

Beilage zur UVB Hauptuntersuchung

5.5 Erschütterungen und Körperschall

Impressum

Bauherrschaft

IBAAarau Kraftwerk AG
Obere Vorstadt 37
5001 Aarau

Projektleitung
Hansjürg Tschannen

Autoren

IG KW Aarau (IUB Bern, IM Locarno, ANL Aarau)

IUB Engineering AG, Bern

Peter Billeter
Manuel Zahno

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Kommentar
1.0	31.03.2010	Gesuchsentwurf
1.1	22.10.2012	Gesuch zur Vorprüfung
2.0	23.10.2013	Gesuch (Auflage)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Rechtslage Erschütterungsimmissionen	3
3	Methodik der Messungen und der Prognose	6
4	Erschütterungsmessungen im heutigen Zustand	9
5	Erschütterungen im Bauzustand	13
5.1	Immissionen	13
5.2	Massnahmen	13
6	Erschütterungsprognose Kraftwerksneubau	14
7	Massnahmen	15
8	Schlussbemerkung und weiteres Vorgehen	16
	Literaturverzeichnis	17
	Anhang	18

1 Einleitung

Das KW Aarau liegt am Rand des Siedlungsgebiets entlang der Erlinsbacherstrasse. Die nächstliegenden Wohngebäude haben heute einen Abstand von ca. 65 – 75 m von den linksufrigen Maschinenblöcken. Nach dem Kraftwerksumbau wird der Minimalabstand rund 75 m betragen. Drehende Maschinen wie Turbinen und Generatoren erzeugen Vibrationen, die als Körperschall über das Erdreich in naheliegende Immissionsorte übertragen werden können. Die so erzeugten Erschütterungen und namentlich der abgestrahlte Körperschall können zu einer Belästigung von Anwohnern führen. Der Schutz vor Erschütterungen ist deshalb auch im Umweltschutzgesetz (USG) geregelt.

Im Rahmen der Bauprojektbearbeitung für die Erneuerung des Kraftwerks Aarau wurden deshalb Erschütterungsmessungen in der heutigen Zentrale und in zwei nahen Gebäuden vorgenommen. Damit wurde einerseits die heutige Erschütterungsimmission bestimmt und andererseits konnte das Übertragungsverhalten von Körperschallwellen zwischen Emissions- und Immissionsort ermittelt werden.

Auf Basis der Messungen im heutigen Zustand kann eine Prognose für Erschütterungsimmissionen nach der Kraftwerkserneuerung angestellt und es können wenn nötig Isolationsmassnahmen ausgelegt werden.

Der vorliegende Bericht ist eine Beilage zum Technischen Bericht, er ist aber auch als Fachbericht die Grundlage für die Aussagen im Kapitel Erschütterungen im UVB.

2 Rechtslage Erschütterungsimmissionen

A) Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden

Bis heute sind Art. 13 und 15 des Bundesgesetzes über den Umweltschutz noch nicht in einer Verordnung umgesetzt worden. Die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen ist deshalb im Grundsatz noch immer direkt auf das Gesetz abzustützen. Es können jedoch folgende Vollzugshilfen und Erfahrungen der Rechtsprechung beigezogen werden:

- Seit längerem wird unter Federführung des BAFU die Verordnung über den Schutz vor Erschütterungen (VSE) bearbeitet. Inzwischen liegt ein Entwurf vor, der zumindest schon die Ämterkonsultation durchlaufen hat. Ein weiteres Vorläuferprodukt, das als Vollzugshilfe dienen kann ist eine Richtlinie zur Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS) vom 20.12.1999, die gemeinsam vom BAV und vom BUWAL veröffentlicht wurde. Darin wird zur Beurteilung von Erschütterungen auf die DIN 4150-2 vom Juni 1999 abgestellt. Zur Beurteilung von abgestrahltem Körperschall werden Planungs- und Immissionsrichtwerte vorgegeben, die weitgehend auf einer Weisung der SBB von 1993 basieren. Die Verordnung VSE baut in wesentlichen Teilen auf der BEKS auf, sie wird aber für alle Erschütterungsquellen gelten.

- In einem Entscheid zu bahnbedingten Erschütterungen hat das Bundesgericht die Anwendung ausländischer Normen und Richtlinien auf dem heutigen Stand des Wissens sanktioniert (BGE 121 II 378).

Damit kann davon ausgegangen werden, dass eine Beurteilung nach dem Entwurf VSE, der sich methodisch und in der Grössenordnung der Immissionswerte auf die DIN 4150-2 bzw. die BEKS abstützt, den Immissionsschutzanforderungen des USG genügen sollte.

Die DIN 4150-2 (1999) beurteilt Erschütterungen anhand der bewerteten Schwingstärke KB_F (gleitendes Mittel des frequenzbewerteten Effektivwerts der Schwinggeschwindigkeiten). Im Verordnungsentwurf wird diese Grösse als Erschütterung K bezeichnet. Dabei wird ein Beurteilungswert K_r aus gemessenen und/oder prognostizierten Schwinggeschwindigkeiten am Immissionsort für die Beurteilungsperioden Tag (6 – 22 Uhr) und Nacht (22 – 6 Uhr) ermittelt. Dieser Beurteilungswert K_r muss unter einem Anhaltswert liegen.

Zudem wird im Verordnungsentwurf (und in der BEKS) der durch die Erschütterungen abgestrahlte Körperschall geregelt. Dazu wird ein Beurteilungswert M_r als Schalldruckpegel der Körperschallabstrahlung mit zulässigen Immissions- bzw. Planungsrichtwerten verglichen.

Die Wohngebäude am Hungerberg liegen in der Empfindlichkeitsstufe II. Es werden dafür die Anhalts- und Planungsrichtwerte für Mischzonen gemäss DIN 4150-2 bzw. BEKS angesetzt:

Zone	K_r	K_r	M_r	M_r
	dimensionslos	dimensionslos	in dB(A)	in dB(A)
	Tag	Nacht	Tag	Nacht
Mischzone	0,10	0,07	40	30

Im allgemeinen beträgt die Schwingstärke KB_F bzw. die Erschütterung K je nach Erschütterungsart rund $\frac{2}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ der maximalen Schwinggeschwindigkeit und 50 % bis 100 % der Standardabweichung der Schwinggeschwindigkeiten. Bei periodischen Immissionen, wie sie durch drehende Maschinen erzeugt werden, entsprechen KB_F bzw. K der Standardabweichung d.h. dem Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit in [mm/s].

Die Wahrnehmungsgrenze von Vibrationen liegt bei normal empfindlichen Menschen im Bereich einer bewerteten Schwingstärke KB_F von ca. 0.1 bzw. bei Schwinggeschwindigkeiten von ca. 0.1 mm/s. Vibrationen von über wenigen mm/s werden als störend empfunden.

Bezüglich **baubedingter Erschütterungen** besagt der Verordnungsentwurf dass dazu Empfehlungen des BAFU abgegeben werden sollen. Es darf davon ausgegangen werden, dass zwischenzeitlich eine sinngemässe Anwendung der Norm DIN 4150-2 zulässig ist. Darin werden einerseits organisatorische Massnahmen vor und während der Bauarbeiten empfohlen (Information, Immissionsüberwachung) und andererseits werden Anhaltswerte für die zulässige Schwingstärke bzw. Erschütterung vorgeschlagen.

Mit der oben erwähnten Umrechnung von Schwingstärken KB bzw. Erschütterungen K auf Schwinggeschwindigkeiten können pauschale zulässige Werte der Schwinggeschwindigkeitsmaxima am Immissionsort abgeschätzt werden, bei deren Einhaltung die in der Schweiz gültigen Anforderungen an den Immissionsschutz eingehalten werden (bei der Umrechnung von KB-Werten auf Schwinggeschwindigkeitsmaxima wurden die Signalcharakteristika der Erschütterungsarten berücksichtigt):

- Erschütterungen im Betrieb: $v_{\max} < 0.07 \text{ mm/s}$
- Baubedingte Erschütterungen: $v_{\max} < 1.2 \text{ mm/s}$

Bei Bauarbeiten dürfen einzelne Immissionen obige Werte überschreiten, die Schwinggeschwindigkeitsmaxima sollten aber i.a. einen Wert von 5 - 10 mm/s bzw. von $KB_{F_{\max}} \approx 5$ nicht überschreiten.

b) Erschütterungseinwirkungen auf Bauten

Solange die Anforderungen an den Immissionsschutz von Menschen eingehalten sind, treten i.a. auch keine Bauschäden auf. Richtwerte von Schwinggeschwindigkeiten, bei deren Einhaltung keine Schäden an der Bausubstanz auftreten, sind in Funktion der Einwirkungshäufigkeit, der Gebäudeempfindlichkeit und der Frequenz in der Schweizer Norm SN 640'312a des VSS und in der DIN 4150-3 angegeben.

Nach der in der Schweiz häufig verwendete Norm SN 640'312a, Erschütterungen – Einwirkungen auf Bauwerke, gehören die Erschütterungen infolge der Bauarbeiten beim KW Aarau zu den häufigen Einwirkungen (Lastwechsel N im Bereich von $1000 < N < 100'000$). Wohngebäude gelten im allgemeinen als normal empfindlich. Historische und gefährdete Bausubstanz gilt als besonders empfindlich. Für die häufige Einwirkung nennt die Norm je nach Frequenzbereich die folgenden Richtwerte:

- Frequenzbereich 0 – 30 Hz: 6 mm/s
- Frequenzbereich 30 – 60 Hz: 8 mm/s
- Frequenzbereich über 60 Hz: 12 mm/s

Bei ständiger Einwirkung oder bei besonders empfindlichen Gebäuden wären die halben obigen Werte als Richtwerte anzusetzen. Als summarische Richtgrösse kann in einem mittleren Frequenzbereich von ca. 10 bis 100 Hz davon ausgegangen werden, dass bei Schwinggeschwindigkeiten im Bereich von unter 3 mm/s noch keine Schäden auftreten sollten.

3 Methodik der Messungen und der Prognose

Zur Erhebung der heutigen Erschütterungsimmissionen und der Körperschallübertragung zwischen Kraftwerk und den Immissionsorten wurden Schwingungsgeschwindigkeitsmessungen vorgenommen. Bei zwei naheliegenden Gebäuden (Immissionsorte) wurden Schwingungsgeschwindigkeitssensoren im Fundamentbereich kraftschlüssig montiert. Die Sensoren in Emissionsnähe befanden sich gerade neben der Maschine 1 auf der Turbinendecke. Abbildung 1 zeigt die Situation mit den Messorten.

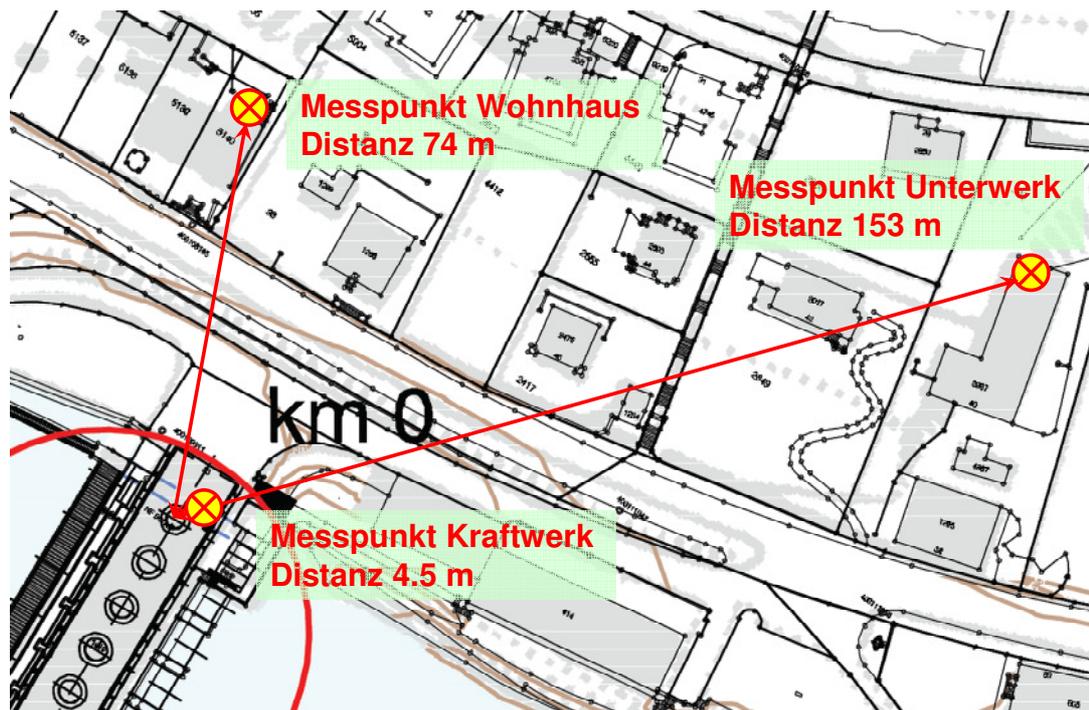


Abb. 1: Situation der Emissions- und Immissionswerte bei den Erschütterungsmessungen beim Zustand heute.

Für die Schwingungsgeschwindigkeitsmessungen wurden Messgeräte vom Typ Syscom / Bartek MR2002 mit je einem triaxialen Schwingungsgeschwindigkeitssensor MS2003 (high gain) verwendet.

Eine der Unsicherheiten bei der Prognose der Wellenausbreitung und Erschütterungseinwirkung liegt bei der Modellierung des Übertragungsverhaltens des Erdreichs. Dieses Übertragungsverhalten kann mit der Auswertung von nahezu gleichzeitig registrierten Schwingungsmessdaten von Messpunkten in Emissionsnähe und am Immissionsort bestimmt werden.

Das Messkonzept zielt darauf ab, aus den Messdaten am Immissionsort und in der Nähe zum Emissionsort (Zentrale) experimentelle Übertragungsfunktionen $|H_{GH}(f)|$ der Wellenausbreitung zu ermitteln. Werden aus den gemessenen Erschütterungen die Leistungsspektren $S_{GG}(f)_{R1}$ in Emissionsnähe (Zentrale) und $S_{HH}(f)_{R2}$ bei den Immissionsorten (Gebäude) berechnet, so schreibt sich die frequenzabhängige Übertragungsfunktion $|H_{GH}(f)|$ zu:

$$|H_{GH}(f)| = \sqrt{\frac{\overline{S_{HH}(f)}_{R2}}{\overline{S_{GG}(f)}_{R1}}} \quad \text{mit}$$

$$\overline{S_{GG}} = \overline{S_{gg,x}} + \overline{S_{gg,y}} + \overline{S_{gg,z}} \quad \text{und} \quad \overline{S_{HH}} = \overline{S_{hh,x}} + \overline{S_{hh,y}} + \overline{S_{hh,z}} \quad (1)$$

Die Auswertung basiert auf den Methoden der Analyse zufälliger Signale (Random data) (vgl. z.B. Bendat & Piersol, 1980, 1986). Verwendet werden die heute gängigen Instrumente der digitalen Signalanalyse mit der Verknüpfung des Zeit- und des Frequenzraums via die Fourier-Transformation. Zur Trennung von deterministischen und stochastischen Signalanteilen werden eine blockweise Signalbearbeitung und die anschliessende Mittelung eingesetzt (blockwise averaging). Das eingesetzte Verfahren geht davon aus, dass zwischen den gemessenen Eingangs- und Ausgangsgrössen, den Vibrationen in der Zentrale, d.h. in Emissionsnähe, und den Erschütterungen an den Gebäuden - ein physikalischer Zusammenhang, die sogenannte Übertragungsfunktion existiert, die als linear (d.h. in diesem Fall amplitudeninvariant) angenommen wird. Näheres zum methodischen Vorgehen ist in Billeter & Berger (2001) und Billeter (2004) zu finden.

Die Prognose der Erschütterungen und des abgestrahlten Körperschalls an den Immissionsorten, d.h. in bewohnten Räumen der Gebäude Hungerberg ist nachfolgend beschrieben. Sie basiert darauf, dass sich aus dem Emissionsspektrum der Schwinggeschwindigkeiten in Turbinennähe durch sukzessive Multiplikation mit den einzelnen Übertragungsfunktionen der Wellenausbreitung und Schwingungsübertragung das Immissionsspektrum am Immissionsort berechnen lässt. Die einzelnen Phasen und Faktoren der Prognose sind untenstehend erläutert:

I) Emission: Als Emissionsspektrum $v_E(f)$ für die Prognose werden zwei Modell angenommen. Einerseits wird die gemessene Schwinggeschwindigkeit um einen Faktor 10 erhöht, andererseits wird ein Emissionsspektrum mit noch mehr Tieffrequenzanteil angenommen, das gerade innerhalb dessen liegt, was nach der Norm DIN/ISO 10'816 Teil 3 an den Fundamenten von neuen Maschinen noch zulässig ist (Effektivwerte $< 1.4 \text{ mm/s}$). Die Emissionsspektren im heutigen Zustand und die sehr ungünstigen Prognoseannahmen sind in Abbildung 2 dargestellt.

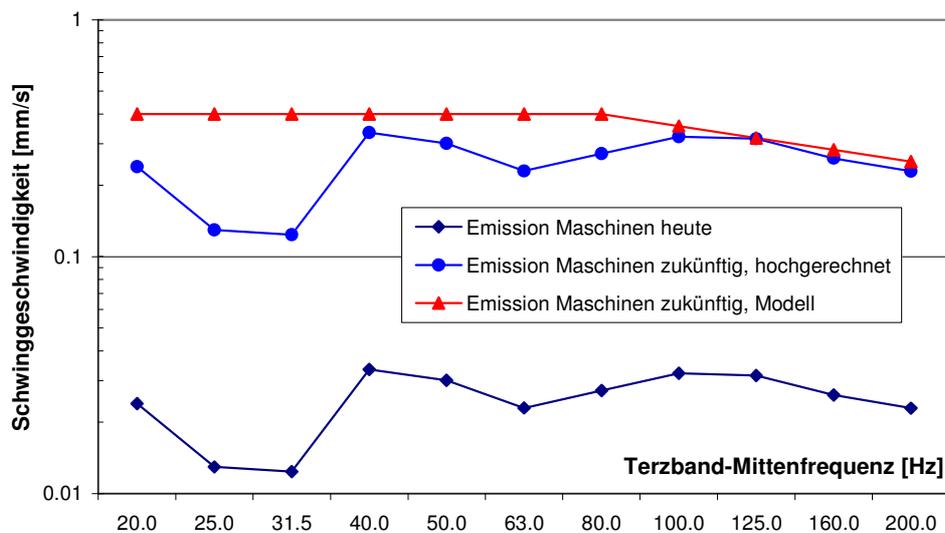


Abb. 2: Emissionsspektren der Turbinen heute zukünftig (Prognose).

II) Wellenübertragung im Erdreich und Einkopplung in Gebäude am Immissionsort: Die messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen für die Wellenausbreitung durch das Erdreich zwischen der Zentrale und den Gebäuden können für die Prognose auf zwei Arten verwendet werden (siehe u.a. Melke, 1992):

A) Die gemessene Übertragungsfunktion $|H_{GH}(f)|$ wird direkt verwendet, wobei sie noch mit dem Verhältnis des Abstands der Messorte (Abstand $R_2 - R_1$ in Abbildung 3) zum minimalen Abstand zwischen Maschinen und Immissionsort skaliert wird.

B) Wenn die gemessenen Übertragungsfunktionen mit der Frequenz zumindest stückweise mehr oder weniger stetig abnehmen, so kann die (gemessene) Übertragungsfunktion mit folgendem analytischen Ansatz angenähert werden:

$$|H_{GH}(f)| = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^n \cdot e^{-\alpha(R_2-R_1)} \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{2\pi \cdot f \cdot D}{c_S} \quad (2)$$

Der Exponent n repräsentiert die sogenannte geometrische Wellendämpfung und beträgt je nach Emissionsquelle und Wellenart zwischen -0.5 und -2. Der Exponent α berücksichtigt den mit der Frequenz zunehmenden Einfluss der Materialdämpfung über das Lehr'sche Dämpfungsmass D und die Scherwellengeschwindigkeit c_S . Die Parameter n und α lassen sich über eine Regressionsanalyse aus den gemessenen Übertragungsfunktionen bestimmen.

III) Wellenausbreitung und Schwingungsübertragung im Gebäude: Die Übertragung von Schwinggeschwindigkeiten v_H im Fundamentbereich auf Schwinggeschwindigkeiten v_D der Decken (bzw. Wände) eines Immissionsraums über dem Fundament wurde als Verstärkungsfaktor V_V eines Einmassenschwingers mit Eigenfrequenzen im Bereich von 25 Hz bis 50 Hz und Lehr'schen Dämpfungsmassen im Bereich von 3 % bis 5 % angenommen (typische Hochbaudecken – und wände).

IV) Erschütterungen im Immissionsraum: Die Prognosewerte der Schwinggeschwindigkeiten $v_D(f)$ auf dem Boden eines Immissionsraums betragen dann:

$$v_D(f) = v_H(f) \times H_{GH}(f) \times V_V(f)$$

Aus dem Effektivwert (Standardabweichung) der Schwinggeschwindigkeit v_D ergibt sich direkt die Schwingstärke KB_F bzw. die Erschütterung K .

V) Schallabstrahlung der Raumhülle: Der Schalldruckpegel $L_p(f)$ des in einen geschlossenen Raum abgestrahlten Körperschalls infolge einer vibrierenden Raumhülle mit der Schwinggeschwindigkeit $v_D(f)$ wurde über den sogenannten Abstrahlgrad $\sigma(f)$ der Raumhülle (Decken und Wände) und die Hallraumeigenschaften bestimmt (Cremer & Heckl, 1996). Dieses Verfahren ist eine der Methoden, die bei der Anwendung der VSE empfohlen sein wird.

Die Prognose der Erschütterung und des abgestrahlten Körperschalls wird im Frequenzbereich von 20 bis 200 Hz vorgenommen.

4 Erschütterungsmessungen im heutigen Zustand

Die im heutigen Betrieb erzeugten Vibrationen der Maschinen liessen sich an den instrumentierten Messorten erfassen. Für die Versuche wurden die Maschinen 1 bis 3 sukzessive zugeschaltet. Abbildung 3 zeigt die Zeitreihe der Dauerüberwachung der während der Versuche gemessenen Schwinggeschwindigkeiten. Interessant ist, dass auch an den Immissionsorten kein grosser Unterschied festzustellen ist, ob nur die nächstliegende Maschine 1 läuft oder weitere Maschinen zugeschaltet sind. Deutlich erkennbar ist, dass eine signifikante Körperschallübertragung erst dann stattfindet, wenn Last gefahren wird (d.h. Strom produziert wird).

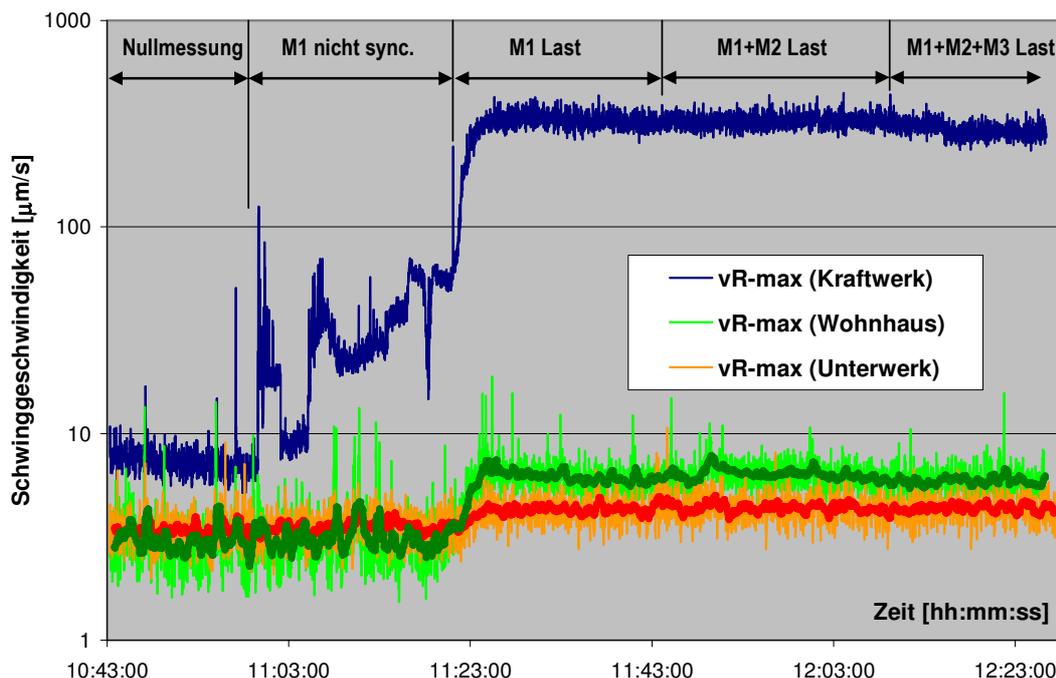


Abb. 3: Dauerüberwachung der Schwinggeschwindigkeiten während den In Situ Messungen im heutigen Betriebszustand.

Aus den Schwinggeschwindigkeitsmessungen konnten die folgenden Grössen ermittelt werden:

(I) Abstandsdämpfung mit dem Exponent n sowie dem Quotienten D/c_s gemäss Gleichung (2). Der experimentell bestimmte Exponent n liegt zwischen -1.6 und -1.3, wobei der grössere Wert anhand der Abstandsabnahme der Standardabweichung der Schwinggeschwindigkeiten und der tiefere Wert aus der Extrapolation der Übertragungsfunktion ermittelt wurde. Die Werte sind plausibel. Abbildung 4 zeigt die Abstandsabnahme der Schwinggeschwindigkeiten.

Der Quotient D/c_s lag zwischen 1.7×10^{-5} und 2.4×10^{-5} , was typische Schwerwellengeschwindigkeiten bei 1'000 m/s und Dämpfungsmasse von 2 % ergibt. Diese Werte sind typisch für Kalkschichten, wie sie die geotechnischen Sondierungen beschreiben: die Rückwärtsrechnung aus den Felskennwerten ergibt Schwerwellengeschwindigkeiten bis 900 m/s. Dies deutet darauf hin, dass bereits die heutige Zentrale nahe oder auf dem Felsen gegründet ist.

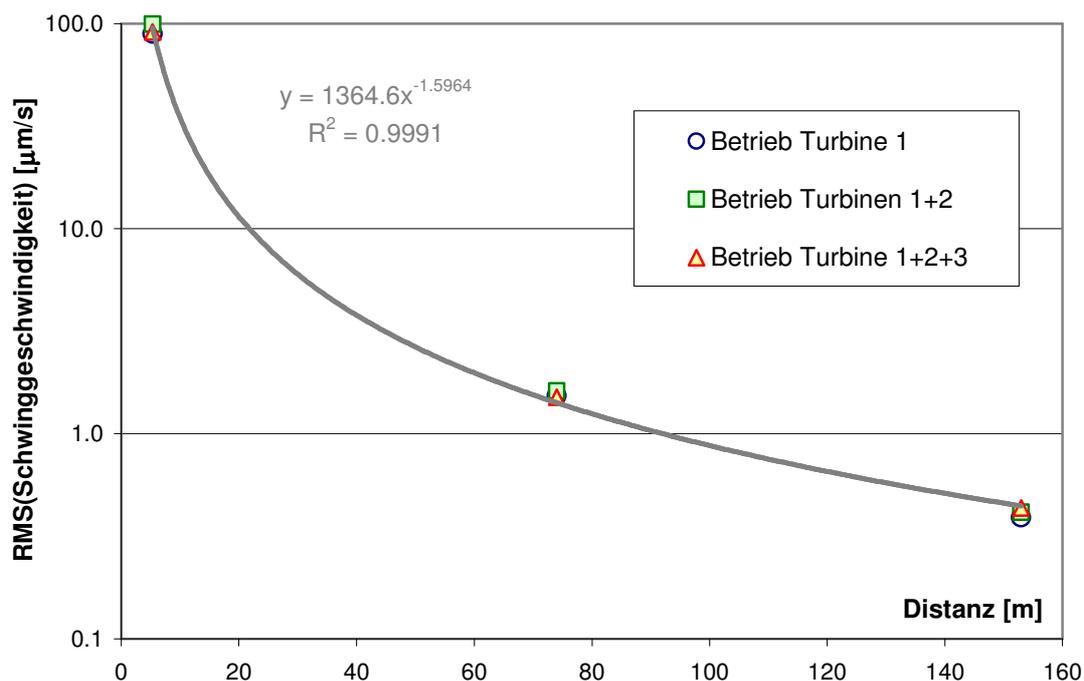


Abb. 4: Abstandsabnahme der Schwingungsgeschwindigkeiten infolge Maschinenbetrieb.

(II) Leistungsspektren der Schwingungsgeschwindigkeiten am Emissions- und an den Immissionsorten. Abbildung 5 zeigt die Leistungsspektren der verschiedenen Betriebszustände mit einer, zwei bzw. drei Maschinen unter Last.

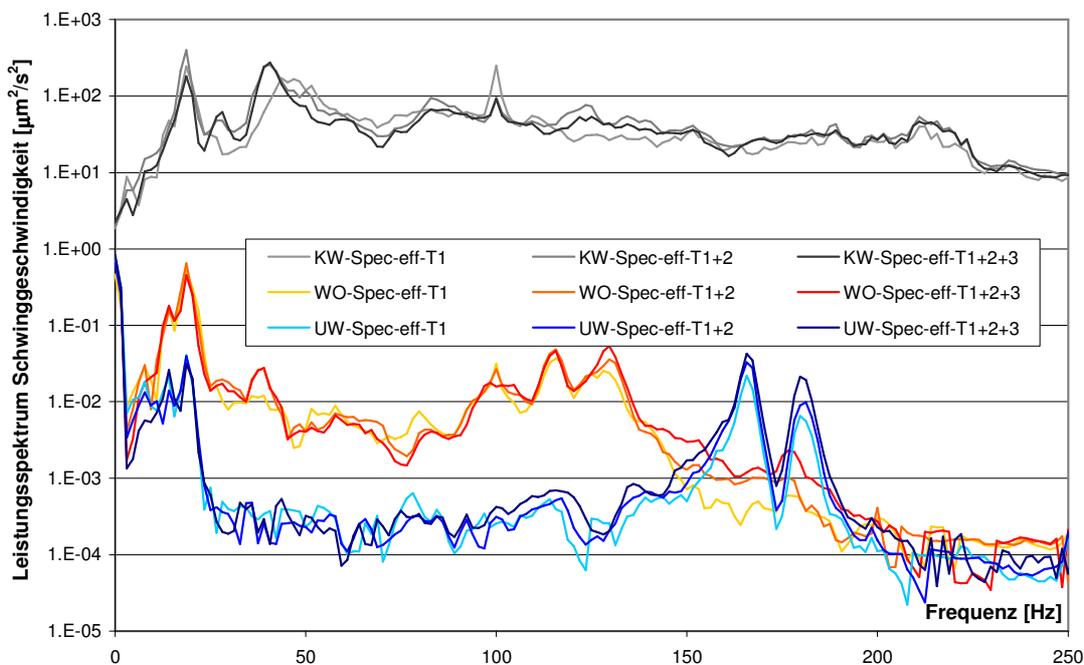


Abb. 5: Spektren der Schwingungsgeschwindigkeiten infolge Maschinenbetrieb (KW = Emissionsort, WO = Wohngebäude, UW = Unterwerk).

(III) **Übertragungsfunktion der Körperschallübertragung** zwischen Zentrale und Immissionsorten. Abbildung 6a zeigt die feinaufgelöste Übertragungsfunktionen im Schmalbandspektrum (Frequenzauflösung 1.56 Hz), in Abbildung 6b ist die Übertragungsfunktionen in den Terzbändern zwischen 20 Hz und 200 Hz so dargestellt, wie sie für die Prognosen verwendet wurden.

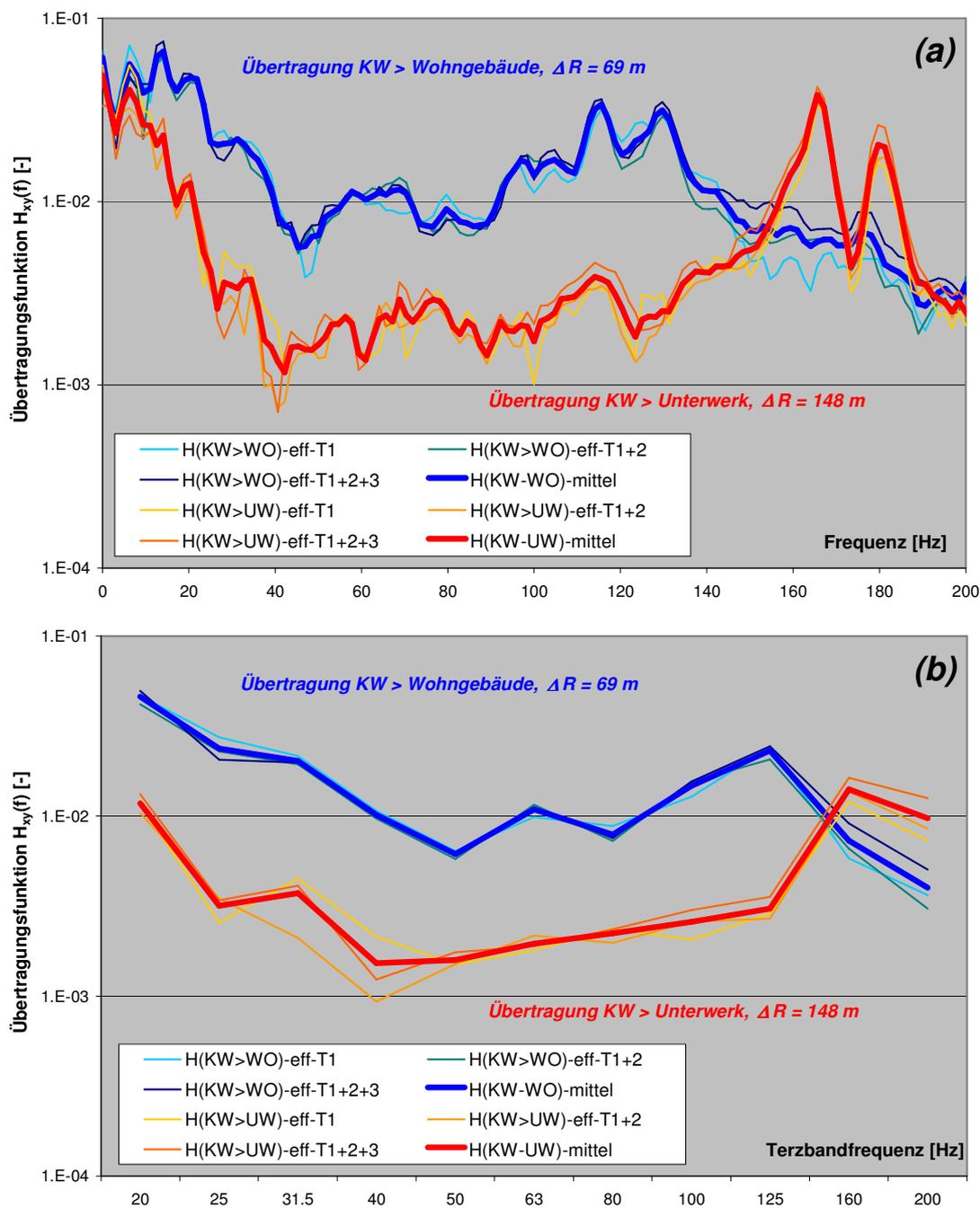


Abb. 6: Messtechnisch ermittelte Übertragungsfunktionen zwischen der Zentrale und den Immissionsorten. (a) im Schmalbandspektrum, (b) Prognosefunktion in den Terzbändern.

Typisch und physikalisch plausibel ist die Abnahme der Übertragung mit zunehmender Frequenz zwischen 10 Hz und ca. 60 – 80 Hz. Die noch immer gute Übertragung oberhalb 100 Hz ist möglicherweise auf Störsignale zurückzuführen, die bei der geringen Signalstärke mitgemessen werden. Es ist davon auszugehen, dass die Übertragung im oberen Frequenzbereich eher überschätzt wird, woraus sich tendenziell konservative/ungünstige Prognosen ergeben.

Aufgrund der Messungen im naheliegenden Wohngebäude an der Erlinsbacherstrasse lässt sich auf eine Hochrechnung auf die heutigen Immissionen infolge des Kraftwerksbetriebs machen.

Erschütterung Keller / UG (gemessen)	Erschütterungen Wohnschose (hochgerechnet, je nach Resonanzverhalten der Bausubstanz)	Abgestrahlter Körperschall (hochgerechnet, je nach Resonanzverhalten der Bausubstanz)
1.68 $\mu\text{m/s}$	2.3 – 6.4 $\mu\text{m/s}$ (K = 0.0023 – 0.0064)	3 – 10 dBA (M < 10)

Wie aus der Tabelle hervorgeht, liegen die heutigen Immissionen bezüglich der Erschütterungen um einen Faktor 10 bis 30 und bezüglich des Abgestrahlten Körperschall um mindesten 20 dB unter den Immissionsrichtwerten. Die gemessenen Werte liegen weit unter der Wahrnehmungsschwelle.

5 Erschütterungen im Bauzustand

5.1 Immissionen

Die Distanz zwischen den Emissionsorten auf der Baustelle und den nächstliegenden Immissionsorten beträgt gut 50 m. Damit sind durch übliche Bauarbeiten wie das Einbringen von Spundbohlen, Abbauarbeiten sowie Ramm- und Bohrarbeiten keine Erschütterungsmissionen zu erwarten, die über den zulässigen Werten der Schwinggeschwindigkeit liegen würden (vgl. Abschnitt 2). Bei Abtragsprengungen ist die Lademenge so anzupassen, dass Erschütterungsmission unterhalb der zulässigen Werte liegen.

5.2 Massnahmen

Damit die Erschütterungsmissionen während der Bauzeit begrenzt und in einem zulässigen Rahmen gehalten werden, wird das folgende Massnahmenkonzept vorgesehen:

Massnahme im Rahmen der Ausschreibungsprojektierung

- Formulierung von Auflagen zur Begrenzung der Erschütterungsmissionen

Vor Baubeginn:

- Messung der heute vorhandenen Erschütterungsmissionen (bereits erfolgt)
- Aufnahme von Rissprotokollen
- Information der Anwohner

Während der Bauarbeiten

- Erschütterungsüberwachung bei nächstliegenden Immissionsorten
- Massnahmenplanung zur Begrenzung der Immissionen
- Anlaufstelle für allfällige Beschwerden

Nach den Bauarbeiten bzw. im Betrieb

- Messung der Erschütterungsmissionen der neuen Zentrale
- Rissprotokoll nach Bauende

6 Erschütterungsprognose Kraftwerksneubau

Die Prognosen der maximal zu erwartenden Erschütterungen und des abgestrahlten Körperschalls nach der Kraftwerkserneuerung wurden für ein Wohngebäude im Mindestabstand von 70 m vom Emissionsort entsprechend dem Vorgehen in Abschnitt 3 ermittelt. Dabei wurden die zwei genannten, sehr ungünstigen Emissionsspektren angesetzt.

Für die Übertragung wurden einerseits die beiden messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen verwendet, wobei diese auf den Abstand des Prognoseorts (75 m) skaliert wurden. Andererseits wurde die analytische Übertragungsfunktion gemäss Gleichung (2) mit den messtechnisch ermittelten Koeffizienten n und D/c_s verwendet. Der Wert D/c_s wurde gegenüber der ermittelten Grösse noch halbiert, um die vollständige Lagerung der Maschinenblöcke auf dem Felsuntergrund abzubilden.

Die Immissionen wurden jeweils für zwei Typen der Gebäuderesonanz ermittelt. Die variierten Parameter sind nachfolgend zusammengestellt:

Emission

E1 = um einen Faktor 10 verstärkte heutige Emission

E2 = konstant hohe Tieftonteile, so dass ISO 10'816-3 noch eingehalten ist.

Übertragung

U1 = skalierte gemessene Übertragung Zentrale – Wohngebäude und nach Gl. 2

U2 = skalierte gemessene Übertragung Zentrale – Unterwerk und nach Gl. 2

Gebäuderesonanz

R1 = Eigenfrequenz 25 Hz, Dämpfung 3 %

R2 = Eigenfrequenz 50 Hz, Dämpfung 5 %

Die Prognoseresultate sind nachfolgend tabellarisch zusammengestellt. Gleichzeitig wird beurteilt, ob die Prognosewerte die Anhaltswerte nach DIN 4150-2 und die Planungsrichtwerte nach BEKS bzw. dem Entwurf VSE einhalten (vgl. Abschnitt 2). Die Genauigkeit der Prognose darf – wie dies auch der Schwankungsbereich zeigt - als auf i.a. besser als einen Faktor 2 bzw. 3 dB angenommen werden. Zwei Beispiele von Berechnungstabellen sind im Anhang gegeben.

Emis- sion	Übertra- gung	Gebäude- resonanz	Erschütte- rung [mm/s]	VSE / BEKS (Nacht)	Körper- schall [dBA]	VSE / BEKS (Nacht)
E1	U1	R1	0.042 – 0.074	knapp	14.9 – 15.1	ja
E1	U1	R2	0.021 – 0.048	ja	23.1 – 25.0	ja
E2	U1	R1	0.094 – 0.143	nein	16.4 – 17.0	ja
E2	U1	R2	0.031 – 0.063	ja	24.2 – 27.3	knapp
E1	U2	R1	0.042 – 0.048	ja	15.1 – 20.2	ja
E1	U2	R2	0.013 – 0.048	ja	25.0 – 27.0	knapp
E2	U2	R1	0.083 – 0.094	nein	17.0 – 20.9	ja
E2	U2	R2	0.02 – 0.068	ja	27.3 – 27.8	knapp

Wie aus der Tabelle hervorgeht, können die zulässigen Immissionsgrenzwerte i.a. gerade eingehalten werden, wenn die zukünftige Emission gegenüber heute zwar stark verstärkt ist, in der Frequenzzusammensetzung aber vergleichbar bleibt. Sollte die zukünftige Emission aber zudem noch stark verstärkte tieffrequente Signalanteile haben und sich die neuen Maschinen bezüglich Laufruhe an der oberen Grenze des für Neuanlagen noch Zulässigen bewegen, so können Überschreitungen der Planungsrichtwerte nicht ausgeschlossen werden.

7 Massnahmen

Um eine sichere Einhaltung der Planungsrichtwerte der Erschütterungen und des abgestrahlten Körperschalls auch für ungünstige Annahmen der betriebsbedingten Körperschallemission und -übertragung nach Kraftwerkserneuerung zu gewährleisten, sind folgende Massnahmen möglich:

Massnahmen emissionsseitig

Vorgabe von erhöhten Anforderungen an die Laufruhe der Maschinen. Diese Anforderung kann in der Ausschreibung der Maschinen verankert werden. Es darf im Übrigen davon ausgegangen werden, dass neue Maschinen i.a. ruhiger laufen, als für die Prognosen in Abschnitt 6 angenommen wurden.

Massnahmen bei der Übertragung

Einbau einer Dämmschicht im Ausbreitungsweg des Körperschalls. Dies kann z.B. durch die elastische Lagerung der Maschinenblöcke geschehen. Im Rahmen des Bauprojekts wurde die Machbarkeit überprüft und es wurden Dämmmaterialien vorevaluiert. Es zeigt sich dass bei einer mittleren Pressung von 0.15 N/mm^2 eine Lagerung auf Sylomer SR220 möglich ist und gute Dämmwirkung zeigt. Mit dieser Massnahme werden die Erschütterungsimmissionen auch bei ungünstiger Abstrahlung und Übertragung gerade unter den Immissionsgrenzwert gebracht und der abgestrahlte Körperschall wird nahezu vollständig gedämpft (Schalldruckpegel $< 5\text{dBA}$).

Zu erwähnen ist, dass die elastische Lagerung der Maschinenblöcke bei Anlagen dieser Grösse neu ist. Planung, Auslegung und der Realisierung der Massnahme verlangen folglich entsprechende Sorgfalt und Fachkenntnis. So kann z.B. eine elastische Lagerung zu einer leichten Verstärkung tieffrequenter Vibrationen führen, was sich aber (a) durch eine angepasste Auslegung und eine geeigneten Verlegeplan der Dämmmaterialien verhindert lässt und was (b) die Dämmwirkung im akustisch wahrnehmbaren Bereich nicht zwingend beeinträchtigen muss.

Es ist deshalb vorgesehen, die Notwendigkeit und Auslegung der Dämmungsmassnahmen im Rahmen der Ausführungsprojektierung noch weiter zu vertiefen. Dazu sind v.a. Emissionsspektren bei vergleichbarer Maschinen und Anlagenkonfigurationen zu erheben bzw. von den Anbietern der Maschinengruppen zu verlangen. Weiter sind gegebenenfalls die Immissionsprognose unter Berücksichtigung des spezifischen Schwingungsverhaltens von Immissionsorten zu verfeinern.

8 Schlussbemerkung und weiteres Vorgehen

Mit den vorliegenden Untersuchungen wurde dargelegt, wie mit Erschütterungs-
immissionen im Bauzustand und im Betrieb des Kraftwerksneubaus umgegangen
werden kann und welche Immissionen zu erwarten sind. Dabei zeigt sich, dass
die Erschütterungsimmissionen im Betrieb der neuen Maschinenblöcke nähere
Beachtung verdienen: Unter der Annahme von sehr ungünstigen Parameter für
die Körperschallemission der Maschinenblöcke und die Übertragung zu den Im-
missionsorten, werden die nach heutigem Stand einzuhaltenden Immissions-
grenzwerte teilweise gerade knapp erreicht.

Es wurde im weiteren gezeigt, mit welchen Massnahmen die Erschütterungs-
immissionen reduziert werden können. Im Bauprojekt wird eine Dämmung mittels
vollständiger elastischer Lagerung der Maschinenblöcke vorgesehen. Die Detail-
projektierung der effektiv notwendigen Immissionsschutzmassnahmen gegen Er-
schütterungen und abgestrahlten Körperschall wird vor der Realisierung im Zuge
der Ausführungsprojektierung dann vorgenommen, wenn die Maschinengruppen
durch die Beschaffung klar bestimmt sind.

Ingenieurgesellschaft KW Aarau

IUB Engineering AG, Bern
IM Maggia Engineering AG, Locarno
ANL AG Natur und Landschaft, Aarau

Bern, Locarno, Aarau, den 23. Oktober 2013

Literaturverzeichnis

BEKS (1999). Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen. BUWAL / BAV, 20.12.1999.

Bendat, J.S. & Piersol, A.G. (1986) Random Data – Analysis and Measurement Procedures. (2nd Ed.), John Wiley & Sons, New York.

Billeter (2004). Erschütterungsfragen im Bau und Betrieb. Proc. alpTransit Tagung 2004 Interlaken, SIA Dokumentation D 0202 Bd. 3, SIA-FGU, pp. 93 - 102.

Billeter, P & Berger, W. (2001). Die Wirksamkeit von Unterschottermatten im eingebauten Zustand. Proc. 4. MR2002 Symposium, EMPA Dübendorf.

DIN 4150-2 (1999) Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Juni 1999.

Cremer, L. & Heckl, M. (1996). Körperschall. (2nd Ed.) Springer, Berlin.

DIN/ISO 10'816 Teil 3 (1998), Mechanische Schwingungen – Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen, Industrielle Maschinen mit Nennleistungen über 15 kW.

Melke, J. (1992). Durchführung von Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschalleinwirkungen. LIS-Bericht Nr. 107. Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen.

Tabelle A1: Beispiel Prognose E1 / U1 / R1.

Berechnung von Schwingungsübertragung sowie Schallpegel von abgestrahltem Körperschall

Immissionsort: Haus Wohngebäude Erlinsbacherstrasse

Übertragungsfunktion Erdreich	H=f(D,cS): Ja	c-Scher = 1000.00	D-Boden = 0.010	alpha = 0.000063
Dämmung:	-	n(R(R0)) -1.3	R = 75.00	R0 = 4.5
Verstärkungsfaktor Gebäude	Eigenfreq. f0 = 25	Dämpfung D-Geb 0.03	Korr. n(R/R01) bei t -1.3	R0-1 = 74

Raumeigenschaften

Abstrahlgrad: $\sigma(f) =$	1.24	Grenzfrequenz: fgr [Hz]	80.00
$\sigma = F(f)$ (ja/nein)	ja	(Achtung Abstrahlgrad dimensionsbehaftet [Pa/(mm/s)])	

a) Übertragung mit n(R/R0) und alpha

Frequenz Terzband-Mitte [Hz] fi	Schwinggeschw. Emission Bankett [mm/s] v(E)-rms	Übertragungsfkt. Boden H(f) [-] H(f)-B	Schwinggeschw. Fundamentbereich [mm/s] v(F)-rms	Verstärkungsfaktor Gebäude [-] VR	Schwinggeschw. je Band, Raum [mm/s] v-rms(fi)	Abstrahlgrad je Frequenz [Pa/(mm/s)] $\sigma(f)$	Schalldruckpegel je Band [dB] Lp(fi)	Schalldruckpegel kumuliert bis fi [dB] Lp-eq(0-fi)	A-Filter je Band [dB] ΔLA	Schalldruckpegel je Band [dBA] LpA(fi)	Schalldruckpegel kumuliert bis fi [dBA] LeqA	
20.00	0.2398	0.0236	0.0057	5.8233	0.0330	0.620	60.19	60.19	-70.40	0.00	0.00	
25.00	0.1294	0.0231	0.0030	7.7560	0.0232	0.693	58.10	62.28	-63.40	0.00	0.00	
31.50	0.1238	0.0224	0.0028	2.4730	0.0069	0.778	48.54	62.46	-56.70	0.00	0.00	
40.00	0.3344	0.0216	0.0072	1.0298	0.0074	0.877	50.27	62.71	-50.50	0.00	0.00	
50.00	0.3007	0.0207	0.0062	0.6580	0.0041	0.980	46.04	62.81	-44.70	1.34	1.34	
63.00	0.2299	0.0195	0.0045	0.4627	0.0021	1.100	41.15	62.84	-39.40	1.75	4.56	
80.00	0.2722	0.0181	0.0049	0.3396	0.0017	1.240	40.32	62.86	-34.60	5.72	8.19	
100.00	0.3216	0.0166	0.0053	0.2614	0.0014	1.240	38.72	62.88	-30.20	8.52	11.37	
125.00	0.3150	0.0148	0.0047	0.2041	0.0010	1.240	35.44	62.88	-26.20	9.24	13.44	
160.00	0.2606	0.0127	0.0033	0.1569	0.0005	1.240	30.16	62.89	-22.50	7.66	14.46	
200.00	0.2295	0.0106	0.0024	0.1244	0.0003	1.240	25.50	62.89	-19.10	6.40	15.09	
Varianz Emission	0.861	Varianz Fundation	0.016	Varianz im Raum	0.042						Berechnung mit Abstrahlgrad	15.09
				KBF-max	0.042							

b) Mit fester Übertragung gemäss Messung

Frequenz Terzband-Mitte [Hz] fi	Schwinggeschw. Emission Bankett [mm/s] v(E)-rms	Übertragungsfkt. Boden H(f) [-] H18(f)	Schwinggeschw. Fundamentbereich [mm/s] v(F)-rms	Verstärkungsfaktor Gebäude [-] VR	Schwinggeschw. je Band, Raum [mm/s] v-rms(fi)	Abstrahlgrad je Frequenz [-] $\sigma(f)$	Schalldruckpegel je Band [dB] Lp(fi)	Schalldruckpegel kumuliert bis fi [dB] Lp-eq(0-fi)	A-Filter je Band [dB] ΔLA	Schalldruckpegel je Band [dBA] LpA(fi)	Schalldruckpegel kumuliert bis fi [dBA] LeqA	
20.00	0.2398	0.0488	0.0117	5.8233	0.0682	0.620	66.50	66.50	-70.40	0.00	0.00	
25.00	0.1294	0.0269	0.0035	7.7560	0.0270	0.693	59.42	67.28	-63.40	0.00	0.00	
31.50	0.1238	0.0212	0.0026	2.4730	0.0065	0.778	48.04	67.33	-56.70	0.00	0.00	
40.00	0.3344	0.0105	0.0035	1.0298	0.0036	0.877	44.03	67.35	-50.50	0.00	0.00	
50.00	0.3007	0.0063	0.0019	0.6580	0.0012	0.980	35.70	67.35	-44.70	0.00	0.00	
63.00	0.2299	0.0113	0.0026	0.4627	0.0012	1.100	36.44	67.36	-39.40	0.00	0.00	
80.00	0.2722	0.0086	0.0023	0.3396	0.0008	1.240	33.89	67.36	-34.60	0.00	0.00	
100.00	0.3216	0.0153	0.0049	0.2614	0.0013	1.240	38.04	67.36	-30.20	7.84	7.84	
125.00	0.3150	0.0240	0.0075	0.2041	0.0015	1.240	39.60	67.37	-26.20	13.40	14.47	
160.00	0.2606	0.0090	0.0023	0.1569	0.0004	1.240	27.12	67.37	-22.50	4.62	14.89	
200.00	0.2295	0.0049	0.0011	0.1244	0.0001	1.240	18.85	67.37	-19.10	0.00	14.89	
Varianz Emission	0.861	Varianz Fundation	0.017	Varianz im Raum	0.074						Berechnung mit Abstrahlgrad	14.89
				KBF-max	0.074							

Tabelle A2: Beispiel Prognose E2 / U2 / R2.

Berechnung von Schwingungsübertragung sowie Schallpegel von abgestrahltem Körperschall

Immissionsort: Haus Wohngebäude Erlinsbacherstrasse

Übertragungsfunktion Erdreich	H=f(D,cS): Ja	c-Scher = 1000.00	D-Boden = 0.010	alpha = 0.000063
Dämmung:	-	n(R/R0) -1.3	R = 75.00	R0 = 4.5
Verstärkungsfaktor Gebäude	Eigenfreq. f0 = 50	Dämpfung D-Geb 0.05	Korr. n(R/R01) bei t -1.3	R0-1 = 153

Raumeigenschaften

Abstrahlgrad: $\sigma(f) =$	1.24	Grenzfrequenz: fgr [Hz]	80.00
$\sigma = F(fi)$ (ja/nein)	ja	(Achtung Abstrahlgrad dimensionsbehaftet [Pa/(mm/s)])	

a) Übertragung mit n(R/R0) und alpha

Frequenz Terzband-Mitte [Hz] fi	Schwinggeschw. Emission Bankett [mm/s] v(E)-rms	Übertragungsfkt. Boden H(f) [-] H(f)-B	Schwinggeschw. Fundamentbereich [mm/s] v(F)-rms	Verstärkungsfaktor Gebäude [-] VR	Schwinggeschw. je Band, Raum [mm/s] v-rms(fi)	Abstrahlgrad je Frequenz [Pa/(mm/s)] $\sigma(f)$	Schalldruckpegel je Band [dB] Lp(fi)	Schalldruckpegel kumuliert bis fi [dB] Lp-eq(0-fi)	A-Filter je Band [dB] ΔLA	Schalldruckpegel je Band [dBA] LpA(fi)	Schalldruckpegel kumuliert bis fi [dBA] LeqA	
20.00	0.4000	0.0236	0.0094	0.5090	0.0048	0.620	43.47	43.47	-70.40	0.00	0.00	
25.00	0.4000	0.0231	0.0092	0.7319	0.0068	0.693	47.40	48.87	-63.40	0.00	0.00	
31.50	0.4000	0.0224	0.0090	1.2434	0.0112	0.778	52.75	54.24	-56.70	0.00	0.00	
40.00	0.4000	0.0216	0.0086	4.2915	0.0371	0.877	64.22	64.64	-50.50	13.72	13.72	
50.00	0.4000	0.0207	0.0083	5.4471	0.0450	0.980	66.88	68.91	-44.70	22.18	22.76	
63.00	0.4000	0.0195	0.0078	2.3897	0.0187	1.100	60.23	69.46	-39.40	20.83	24.91	
80.00	0.4000	0.0181	0.0072	1.0256	0.0074	1.240	53.26	69.57	-34.60	18.66	25.83	
100.00	0.3564	0.0166	0.0059	0.6570	0.0039	1.240	47.62	69.59	-30.20	17.42	26.42	
125.00	0.3175	0.0148	0.0047	0.4675	0.0022	1.240	42.70	69.60	-26.20	16.50	26.84	
160.00	0.2828	0.0127	0.0036	0.3395	0.0012	1.240	37.57	69.61	-22.50	15.07	27.12	
200.00	0.2520	0.0106	0.0027	0.2613	0.0007	1.240	32.76	69.61	-19.10	13.66	27.31	
Varianz Emission	1.221	Varianz Fundation	0.024	Varianz im Raum	0.063						Berechnung mit Abstrahlgrad	27.31
				KBF-max	0.063							

b) Mit fester Übertragung gemäss Messung

Frequenz Terzband-Mitte [Hz] fi	Schwinggeschw. Emission Bankett [mm/s] v(E)-rms	Übertragungsfkt. Boden H(f) [-] H18(f)	Schwinggeschw. Fundamentbereich [mm/s] v(F)-rms	Verstärkungsfaktor Gebäude [-] VR	Schwinggeschw. je Band, Raum [mm/s] v-rms(fi)	Abstrahlgrad je Frequenz [-] $\sigma(f)$	Schalldruckpegel je Band [dB] Lp(fi)	Schalldruckpegel kumuliert bis fi [dB] Lp-eq(0-fi)	A-Filter je Band [dB] ΔLA	Schalldruckpegel je Band [dBA] LpA(fi)	Schalldruckpegel kumuliert bis fi [dBA] LeqA	
20.00	0.4000	0.0334	0.0134	0.5090	0.0068	0.620	46.48	46.48	-70.40	0.00	0.00	
25.00	0.4000	0.0088	0.0035	0.7319	0.0026	0.693	39.00	47.19	-63.40	0.00	0.00	
31.50	0.4000	0.0113	0.0045	1.2434	0.0056	0.778	46.83	50.03	-56.70	0.00	0.00	
40.00	0.4000	0.0054	0.0022	4.2915	0.0093	0.877	52.19	54.25	-50.50	1.69	1.69	
50.00	0.4000	0.0044	0.0018	5.4471	0.0096	0.980	53.48	56.89	-44.70	8.78	9.55	
63.00	0.4000	0.0055	0.0022	2.3897	0.0052	1.100	49.18	57.57	-39.40	9.78	12.68	
80.00	0.4000	0.0060	0.0024	1.0256	0.0024	1.240	43.63	57.74	-34.60	9.03	14.24	
100.00	0.3564	0.0076	0.0027	0.6570	0.0018	1.240	40.84	57.83	-30.20	10.64	15.81	
125.00	0.3175	0.0090	0.0029	0.4675	0.0013	1.240	38.35	57.88	-26.20	12.15	17.36	
160.00	0.2828	0.0412	0.0117	0.3395	0.0040	1.240	47.79	58.28	-22.50	25.29	25.94	
200.00	0.2520	0.0318	0.0080	0.2613	0.0021	1.240	42.26	58.39	-19.10	23.16	27.78	
Varianz Emission	1.221	Varianz Fundation	0.021	Varianz im Raum	0.018						Berechnung mit Abstrahlgrad	27.78
				KBF-max	0.018							