anhand den Messresultaten kalibriert. Bei den rechnerischen Untersuchungen des Einflusses der Versteifungsvarianten (Varianten Aufhängung und Fachwerk) wurde die Manipulatorstruktur selber als starr angenommen. Ziel der Ertüchtigungsvarianten war ein möglichst grosses Anhebung der fundamentalen Decken-Eigenfrequenzen und der Minimierung der Schwinggeschwindigkeiten, insbesondere an der Manipulatorspitze. Der Vergleich der Varianten erfolgte u. a. an den berechneten Resonanzkurven an der Modellmanipulatorspitze infolge harmonischer Modellanregung.