Sonderdruck aus Heft 7/8 (2012) Seiten 326-330

G 21613

Bauingenieur

Die richtungweisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen

www.bauingenieur.de

R. Höfle, R. Zindler

getzner
the good vibrations company

Umweltfreundliche Wasserkraftwerke in Wohngebieten
Effizienter Schallschutz für das Wasserkraftwerk Keselstraße in Kempten

Bauingenieur
Die richtungweisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen

Sonderdruck aus Heft 7-8/2012 Seiten 326-330

Umweltfreundliche Wasserkraftwerke in Wohngebieten Effizienter Schallschutz für das Wasserkraftwerk Keselstraße in Kempten

R. Höfle, R. Zindler

Zusammenfassung

Die Allgäuer Überlandwerk GmbH (AÜW) ließ in den Jahren 2007 bis 2010 das Wasserkraftwerk Keselstraße in Kempten neu errichten. Durch eine deutliche Erhöhung der Ausbauleistung können im Vergleich zum alten Kraftwerk nun fast doppelt so viele Haushalte mit CO_2-freiem Strom versorgt werden – mit entsprechend positiver Wirkung auf die Umweltbilanz. Direkt neben dem geplanten Wasserkraftwerk befinden sich alte Fabriken, welche nach Fertigstellung des Wasserkraftwerks kernsaniert werden. In Folge entstehen hochwertige neue Wohnungen und Büros, wodurch bei der Neuerstellung des Kraftwerks erhöhte Anforderungen an den Schallschutz zum Tragen kamen. Die Lösung dieser schallschutztechnischen Aufgabe bestand darin, das gesamte Maschinenhaus des Kraftwerks vollflächig mit Polyurethan-Elastomeren von Getzner Werkstoffe zu lagern.

Bild 1. Kraftwerk Keselstraße in Kempten mit den angrenzenden, denkmalgeschützten Bauwerken (© AÜW/B. González)

Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Roger Höfle
Getzner Werkstoffe GmbH
Herrenau 5, A-6706 Bürs
Tel.: +43–5552–201–1330
roger.hoefle@getzner.com

Dipl.-Ing. Rainer Zindler
Getzner Werkstoffe GmbH
Nördliche Münchner Str. 27a
82031 Grünwald
Tel.: +49–89–693500–15
rainer.zindler@getzner.com

1 Projektbeschreibung

Das AÜW-Kraftwerk befindet sich in Kempten (Keselstraße), westseitig der Iller und wird über diese mit Wasser gespeist. Das ursprüngliche Kraftwerk wurde im Jahr 1958 erbaut. In den Jahren 2007 bis 2010 erfolgte die Neuerrichtung des Kraftwerks, wobei hinsichtlich mehrerer Ingenieurdisziplinen besondere Herausforderungen zu bewältigen waren. So befinden sich in direkter Nachbarschaft des Kraftwerks denkmalgeschützte Bauwerke, in deren Erscheinungsbild sich das Kraftwerk architektonisch einzuordnen hatte. Die Gestaltung der neuen Kraftwerksanlage sah eine durchgängige Gebäudehülle vor, welche die Dynamik der Wasserkraft widerspiegelt (**Bild 1**).

Für die kraftwerkstechnische Planung war das Ingenieurbüro RMD-Consult verantwortlich. Im Rahmen des Kraftwerksneubaus kamen zwei baugleiche Kaplanturbinen zum Einsatz, welche bei einer Drehzahl von 150 U/min eine Nennleistung von jeweils 1370 kW aufweisen. Die jährliche Stromerzeugung konnte durch den Neubau des Kraftwerks von ca. 6 GWh auf ca. 10,5 GWh erhöht werden. Damit lassen sich rund 3000 Haushalte nachhaltig mit Strom versorgen. Nicht weniger beeindruckend ist die Einsparung von ca. 5400 Tonnen CO_2 pro Jahr [1].

Tabelle 1. Dimensionslose Anhaltswerte der bewerteten Schwingstärke nach DIN 4150 [3]

untere Anhaltswerte A_u für ...	tags	nachts
Industriegebiete	0,40	0,30
Gewerbegebiete	0,30	0,20
Mischgebiete (Büros)	0,20	0,15
allgemeine Wohngebiete	0,15	0,10

Aufgrund der neu entstehenden Wohnungen und Büros im direkten Nahfeld des Kraftwerks wurden hohe Anforderungen an den Schallschutz gestellt. Die schall- und erschütterungstechnischen Maßnahmen am Kraftwerk Keselstraße ergaben sich dabei aus dem Bebauungsplan der Stadt Kempten [2].

2 Anforderungen an den Schallschutz

Hinsichtlich des Schallschutzes muss grundsätzlich zwischen Körperschall (Ausbreitung von Schwingungen in einem Festkörper) und Luftschall (Ausbreitung über die Luft) unterschieden werden.
Schwingungen entstehen durch die dynamische Beanspruchung eines Bauteils. Diese Schwingungen werden auf die benachbarten Gebäude übertragen. Das Maß der Übertragung hängt neben der Entfernung und der Untergrundbeschaffenheit im Wesentlichen auch davon ab, ob und welche Art der elastischen Entkopplung zum Einsatz kommt. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Schwingungsübertragung durch den Untergrund nur schwer prognostizierbar ist, da die Untergrundbeschaffenheit engräumig stark schwanken kann und zusätzlich von jahreszeitlichen Effekten (gefrorener Boden, Lage des Grundwasserspiegels) abhängt. Demgegenüber weisen elastische Elemente von Getzner definierte Eigenschaften auf, die eine fundierte rechnerische Prognose der Schwingungsausbreitung – auf Basis der mechanischen und dynamischen Zusammenhänge – ermöglichen. Die zulässigen Schwingungen am Immissionsort sind abhängig von der Nutzung. So werden bei einer Nutzung als Wohnraum oder als Büro in der Regel höhere Anforderungen gestellt als bei einer rein industriellen oder gewerblichen Nutzung (**Tabelle 1**).

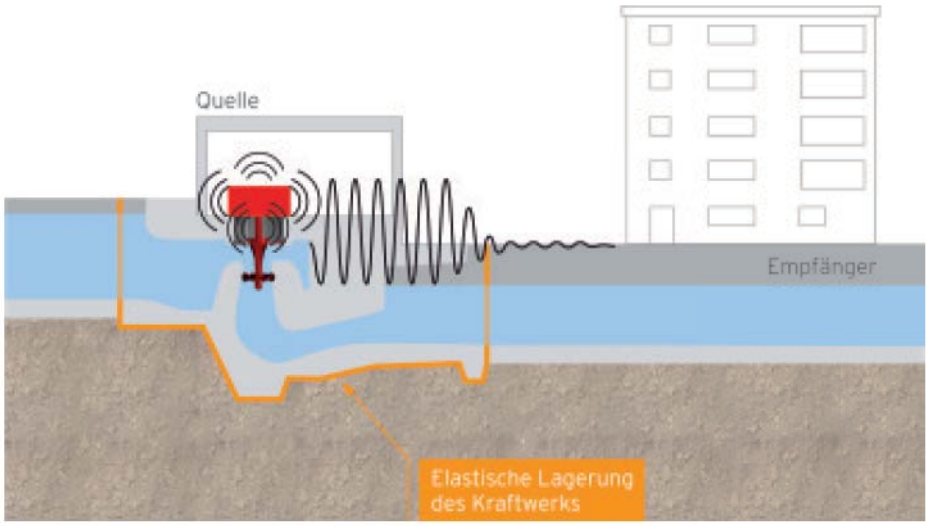

Bild 2. Schematische Darstellung des Übertragungswegs

Eine direkte Übertragung des Luftschalls erfolgt in Form von Schallwellen über die Luft. Eine Beeinträchtigung kann unterbunden werden, indem die Schallquelle abgeschirmt wird. Ein weiteres schalltechnisches Phänomen ist jenes des sekundären Luftschalls. Dabei werden Schwingungen zunächst als Körperschall übertragen. Am Immissionsort werden diese Schwingungen durch die Raumbegrenzungen (z. B. Wände und Decken) abgestrahlt, so dass dies zu einer Beeinträchtigung der Anrainer führen kann.
Die Anforderungen an die Luftschallisolierung wurden durch die Einhausung der Turbinenanlagen erfüllt. Hinsichtlich der Körperschallabstrahlung wurde für das Kraftwerk eine elastische Lagerung gefordert, um die Anforderungen an den Schallschutz in den angrenzenden Gebäuden auch tatsächlich einhalten zu können. Die elastischen Elemente zur Schwingungsisolierung kommen entweder am Emissionsort (Quellenisolierung), entlang des Übertragungsweges oder am Immissionsort (Empfängerisolierung) zum Einsatz. Die gewählte Maßnahme hängt in vielen Fällen von den baulichen und rechtlichen Randbedingungen ab. Im Fall des Kraftwerks Keselstraße wurde der Fundamentbereich im Zuge des Neubaus freigelegt und das Kraftwerk elastisch gelagert (**Bild 2**).
Neben der elastischen Lagerung des Kraftwerkfundaments wurden auch sämtliche Stahlrohre und Verbindungen, die den schwingungstechnisch isolierten Abschnitt des Bauwerks mit der Umgebung verbinden, entkoppelt. Andernfalls wäre an diesen Stellen eine Körperschallbrücke entstanden, die die isolierende Wirkung der elastischen Lagerung mindert.

3 Elastisches Lagerungskonzept

Die Werkstoffe Sylomer® und Sylodyn® sind technisch hochwertige Elastomere auf Basis von Polyurethan, die – in Abhängigkeit der gewählten Rezeptur – definierte dynamische Eigenschaften aufweisen. Das schwingungsisolierende Verhalten von Sylomer® und Sylodyn® kann in mechanischer Hinsicht als Kombination einer Feder und eines Dämpfers interpretiert werden.
Für das Projekt Keselstraße wurde eine vollflächige Gebäudelagerung mit Sylomer®-Matten vorgesehen. Diese elastischen Lager können bis zu einer statischen Belastung von 1,2 MN/m² eingesetzt werden. Darüber hinaus sind kurzzeitige Lastspitzen bis zu 6,0 MN/m² möglich. Durch ein fein abgestuftes Produktportfolio (**Bild 3**) kann für jedes Projekt eine schwingungstechnisch optimierte Lösung erarbeitet werden.
Elastomere auf Basis von Polyurethan kommen seit Jahrzehnten in verschiedenen Bereichen der Schwingungsisolierung zum Einsatz. Insbesondere bei elastischen Lagerungen für den Schienenverkehr wirken dabei zum Teil sehr große Amplituden auf sehr kleine Flächen. Dass die Werkstoffe diese deutlich höhere Beanspruchung als bei Gebäudelagerungen auch über lange Zeiträume hinweg problemlos bewältigen, beweist deren hohe Dauerfestigkeit [4].

Neben der Grundfläche des Maschinenhauses waren auch die aufgehenden Seitenwände bis zur Geländeoberkante hin zu entkoppeln. Insgesamt wurden am Kraftwerk Keselstraße ca. 2000 m² elastische Matten verbaut. Die Materialauswahl für die verschiedenen Bereiche des Kraftwerks erfolgte unter Berücksichtigung der statischen Belastung sowie der dynamischen Anforderungen. Die Matten im Fundamentbereich werden im Wesentlichen durch das Eigengewicht des Bauwerks belastet. Daneben müssen aber auch Lasten aus der maschinentechnischen Anlage sowie des Wassers für unterschiedliche Lastfälle (z. B. Betrieb, Stillstand, Notabschaltung) berücksichtigt werden. Für die seitlichen Matten sind insbesondere der Frischbetondruck (im Bauzustand) und der Erdruhedruck (im Endzustand) maßgeblich.

Unter Berücksichtigung der verwendeten Materialtypen, der Bauwerksgeometrie, der vorhandenen Belastung sowie der Anregefrequenzen werden mit einem eigens entwickelten, dreidimensionalen Berechnungsprogramm die Eigenfrequenzen berechnet und eine Prognose über die schwingungsisolierende Maßnahme erstellt (**Bild 4**).

Um eine hohe Wirksamkeit der schwingungsisolierenden Maßnahme zu erzielen, sollten grundsätzlich Eigenfrequenzen angestrebt werden, die deutlich unterhalb der kritischen Anregefrequenzen liegen. Dabei gilt, dass unter einer vorgegebenen Belastung die Eigenfrequenz mit geringerer Steifigkeit der elastischen Lagerung abnimmt. Eine weiche Lagerung kann zum einen durch entsprechende Materialauswahl erfolgen. Dabei sind allerdings immer auch die statisch möglichen Einsatzbereiche (siehe Bild 3) zu berücksichtigen. Zum anderen wird die Steifigkeit der Gebäudelagerung durch die Dicke der eingesetzten Lager bestimmt. Bei der oben genannten Aufgabenstellung unterstützte der Schwingungsexperte die beratenden Ingenieurbüros bei der optimalen Gestaltung der Gebäudelagerung, so dass eine dauerhaft funktionierende Lösung erzielt wird. Neben den Anforderungen an die Schwingungsisolierung werden auch die wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigt. Beim Kraftwerk Keselstraße wurden nach Abschluss der Lageroptimierung die relevanten Eigenfrequenzen zwischen ca. 12 Hz und 16 Hz prognostiziert (**Tabelle 2**).

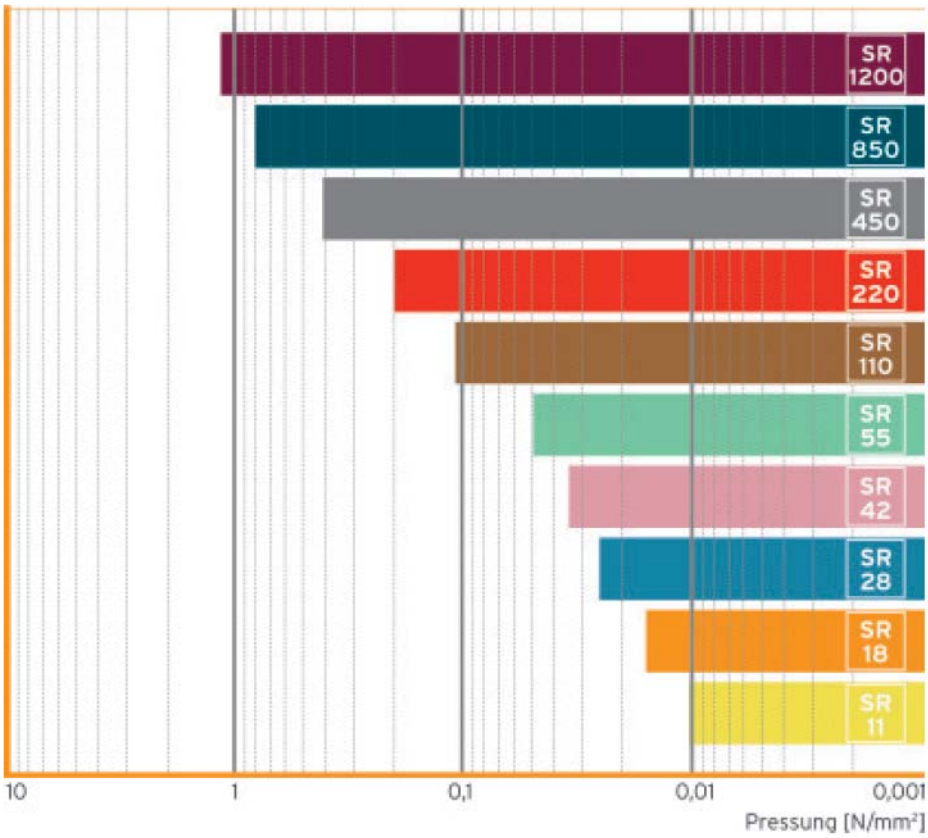

Bild 3. Statischer Einsatzbereich der unterschiedlichen Sylomer®-Typen

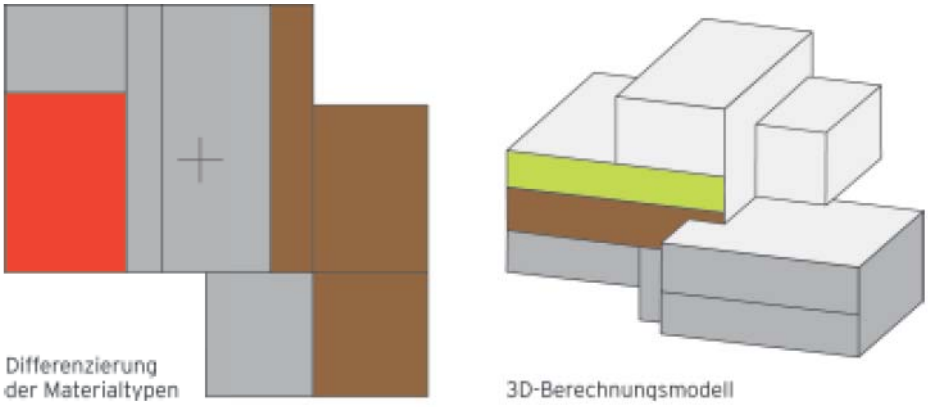

Bild 4. Berechnung der Eigenfrequenzen

Tabelle 2. Relevante Eigenfrequenzen

Eigenfrequenz	[Hz]
f_z (vertikale Eigenfrequenz)	13,4
f_{uz} (Eigenfrequenz um die z-Achse)	16,3
f_{xu} (Kippfrequenz um die x-Achse, unten)	13,8
f_{xo} (Kippfrequenz um die x-Achse, oben)	16,3
f_{yu} (Kippfrequenz um die y-Achse, unten)	11,9
f_{yo} (Kippfrequenz um die y-Achse, oben)	15,8

Die anregenden Frequenzen sind durch die Turbinenanlage vorgegeben. Neben der Drehzahl der Turbinen und den hydraulischen Druckpulsationen sind für die Wirksamkeitsprognose der elastischen Lager insbesondere die Anzahl der Lauf- und Leitradschaufeln von Bedeutung. Bei starr gekoppelten Maschinensätzen leiten sich aus der Schaufelanzahl und der Drehzahl der Turbine die wesentlichen Anregungen des Gebäudes ab. Beim Kraftwerk Keselstraße ist die Bandbreite der anregenden Frequenzen recht groß. Von Seiten

des Gutachters wurde die Wirksamkeit der elastischen Lagerung insbesondere für die Frequenzen 2,5 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 45 Hz und 90 Hz im Detail untersucht. Die zu erwartenden Anregefrequenzen liegen damit teilweise unter den für dieses Projekt berechneten Eigenfrequenzen. In diesem Fall ist in einem Frequenzbereich bis ca. 23 Hz mit einer gewissen Verstärkung der Schwingungen zu rechnen, wobei dies zu keinerlei Beeinträchtigung der Gesamtlösung führt (siehe Abschnitt „Nachmessung der Wirksamkeit“). Allgemein gilt, dass die isolierende Wirkung (unabhängig von der Art der elastischen Lagerung) erst bei Frequenzen von über $1{,}41 \cdot f_0$ auftritt (**Bild 5**). Durch die Isolierung des Körperschalls wird in weiterer Folge auch der sekundäre Luftschall verringert.

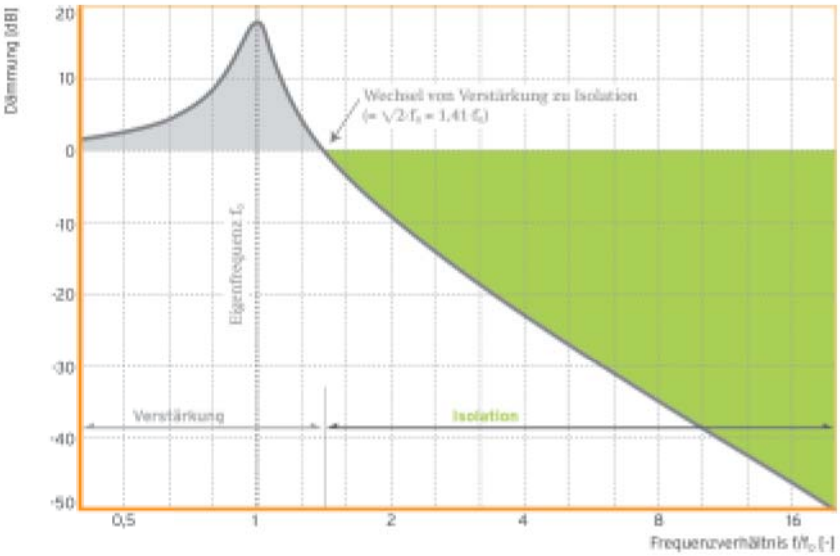

Bild 5. Schematische Darstellung der Bereiche mit verstärkender und isolierender Wirkung

4 Verlegung der Lager

Bei komplexen Bauwerken wie dem Kraftwerk Keselstraße kommen in der Regel mehrere Typen von Elastomermatten zum Einsatz. Für den Einbau der elastischen Lager wurden vom Lösungsanbieter Verlegepläne ausgearbeitet, aus denen ersichtlich ist, welcher Materialtyp in welchem Bereich des Gebäudes eingesetzt werden muss (**Bild 6**).
Die Verlegung der elastischen Lager erfolgte durch die ausführende Baufirma und unter Aufsicht der Fachleute des Lösungsanbieters. Die Verlegearbeiten lassen sich einfach ausführen und auch kontrollieren, da die einzelnen Materialtypen im Werk mit unterschiedlichen Farben produziert werden (**Bild 7**).
Üblicherweise werden die elastischen Lager als Rollen oder als vorkonfektionierte Matten auf die Baustelle geliefert. Zur Qualitätssicherung werden werkseitig vor der Auslieferung – im Rahmen der kontinuierlichen Güteüberwachung – die relevanten statischen wie auch dynamischen Kennwerte der eingesetzten Elastomere überprüft und darüber ein Prüfzeugnis ausgestellt.
Um beim Einbau ein Eindringen von Beton und damit Körperschallbrücken zu vermeiden, wurden die Stöße zwischen den Matten vor Ort mit einem Beton-Gewebeabdeckband abgeklebt. Zur seitlichen Entkopplung des Bauwerks kamen auch an der Baugrubenverbauung Elastomermatten zum Einsatz. Vor die elastische Lagerung wurde dann die Bewehrung gestellt und anschließend betoniert. Für komplexe dreidimensionale Strukturen wie Pumpensümpfe oder Ähnliches können die Matten auf der Baustelle leicht nachkonfektioniert werden. Sie lassen sich mit handelsüblichen Werkzeugen und Hilfsmitteln schneiden, stanzen, kleben und verschweißen.

Bild 6. Verlegeplan für den Fundamentbereich

5 Nachmessung der Wirksamkeit

Nach Umsetzung dieser Baumaßnahme erhielt – zur Gewährleistung unabhängiger Messergebnisse – ein externer Gutachter den Auftrag, die vorhandenen Schwingungen zu messen. Regelmäßige Nachmessungen an diversen Projekten verbessern die Prognosemodelle. Parallel dienen sie auch der Sicherstellung der Qualität der schwingungsisolierenden Maßnahmen. Die Schwingungsmessungen erfolgten an mehreren geeigneten Punkten im und am Kraftwerk sowie am benachbarten Gebäude (**Bild 8**). Darüber hinaus wurden die Messungen während unterschiedlicher Turbinenleistungen durchgeführt.
Die Schwingungen wurden mit einem triaxialen Messsensor aufgenommen. Aus den festgestellten Schwinggeschwindigkeiten können zum einen die maßgeblichen Amplituden und

Frequenzen abgeleitet werden. Darüber hinaus lässt sich zwischen zwei Punkten (z. B. im Kraftwerk und am Anrainergebäude) eine Pegeldifferenz ermitteln. Diese gibt Aufschluss über die schwingungsisolierende Wirkung zwischen diesen beiden Punkten. Der Einfluss der Elastomerlager ist am deutlichsten zu erkennen, wenn die beiden Messpunkte MP03 und MP04 miteinander verglichen werden (**Bild 9**).

Während sich der Messpunkt MP03 noch auf der „schwingenden" Seite des neu errichteten Bauwerks befindet, liegt der Messpunkt MP04 außerhalb des Bauwerks, also auf der „ruhigen" Seite. Die beiden Punkte sind durch die elastische Lagerung voneinander getrennt. Die Pegeldifferenz zeigt eindrücklich, dass die Schwingungen durch die elastische Lagerung deutlich reduziert werden. Eine Verstärkung der Schwingungen im niedrigen Frequenzbereich konnte für die Vertikalkomponente nicht festgestellt werden.

Bild 7. Verlegung der elastischen Lager

Aus physikalischer Sicht ist eine Pegeldifferenz (vgl. Bild 9) von einer Einfügedämmung (vgl. Bild 5) abzugrenzen. Während bei der Pegeldifferenz zwei unterschiedliche Messpunkte für einen konkreten Zustand verglichen werden, wird bei der Einfügedämmung die isolierende Wirkung an einem Messpunkt und für zwei unterschiedliche Zustände (mit bzw. ohne elastische Lagerung) betrachtet. Im Eisenbahnwesen können Einfügedämmungen verhältnismäßig einfach bestimmt werden, indem beispielsweise ein Streckenabschnitt vor und nach dem Einbau elastischer Komponenten verglichen wird. Beim Kraftwerksbau ist dies in

Bild 8. Messpunkte am Kraftwerk Keselstraße

der Regel nicht möglich, da es entweder keinen Bezugszustand vor Einbau der elastischen Lagerung gibt (d. h. erstmalig errichtetes Bauwerk) oder die Bauwerke beziehungsweise die Maschinen sich vor und nach dem Einbau derart stark unterscheiden, dass ein Vergleich nicht möglich ist. In diesen Fällen können nur Pegeldifferenzen bestimmt werden.

Für die Beurteilung des geforderten Schallschutzes beim Kraftwerk Keselstraße waren die Messpunkte MP05 und MP06 im nächstgelegenen Anrainergebäude wesentlich. Die Messungen erfolgten im Erd- und Obergeschoss. In **Tabelle 3** sind die Anhaltswerte nach DIN 4150–2 (Mischgebiet) den bewerteten Schwingstärken (KB-Werte) gegenübergestellt.

Nach der Auswertung der Schwinggeschwindigkeiten stellte der unabhängige Gutachter fest, dass die Anforderungen an den Körperschallschutz sowohl tagsüber als auch nachts dauerhaft eingehalten werden können [5].

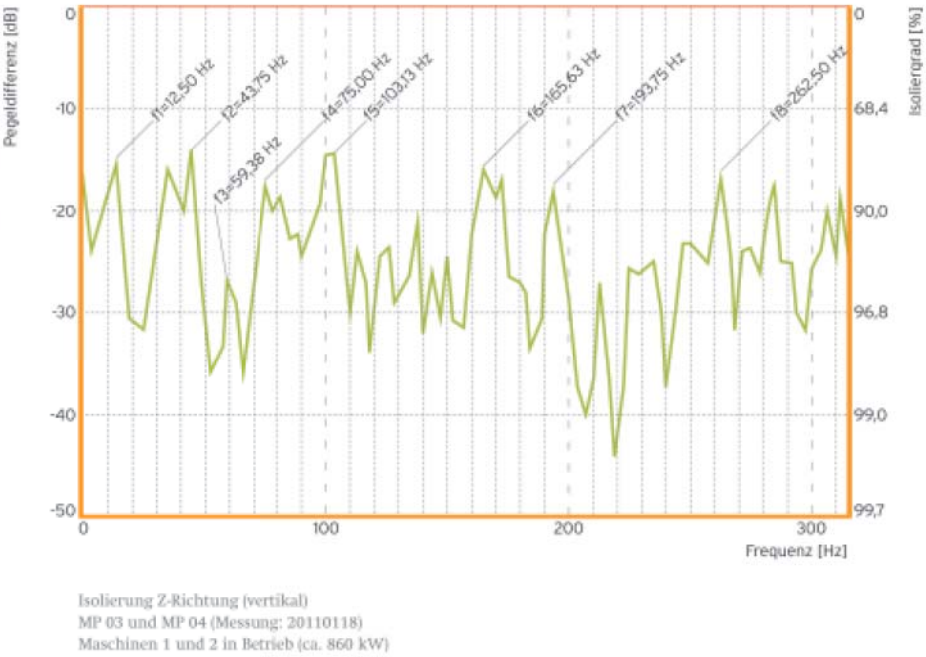

Bild 9. Pegeldifferenz MP03 und MP04, dargestellt für die Z-Richtung (vertikal)

6 Beurteilung

Der Bau von Kraftwerksanlagen mit hochdynamischen Maschinensätzen verursacht Schwingungen, die an die unmittelbare Umgebung abgestrahlt werden. Um sensible Gebäude sowie die darin wohnenden Anrainer effizient vor Erschütterungen sowie sekundärem Luftschall schützen zu können, müssen geeignete Maßnahmen zur Schwingungsisolierung getroffen werden. Durch die Verwendung geeigneter Polyurethan-Materialien, die Anwendung fundierter Prognosemodelle sowie eine entsprechend qualifizierte Produkt- und Bauüberwachung konnte eine optimale Lagerung des Kraftwerks realisiert werden. Die prognostizierte Verbesserung des Schallschutzes beim Kraftwerk Keselstraße konnte durch die messtechnische Begleitung entsprechend belegt werden.

Tabelle 3. Vergleich der Anhaltswerte mit den gemessenen Schwingstärken

Messpunkt	gemessene KB-Werte	Anhaltswert A_u nach DIN 4150	
MP05 (Erdgeschoss)	0,002	0,20	tags
		0,15	nachts
MP06 (Obergeschoss)	0,005	0,20	tags
		0,15	nachts

Literatur

[1] Heruntergeladen von http://www.auew.de/index.php am 13.04.2012

[2] Stadt Kempten: Bebauungsplan „Ehemalige Spinnerei und Weberei", Architekturbüro Heiler, Kempten als Ersteller der Bebauungsplanzeichnung, 2002

[3] DIN 4150: Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, 1999

[4] *Müller, G.*: Langzeiteigenschaften von Sylomer®- und Sylodyn®-Materialien, Bericht Nr. M93 914/1, Müller-BBM, 2011

[5] *Schmid, H.*: Messtechnische Untersuchungen zu Erschütterungs- und sekundärer Luftschallsituation bei der Wasserkraftanlage Keselstraße der AÜW in Kempten / Allgäu – Beurteilung der IST-Situation, Projekt Nr. AUS / 2010_05, 2011

© Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2012