

Projekt Schwingungsmessung Ilanz II

PSEL Projekt Nr. 95-G98g / 8. Nov. 95

3. Bericht: Auswertungen

Autor: Bruno Fricker

Datum: 11. April 1996

Ref: WW96FRI.033

Verteiler

seitens NOK:

seitens PSEL:

Referenzdokumente:

1. Protokoll WW95FRI.057 vom 27. Nov. 1995
2. Protokoll WW96FRI.002 vom 20.12.95 und 8./9.1.96

3.1 Inhaltsverzeichnis

3.1 Inhaltsverzeichnis	2
3.2 Einleitung	3
3.3 Übersicht über die Messorte	4
3.3.1 Tabelle der Montagen vs. Nummer der Messungen und Besonderheiten	7
3.4 Diskussion der Amplitudenwerte	7
3.4.1 Die EXCEL-Funktion STABWN	7
3.4.2 Diskussion der Standardabweichungen	7
3.4.3 Die Hallenwandaustritte der Düsenrohre	9
3.4.4 Vibrationen an den geschwungenen Rohrbögen zu den Peltierturbinen	10
3.4.5 Diskussion der Rohrvibrationsmessungen im Schieberrau	11
3.4.6 Die Vibrationen am Generator-Lagerbock	12
3.4.7 Schwingung des Hallendachs	12
3.4.8 Die Schwingung der oberen Aussenwand im Block 1	12
3.4.9 Die Schwingung der oberen Aussenwand im Block 0	13
3.4.10 Die Schwingung der oberen Aussenwand im Block 2	13
3.4.11 Die Schwingung der unteren Aussenwand im Block 1	13
3.5 Diskussion interessanter Spektren und Kohärenzen	14
3.5.1 Definitionen	14
3.5.2 Kohärenz und Baudynamik	14
3.5.3 Diskussion der Auswertungen mit Amplitudenspektren und Kohärenz	15
3.5.3.1 Blatt 1 und 2, Lauf 4, Bo 30MW:	15
3.5.3.2 Blatt 3, Lauf 7, AuoBuo 30MW	16
3.5.3.3 Blatt 4, Lauf 14, AuoBuo 50MW	16
3.5.3.4 Blatt 5, Lauf 21, AuoBuo 60MW	17
3.5.3.5 Blatt 6, Lauf 18, Bo 60MW	18
3.5.3.6 Blatt 7+8, Lauf 19, Auo 60MW	18
3.5.3.7 Blatt 9-10, Lauf 20, Buo 60MW	19
3.5.3.8 Blatt 11-12, Lauf 28, AuoBuo 60MW	19
3.5.3.9 Blatt 12-13, Lauf 24, AuoBuo 30MW	19
3.5.3.10 Blatt 14, Lauf 21, AuoBuo 60MW	20
3.5.3.11 Blatt 15-17, Lauf 22, AuoBuo 50MW	20
3.5.3.12 Schlussbetrachtung	22
3.6 Diskussion der Luftschall-Sonagramme	23
3.6.1 Messungen vor der oberen Aussenwand (bergseitig)	23
3.6.2 Messungen vor der unteren Aussenwand (bergseitig)	24
3.6.3 Messungen auf dem Fussweg zum Wohnhaus	24
3.6.4 Messungen im Kugelschieberraum	25
3.6.5 Messungen entlang der Strasse	25
3.7 Empfohlene Massnahmen	25
3.8 Anhang I: Graphen mit Zeitsignalen	26
3.9 Anhang II: Graphen mit Spektren und Kohärenzen	26
3.10 Anhang III: Graphen mit Sonagrammen	26

3.2 Einleitung

In diesem 3. Bericht werden die Auswerteresultate des umfangreichen Datenmaterials präsentiert und interpretiert und mögliche Massnahmen vorgeschlagen. Es handelt sich um die am 9. Januar 1996 abgeschlossene Messkampagne. Eine wichtige Massnahme (Düsenkorrektur) wurde vorgenommen im Anschluss an die hier ausgewertete Messkampagne.

Der Bericht ist in die insgesamt 33 Messläufe gegliedert (vgl. 2.8 Messfahrplan im 2. Protokoll), die sich durch unterschiedliche Leistungen N {30, 50, 60 MW} und durch unterschiedliche Gruppierung der aktiven Düsen {A1, A2, B1, B2} unterscheiden. Diese Leistungszahlen beziehen sich immer auf den Zustand von 4 aktiven Düsen. Sind bei 50 MW z.B. nur 2 Düsen aktiv, beträgt die effektive Leistung nur 25 MW.

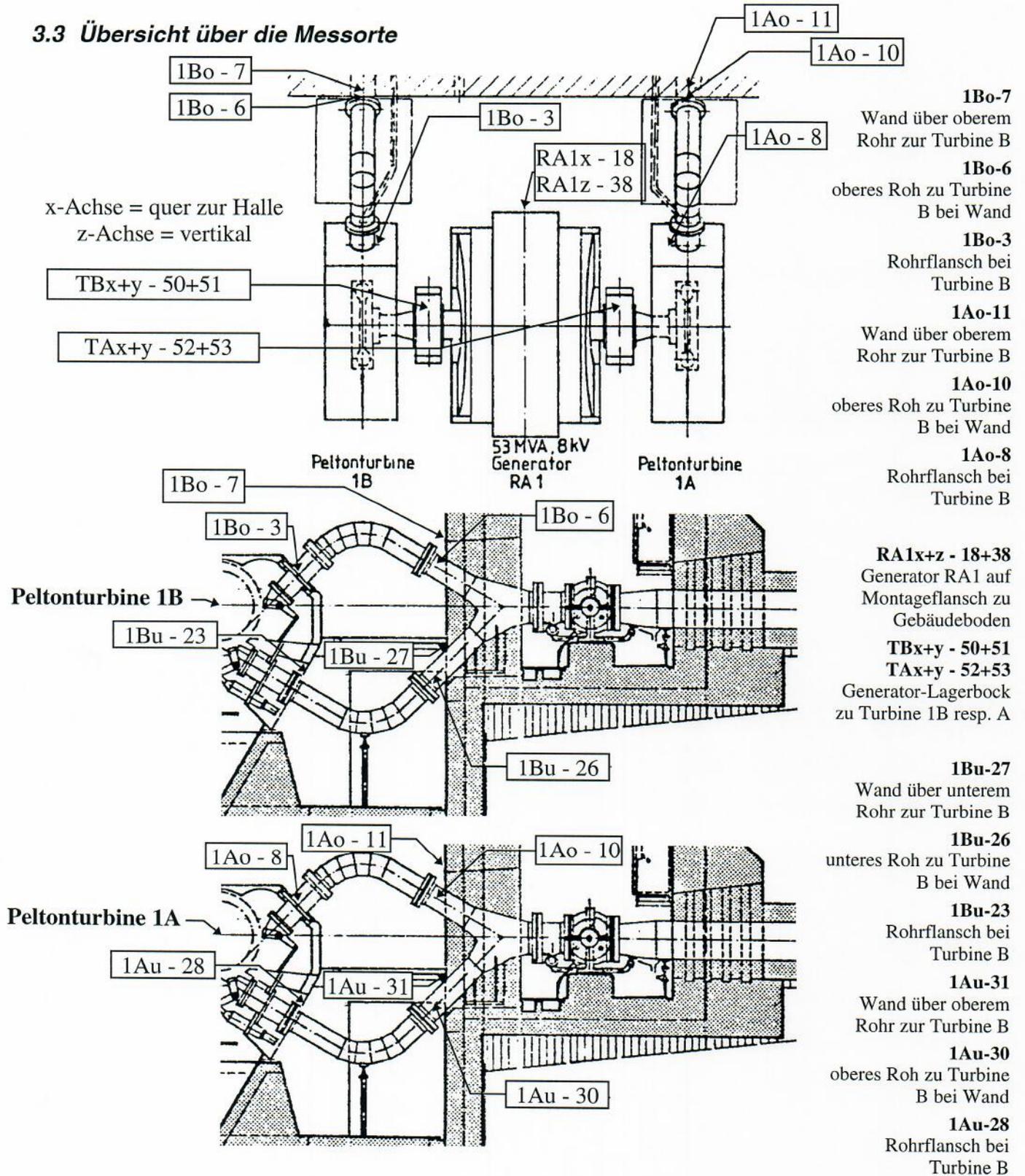
Wenn d die Anzahl aktiver Düsen bedeutet, lässt sich die effektive Leistung N_{eff} aus diesen beiden Parameter wie folgt ermitteln:

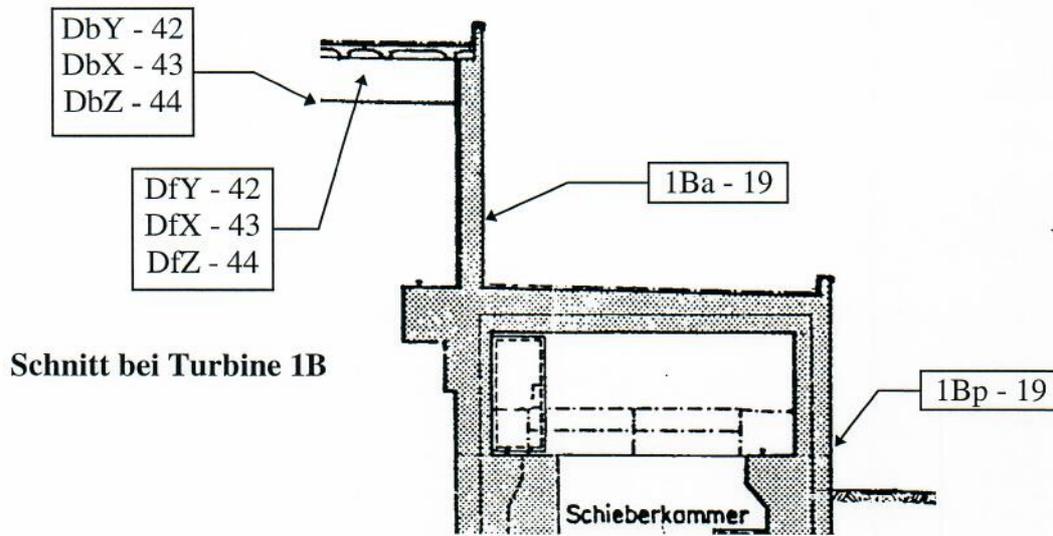
$$N_{\text{eff}} = N/4 \cdot d \quad (1)$$

Schliesslich mussten - da nur 16 Kanäle total zur Verfügung standen - Beschleunigungssensoren umplaziert und Messkonfigurationen wiederholt werden.

Für die Auswertung ist es entscheidend „vor lauter Bäumen den Wald“ nicht aus den Augen zu verlieren. Es ist deshalb besonders wichtig, sich stets die effektiven Messorte vor Augen zu halten. Weil dies für eine Gesamtschau so wesentlich ist, folgt im nächsten Abschnitt nochmals eine übersichtliche Darstellung aller Messort-Nummern.

3.3 Übersicht über die Messorte





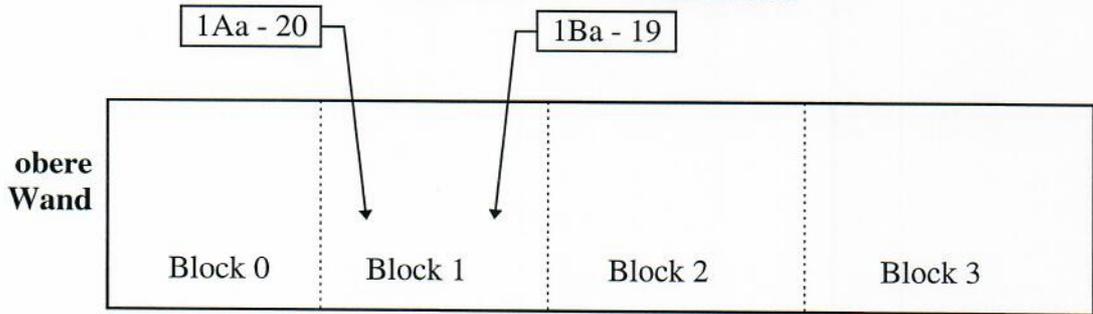
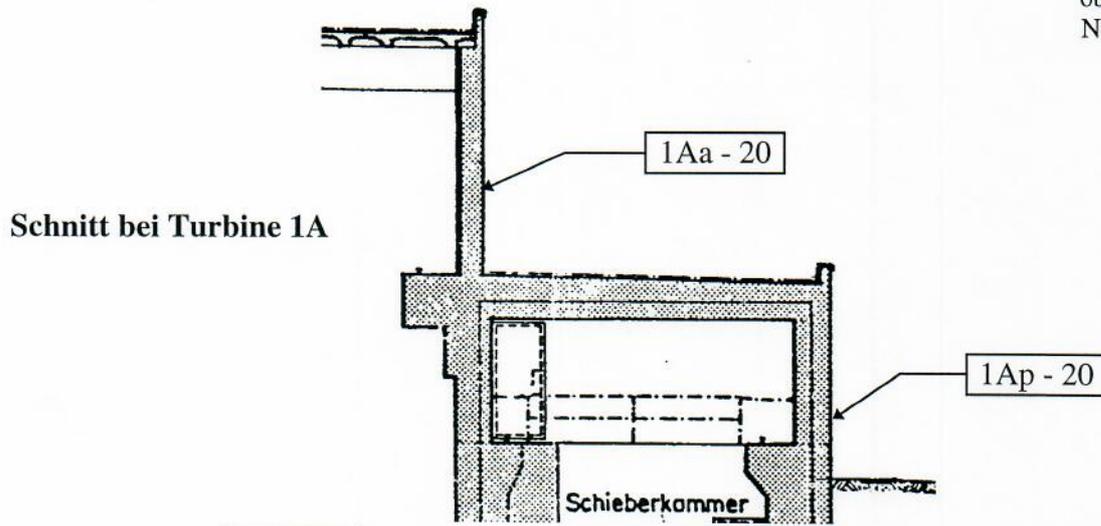
1DbY,X,Z-42,43,44
 3-dimensionale
 Vibration am Balken für
 Hallendach über
 Generator RA1

1DfY,X,Z-42,43,44
 3-dimensionale
 Vibration an der Füllung
 für Hallendach über
 Generator RA1 B

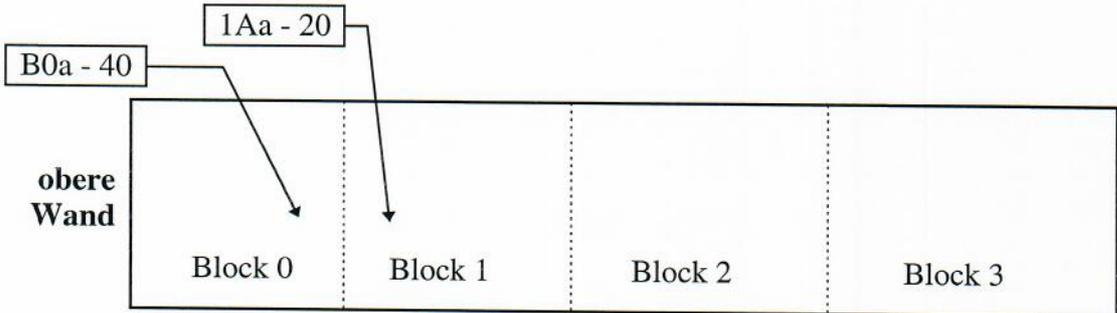
1Ba-19 / 1Aa - 20
 obere Aussenwand
 im Block 1

1Bp-19 / 1Ap - 20
 untere Aussenwand
 im Block 1

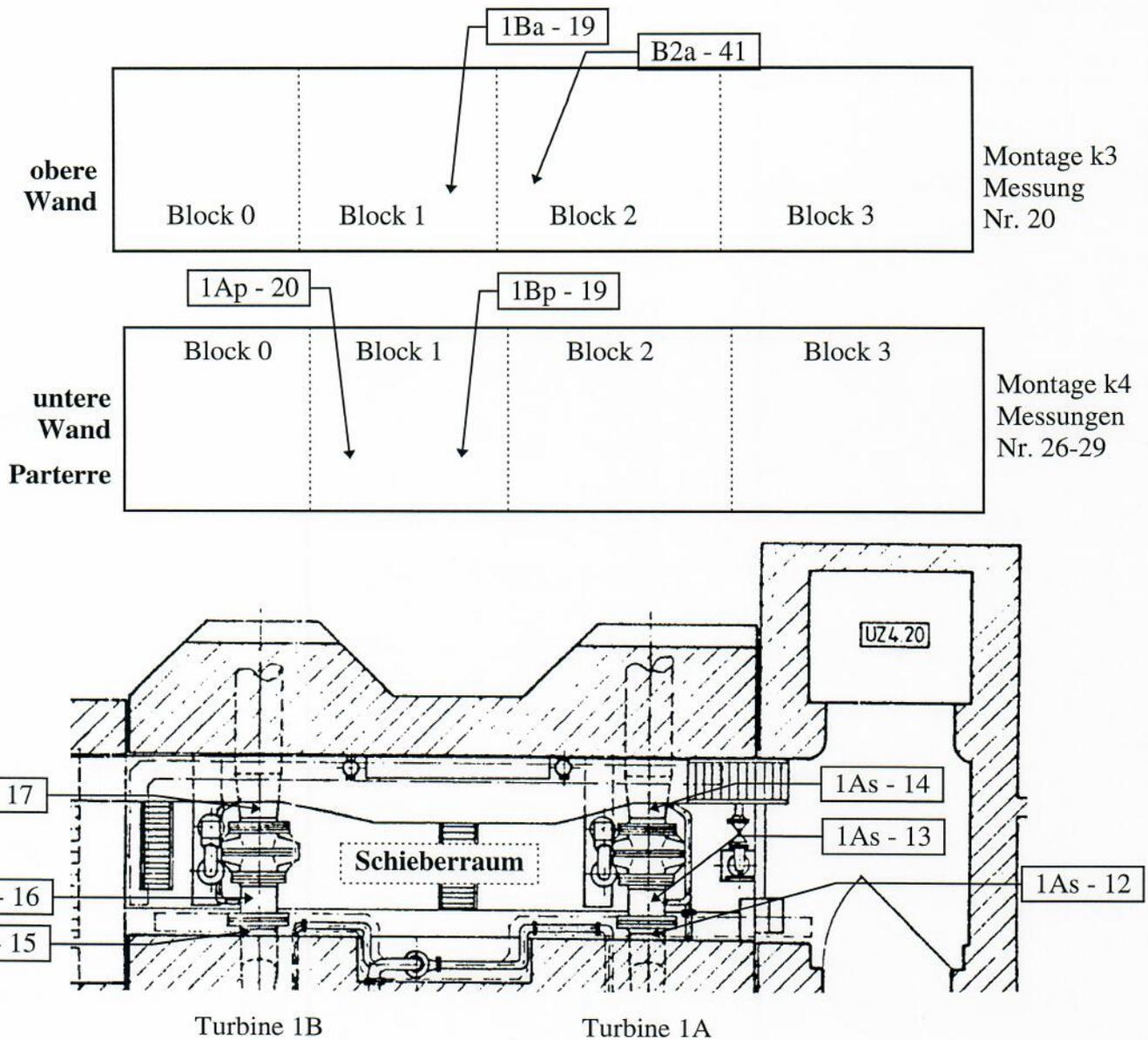
B0a - 40 / B2a - 42
 obere Aussenwand im
 Neben-Block 0 resp 2



Montage k1
 Messungen
 Nr. 1-18, 21,
 22-24, 30-33



Montage k2
 Messung
 Nr. 19



Die Messorte sind in den oben abgebildeten Skizzen deutlich eingetragen und in den rechts stehenden Legenden kommentiert. Im Schieberraum sind die Messorte am Druckrohr maschinenseitig (15 resp. 12), am Druckrohr zwischen Dilatation und Schieber (16 und 13) sowie am Druckrohr bergeseitig nach Wandaustritt (17 resp. 14). Es folgt eine Auflistung der bei den Graphen im Anhang I erwähnten Montagen und die zugehörige Nummern der Messungen:

3.3.1 Tabelle der Montagen vs. Nummer der Messungen und Besonderheiten

Montage	Messungen Nr.	Besonderheit	wo?
k1	1 - 18, 21, 30		
k2	19	Messort 40 im Block 0, statt 19	Aussenwand oben
k3	20	Messort 41 im Block 2, statt 20	Aussenwand oben
k4	26-29	Kanal 19, 20 auf Aussenwand Parterre verschieben	Aussenwand unten
k5	22	Kanal 11-13 an Hallendachbalken	innen
k6	23, 31	Kanal 11-12 an Hallendachfüllung	innen
k7	24	Kanal 0, 3, 6: Messort 12, 13, 14 statt 3, 23, 8 Kanal 1, 4, 7: Messort 15, 16, 17 statt 6, 26, 10	Schieberraum
k8	32	Kanal 12, 13 auf Lager Turbine 1B	statt Schieberraum
k8	33	Kanal 12, 13 auf Lager Turbine 1A	statt Schieberraum
	Messung Nr. 25	nicht ausgeführt	

3.4 Diskussion der Amplitudenwerte

Ein erste Übersicht über Schwingungsamplituden liefern die RMS-Werte resp. Standardabweichungen.

3.4.1 Die EXCEL-Funktion STABWN

STABWN berechnet die Standardabweichung ausgehend von der Grundgesamtheit. Es wird vorausgesetzt, daß alle Werte als Argumente gegeben werden. Die Standardabweichung ist ein Maß dafür, wie weit die jeweiligen Werte um den Mittelwert (Durchschnitt) streuen.

Die Syntax ist:

$$\text{STABWN}(\text{Zahl1};\text{Zahl2};\dots)$$

Zahl1,Zahl2,... sind 1 bis 30 numerische Argumente, die einer Grundgesamtheit entsprechen.

STABWN geht davon aus, daß die ihr übergebenen Argumente einer Grundgesamtheit entsprechen. Es ergeben sich deshalb Abweichungen, wenn die Stichproben sehr kurz sind (Unterschiede der Tabellenwerte 2.10.3 die 1000 Messwerte umfassen und der im Anhang I abgebildeten EXCEL-Graphen).

STABWN verwendet die folgende Formel:

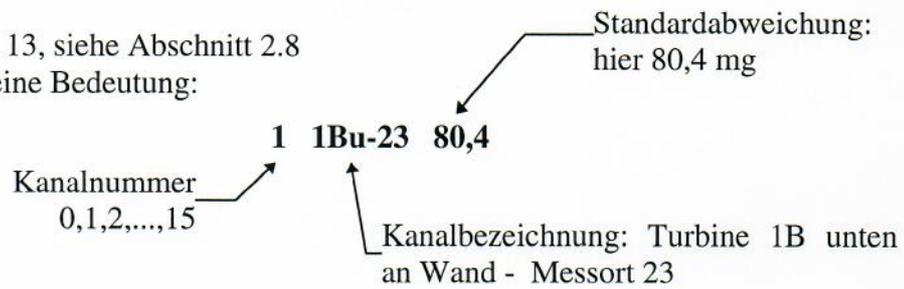
$$\sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}} \quad (2)$$

3.4.2 Diskussion der Standardabweichungen

Die in Anhang I in den EXCEL-Diagrammen in den y-Achsenbeschriftungen angegebenen Standardabweichungen werden im folgenden diskutiert. Es handelt sich um die STABWN-Werte der jeweils ersten 512 Abtastwerten des mit SPECTRAPOT aufgenommen Sekundenintervalls mit jeweils 10000 Abtastwerten.

Die in der folgenden Tabelle wiedergegebenen RMS-Werte sind nach einer digitalen Tiefpassfilterung mit Eckfrequenz bei 1kHz berechnet (kleinere Werte als im

Ein Beispiel (Lauf-Nr. 13, siehe Abschnitt 2.8 im 2. Protokoll) und seine Bedeutung:



Ein leicht lesbare Übersicht vermittelt die folgende RMS-Tabelle. Darin sind die Vibrationswerte pro Ableitort und Laufnummer aufgetragen. Man vergleiche hierzu die Tabelle im Abschnitt 2.8 (2. Bericht). Die Düsen sind der leichten Lesbarkeit halber mit u=unten und o=oben indiziert. Die leeren Felder wurden nicht gemessen. Die mit „sat“ bezeichneten Zellen sind mit übersteuerten Signalen belegt, was eine Berechnung unsinnig werden lässt. Die Messobjekte schwingen dort besonders kräftig.

Standardabweichungen der ersten 512 Messwerte aller Messläufe:

Düsen	MW	Lauf	1Bo-3	1Bo-6	1Bo-7	1Ao-8	1Ao-10	1Ao-11	1Bu-23	1Bu-26	1Bu-27	1Au-28	1Au-30	1Au-31	RA1-18x	RA1-18z	1Aa-20	1Ba-19
Au	30	1	3.8	2.8	0.9	3.7	5.8	2.0	2.5	6.6	0.7	3.2	6.1	1.4	7.5	10.3	2.3	0.7
Ao	30	2	4.9	3.4	1.4	7.3	11.5	1.4	2.5	5.2	1.1	6.3	12.2	1.6	8.4	10.8	2.3	1.0
Bu	30	3	5.2	9.6	1.8	3.4	3.3	1.4	3.0	8.8	1.7	2.7	4.9	1.1	9.3	13.3	2.2	1.5
Bo	30	4	10.2	13.0	2.0	2.6	4.0	1.5	11.1	20.4	3.5	3.2	5.8	1.5	9.6	13.4	2.4	1.4
Auo	30	5	3.9	3.0	0.8	9.2	10.8	1.8	3.7	7.2	0.9	6.6	10.9	1.5	12.3	8.5	1.2	0.9
Buo	30	6	9.3	10.2	1.6	4.4	5.6	1.3	9.5	27.6	1.8	3.3	7.4	1.2	12.7	9.0	1.3	1.3
AuoBuo	30	7	8.8	7.5	1.6	7.3	9.0	1.8	8.7	20.1	2.3	6.0	10.3	2.0	14.7	11.3	1.5	1.3
Au	50	8	4.3	3.7	1.5	14.0	17.2	3.2	2.8	7.8	1.2	9.0	17.0	2.3	11.7	9.5	2.2	0.9
Ao	50	9	4.6	3.8	1.3	16.1	22.2	3.2	4.4	8.3	1.7	17.4	40.0	4.7	11.7	9.7	2.2	1.0
Bu	50	10	14.9	26.5	3.4	3.4	5.6	2.1	8.7	19.5	3.5	3.2	6.1	1.6	13.7	11.2	2.3	2.1
Bo	50	11	23.1	19.0	13.1	4.0	6.0	2.3	54.4	120.0	112.9	7.7	17.5	3.0	14.1	10.2	2.6	2.6
Auo	50	12	4.2	5.2	1.0	16.5	18.9	4.2	4.0	9.3	0.9	14.0	32.5	4.2	17.3	10.8	1.4	1.3
Buo	50	13	25.4	33.1	123.0	5.3	10.4	2.5	80.4	129.1	78.7	5.1	16.8	2.7	17.2	13.1	2.3	3.0
AuoBuo	50	14	24.9	30.6	11.8	20.4	20.4	4.7	70.6	117.9	44.0	22.2	40.8	6.7	18.4	14.7	2.7	3.3
Au	60	15	4.3	5.2	1.8	22.3	29.6	4.2	4.9	8.9	1.9	12.8	29.2	5.1	13.5	11.3	1.9	1.4
Ao	60	16	5.3	6.3	2.5	58.8	29.2	39.2	5.4	11.2	3.1	58.8	161.6	16.3	14.0	10.5	2.8	1.8
Bu	60	17	23.8	37.5	5.3	4.0	7.7	2.1	10.7	29.9	7.3	3.7	10.3	2.3	14.3	10.1	2.9	1.7
Bo	60	18	52.9	34.5	286.1	9.2	sat	7.0	327.9	326.5	410.9	15.2	32.9	6.3	18.3	12.7	3.3	5.5
Auo	60	19	6.1	9.1	2.0	35.3	40.3	69.2	5.4	16.1	2.7	45.3	100.9	29.8	18.3	12.3	3.2	
Buo	60	20	74.7	10.5	292.6	9.1	13.8	4.9	128.1	191.6	207.8	7.8	20.1	4.8	20.7	14.8		5.0
AuoBuo	60	21	66.2	95.5	224.9	104.8	15.1	148.1	327.7	483.2	326.6	67.5	92.2	25.3	24.4	17.9	4.3	5.5
AuoBuo	50	22	25.6	79.1	66.1	47.6	18.9	0.1	241.3	253.7	4.6	14.4	0.02				2.4	2.9
AuoBuo	60	23	76.4	457.9	148.0	171.3	132.4	42.0	587.1	560.3	22.8	31.8				3.4	3.1	4.4
AuoBuo	30	24			2.1			17.2			1.8	5.7	1.2	2.0	11.4	7.6	2.2	1.9
Auo	60	26	5.9	8.2	33.3	180.2	163.1	89.6	6.4	12.7	2.1	40.8	162.2	672.6	12.2	10.1		
Buo	60	27	50.3	16.7	180.5	7.8	11.4	1.3	701.1	715.8	172.1	6.5	19.8	2.4	13.0	10.0		
AuoBuo	60	28	114.8	439.9	189.7	141.1	133.3	40.4	466.7	561.6	52.3	33.2	180.3	341.1	22.6	15.2		
AuoBuo	30	29	2.0	1.4	0.04	1.6	1.2	0.4	0.4	0.4	0.1	1.3	1.1	0.4	2.6	1.5		
AuoBuo	60	30	96.3	454.4	sat	216.3	156.1	sat	335.9	459.3	sat	sat	sat	sat	18.4	17.8	3.2	4.4
AuoBuo	50	31	30.8	359.2	65.1	58.8	53.0	0.3	321.5	299.4	8.6	22.6	0.1				2.8	3.7
AuoBuo	30	32			2.0			14.0			2.3	5.3	0.8	1.5			2.0	2.0
AuoBuo	30	33			2.3			17.2			3.4	5.6	1.0	1.6			2.0	2.0
AuoBuo	30	34																

Düsen	MW	Lauf	1Ap-20	1Bp-19	B0a-40	B2a-41	DbY-42	DbX-43	DbZ-44	DfY-42	DfX-43	DfZ-44	1Bs-15	1Bs-16	1Bs-17	1As-12	1As-13	1As-14	TBX-50	TBY-51	TAX-52	TAY-53	1AL-18x Turbine A	1AL-18z	1AL-18x Turbine B	1AL-18z	
Au	30	1																									
Ao	30	2																									
Bu	30	3																									
Bo	30	4																									
Auo	30	5																									
Buo	30	6																									
AuoBuo	30	7																									
Au	50	8																									
Ao	50	9																									
Bu	50	10																									
Bo	50	11																									
Auo	50	12																									
Buo	50	13																									
AuoBuo	50	14																									
Au	60	15																									
Ao	60	16																									
Bu	60	17																									
Bo	60	18																									
Auo	60	19			2.2																						
Buo	60	20				1.4																					
AuoBuo	60	21																									
AuoBuo	50	22					0.6	1.5	1.2																		
AuoBuo	60	23								0.2	0.8	1.0															
AuoBuo	30	24											2.6	3.0	4.9	2.0	3.2	2.5									
Auo	60	26	1.1	1.1																							
Buo	60	27	3.3	2.3																							
AuoBuo	60	28	3.3	2.5																							
AuoBuo	30	29	1.7	1.4																							
AuoBuo	60	30																									
AuoBuo	50	31								0.6	0.8	2.1										3.1					
AuoBuo	30	32											2.7	2.9	3.4			2.5	2.5							sat	8.7
AuoBuo	30	33											3.1	3.2	5.6			3.0			2.0	3.9					
AuoBuo	30	34																					19.6	6.7			

2. Teil

- Die Laufnummern 21, 23, 28 und 30 haben vier geöffnete Düsen und 60MW.
- Die Laufnummern 19 und 26 haben zwei geöffnete Düsen von Turbine 1A und 60MW.
- Die Laufnummern 20 und 27 haben zwei geöffnete Düsen von Turbine 1B und 60MW.
- Die Laufnummern 15, 16, 17 und 18 sind mit je einer Düse Au, Ao, Bu resp. Bo und 60MW.

3.4.3 Die Hallenwandaustritte der Düsenrohre

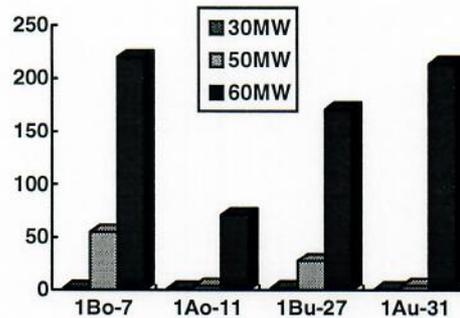
Für die Vibrationsüberleitung zur Gebäudewand besonders wichtig sind die Messorte an der Halleninnenwand 1Bo-7, 1Bu-27, 1Ao-11 und 1Au-31 (vgl. 3.3) unmittelbar bei den Rohdurchtritten. Wo sind besonders hohe Amplituden verzeichnet?

Wie verhält sich die Messstelle 1Bo-7 ? Leitungen von 30, dann 50MW bringen zunächst wenig Vibration. Erst bei Lauf 11 erhöht sich diese merkbar (auf 13). In diesem Falle ist die Düse B oben offen. Einen Sprung auf 123 macht die Vibration, wenn die Düse Bu zugeschaltet wird (immer noch bei 50MW). Wir bei gleicher Leistung auch Auo zugeschaltet, sackt die Vibration erstaunlicherweise auf 12 ab. Dann wird auf 60MW erhöht. Au, Ao, Bu bringen keine Schwingungen an diesen Messort. Bei Bo jedoch schnell die Vibration auf 286 hoch, um bei Buo noch höher zu klettern (292). Wir das Aggregat mit Auo zusätzlich symmetrisch angetrieben, immer noch bei 60MW, nimmt die Vibration auf 224 ab. Zurück auf 50MW > nur noch 66. Wieder auf 60MW > 148. Zurück auf 30MW > 2. Auo auf 60MW >

bringt indirekt 33. Wechsel auf Bu0 und 60MW > 180, und mit Au0Bu0 > 190. Au0Bu0 auf 50MW > nur noch 65. Bei 30MW sind diese Werte nur noch 2. Es ergibt sich die Schlussfolgerung:

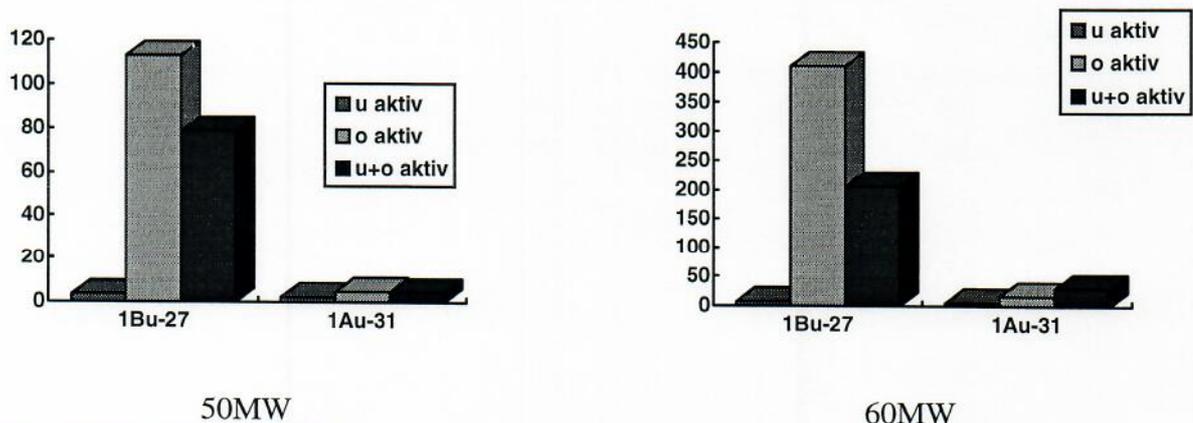
Während bei 30 die Wand nur wenig mg vibriert, nimmt bei einer Leistungssteigerung auf 50MW dieser Wert etwa 10x zu (Durchschnitt 55mg) Eine geringe Leistungssteigerung von 50 auf 60MW bewirkt einen überproportionalen Vibrationsanstieg auf durchschnittlich 220mg.

Schluss: Die Hallen-Wandvibration bei einem aktiven Rohr nimmt mit der Generatorleistung exponentiell zu. Die Wandvibration erreicht bei 60MW „kritische“ Werte.



An den andern 3 Wandmessorten ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Dies ist in obigem Diagramm gemittelt und zusammengefasst. Interessanterweise liegen die 50MW-Werte bei Turbine 1A wesentlich tiefer als bei 1B.

Besondere Beachtung verdient, dass die Vibrationen an den unteren Messpunkten stärker sind, wenn die obere Düse allein aktiv ist, verglichen mit den Vibrationen, bei denen nur die untere Düse aktiv ist. Dies tritt bei 50 und bei 60MW deutlich hervor. Der Effekt ist bei 1Bu-27 viel ausgeprägter als bei 1Au-27:

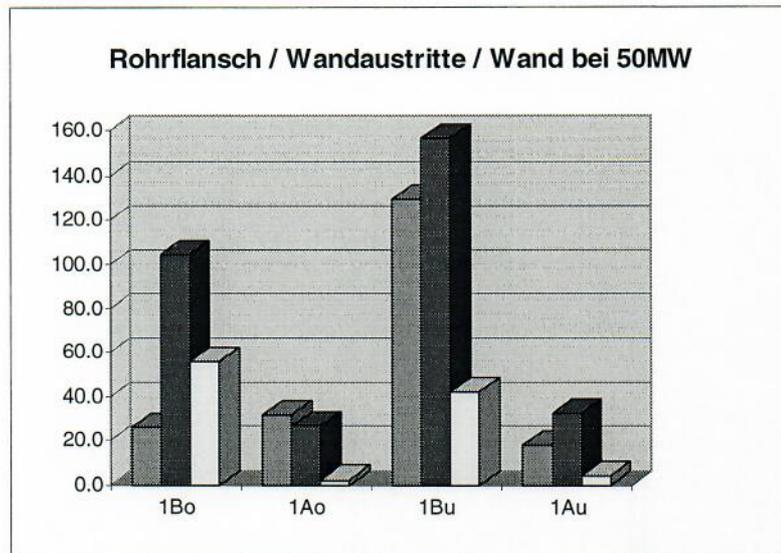


Schluss: Die oberen Düsen haben auf die Hallen-Wandvibrationen einen besonders durchschlagenden Einfluss, insbesondere bei der Turbine 1B.

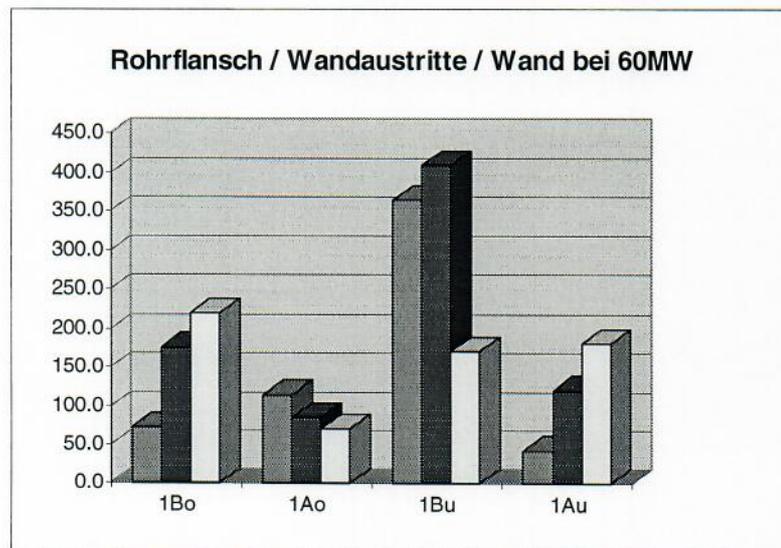
3.4.4 Vibrationen an den geschwungenen Rohrbögen zu den Peltierturbinen

Die untenstehende Grafik vermittelt, für die 4 Rohrbögen, die gemittelten Vibrationswerte an den Rohrflanschen bei den Maschinengehäusen, am Rohr kurz nach Austritt aus der Hallenwand und der Wand in de Nähe des Rohrs selbst, bei 50MW und bei 60MW. Es wurden nur Rohre mit geöffneten Düsen berücksichtigt. Ausnahme: *Untere Rohrbögen mit nur oben geöffneten Düsen sind auch berücksichtigt* (beträchtliche Anregung gemäss obigem Schluss). Die Turbine 1A schwingt bedeutend schwächer. Die Turbine 1B ist vor allem unten stark angeregt. Die Rohrschwingungen sind an der Wand stärker als beim Gehäuse. Allerdings schwingen beim Gehäuse grössere Flächen.

Bei 50MW sind die Wandschwingungen bei 1B ähnlich wie beim Rohr; bei 1A schwingt die Wand wesentlich schwächer als das Rohr. Die Wandschwingungen sind bei 1A wesentlich schwächer.



Bei 60MW ist zunächst die ungefähre Verdreifachung der Amplituden bemerkenswert! 1B schwingt auch so betrachtet stärker, als 1A; allerdings sind die Wandschwingungen bei 60MW durchaus vergleichbar an allen 4 Messorten.



Schluss: Bei 60MW erreicht die Hallenwandschwingung so hohe Werte, dass die lokalen Unterschiede 1B vs. 1A verschwinden. Offensichtlich nähert man sich einem chaotischen (nichtlinearen) Schwingungszustand, wenn man die Leistung von 50MW auf 60MW erhöht.

3.4.5 Diskussion der Rohrvibrationsmessungen im Schieberrau

Man beachte den Grundriss unter 3.3 (Seite 6) und den Messlauf 24. Es sind 6 Messorte erfasst, allerdings nur bei 30MW. Die *bergseitigen Amplituden* sind tendenziell grösser. Bei 1B sind 3 Messläufe erfasst; bei 1A sind nur 3 Messlauf (Verwendung zweier Sensoren am Turbinenlager TAX/Y. Möglicherweise werden die Gebäudevibrationen durch das Fundament des Kugelschieberraus auf die Bergseite übertragen. Der Schall aus dem Schotterbett (vgl. 3.7.2) stützt diese Aussage. Eine lokale Schwingungs-Entkoppelung ist durch die solide Betonierung verunmöglicht.

Schluss: Die Gesamtvibrationen am Rohr werden durch die Rohrdilatation beim Kugelschieber nicht gedämpft.

3.4.6 Die Vibrationen am Generator-Lagerbock

Die Messläufe 32 und 33 erfolgten unter Zeitdruck ganz am Schluss nur bei 30MW. Alle Düsen waren geöffnet. Es zeigen sich ähnliche Gesamtpegel wie an den Rohren im Kugelschieberraum und an den Hallen-Innenwänden. Dies ist durch die solide Abstützung der Lager auf den Fundamenten erklärbar.

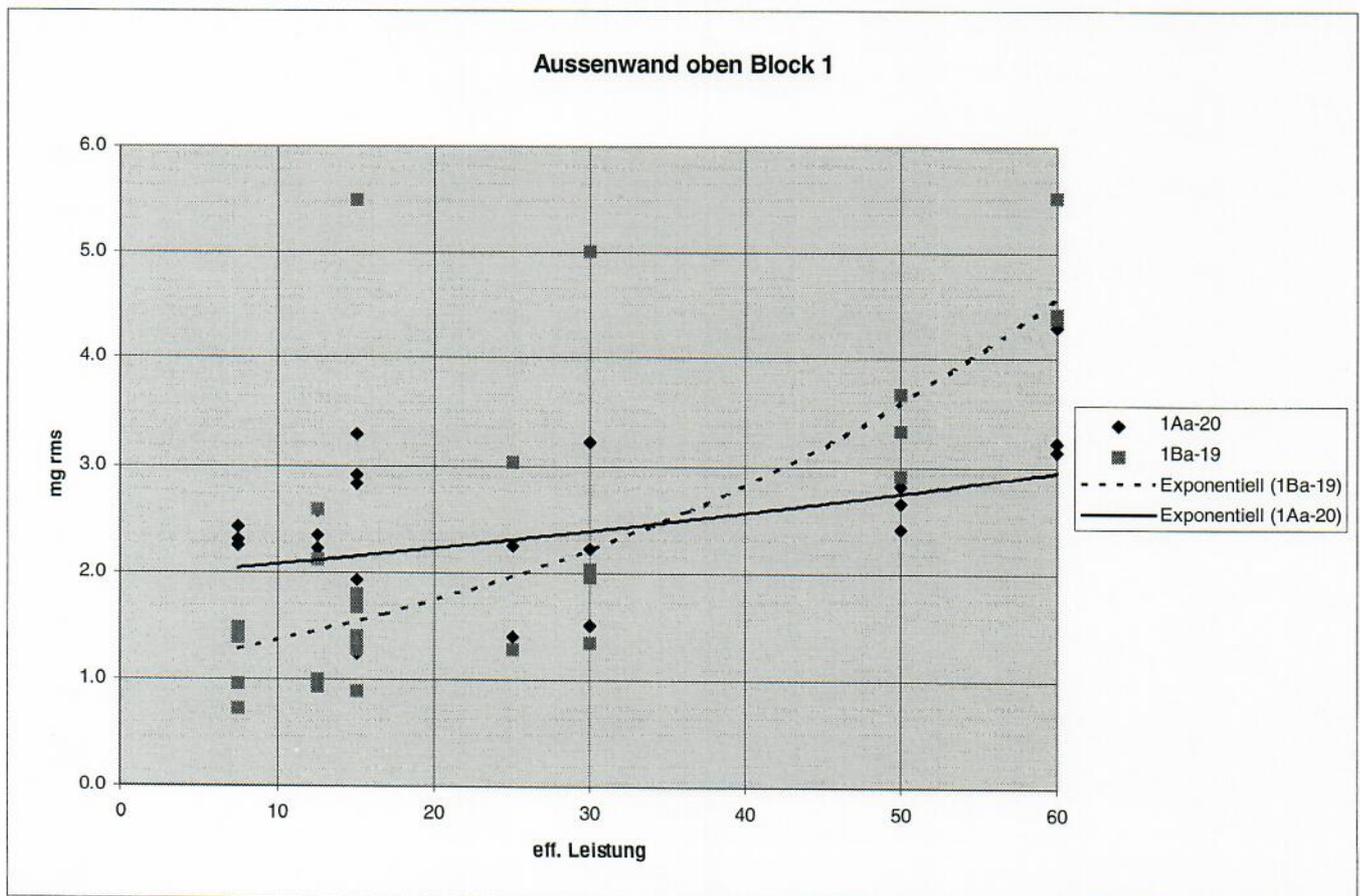
Schluss: Da an ganz verschiedenen Stellen die fundamentnahen Schwingpegel bei 30MW ähnlich sind, kann auf eine durchgängige Erregung des Betonfundaments, zumindest innerhalb Block 1, geschlossen werden.

3.4.7 Schwingung des Hallendachs

Man betrachte die Messläufe 22, 23 und 31 (Y-Achse = Querachse, X-Achse = Längsachse). Zwei Messungen sind mit 50MW, eine mit 60MW. Es treten in allen drei Richtungen vergleichbare Gesamtpegel auf um 1mg. Der Dachbalken schwingt in der Hallenlängsachse am stärksten, also in der Richtung der geringsten Biegesteifigkeit des Rechteckprofils. Die Dachfüllung schwingt vertikal am stärksten. Bei 60MW überhöht sich dieser Schwingungsmodus (von 1.0mg bei 50MW auf 2.1mg bei 60MW). Die relativ geringen Amplituden dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass hier wahrscheinlich sehr grosse Flächen eines massiven Baukörpers schwingen. Vertikale Schwingbäuche repräsentieren im Sinne des *Stimmgabelmodells* die Schwingungen der Aussenwände. Die Frage, ob das Dach durch die Luft oder durch die Betonwände angeregt wird, kann an dieser Stelle nicht entschieden werden.

Schluss: Festgestellt wird hier nur, dass das Hallendach über dem Generator erheblich und mit der oberen Aussenwand vergleichbar schwingt.

3.4.8 Die Schwingung der oberen Aussenwand im Block 1



Das Diagramm zeigt die in der Tabelle der Standardabweichungen der Vibrationspegel auf Seite 8 eingetragenen Schwingungswerte in Funktion der effektiven Generatorleistung gemäss Formel (1). Eingetragen sind ausserdem die exponentiellen Regressionslinien, welche die mit der Leistung überproportional ansteigenden Schwingungswerte sichtbar machen. Interessant ist, dass diese Linie fast linear verläuft für den linken Messort, die dem (korrigierten) Peltonblock 1A näher liegt. Im Unterschied dazu ist die progressive Schwingneigung (gestrichelte Kurve) gut erkennbar für den rechten Messort, die dem (unkorrigierten) Peltonblock 1B näher liegt. Wir zeigen unter 3.5.3.4 noch deutlicher, dass diese **exponentielle Schwingneigung** zunimmt, je stärker die Gebäudestrukturen angeregt werden.

3.4.9 Die Schwingung der oberen Aussenwand im Block 0

Baulich sind die Blöcke voneinander über eine Stossfuge verbunden, also schwingungsmässig einigermaßen entkoppelt. Im Luftschall hört man dies deutlich, wenn man das Dach des Anbaus abschreitet. Die Körperschwingung ist in der Spalte B0a-40 eingetragen (Lauf 19): Im Block 0 wird **2.2mg** gemessen; gleichzeitig wird daneben im Block 1 (Stelle 1Aa-20) **3.2mg** gemessen. Man vergleiche auch die Zeichnung auf Seite 5 unten. Dabei läuft die Turbine 1A mit voller Kraft auf beiden Düsen.

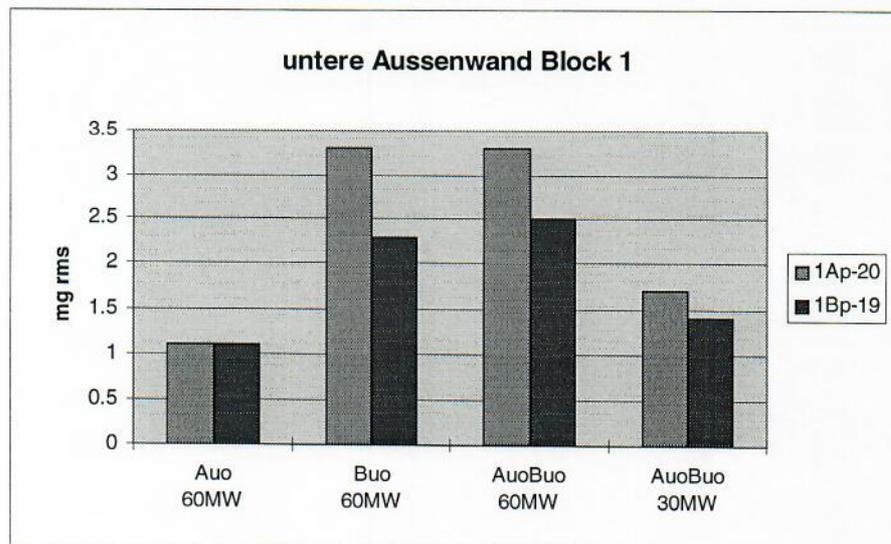
3.4.10 Die Schwingung der oberen Aussenwand im Block 2

Dasselbe versuchten wir in Block 2 festzustellen. Die entspricht der Messanordnung ganz oben auf Seite 6, Lauf Nr. 20. Der Körperschwingungspegel ist bei B2a-41 **1.4mg**. Gleichzeitig wird daneben bei 1Ba-19 **5.0mg** gemessen. Dabei ist die Turbine 1B auf voller Leistung mit beiden Düsen.

Schluss: Die Stossfugen zwischen den Blöcken an der oberen Aussenwand bilden wirksame Barrieren gegen die Schwingungsausbreitung bei voller Leistung der benachbarten Turbine.

3.4.11 Die Schwingung der unteren Aussenwand im Block 1

Es wurde hier nur Schwingungen am Block 1 selbst registriert.



Diskussion von links nach rechts: Die Turbine 1A wird durch beide Düsen angestrahlt auf Stufe 60MW. An beiden Messorten schwingt die untere Aussenwand genau gleich und eher schwach. Die Turbine 1B führt zu wesentlich mehr Vibration, wenn sie mit 60MW durch beide Düsen erregt wird. Paradoxaerweise schwingt die linke (1A zugeordnete Messstelle) besonders stark (Verwechslung?). Das Bild ändert sich kaum, wenn 1A und 1B mit 60MW angestrahlt werden. Durch eine Absenkung auf 30MW bei gleicher Düsenstellung halbieren sich auch die Vibrationspegel (lineares Verhalten in diesem abgelegenen Gebäudeteil).

Schluss: Die Schwingpegel der Parterre-Aussenwand sind proportional zur MW-Leistung.

3.5 Diskussion interessanter Spektren und Kohärenzen

Wir beziehen uns bei der folgenden Interpretation auf die separat ausgedruckten Abbildungen von Powerspektren und Kohärenzfunktionen im Anhang II. Bitte diese zur Hand nehmen gleichzeitig mit dem Text. Die Abbildungen sind seitenweise indentifiziert. Jeder Rahmen hat oben die Laufnummer, und bei den Spektren steht die Kanalbezeichnung. Die Tabelle unter 3.2.4 „Standardabweichungen“ ist ebenfalls zu beachten (Seiten 6 und 7).

3.5.1 Definitionen

Kohärenz, Phasenfunktion und Leistung sind als **Spektren** über einer Frequenzachse von 60 ... 2561 Hz aufgetragen. Die Spektren sind farbig (auf dem Bildschirm) resp. grau (auf der Laserkopie) abgestuft: Diese **Bereichen** ändern bei 200/220, 420/440, 620/640, 840/860 und 1040/1060 Hz. Die sind die Peakfrequenzen der harmonischen Oberwellen der 210Hz Grundwelle (Peltier-Schaufelfrequenz). Damit können harmonische Komponenten (liegen auf Bereichsübergängen) leicht unterschieden werden von nichtharmonischen Komponenten (liegen innerhalb von Bereichen). Die Frequenzen > 1060Hz werden nicht diskutiert, da sie aus messtechnischen Gründen ohne Aussagewert sind. Die Signale sind mit 10kHz abgetastet und bei 1000Hz tiefpassgefiltert. Deshalb sind nur Werte bis etwa 1000Hz genau genug. Die hochpräzisen Accelerometer an den Aussenwänden zeigen überdies Trägerfrequenzschwingungen >1000Hz.

Leistungsspektren oder **Powerspektren** oder **Spectra** sind Synonyme. Sie sind hier als **Amplitudenspektren** aufgetragen mit einer linearen Intensitätsskala in vertikaler Richtung.

Die **Kohärenzspektren** haben eine vertikale Skala von 0 ... 100%. Darunter sind jeweils die **Phasenspektren** die Modulo ± 180 Grad schwingen. Die Phasenspektren sind nicht wichtig für unsere Interpretation.

3.5.2 Kohärenz und Baudynamik

Das Kohärenzspektrum kann anschaulich erklärt werden. Es wird immer von einem Kanalpaar errechnet. Es ist das **komplexe Kreuzspektrum dividiert durch die Beträge der beiden Powerspektren**. Als komplexes Spektrum besteht es aus Betragsfunktion (=Kohärenzspektrum) und Phasenfunktion. Wegen der Division ist die Betragsfunktion normiert, d.h. die Kohärenz kann Werte annehmen zwischen 0 ... 1 (resp. 0 ... 100%).

Die Kohärenz zeigt den **Grad der linearen Koppelung** zwischen den beiden Messorten in Abhängigkeit von der Frequenz. Eine hohe Kohärenz (Werte in der Gegend von 30-50% oder höher) beweist den **Befund einer einfachen linearen Übertragung resp. Verbindung zwischen beiden Messorten**. Dies wird umso interessanter, je höher die Generatorleistung ist. Denn wenn viele Gebäudeteile stark schwingen, entstehen durch nichtlineare chaotische Ausbreitung der Erregung zahlreiche lokale Generatoren mit je eigener Frequenzzusammensetzung. Alle diese Sekundärgeneratoren wirken als unabhängige Quellen auf das Messstellenpaar ein und zerstören die Kohärenz. Dies zeigt sich eindrücklich an Messungen mit 4 Düsen und 60MW: dort ist fast überall die Kohärenz \cong Null (vgl. Lauf 21 auf Blatt 4). Dort ist noch etwas zweites gut sichtbar: Obgleich die Leistungsspektren gross sind, können die Kohärenzen Null sein. Umgekehrt können sehr schwache Leistungsspektren hohe Kohärenzwerte zeigen (vgl. Blatt 5 rechts unten an den Aussenwänden bei Lauf 18 mit nur 15MW effektiver Leistung). Die Eigenschaft der linearen Koppelung und der Schwingstärke sind eben ganz verschiedene Aspekte die Gebäudeschwingung. Die Kohärenz ist gewissermassen ein **Test auf Linearität**. Wenn die Kohärenz gegen Null tendiert, kann zwischen den beiden Messorten und der betreffenden Frequenz sicher keine lineare Übertragung vorherrschen.

Ein Kohärenz kann auch hoch sein, wenn an beiden Messorten der **Einfluss eines gemeinsamen Generators** (bei der betreffenden Frequenz) dominierend ist. Die Phasendrehungen einer bestimmten Frequenz müssen über 1000 Abtastwerte (1 Sekunde) parallel verlaufen (die Phasenpfeile synchron drehen), damit eine hoher Kohärenzwert entsteht. Die Tendenz einer chaotischen Frequenzfluktuation bei starker Erregung bringt pro Frequenz eine statistische Unsicherheit (Phasenjitter) in Umdrehungen der beiden Phasenpfeile. Die genügt, um mathematisch die Kohärenzgrösse an der betreffenden Frequenzstelle gegen Null zu drücken.

Es folgt aus obigen Überlegungen, dass geringe Anregungen (30MW und 50MW insbesondere mit nur einer Düse) höhere Kohärenzwerte resultieren. In diesen Zuständen zeigt das Gebäude ein „braves“ Verhalten: **elastische Schwingungen** können keine neuen Frequenzen erzeugen. Der Grad der Nichtlinearität zwischen den Gebäudeteilen nimmt mit starker Anregung deutlich zu. Eine hohe Schwingamplitude führt viele Gebäudeteile in Schwingsättigung (wie die harten Anschläge einer Federung vorstellbar) oder in plastizierende Bereiche (wo sich das Mikrogefüge teilweise verändert), wodurch büschelartig und lokal neue Frequenzen angeregt werden. Diese dynamisch und progressiv angeregten unabhängigen Generatoren zerstören die hohe Kohärenz.

Man kann von einem zunehmend **chaotischen Schwingverhalten** sprechen. Dadurch entstehen die unüberhörbaren und nur schwer zu dämpfenden Schallimmissionen in der Nachbarschaft. Es ist eine andere Frage, wie stark dadurch das Gebäude oder bestimmte Anlageteile beschädigt werden. Die drastischen Unterschiede zwischen 50MW und 60MW (Diskussion der Schwingamplituden auf Seiten 8 ff.) sprechen eine deutliche Sprache. Generell neigen chaotische System zum „Kippen“ (Bifurkation, Wirbelablösungen) mit nur schwer vorhersagbaren Konsequenzen und Überraschungen im Sinne kleiner Ursache und grosser Wirkung. Wie weit eine solche Gefahr schon besteht, vermögen wir derzeit nicht zu beurteilen.

3.5.3 Diskussion der Auswertungen mit Amplitudenspektren und Kohärenz

Siehe Anhang II: Blatt 1 - 12

3.5.3.1 Blatt 1 und 2, Lauf 4, Bo 30MW:

Betrachten wir als erstes die 4. Zeile in der Tabelle auf Seite 8. Mit einer geringen effektiven Leistung von 7.5MW durch die **obere Düse** an der Peltonturbine 1B, wird das Gebäude zum Schwingen angeregt. Oben sieht man 4 ausgewählte **Amplitudenspektren** an den 4 Hallenwand-Messorten 1Bo-7, 1Ao-11, 1Bu-27 und 1Au-31. Die Peakfrequenzen sind markiert und zeigen Werte von 0.81, 1.8, 0.81 und 0.53mg. Nur bei der Turbine 1B liegen die Peaks auf der Grundwelle 210Hz (unten) resp 1. Harmonischen 420Hz (oben). Offenbar verursacht das herunterprasselnde Wasser auf dem passiven **unteren Rohr** die stärkere Vibration, auch an der Hallenwand. Der inkompressible stehende Wasserkörper ist in der Lage, die Schwingungen an die untere Wand zu leiten. (Wasser dämpft - da inkompressibel - im akustischen Bereich schlecht. Töne werden im Wasser hervorragend fortgeleitet: U-Boot-Sonartechnik.) Es fällt auf, dass die sanierte Turbine 1A Peaks an nichtharmonischen Stellen zeigt (oben 100Hz, unten 760Hz nebst 210Hz).

Die **Kohärenzfunktion** hilft, dies zu verstehen. Die Kohärenzfunktion zwischen 1Ao-8 und 1Ao-11 hat bei 100Hz einen Peak. Gleichzeitig ist die Schwingamplitude bei 1Ao-8 hoch bei 100Hz. Durch die lineare Übertragung im oberen Rohr von der Turbine zur Wand wird dieser Peak auf die Wand übertragen. Die Phasenfunktion verläuft an dieser Stelle horizontal, was ein weiterer Hinweis auf die gute Übertragung ist. Für das untere Rohr gilt dasselbe zur Erklärung des Peaks bei 210Hz, wo die Kohärenz den höchsten Peak aufweist. Jedoch hat die Kohärenz auch einen (halb so hohen) Peak bei 760Hz. Woher stammt die Energie, die in diesem Frequenzfenster zur Wand übertragen wird? 1Au-28 ist zwar nicht Null, aber auch nicht markant erhöht. Die Wand schwingt aber dort markant. Gibt es einen anderen „Kanal“ dafür? Etwa der Generator RA1 via Fundament. Eine Kohärenzfunktion (Blatt 2) zeigt, dass bei 760Hz

1. eine Leitung nach 1Au-31 besteht (18% Kohärenzpeak)
2. die Generatorschwingungen RA1-18 mit 1.65mg bei x und 2.17 bei z sehr hoch sind .

Umgekehrt wird wegen der Null-Kohärenz im darüberliegenden Frequenzgebiet trotz noch viel stärkerer Schwingung der Generatorverankerung in x-Richtung davon nichts an die Wand 1Au-31 übertragen wird! Ich vermute, dass insbesondere die Horizontalschwingungen (x-Richtung) übertragen werden, da die Phasenfunktion dort horizontal verläuft. Eine Wellengruppe benachbarter Frequenzen unterstützt sich dadurch bei ihrer Fortpflanzung (keine Dispersion).

Die dominante Schwingung an der oberen Wand bei 1Ao-11 kann ebenfalls leicht auf diese Quelle Generator zurückgeführt werden, da folgende Ursachen gemeinsam erfüllt sind:

1. Kohärenz sehr hoch (ca. 90% in x, Interchannelcoherence x/y ebenfalls)
2. Phasenfunktion horizontal
3. RA1-18x zeigt eine markante Vibrationsspitze

Schluss: Die zwei Wandstellen 1Bo-7 und 1Bu-27 zeigen harmonische Schwingungen der Schaufelfrequenz des angetriebenen Peltonrads 1B, die durch die beiden Rohre auf die Wand übertragen werden (unabhängig ob das Wasser fließt oder steht). Die Wand hinter dem nicht angetriebenen Rad 1A schwingt in anderen Frequenzlagen, die vom Generator RA1 via Fundament angeregt werden.

3.5.3.2 Blatt 3, Lauf 7, AuoBuo 30MW

Die gleichen Dominanten (420Hz und 220Hz hinter 1B resp. 100Hz und 760Hz hinter 1A) zeigen sich, wenn man alle 4 Düsen bei 30MW zuschaltet. Das Bild wird sogar noch eindeutiger. Mit der Kohärenz werden die Beziehungen aller 4 Wandmessorte untersucht. Auch im soliden Material selbst sind lineare „Frequenzbrücken“ besonders guter Übertragung zu erwarten (hohe Kohärenz und horizontale Phasenfunktion) und auch Zonen wo infolge Materialdämpfung (innere Energiedissipation) die Fortleitung der Wellen behindert ist (geringe Kohärenz und wilder Phasenverlauf). Besonders markant sind die Brücken bei 210Hz zwischen oben und unten auf der 1B-Seite. Auf der 1A-Seite gibt es ein fast ungestört übertragendes Gebiet bei 100Hz zwischen oben und unten. Zirkular zwischen allen Paaren werden die 760Hz bevorzugt übertragen.

Schluss: Die Hallenwand überträgt Frequenzen um 760Hz in allen Richtungen besonders gut.

Dies gilt zumindest im Block 1 im Bereich der Rohrdurchführungen. Im Sonogramm zeigt sich an dieser Stelle eine grüne Linie zwischen den Harmonischen von 630Hz und 840Hz (Stelle A) selbst neben der oberen Aussenwand.

3.5.3.3 Blatt 4, Lauf 14, AuoBuo 50MW

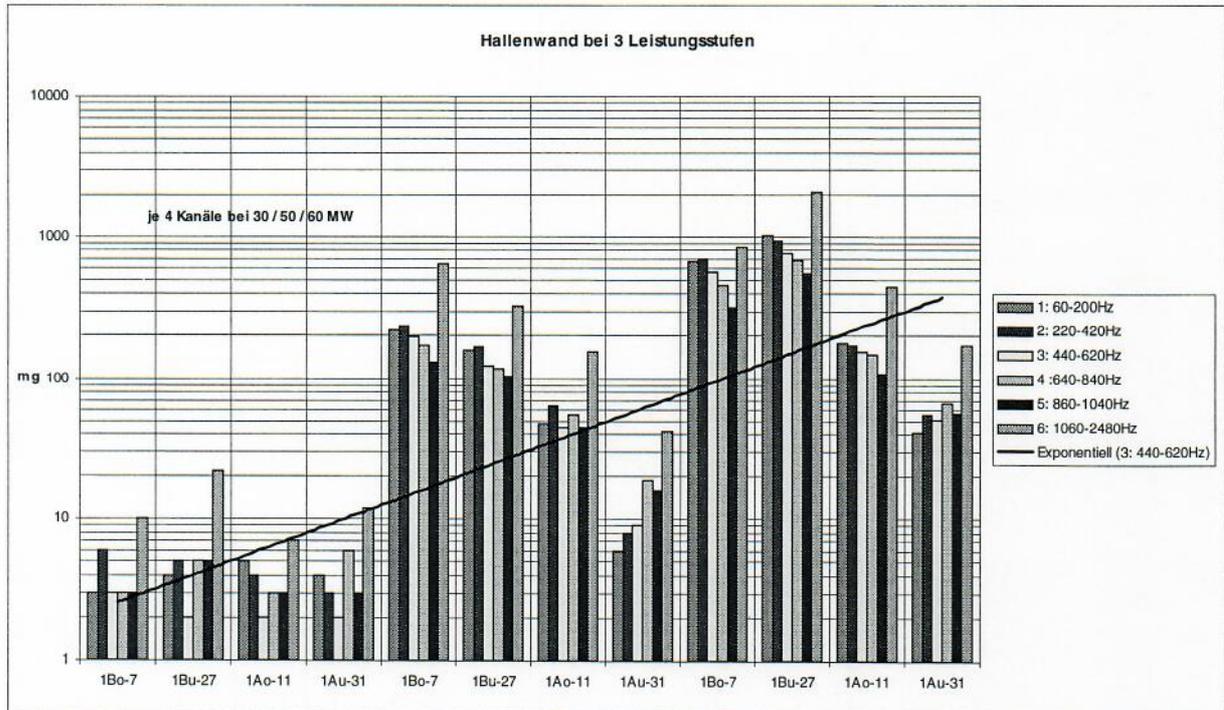
Es werde dieselben Wandmessstellen verglichen wie oben (Rohraustritte Hallenwand). Die Leistung ist nun aber von 30 auf 50MW erhöht. Grundsätzlich zeigt sich die exponentielle Erhöhung der Schwingungsamplituden um eine Grössenordnung. Spektral wird das Schwingen „weisser“, das heisst die Spektren zeigen viele gleichmässig angeregten Frequenzen und nicht mehr sehr grosse Unterschiede (wenig spektrale Struktur). Hinter der nicht sanierten Turbine 1B ist unten und oben eine viel höhere Vibration festzustellen. Das sanierte Rad zeigt besonders unten relativ wenig Wandvibration.

Die innere Nichtlinearitäten der Wand ist nun aber so gross, dass die Kohärenzen durchwegs fast Null sind im Kreise der 4 Messorte. Dieses Bild wird noch verdeutlicht durch den Umstand, dass von allen Seiten unabhängige „Generatoren“ ihre Partialschwingungen zuführen.

Schluss: Ein chaotisches (nichtlineares) Verhalten zeichnet sich bereits bei 50MW ab.

3.5.3.4 Blatt 5, Lauf 21, AuoBuo 60MW

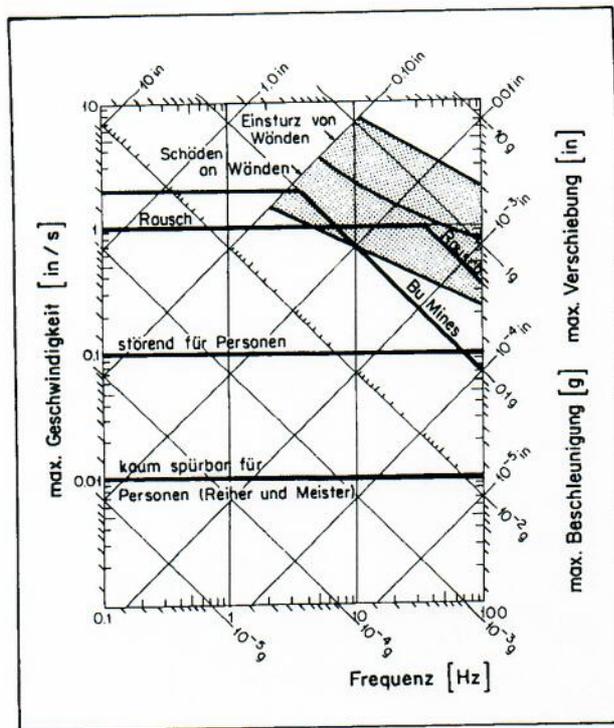
Diese Messung setzt das oben festgestellte exponentielle Verhalten fort: bei einer Steigerung von 50MW auf 60MW sind die spektralen Schwingamplituden durchschnittlich 5-mal höher! Die Spektren sind uniform; tiefe Frequenzen sind bevorzugt. Alle Kohärenzen sind fast Null. Die Phasenverläufe sind bizarr.



Die Messwerte der Blätter 3 - 5 sind für die 4 Messorte an der Hallenwand oben grafisch zusammengefasst. Die Säulen sind die mittleren Leistungen für alle spektralen Bänder 1 - 6. Die Vertikalachse in mg-Beschleunigung ist logarithmisch skaliert. Durch die exponentielle Regressionsgerade für Band 3 von 440 bis 620Hz (wie auch für die übrigen 5 Regressionsgeraden, die hier weggelassen sind) wird die exponentielle Steigerung der Vibration bei relativ geringen Leistungserhöhungen 30 / 50 / 60MW eindrücklich bestätigt.

Schluss: Ein lineares System zeigt eine zur Anregung proportionale Reaktion. Nur Nichtlinearitäten, wie sie etwa durch Überbelastung entstehen, können den gezeigten exponentiellen Zusammenhang verursachen. Werden Nichtlinearitäten extrem - etwa erkennbar in einem totalen Verschwinden der Kohärenzfunktion von verbundenen Teilen - sind chaotische Überraschungseffekte auf Ermüdung und Festigkeit und punkto Sicherheit nicht auszuschliessen.

Leider machen diesbezügliche Normen nur Angaben bis 100 Hz. Schäden an Wänden sind aber bereits ab etwa 100mg zu erwarten. Da sich solche Schäden akkumulieren, muss auch die Dauer der zeitlichen Einwirkung in Betracht gezogen werden.



Aus:
Hugo Bachmann
+ Walter Ammann:
Schwingungspro-
bleme bei Bauwerken.
Verlag IABSE,
ETH-Hönggerberg,
8093 Zürich.

Anhaltswerte für die Beurteilung von Schwingungseinwirkungen auf Bauwerke

3.5.3.5 Blatt 6, Lauf 18, Bo 60MW

An der Hallenwand hinter 1B steigert sich die Erregung noch, wenn bei Volleistung die Turbine 1A abgeschaltet wird und von 1B nur die obere Düse läuft. Während die Wandvibrationen hinter 1A drastisch verringert sind (nur 1% verglichen mit hinter 1B), entsteht im Wandbereich hinter 1A eine lineare Koppelung insbesondere bei der 2. Harmonische 640Hz, die auch in den Sonagramme stark dominiert. Insbesondere auf die Distanz zum Wohnhaus ist ja gerade diese Komponente am wichtigsten.

3.5.3.6 Blatt 7+8, Lauf 19, Auo 60MW

Im Lauf 19 ist nur die sanierte Turbine 1A in Betrieb, und zwar bei Volleistung auf beiden Düsen. Es sollen die oberen Aussenmessorte B0a-40 (Block 0) und 1Aa-20 (Block 1 hinter Turbine 1A) in Beziehung gebracht werden mit dem Vibrationsgeber 1A resp. die dort platzierten Accelerometer.

Die Amplitudenspektren rund um 1B sind alle sehr schwach im Vergleich zu den Spektren von 1A und dem Generator RA.

Im **Block 0** gibt es fast keine Kohärenz zur oberen und unteren Wandmessstelle hinter 1A sowie am Montageort RA des Generators. Dasselbe gilt für die Überleitung auf Block 1. Nur ganz tiefe Lagen in der Gegend 100Hz zeigen etwas Durchlässigkeit.

Im Block 1, namentlich an der Messstelle 1Aa20, gibt es ein differenziertes Kohärenzspektrum, z.B.

- zu 1Bo-7 bei 840Hz an der Wand
- zu 1Bu-27 bei 620Hz an der Wand.
- zu 1Ao-8 bei 200Hz auf der Turbine selbst
- zu 1Au-28 bei 200Hz auf der Turbine selbst
- zu RA1-18z und RA1-18x an der Generatorabstützung

Zu 1Ao-11 und 1Au-31 (aktive Wandmessstellen) ist keine Kohärenz mit 1Aa-20 zu verzeichnen. Die Einleitung geschieht also via Fundament und/oder via Dach. Die starke Erregung der Wand könnte wie eine Barriere gegen kohärente Fortleitung wirken. Wir die Wand durch Erregung plastisch?

Die vorhandenen Kohärenzen zeigen die Dominanten, welche im Luftschall-Sonogramm wiederzuerkennen sind.

Schluss: Die Überleitung von aussen hörbaren harmonischen Schwingungen auf die Aussenwand geschieht durch kohärente Kanäle auf Umwegen, z.B. via Dach oder Fundament.

3.5.3.7 Blatt 9-10, Lauf 20, Buo 60MW

Es ist hier die nicht sanierte Turbine 1B alleine in Betrieb bei Vollast und mit beiden Düsen. Alle mit 1B direkt verknüpften Stellen schwingen exzessiv. Bei 1A schwingen nur die wandständigen Rohmessstellen 1Ao-10 und 1Au-30 nennenswert mit. Bei 1B schwingt das untere Zuleitungssystem 1Bu-23/26/27 stark, wogegen im obere Zuleitungssystem nur die Wand und nicht das Rohr schwingt (das Wasser prasselt auf die untere Düse).

Wo verschwinden die Kohärenzen zur oberen Aussenwand „hinter“ 1B? - Bei 1Bo-6 und 1Bo-7. **Erklärung: Die Kohärenz (Linearität) wird durch extreme Schwingstärke zerstört.** Dass am Turbinengehäuse bei 1Bo-3 merklich Kohärenz auftritt, trotz hoher Schwingstärke, hat seinen Grund in einer **wichtigen Koppelung via Fundament oder Hallenlufttraum/Dach** (was noch zu klären bleibt).

Wo prägen sich diesbezügliche Kohärenzen besonders deutlich aus? - Bei allen 6 Zuleitungsmessstellen für 1A und auf der Aussenwand im Block 2 (B2a-41). Erklärung: Die Schwingstärken sind hier gering.

Die Kohärenzen zum Generator RA1 zeigen alle einen Peak bei 630Hz, der 2. Harmonischen, was auf eine wichtige Übertragung zur Aussenwand hindeutet. Tatsächlich findet man in den Schall-Sonagrammen diese Komponenten vielfach wieder, vor allem auf Distanz (siehe unten).

3.5.3.8 Blatt 11-12, Lauf 28, AuoBuo 60MW

Also volle Stärke, alle Düsen, aussen wird an der bergseitigen Parterrewand gemessen. Die grössten Schwingstärken finden sich am Zufluss zu 1B. Die Hallenwand schwingt oben mit bis 0.1mg! Die Kohärenzen sind fast alle gleich Null. Einzig beim Rohrdurchtritt zu 1A oben findet sich zwischen Wand und Rohr etwas Kohärenz bei gleichzeitig erstaunlich geradem Phasenverlauf. Ähnliches gilt für die Rohr und Generatormessstelle bei 1A unten. Die bessere Wasserbewirtschaftung in dieser Turbine macht sich in einem besseren Kohärenzverhalten sichtbar.

Zur Aussenwand 1Bp-19 und 1Ap-20 koppelt nur der Generator RA1 merklich, und zwar auch bei Frequenzen unter 210Hz.

Diese Aussenwand selbst ist ein eigenständig schwingendes Gebilde mit mehrfach angeregten Resonanzen (Modi). Dies prägt sich in dem rechenartigen Kohärenzspektrum aus, wo zu jeder Zinke ein horizontales Phasenpodest zugeordnet ist. Die Wand in sich, weil nur schwach angeregt, schwingt also weitgehend linear.

3.5.3.9 Blatt 12-13, Lauf 24, AuoBuo 30MW

Diese Messungen reflektieren die Rohrvibration im Schieberraum. Man beachte die Messorte auf Seite 6. Zwischen 12 und 13 resp. 15 und 16 befindet sich die Dilatationsmechanik. Bei nur 30MW sind keine grossen Pegel zu erwarten. Es wurde keine Messung unter Vollast gemacht. Die Messstellen 1As-14 und 1Bs-17 haben einen direkten Bezug zum massiven Fundament unter der unteren Aussenwand. Hinter der Turbine 1B befindet sich dort das Schwingmaximum aller 6 Messstellen bei einer Frequenz von 630Hz. Die Aussenwand 1Ba-19 schwingt aber bei etwa 100Hz maximal und zeigt bei 630Hz nur einen geringen Peak. Die Wand bezieht ihre Schwingstärke deshalb nicht nur aus dem Rohr, sondern über das Fundament aus andern Bereichen. Die starke Dämpfung des Erdreichs für alle darin

eingebetten Fundamentstrukturen dürfte die Bevorzugung der ganz langsamen Frequenzen erklären. Der Peak bei 540Hz bei 1Aa-20 ist möglicherweise ein Messartefakt, da sich eine solche Linie im Sonogramm der unteren Aussenwand nicht zeigt (driftende Eigenschwingung des Accelerometers bei sehr schwacher Aussteuerung). Dass die langsamen Rumpelfrequenzen sich über das Fundament ausbreiten können, zeigt sich auch in verschiedenen Kohärenzbuckeln ab 60Hz. Wir haben bereits erwähnt, dass auch der Generator zu diesen Vibrationen beiträgt.

3.5.3.10 Blatt 14, Lauf 21, AuoBuo 60MW

Eine ähnliche Aussage wie unter 3.5.3.8 lässt sich für die obere Aussenwand im Block 1 machen. Die Wand schwingt in vielen Modi. Auffallend ist ein breiter Kohärenzbuckel zwischen 60 und 210 Hz. Der Phasengang ist auffallend treppenartig. Abgeschlossene Schwingsysteme dürften sich hier überlagern.

Die Amplitudenmasstäbe aller Amplitudenspektren sind gleich (0.10) auf diesem Blatt. Man beachte die merkliche Schwingstärke des Generators. Wenn man bedenkt, dass hier wesentlich grössere Flächen abstrahlen, wird der Anteil des Generators auf den schwingenden Luftraum in der Halle signifikant sein.

Das Turbinengehäuse 1B schwingt in den Hallenraum auf allen Harmonischen, jedoch bei 840Hz dominant. Alle Harmonische zu 210Hz sind bei 1B stark, und die Kohärenz zeigt das rechenartige Bild mit treppenförmiger Phasenfunktion, was auf Übertragungskanäle durch den Luftraum schliessen lässt.

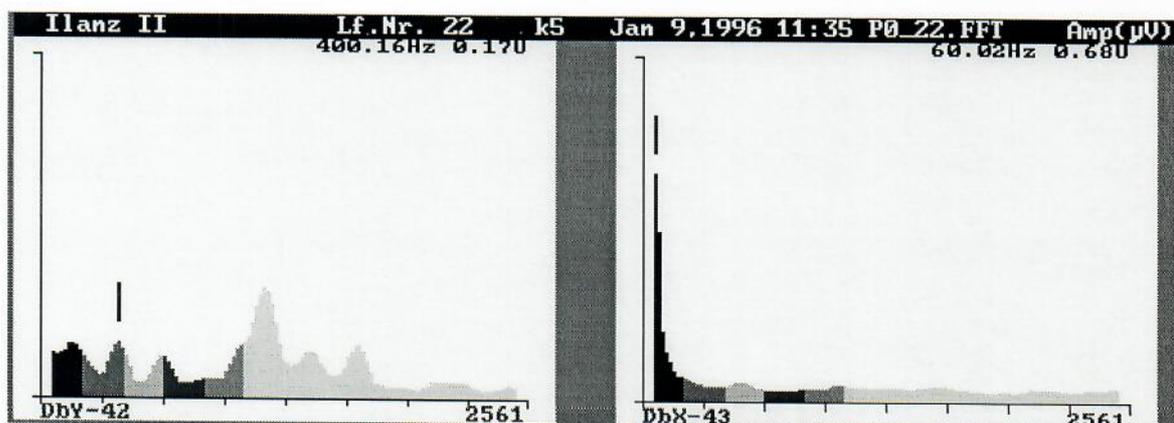
Das Turbinengehäuse 1A verhält sich ganz ander: als breitbandig abfallendes, besser ausbalanciertes Powerspektrum. Aber die Schwingstärke (Fläche unter dem Spektrum) ist insgesamt eher noch höher (die Sanierung hat die dominanten Peaks verwischt, den Lärm dieser Maschinen aber eher erhöht).

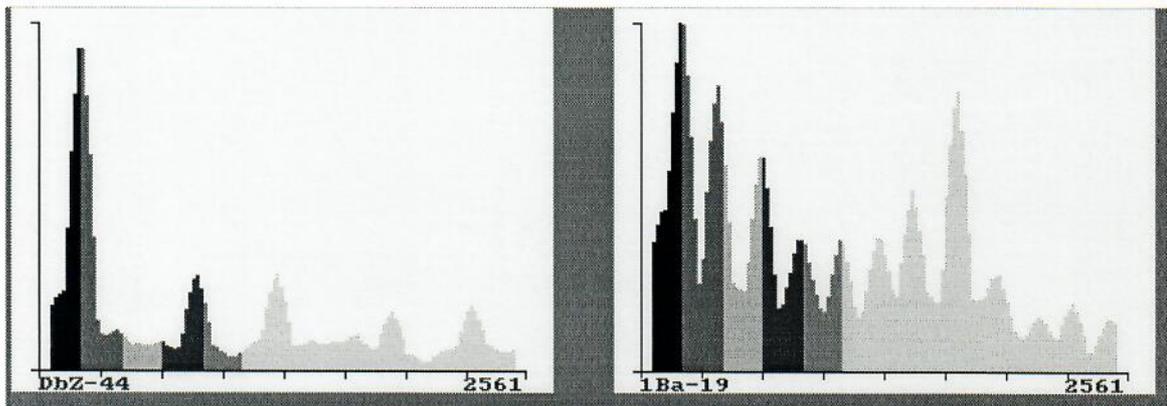
Schluss: Schaufelkorrekturen vermögen Resonanzen abzubauen (polyrhythmische Differenzierung); die von der Turbine abgehende Schwingleistung bleibt aber in etwa erhalten.

Gegen aussen wirksame Immissions-Sanierungen müssen durch echte Schalldämpfungsmassnahmen an der äusseren Gebäudehülle realisiert werden.

3.5.3.11 Blatt 15-17, Lauf 22, AuoBuo 50MW

Diese abschliessende Betrachtung mit einem symmetrisch angetriebenen Generator bei nicht ganz voller Leistung. Die obere Aussenwand Block 1 ist im Visier, ebenso die Dachbalken in Hallenraummitte über dem Generator. In Z-Richtung (vertikal) schwingt das Dach am stärksten. Es zeigt sich ein Maximum bei 210Hz. In X-Richtung (Hallenlängsachse) schwingt das Dach minimal, jedoch mit einem Anstieg der Pegel bei der 60Hz-Kante. In Y-Richtung (Hallenquerachse Richtung Wand) ist eine breitbandiges mittelstarkes Amplitudenspektrum zu verzeichnen. Zur Verdeutlichung sind hier nochmals die Amplitudenspektren einzeln dargestellt:





In der Z-Richtung ist klar die Turbinen-Grundfrequenz von **210Hz** angeregt. Eine weitere Harmonische (im interessierenden Bereich) liegt bei (nur) 800Hz mit etwa 1/3 Stärke. Es ist die 1.Oberwelle des in der Querrichtung vorgefundenen Peaks bei (nur) 400Hz. Solche Peaks wurde am Generatorsockel beobachtet. Man beachte auch den Kommentar zu Sonagramm 7, wo nebst 420Hz auch **400Hz** als deutlich abgehobene Schwingkomponente über der Aussenwand gemessen wurde. Es stellt sich die Frage nach dem dahinter stehenden Energiequelle. Haben die Dachbalken vielleicht eine eigene ausgeprägte Resonanz, die von den Turbinen nur unwesentlich abweicht? Die Frage kann hier nicht schlüssig beantwortet werden. Die Sachverständigen für den Generator könnten vielleicht weiterhelfen. Dieser Effekt stützt aber die Vorstellung, dass die oberen Aussenwände (auch) durch das Hallendach wie eine Stimmgabel angeregt werden. Denn bereits ohne Kohärenzbetrachtung wird hier klar, dass es das Dach ist, welches Schwingenergie in die Wände einkoppelt, die im Geräuschpegel an die Umwelt von Bedeutung ist. Wenngleich die 210Hz und 400Hz Komponente vergleichbare Stärken haben an der Wand, gibt es an der Wand weitere Komponenten (hier namentlich 630Hz) die im Dach nicht vorkommen. Dass solche Anteile durch basale Gebäudestrukturen auf die Wand übertragen werden, ist evident.

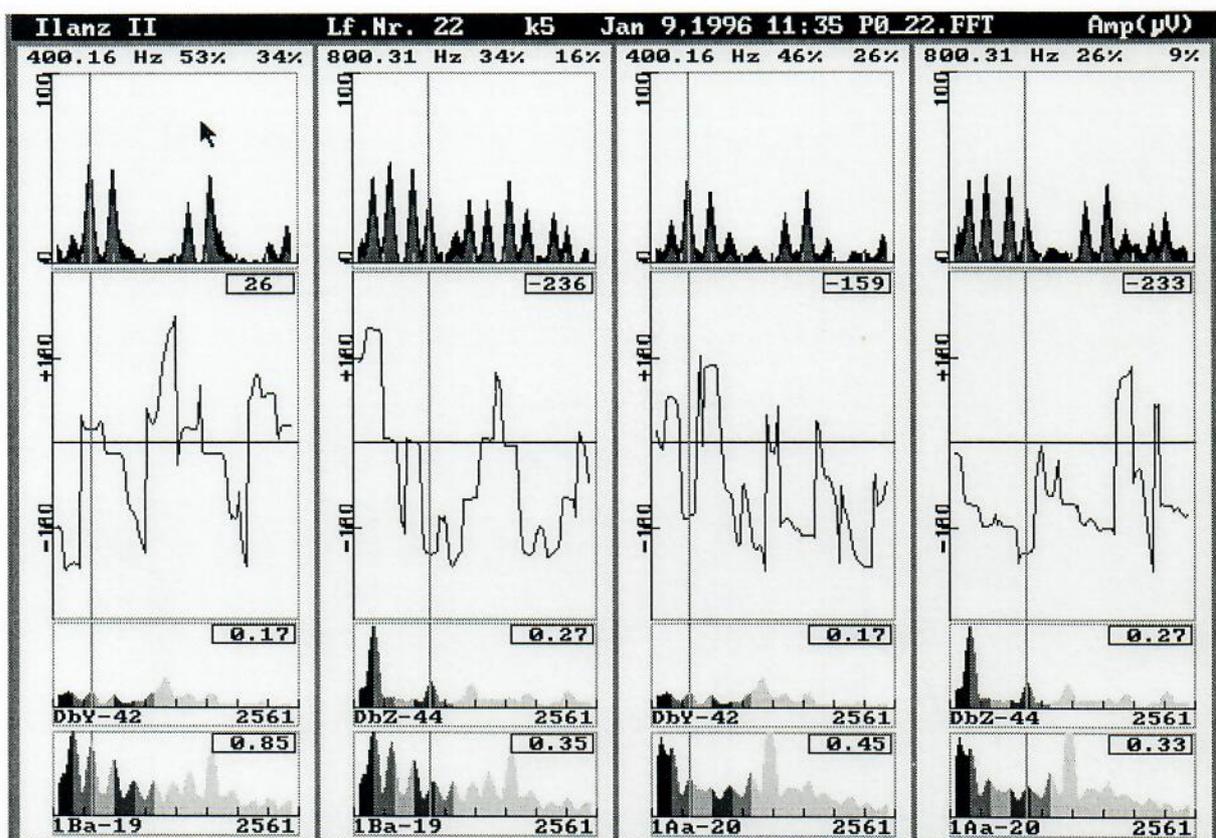
Schluss: Die obere Aussenwand schwingt als komplexes Gemisch von Schwingmodi, die teils durch das Hallendach, teils durch die Gebäudebasis übertragen werden.

Ein Sanierung nur des Dachs zum Beispiel, würde die erhoffte Wirkung nicht bringen.

Dass hier wiederum ein partiell frei schwingender Resonanzkörper in der oberen Aussenwand zu sehen ist, zeigt sich in den markant strukturierten Kohärenzspektren zu den Wandmessstellen. Insbesondere sind erwähnt:

- Resonanzpeak 1Bo-3 zu 1Ba-19 bei 630Hz mit horizontaler Phasentreppe und zu allen DbX/Y/Z (diese Formante wird also auf das Dach übertragen!)
- die beiden markanten Peaks der Kohärenz vom Dachbalken zur Aussenwand in Z- und Querrichtung liegen je etwas tiefer als die Harmonischen zu 210Hz, weshalb sie die 400Hz resp. 800Hz gut übertragen. Diese Kohärenz„löcher“ sind also eigentliche Übertragungskanäle und mögen eine Erklärung abgeben, weshalb insbesondere eine 400Hz-Schwingung an der Aussenwand sich zusätzlich ausprägt. Die Aufspaltung der 1. Harmonischen der Schaufelfrequenz in 420Hz und 400Hz auf der Aussenwand (vgl. Sonagramme 7 und 8) findet so eine überraschende Erklärung: der 420Hz-Anteil wird über den Wandsockel, die 400Hz-Linie wird über das Hallendach zugeführt. Das Bild ist für beide Wandmessstellen gleich, was die Zuverlässigkeit dieser Aussage unterstreicht (siehe separate Abbildung nächste Seite)

Schluss: Kohärenzpeaks sind Übertragungskanäle, ermöglichen also zuverlässige Nachweise, wo und bei welcher Frequenz Schwingenergie übertragen werden kann. Über deren tatsächliche Stärke geben die Amplitudenspektren Auskunft.



Weitere Interpretationen der Blätter 15 -17:

DbX-43 (die Hallenlängsrichtung) zeigt keine Kohärenz zur Aussenwand (logisch!)

1Ao-8 zeigt keine nennenswerte Kohärenz zum Hallendach (dieser Befund ist recht auffallend verschieden zum Bild der nicht sanierten Turbine!)

Bei rund 1000Hz gibt es eine durchgehende Kohärenz über das untere Druckrohr von 1B bis zur zugeordneten Wandmessstelle (Blatt 17 unten), während bei 1A via Kohärenz viel weniger Übertragungspotenz sichtbar wird. Die rund 1000Hz-Linie zeichnet sich im Aussenschall ab (Sonagramm 7).

Bei 630Hz zeichnet sich eine kohärente Durchlässigkeit entlang des Pfades oberes Rohr / 1Ba-19 ab. Über das obere Rohr ist eine solche Penetranz ab Turbine 1A durch Null-Kohärenz kaum denkbar.

Schluss: Es ist wahrscheinlich, dass die oberen Wandvibrationen im Block 1 überwiegend von Turbine 1B angeregt werden.

3.5.3.12 Schlussbetrachtung

Amplitudenspektren und Kohärenzfunktionen der Beschleunigungswerte von Anlage- und Gebäudeteilen ergeben über die Beurteilung durchschnittlicher Schwingstärken hinaus sehr differenzierte Einblicke in das dynamische Ausbreitungsmuster der Vibrationswellen und über die Anregungszustände relativ frei schwingender Baukörper. Diese unter den Begriff der Baudynamik fallenden, im Bauwesen stiefmütterlich behandelten modernen Methoden der elektronischen Messtechnik lassen sich im Prinzip unendlich verfeinern im topografischen, im frequentiellen und im zeitlich-dynamischen Sinne. Auch die Art der messtechnischen Befragung lässt sich variieren und fördert neue Einsichten zu Tage. So zeigt etwa die Kohärenzfunktion auf, welche Sinuswellen linear übertragen werden, wogegen das Amplitudenspektrum Auskunft über deren Stärke gibt. Dass diese Aspekte im Blick auf eine optimierte Bauweise sehr aktuell sind, zeigt ein im Juni an der ETH-Z

durchgeführtes Seminar von Prof. Dr. Hugo Bachmann, wo **7 Thesen der Baudynamik** wie folgt aufgestellt wurden:

1. **Baudynamik ist immer noch ein Schreckgespenst**; es klafft immer noch eine Wissenslücke zwischen dem praktischen Ingenieur und dem Dynamik-Spezialisten
2. Zahlreiche Bauten sollten **nicht nur für statische Belastung bemessen** werden
3. Die Praxis braucht **einfache Regeln für die dynamische Bemessung** (Eigenfrequenz, Frequenzabstimmung mit Dämpfung und Erregerfrequenz, vertikal und horizontal)
4. Die **Dämpfung ist ein „Heimlicheiss“**
5. Es gibt **immer wieder Überraschungen**, z.B. Wirbelablösungen
6. **Nichtlineare, dynamische Computerprogramme benötigen angemessene Elemente für die plastizierenden Bereiche**
7. **Nichtlineare, dynamische Rechenmodelle sind mit Versuchen zu überprüfen**

Wesentliches Ergebnis in unserem Zusammenhang ist, dass dem Konzept des Schwingungstilgers viel Bedeutung beigemessen wird. Es handelt sich hierbei um eine auf das Hauptsystem (z.B. Wand) abgestimmtes schwingungsfähiges System. Mit einer genauen Abstimmung der Frequenz des Schwingungstilgers auf das Hauptsystem kann erreicht werden, dass die im Schwingungstilger induzierten Kräfte den Schwingungen des Hauptsystems entgegenwirken. Es handelt sich um eine mit Feder und Dämpfung ans Hauptsystem abgestimmt angeschlossene Masse, deren Massenverhältnis etwas $1/20$ der Masse des Hauptsystems gewählt wird. - Beschränkung: ein Tilger wirkt nur an einem Ort auf eine Sinusschwingung optimal.

Dieses Konzept kann aus naheliegenden Gründe deshalb **im Kraftwerk Ilanz II** nicht realisiert werden. **Das Gebäude schwingt in einem umfassenden und äusserst komplizierten Sinne. Die Erregung schlägt überall mehr oder weniger durch. Der Block 1 ist am meisten betroffen. An Schlüsselstellen werden Amplitudenwerte erreicht, die unsere Accelerometer übersteuerten. Die maximalen noch messbaren Orte erreichten Schwingwerte, die noch verdächtig nahe an in der Literatur genannte Schadensgrenzen herankommen resp. diese bereits überschreiten. Das Hauptgeschehen spielt sich in einem Frequenzbereich ab, der in den Standards gar nicht erfasst ist, deshalb entstehen zusätzliche Unsicherheiten.**

3.6 Diskussion der Luftschall-Sonogramme

Die Luftschall-Sonogramme 1 bis 20 befinden sich im Anhang III. Man beachte die dortigen Bildlegenden! Die Texte beziehen sich auf diese Sonogramm-Darstellungen. Es handelt sich um Frequenz/Zeit-Diagramme. Die nach Frequenz (z.B. 150 - 650 Hz) und Zeit (z.B. 113 - 195 s) aufgemalten Farben stellen die Schallintensität in Dezibel bei der betreffenden Frequenz/Zeit-Koordinate dar. Es sind Falschfarben, deren Skala (z.B. 0 bis -5 dB = rot) jeweils rechts definiert ist. Die Sonogramme werden mittels Kurzzeit-FFT-Spektren berechnet. Jedes Spektrum definiert eine Spalte im Sonogramm. Das Hamming-Fenster hat unterschiedliche Längen, ausgedrückt oben rechts in Anzahl Abtastwerte oder Samples pro Fenster (z.B. 1024 oder 512 oder 256). In der darüber erwähnten Schrittweite (z.B. SW : 700) ist die Versetzung sukzessiver Fenster ersichtlich (z.B. sind 1024-Samples-Fenster hintereinander um 700 Samples versetzt, überlappen also um 324 Samples).

Die Peltongruppe lief auf 60 MW (alle 4 Düsen auf voller Leistung) bei diesen Luftschallaufnahmen. Man beachte auch die Tabelle mit Lf.Nr. 100 - 111 im Abschnitt 2.11 (2. Bericht).

3.6.1 Messungen vor der oberen Aussenwand (bergseitig)

Diese Messungen sind in den Sonogrammen 1 - 13 dargestellt. Ich befand mich mit dem portablen SONY-DAT-Recorder und dem zugehörigen Richtmikrofon auf dem schneebedeckten Dach des

bergseitigen Anbaus. Das Mikrofon hielt ich, wo nicht anders erwähnt, mit ausgestrecktem Arm 2m über Dachboden schräg in die Richtung, wo Wand/Kiesboden des Anbaudachs zusammentreffen.

Zunächst schritt ich entlang der Dachkante horizontal gleichmässigen Schritts. Die Übergänge zwischen den Blöcken 0 - 1 - 2 - 3 (Fugen zwischen Betonplatten) sind sprechend vermerkt und in den Sonagrammen eingetragen. Es zeigt sich, dass der Block 1 viel stärker vibriert, als die übrigen Wandsegmente (Sonagramm 1 - 6). Es ist die Schaufelfrequenz bei 210Hz und ihre 1. Harmonische bei 420Hz sowie die 2. Harmonische bei 630Hz, die hier ins Gewicht fallen. Die 3. und 4. Harmonischen sind aber noch sichtbar. Die 1. Harmonische 420Hz ist bei dieser Messung am stärksten. In den Nachbarwänden kommt die Grundwelle 210Hz noch am ehesten durch.

Im den Sonagramm 7 mit grösserer Fensterlänge (1024) und entsprechend feinerer Frequenzauflösung wird deutlich, dass die 1. Harmonische aufgespalten ist in zwei Frequenzen 420 und ca. 400Hz. Nicht die 420Hz sondern die 400Hz ist an diesem Messort dominant! Ganz rechts tritt auch noch eine schwache Linie bei 374Hz hervor, die vermutlich von den Kaplan turbinen stammt. Das Geräusch dieser Turbinen prägt sich vor der Wand 3 aber etwa 1000x schwächer aus (-30dB)!

Nun wird die Wand nochmals abgescritten (Sonagramm 11), jedoch nur mit 1m Wandabstand und mit 2m über Kiesdach horizontal gerichtetem Mikrofon. Der Luftschall wird hier räumlich viel mehr fokussiert. Der Schwingbauch bei 396Hz fällt räumlich mit dem Blechkasten zusammen. Da diese Schwingung nur vom Blechkasten ausgeht, wird sie auf Distanz kaum bemerkbar sein. Auf Distanz wird nur auffallen, was grossflächig schwingt. Die abgestrahlte Schallenergie ist mit der schwingenden Fläche proportional. Die Betonwand Block 1 als Ganzes schwingt also hauptsächlich mit der Grundfrequenz 210Hz; die 1. und 2. Harmonische sind aber ebenfalls deutlich, was diesem Klang eine gute subjektive Hörbarkeit verleiht.

Besonders interessant sind die vertikalen Schallprofile (Sonagramm 12). Hier wurde das Mikrofon gleichmässig von der Dachkante des Hallendachs bis zur Kante des Kiesdachs des Vorbaus gedreht. Dies 2x links und rechts der gestrichelten Linie. **Das Hallendach und die obere Wandpartien schwingen dominant bei 630Hz**, offenbar vor allem dort, wo die Wand lt. Bauplan nicht gefangen ist (Stimmgabel!). Die Grundwelle 210Hz strahlt aus allen Richtungen etwa gleich stark ein: also schwingt das ganze von hier auf Vordachmitte überblickbare Gebäude mit 210Hz. Diese Frequenz dringt überall durch. Leider war es nicht möglich, Aussenmessungen des Luftschalls über dem Hallendach zu machen. Doch zeigen die Innenmessungen mit Accelerometer, dass das Dach der Halle erheblich angeregt wird, offenbar durch den Luftkörper der Halle selbst.

3.6.2 Messungen vor der unteren Aussenwand (bergseitig)

Wer die bergseitigen Aussenwand des Anbaus mit dem Mikrofon abschreitet, merkt sogleich, dass aus dem Schotterbett der Wand laute 210 Hz Vibrationen (mit 2. Harmonischen) emporstrahlen. Es hat hier eigentliche „Schwingungsnester“ in den grossen Hohlräumen zwischen den Steinen. Dies hat weiter keine besondere Bedeutung und kann als einen lokalen Resonatoreffekt gedeutet werden. Grossflächige Abstrahlungen gibt es dadurch nicht. Diese untere, äussere Wand schwingt aber auch als Ganzes, wie das Sonagramm 14 zeigt. Insbesondere die 2. Harmonische bei 630Hz dominiert.

3.6.3 Messungen auf dem Fussweg zum Wohnhaus

Diese Messungen sind besonders wichtig, da dort die Tonimmissionen auf betriebsfremde Menschen einwirken. Im Wohnhaus selbst wurde nicht gemessen, jedoch auf dem problemlos zugänglichen Fussweg. Dieser wurde aufwärts und abwärts regelmässig abgescritten. Wegmarken 1 - 9 wie Bäume etc. wurden auf Band gesprochen und im Sonagramm 15 eingetragen. Besonders die 2. Harmonische bei 630Hz wirkt hier stark ein. Dies ist vermutlich ein Richtstrahleffekt der Wand, da die kürzeren Wellen besser gerichtet sind und weniger rundum verlaufen. Möglicherweise tragen auch Hallendachschwingungen dazu bei, da das Dach aus der Höhe schräg sichtbar wird.

Auffallend sind zwei Verstärkungszonen, die vermutlich angehäuften Interferenzknoten darstellen. Die Wellenlänge von Luftschall bei 630 Hz ist ca. $\frac{1}{2}$ Meter (Schallgeschwindigkeit 330m/s). Das Interferenzbild ist recht kompliziert und lässt keine einfache Deutung zu. Dieses unregelmässige Interferenzmuster lässt auch nicht an zonenweise wirksame Interferenzfilter (Lamellenkonstruktion) als bauliche Hilfsmassnahme denken. Wesentlich ist, dass mit wenigen Metern Versatz Zonen auftreten, wo der 210Hz Turbinenklang sehr gut hörbar ist und dann wieder kaum hörbar ist. Dieser Klang ist in der Tat recht laut; die Geräuschpegel erreichen Maxima, die weit über dem Strassenlärm liegen, und dies andauernd, so lange die Turbinen laufen.

Es wäre interessant, mit einem noch schärfer fokussierenden Richtmikrofon noch besser zu entscheiden, wie gross der Anteil des Hallendachs an der Geräuschemission ist. Sicher ist, dass der ganze Gebäudekomplex, namentlich Block 1, stark vibriert und auf Distanz massgeblich einwirkt. Nebst den Vibrationsamplituden sind vor allem die räumlichen Ausdehnungen der vibrierenden Kraftwerkteile für die Fernwirkung entscheidend. Räumlich begrenzte, kleinflächige Dämpfungsmassnahmen dürften deshalb wenig Erfolgsaussichten haben.

Am unteren Ende des Frequenzspektrums zeigen sich Linien bei 35Hz und 70Hz, deren Ursache wir nicht ausmachen können.

3.6.4 Messungen im Kugelschieberraum

Im Kugelschieberraum wurde der Laufsteg einmal hin und zurück abgeschrieben (Sonagramm 17). Auch hier zeigen sich die beiden dominanten Anteile von 210Hz und 630Hz, die den relativ engen Raum beide durchdringen. Eindeutige Zuordnungen zu 1A oder 1B sind ohne Nachmessungen kaum möglich.

3.6.5 Messungen entlang der Strasse

Die bergseitige Fahrstrasse wurde am werksseitigen Strassenrand in Richtung Ilanz abgeschrieben. Die Wegmarken sind wiederum eingetragen (Sonagramm 18). Die Übergänge Block 3/2, Block 2/1 und Ende Block 1 sind ebenso vermerkt. Zwischen 3 und 4 befindet sich Block 1, der um Grössenordnungen stärker schwingt. Wiederum sind die Linien 35Hz und Harmonische sichtbar. Ursache?

Es folgen noch 2 Messungen von wenigen Sekunden aus dem Stand vor Pelton turbine 1B (Sonagramm 19) und Pelton turbine 1A (Sonagramm 20). 1B schwingt überdeutlich bei 630Hz. 1A zeigt hier ausgewogene Intensität bei 210Hz und 630Hz. Ausserdem tritt noch die 1. Harmonische bei 420Hz deutlich hervor. Man beachte in dieser Abbildung die gemittelten Autospektren, die den zeitlichen Abschnitt von 4 resp. rund 7 Sekunden zusammenfassen, was bei stationären Verhältnissen (nicht schreiten, nicht schwenken) angebracht ist.

3.7 Empfohlene Massnahmen

Auf Seite 20 wurde vermerkt: Gegen aussen wirksame Immissions-Sanierungen müssen durch echte Schalldämpfungsmassnahmen an der äusseren Gebäudehülle realisiert werden. Auf Seite 23 wurde festgestellt: ein Schwingungstilger wirkt nur an einem Ort und auf 1 Sinusschwingung optimal. Obige Messungen beweisen

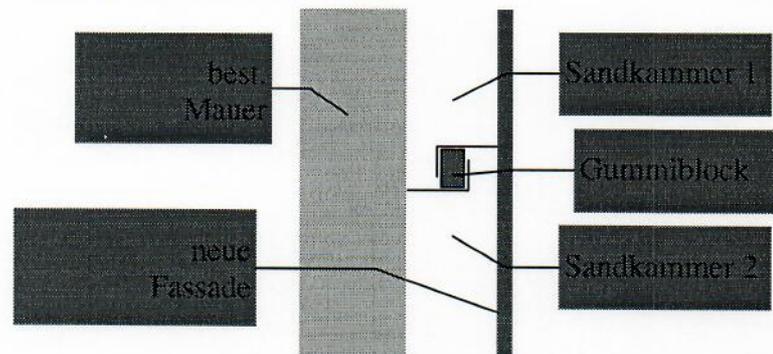
- wie penetrant und auf wie vielen Wegen
- wie grössflächig
- wie frequentiell differenziert
- wie nichtlinear

die nicht in Strom oder Wasserwirbel umgesetzte Turbinenleistung an der äusseren Gebäude sich bemerkbar macht. Der Einsatz von diskreten Schwingungstilger ist deshalb kaum ein aussichtsreiches Lösungskonzept. Das Aufmauern einer grossen Schallschutzwand gegen den/die Nachbarn wohl auch

nicht. An der Maschine selbst kann wohl korrigiert werden, aber mit nur geringem Erfolg punkto Immissionen. Der gezielte Einbau von Vibrationssperren (Schlitze im Fundament und im Mauerwerk) ist ein wohl zu komplexes Unterfangen, da die gesamte Gebäudekonzeption hinfällig würde. Teilmassnahmen wie Isolation der 4 Druckrohre von der Hallenwand bringen sicher nicht den gewünschten Erfolg, da zahlreiche alternative Übertragungswege existieren.

Mein Vorschlag wäre: Die Schwingungen an den Aussenwänden tilgen mit einer homogen verteilten Tilgerkonstruktion. Diese besteht aus einer Schicht lockerem Sand, die in einer ebenso tragfähig wie leicht konstruierten 2. Gebäudehaut gefangen wäre. Es ist das Prinzip des rückstossfreien Hammers hier umgesetzt. Ein Schlag beinhaltet viele Frequenzen, diese werden „auf einen Schlag“ aufgeessen durch das Sandmagazin im Hammer selbst. Sandsäcke sind hervorragende Schalldämpfer gegen Explosionen (Frontstellungen und Unterstände im Krieg), da sie billig sind und alle vorkommenden Frequenzen unselektiv aufnehmen und in innerer Reibung vernichten.

Die Art einer wabenförmigen Befestigung einer solchen Dämmhaut müsste man sich konstruktiv gut überlegen. Es sind beträchtliche Massen festzuhalten. Andererseits darf man den Effekt nicht wieder relativieren durch allzu solide Verankerungen, die als Schallbrücken wirken und die Vibrationen in die 2. Haut einleiten. Die Maueranker müssten verzahnt sein und mit einer auf Druck belasteten Gummizwischenlage versehen sein, etwa wie folgt:



Den Spalt zwischen der bestehenden Mauer und der neuen Fassade müsste man durch Versuche ermitteln. Beim Schwingungstilger ist $1/20$ der Masse des Hauptsystems empfohlen. In Anbetracht der verschiedenen Schwingfrequenzen, müsste man hier etwa mit 10 verschiedenen Schwingern operieren, also $1/2$ der Masse des Hauptsystems. Man könnte als eine Sandwand von $1/2$ Dicke wie die Mauer selbst vorschlagen. Doch könnte auch viel weniger genügen, da es hier ja nur darum geht, die Schwingstärke der neuen Fassade verschwinden zu lassen und nicht darum, die bestehende Mauer zu beruhigen. In Versuchen, am besten an der bestehenden Mauer selbst, könnten ohne Risiko abgeklärt werden, ob diese Massnahme halten würde, was ich verspreche.

Schluss: Ich empfehle Ihnen die Sanierung mit einer sandgefüllten 2. Fassade sehr, denn damit wären die Schallemissionen gegen die Nachbarn zu stoppen und - bei massiverer Konstruktion mit noch mehr Sand - könnte möglicherweise auch die Schwingstärke des Gebäudes selbst deutlich verringert werden, mit dem Erfolg, den Hallenraum von aussen zu beruhigen und die Konstruktionsermüdung günstig zu beeinflussen.

3.8 Anhang I: Graphen mit Zeitsignalen

3.9 Anhang II: Graphen mit Spektren und Kohärenzen

3.10 Anhang III: Graphen mit Sonagrammen