

Schlussbericht, DIS47315 / 150257, April 2004

Bericht über die Beurteilungshilfe zur Bestimmung der Tonhaltigkeit von Wärmepumpen nach Anhang 6 der Lärmschutz-Verordnung

Ausgearbeitet durch
Prof. Ercolino Rosa und Prof. Dr. Urs Bopp
Trefzer Rosa + Partner GmbH
Bündtenweg 4B
4453 Nussdorf

Zusammenfassung

In der LSV existieren keine objektiven Kriterien für die Bestimmung des Tongehalts einer Lärmquelle. In der Praxis ist die Zuordnung des Tongehalts einer Lärmquelle sehr schwierig und teilweise auch vom subjektiven Empfinden des Experten abhängig.

In der vorliegenden Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energie, des Amtes für Umwelt + Energie, Basel-Stadt, des Amt für Raumplanung, Basellandschaft, und der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz ein Hilfsinstrument (Programm) entwickelt, mit dem die Beurteilung des Tongehalts einer Wärmepumpe objektiv und mit einfachen Mitteln durchgeführt werden kann.

Mit der entwickelten Beurteilungshilfe kann die Beurteilung der Hörbarkeit des Tongehalts einer Wärmepumpe auf einfache Weise objektiviert werden. Nach der Eingabe eines unbewerteten Terzspektrums, beurteilt das Programm den Tongehalt als nicht, schwach, deutlich oder stark hörbar und gibt die entsprechenden Korrektur nach Anhang 6 der LSV an.

Wegen der Verwendung eines Terzspektrums, kann die Beurteilungshilfe nicht in allen Fällen eine richtige Beurteilung vornehmen. Trotzdem dürfte sie objektiver urteilen als Personen, besonders in den Fällen, wo ein Hörvergleich nicht möglich ist.

Bei einer breiten Anwendung der Beurteilungshilfe durch die Behörden würden überall gleiche Beurteilungen vorgenommen. Dadurch hätten die Hersteller bessere Voraussetzungen zur Weiterentwicklung ihrer Produkte.

Die Beurteilungshilfe soll nun in einer Testphase auf ihre Tauglichkeit überprüft werden.

Diese Arbeit ist mit finanzieller Unterstützung des BFE entstanden. Für Inhalt und Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Auftrag	1
1.2	Grundlagen	1
1.3	Ziel	2
2	Ausgangssituation	3
2.1	Beurteilung von Terzspektren durch eine Vollzugsbehörde	3
2.2	Künstlich erzeugte Geräusche	3
2.3	Geräuschmessungen	4
3	Emissionsmessung von Wärmepumpen	4
3.1	Messobjekte	4
3.2	Messgeräte	5
3.3	Messsituation	5
3.4	Messergebnisse	6
4	Verfahren für die Beurteilungshilfe	7
5	Validierung	8
5.1	Beurteilung der gemessenen Wärmepumpen	9
5.2	Beurteilung der gemessenen Ventilatoren	10
5.3	Beurteilung der Terzspektren von Wärmepumpenmessungen der EMPA	11
6	Pegelkorrektur K2 nach LSV	12
7	Schlussbemerkungen	13
8	Dank	13
9	Literatur	13
Anhang A	K-Bewertung	15

1 Einleitung

Bei der Ermittlung des Beurteilungspegels für Industrie- und Gewerbelärm muss nach Lärmschutz-Verordnung (LSV) Anhang 6 [1] die Hörbarkeit des Tongehalts einer Lärmquelle berücksichtigt werden. Für die Bestimmung des Tongehalts, im Folgenden kurz als Tonhaltigkeit bezeichnet, existieren aber keine objektiven Kriterien.

In der Praxis ist die Zuordnung der Tonhaltigkeit sehr schwierig und teilweise auch vom subjektiven Empfinden des Experten abhängig. Nach einer von der Fachhochschule beider Basel durchgeführten Umfrage unter Akustikexperten [2], liegen deren Beurteilungen aller vorgespielten Geräusche im ganzen zugelassenen Bereich zwischen „nicht hörbarem Tongehalt“ und „stark hörbarem Tongehalt“. Dies entspricht einem Bereich von +0 dB bis +6 dB für die Pegelkorrektur K2 gemäss LSV Anhang 6.

Die Vollzugsbehörden stehen oft noch vor dem Problem, eine Beurteilung nur nach einem vorliegenden Messprotokoll vornehmen zu müssen, ohne die Hörbarkeit subjektiv beurteilen zu können. Solche Messprotokolle enthalten meist nur ein Terzspektrum, was die Beurteilung weiter erschwert.

Dieser Zustand ist in verschiedener Hinsicht unbefriedigend. Zum einen stehen die Vollzugsbehörden im Konflikt, die Interessen der Anwohner zu schützen, was zu einer zu hohen Beurteilung führen kann. Zum anderen können sich Hersteller bei der Verbesserung ihrer Produkte nicht auf eine klare Beurteilungspraxis abstützen, sondern sind der „Willkür“ der Behörden ausgesetzt.

Um diese Situation zu verbessern, haben, auf Initiative des Amt für Raumplanung, Herrn Dipl. Ing. P. Trauffer, das Bundesamt für Energie, Bereich Umgebungswärme, das Amt für Umwelt + Energie, Abt. Lärmschutz, Basel-Stadt, das Amt für Raumplanung, Abt. Lärmschutz, Basellandschaft, und die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz beschlossen, für den Bereich Wärmepumpen eine Beurteilungshilfe erarbeiten zu lassen.

1.1 Auftrag

Das Bundesamt für Energie, Bereich Umgebungswärme, das Amt für Umwelt + Energie, Abt. Lärmschutz, Basel-Stadt, das Amt für Raumplanung, Abt. Lärmschutz, Basellandschaft, und die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz gaben Trefzer Rosa + Partner GmbH den Auftrag, ein einfaches Hilfsmittel (Programm) zu erarbeiten, das die objektive Beurteilung der Hörbarkeit des Tongehalts einer Wärmepumpe auf der Basis von Terzspektren erlaubt.

1.2 Grundlagen

Für die Beurteilung der Hörbarkeit des Tongehalts einer Lärmquelle gibt es zur Zeit keine objektive Richtlinie. In jedem Kanton wird die Beurteilung subjektiv von den Vollzugsbehörden durchgeführt.

Vor kurzem (November 2002) wurde ein überarbeiteter Entwurf der Deutschen Norm DIN 45681 [3] herausgegeben. Auch darin wird auf die Notwendigkeit einer Objektivierung der Tonhaltigkeit und des Tonzuschlages hingewiesen: „Die Bemessung von Tonzuschlägen nach dem Höreindruck kann zu Unsicherheiten bei der Beurteilung führen, insbesondere dann, wenn Uneinigkeit über das Ausmass der Tonhaltigkeit besteht.“

In [3] wird ein Verfahren vorgestellt, das auf einer Schmalbandanalyse basiert. Es können damit einzelne Sinustöne innerhalb eines Geräusches bestimmt werden. Das Erstellen einer

Schmalbandanalyse ist aber recht aufwendig und kann den Nutzern dieser Arbeit (i.e. den Vollzugsbehörden) nicht zugemutet werden. Des weiteren Bestimmt DIN 45681 Einzeltöne erst ab einer Frequenz von 100 Hz: „Das beschriebene Verfahren ist anwendbar, wenn die Frequenz des zu beurteilenden Tones höher als 100 Hz ist...“.

Gerade bei Wärmepumpen können aber Tongehalte von weniger als 100 Hz hörbar sein. In solchen Fällen, „... wenn die Tonfrequenz kleiner als 100 Hz ist ...“, kann dieses Verfahren zur Ermittlung der Tonhaltigkeit ... die subjektive Beurteilung nicht ersetzen...“, wird in [3] festgehalten. Hier ist zu bedenken, dass tiefe Töne weiter tragen.

Dafür gibt es eine Norm speziell für tieffrequente Geräusche [4]. Dabei gilt hier: „Das Geräusch enthält einen deutlich hervortretenden Einzelton, wenn die Differenz zwischen $L_{Terz, eq}$ in einer Terz und den entsprechenden Pegeln in den beiden Nachbarterzen grösser als 5 dB ist.“

Es existieren aber noch andere Normen, in denen nicht eine Schmalbandanalyse, sondern eine Terzanalyse als Basis dient. Einige werden im Folgenden beschrieben.

In einer Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure VDI 2058 [5] wird ein „Zuschlag für Einzeltöne“ erhoben, wenn sich „... mindestens ein Einzelton deutlich hörbar heraushebt...“. Weiter wird angemerkt: „In einem Terzspektrum kann ein hervortretender Einzelton den Pegel seiner Terz gegenüber den benachbarten Terzpegeln um 5 dB und mehr erhöhen“.

Auch in der Norm ISO1996-2 [6] werden keine genauen Angaben zur objektiven Beurteilung gemacht. Es findet sich lediglich der Hinweis: „... In some cases, a prominent tonal component may be detected in one-third octave spectra if the level of a one-third octave band exceeds the level of the adjacent bands by 5 dB or more... . . . If tonal components are clearly audible and their presence can be detected by a one-third octave analysis, the adjustment may be 5 to 6 dB. If the components are only just detectable by the observer and demonstrated by narrow-band analysis, an adjustment of 2 to 3 dB may be appropriate.“ Auch hier muss also das Geräusch von der beurteilenden Person selbst abgehört werden.

Die österreichische Norm ÖNORM S 5004 [7] schliesst sich eng an ISO1996-2 an. Es heisst darin unter anderem: „Wenn Tonkomponenten deutlich hörbar sind und ihr Vorhandensein durch eine unbewertete Terzanalyse nachgewiesen werden kann, d.h. wenn der Pegel eines Terzbandes die Pegel der benachbarten Bänder um 5 dB oder mehr übersteigt, beträgt der Anpassungswert +6 dB. ... Wenn die Tonkomponenten zwar hörbar sind, aber das Terzbandkriterium nicht erfüllt ist, beträgt der Anpassungswert +3 dB.“

1.3 Ziel

Die Auftraggeber und Auftragnehmer massen sich nicht an, mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen eine einfachere und genauere, allgemein gültige Methode entwickeln zu können, als dies den Normengremien in den vergangenen Jahren gelungen wäre. Vielmehr soll durch Einschränken des Anwendungsbereiches die Aufgabe vereinfacht werden.

In der Vorliegenden Arbeit soll ein einfaches, pragmatisches Verfahren erarbeitet werden (im Folgenden kurz als Beurteilungshilfe bezeichnet), das den Vollzugsbehörden eine objektive Beurteilung der Hörbarkeit des Tongehalts einer Wärmepumpe ermöglicht.

Die Beurteilungshilfe soll auf Terzspektren basieren, da diese in vielen Fällen die einzige zur Verfügung stehende Grundlage bilden und eine subjektive Beurteilung (Anhören des Geräusches, kurz Höreindruck) oft nicht möglich ist. Dabei wird bewusst in Kauf genommen, dass die Beurteilungshilfe u.U. nicht alle Fälle ganz richtig erfasst. Die Autoren erwarten jedoch, dass es in der Mehrzahl der Fälle bessere Beurteilungen liefert, als die vorgängig erwähnte subjektive, auf Erfahrung und „Gefühl“ basierende Beurteilung nach Terzspektren.

Im Weiteren soll die Beurteilungshilfe Herstellern von Wärmepumpen eine objektive Richtlinie sein, wenn sie ihre Produkte weiter verbessern wollen.

2 Ausgangssituation

2.1 Beurteilung von Terzspektren durch eine Vollzugsbehörde

Es war übliche Praxis bei einem der Auftraggeber (ARP), Beurteilungen der Hörbarkeit des Tongehalts einer Wärmepumpe anhand von Messprotokollen vorzunehmen, die von der EMPA durchgeführt wurden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung, wurden lineare Terzspektren von 16 Wärmepumpenmessungen der EMPA dieser Vollzugsbehörde zu Beurteilung vorgelegt. Das Ergebnis der Beurteilung ist in Tabelle 1 wiedergegeben.

Tabelle 1: Subjektive Beurteilung der Hörbarkeit des Tongehalts einer Wärmepumpe anhand von Terzspektren

Wärmepumpe - Bericht Nr.	Beurteilung Tonhaltigkeit
273	stark
287	deutlich
288	keine
290	keine
292	schwach
293	keine
295	schwach
296	keine
300	keine
302	deutlich
303	stark
305	deutlich
306	deutlich
310	schwach
311	keine
312	keine

Diese Beurteilung wird zur Überprüfung des zu entwickelnden Verfahrens für die Beurteilungshilfe herangezogen werden, auch wenn die Geräusche von der Beurteilenden Person nie abgehört werden konnten.

2.2 Künstlich erzeugte Geräusche

Um eine Vielzahl von Geräuschaufnahmen mit unterschiedlich hörbarem Tongehalt unterschiedlicher Frequenz zu erhalten, wurden im Akustikraum mit Hilfe eines Generators Sinustöne in ein Rosa-Rauschen eingemischt.

Solche Geräusche sind aber nur von begrenztem Nutzen. Zum einen ist die Analyse des Terzspektrums eines solchen Geräusches problematisch, wenn der Sinuston gerade auf der Grenzfrequenz zwischen zwei Terzen liegt. Für solch einen Fall schreibt die ÖNORM [6] vor: „Wenn zwei benachbarte Terzbänder annähernd den gleichen Pegel aufweisen und diese Pe-

gel mindestens 5 dB über dem Pegel der Nachbarbänder liegen, beträgt der Anpassungswert ebenfalls +6 dB, da dies darauf hinweist, dass die vorherrschende Frequenz an der Grenze zwischen den beiden Terzbändern liegt.“ Bei den erzeugten Geräuschen ist diese Praxis allerdings nur mit Schwierigkeiten anzuwenden, da der Druckpegel des Einzeltones nur zu einem geringen Anstieg des Terzpegels führt. Bei schwach hörbarem Tongehalt ist der Anstieg oft so gering, dass sich das Terzband nur wenig von den benachbarten abhebt. Trotzdem kann der Ton vom Ohr noch wahrgenommen werden. Erwartungsgemäss ist dies besonders ausgeprägt, wenn der Einzelton gerade auf der Grenzfrequenz zweier Terzbänder liegt.

Die im Labor erzeugten Geräusche können somit nur mit Vorsicht zur Überprüfung der zu entwickelnden Beurteilungshilfe herangezogen werden.

2.3 Geräuschemessungen

Da die unter 2.1 beurteilten Geräusche nie wirklich abgehört und subjektiv beurteilt wurden, und die unter 2.2 aufgeführten, im Labor erzeugten Geräusche das Spektrum von Wärmepumpen nicht richtig wiedergeben, wurden verschiedene Wärmepumpen, im Labor und im eingebauten Zustand, ausgemessen, um die vorgeschlagene Beurteilungshilfe zu validieren. Diese Messungen werden im nächsten Kapitel näher beschrieben.

3 Emissionsmessung von Wärmepumpen

3.1 Messobjekte

Die im Labor gemessenen Wärmepumpen zählen zu den fortschrittlichsten. Daneben wurden auch zwei im Einsatz stehende Wärmepumpen gemessen.

Tabelle 2: Ausgemessene Wärmepumpen

	Hersteller / Typ	Aufstellungsort	Zustand	Datum	Witterung (aussen)
WP1	Siemens LI7M	Labor	mit und ohne Schacht	9.9.03	18°C / 978 mbar
WP2	Stiebel Eltron WPL18	Labor	mit und ohne Schacht	11.9.03	15°C / 988 mbar
WP3	Stiebel Eltron WPL15	eingebaut	mit und ohne Schutzgitter	13.11.03	4°C / 1022 mbar
WP4	Heliotherm WP19L	eingebaut	offen aufgestellt	5.12.03	5°C / 990 mbar

Um weitere Messdaten zu erhalten und um Quervergleiche zu anderen, den Wärmepumpen ähnlichen Geräuschquellen ziehen zu können, wurden folgende Messungen von Ventilatoren mit in die Studie einbezogen.

Tabelle 3: Ausgemessene Ventilatoren

	Objekt	Aufstellungsort	Anzahl / Zustand	Datum
V1	Neoplan alt	Labor	1	23.2.04
V2	Neoplan neu1	Labor	1	27.2.04
V3	Neoplan neu2	Labor	1	4.3.04
V4	Neoplan neu2	Labor	2 in Serie	9.3.04
V5	Lüftung Mästerei	eingebaut	Mehrere Lüfter unter Volllast	10.6.03

3.2 Messgeräte

Tabelle 4: Verwendete Messgeräte

Anzahl	Art	Hersteller	Typ
4	Schallpegelmessgeräte	Brüel & Kjaer	2230
2	Digital-Datenaufzeichnungsgeräte	Sony	TCD-D100
2	Akustik-Kalibratoren	Norsonic	1251
1	Echtzeit-Frequenzanalysator	Norsonic	840
1	Messdatenerfassungs-Software	DIAdem 6.0	

3.3 Messsituation

Die Wärmepumpen WP1 und WP2 wurden im Labor ausgemessen. Dabei wurde jeweils die Ansaugöffnung, bzw. die Auslassöffnung von der Anlage abgetrennt gemessen. Die Öffnungen wurden einmal ohne und einmal mit einem Lüftungsschacht, aber jeweils ohne Schutzgitter gemessen. Durch den Lüftungsschacht der Grösse 120x70x60 cm wurde der Luftstrom um 90° abgelenkt.

Die Daten wurden bei unter Volllast laufender Wärmepumpe in Abständen von 5 m und 10 m aufgenommen.

Abbildungen 1 und 2 zeigen die Situation am Beispiel der WP1.



Abbildung 1: Aufstellung der WP1 im Labor



Abbildung 2: Messsituation aussen, mit Lüftungsschacht

Bei den eingebauten Wärmepumpen WP3 und WP4 mussten die Messabstände den örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Die differierenden Messabstände wurden in den Messergebnissen aber nicht speziell berücksichtigt, da primär das Spektrum von Interesse war und nicht der Pegel. Ansaug- und Auslassgeräusche konnten nur bedingt getrennt gemessen werden.

Bei den Ventilatoren wurden im Labor in Abständen von 1 m und 3 m die Geräusche bei verschiedenen Drehzahlen aufgezeichnet.

3.4 Messergebnisse

Im Folgenden ist nur die Beurteilung nach dem Höreindruck wiedergegeben. Die Beurteilung durch die entwickelte Beurteilungshilfe ist im Abschnitt 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Subjektive Beurteilung (Höreindruck) der Hörbarkeit der Tonhaltigkeit der Wärmepumpen

	Hersteller / Typ	Öffnung	Zustand	Beurteilung Tonhaltigkeit
WP1	Siemens LI7M	Ansaug	ohne Schacht	keine
		Ansaug	mit Schacht	schwach
		Auslass	ohne Schacht	keine
		Auslass	mit Schacht	schwach
WP2	Stiebel Eltron WPL18	Ansaug	ohne Schacht	keine
		Ansaug	mit Schacht	keine
		Auslass	ohne Schacht	keine
		Auslass	mit Schacht	keine
WP3	Stiebel Eltron WPL15	Ansaug	ohne Schutzgitter	keine
		Ansaug	mit Schutzgitter	z.T. schwach
		Auslass	ohne Schutzgitter	keine
		Auslass	mit Schutzgitter	z.T. schwach
WP4	Heliotherm WP19L	Ansaug		stark
		Auslass		stark

Tabelle 6: Subjektive Beurteilung (Höreindruck) der Hörbarkeit der Tonhaltigkeit der Ventilatoren

	Objekt	Drehzahl [min^{-1}]	Beurteilung Tonhaltigkeit
V1	Neoplan alt	2880	deutlich
		2190	deutlich
		1460	deutlich
V2	Neoplan neu1	1460	keine
V3	Neoplan neu2	1460	keine
		1570	keine
		1680	keine
V4	Neoplan neu2	1945	stark
		2200	deutlich
V5	Lüftung Mästerei	Volllast	keine

4 Verfahren für die Beurteilungshilfe

In Anlehnung an die Normen [4-6], wurde die Überhöhung eines Terzbandes gegenüber den benachbarten Terzbänder zur Beurteilung gewählt. Als Überhöhung gilt dabei die algebraische Summe der Differenzen, gebildet aus dem unbewerteten Terzpegel eines Bandes als Minuend und den Pegeln der benachbarten Terzbänder als Subtrahenden nach Gleichung (1).

$$\Delta L_i = 2 \cdot L_{pi} - L_{pi-1} - L_{pi+1} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Dabei gilt:

ΔL_i Überhöhung des Terzbandes i ,

L_{pi} unbewerteter Schalldruckpegel des zu untersuchenden Terzbandes i [dB(lin)],

L_{pi-1} unbewerteter Schalldruckpegel des nächst tieferen benachbarten Terzbandes [dB(lin)] und

L_{pi+1} unbewerteter Schalldruckpegel des nächst höheren benachbarten Terzbandes [dB(lin)].

Die Auswertung hat gezeigt, dass eine Beurteilung nur nach Gleichung (1) besonders im tiefen Frequenzbereich zu starke Werte liefert. Aus diesem Grunde muss der berechnete Wert der Überhöhung noch frequenzabhängig korrigiert werden, was in dieser Arbeit als K-Bewertung bezeichnet wird. Diese Korrektur ist in Abbildung 3 und als Tabelle in Anhang A wiedergegeben.

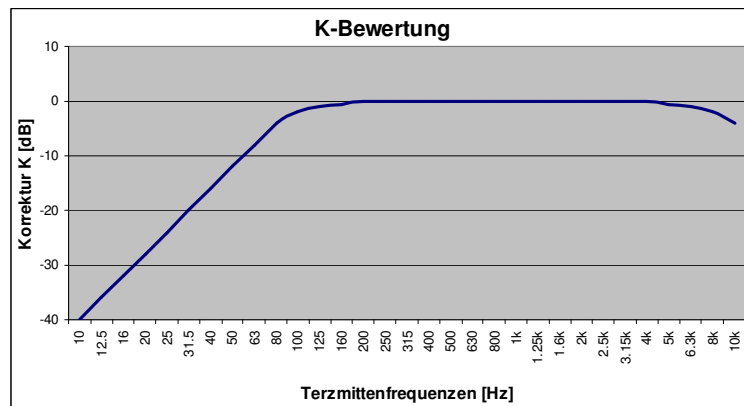


Abbildung 3: Frequenzabhängige Korrektur der Überhöhung bei der K-Bewertung

Die in Gleichung (1) ermittelte Differenz wird einfach mit dem Korrekturwert der K-Bewertung algebraisch addiert

$$L_{Bi} = \Delta L_i + K_i \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

wobei

L_{Bi} Beurteilungswert des Terzbandes i ,

ΔL_i Überhöhung des Terzbandes i und

K_i K-Bewertung des Terzbandes i nach Tabelle 11 ist.

Die Gleichungen (1) und (2) können auch zusammengefasst werden als

$$L_{Bi} = 2 \cdot L_{pi} - L_{pi-1} - L_{pi+1} + K_i \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

Dabei sind

L_{Bi} Beurteilungswert des Terzbandes i ,

L_{pi} unbewerteter Schalldruckpegel des zu untersuchenden Terzbandes i
[dB(lin)],

L_{pi-1} unbewerteter Schalldruckpegel des nächst tieferen benachbarten Terzbandes [dB(lin)],

L_{pi+1} unbewerteter Schalldruckpegel des nächst höheren benachbarten Terzbandes [dB(lin)] und

K_i K-Bewertung des Terzbandes i nach Tabelle 11.

Der nach Gleichung (3) ermittelte Wert wird nun mit verschiedenen Grenzwerten verglichen, um die Tonhaltigkeit zu beurteilen. Dabei gelten die in Tabelle 7 wiedergegebenen Grenzwerte.

Tabelle 7: Grenzwerte zur Beurteilung der Hörbarkeit des Tongehalts

Beurteilungswert L_{Bi} [dB]	Beurteilung des Tongehalts
$L_{Bi} < 15$	nicht hörbar
$15 \leq L_{Bi} < 20$	schwach hörbar
$20 \leq L_{Bi} < 25$	deutlich hörbar
$25 \leq L_{Bi}$	stark hörbar

Es fällt auf, dass die Beurteilungswerte deutlich höher sind, als die 10 dB, die in einigen Normen als Kriterium aufgeführt werden [4-7]. Der Hörvergleich bei den Wärmepumpen hat jedoch gezeigt, dass dieses Kriterium nicht mit dem Höreindruck übereinstimmt. Die Ursache mag darin liegen, dass bei Wärmepumpen nicht ein einzelner Sinuston hörbar ist, sondern ein etwas breitbandigerer Ton und dieser deshalb beim Hörvergleich nicht so auffällig ist.

5 Validierung

Vor dem definitiven Festlegen des unter Abschnitt 4 aufgeführten Verfahrens, wurden verschiedene Einflussfaktoren untersucht, wie Verwendung von unbewerteten und A-bewerteten Terzspektren, unterschiedliche Formen von Kurven bei der K-Bewertung, Grösse der Grenzwerte, etc.

Es hat sich gezeigt, dass eine A-Bewertung der Terzspektren in der Regel keinen grossen Einfluss auf das Ergebnis der Beurteilung hat.

Die Form der Kurve bei der K-Bewertung (Abbildung 3) wurde so optimiert, dass ein tieffrequenter Tongehalt (im Bereich von 40 Hz bis 100Hz) möglichst dem Höreindruck entsprechend beurteilt wird.

Es hat sich gezeigt, dass bei Wärmepumpen auch unter 100 Hz ein hörbarer Tongehalt auftreten kann. Dieser Bereich wird von der DIN 45681 nicht abgedeckt und kann deshalb nicht

zu einem Quervergleich beigezogen werden. (Siehe hierzu im Besonderen auch Abschnitt 5.1.)

Bei höheren Frequenzen, ab 100 Hz, zeigt die Auswertung nach DIN 45681 in den meisten Fällen eine Übereinstimmung mit jener der Bewertungshilfe. Allerdings konnte in einigen Fällen keine aussagekräftige Auswertung vorgenommen werden, wenn das Schmalbandspektrum stark zerfurcht war. Die Norm sieht in solch einem Fall keine Glättung der Kurve vor, sondern lediglich eine Mittelung über mehrere Messungen. Aber auch dies führte nicht in allen Fällen zu brauchbaren Ergebnissen. Dies unterstreicht die von den Auftraggebern vertretene Auffassung, dass die Beurteilung der Tonhaltigkeit nach DIN 45681 den Vollzugsbehörden kaum zugemutet werden kann.

Aus diesen Gründen wird im Folgenden nur bei einer Messung ein Vergleich zur DIN 45681 gemacht.

5.1 Beurteilung der gemessenen Wärmepumpen

Die wichtigsten Ergebnisse eines Vergleichs der Beurteilung der Tonhaltigkeit zwischen der Beurteilungshilfe und dem Höreindruck sind in Tabelle 8 wiedergegeben.

Die Beurteilungen von WP1 zeigt, dass diese offenbar um 100 Hz eine Eigenfrequenz des Schachtes anregt. Auch ohne Schacht sind dort Beurteilungswerte $L_{B,i}$ bis zu 13 dB vorhanden. Diese liegen aber immer noch im Bereich von nicht hörbarem Tongehalt. Im Gegensatz dazu liegen die Beurteilungswerte z.B. von WP2 deutlich tiefer (max. 2.2 dB ohne Schacht), so dass diese die Eigenfrequenz nicht anregt.

Ähnliches kann über WP3 gesagt werden. Hier wird offensichtlich eine Eigenfrequenz des Schutzgitters geringfügig angeregt, so dass der Beurteilungswert $L_{B,i}$ z.B. von 14.7 dB ohne Gitter auf 15.3 dB mit Gitter steigt und damit eine schwach hörbare Tonhaltigkeit beurteilt wird.

Tabelle 8: Vergleich der Beurteilung der Tonhaltigkeit zwischen Beurteilungshilfe und Höreindruck bei Wärmepumpen

	Hersteller / Typ	Öffnung	Zustand	Beurteilung Tonhaltigkeit mit	
				Höreindruck	Beurteilungshilfe
WP1	Siemens LI7M	Ansaug	ohne Schacht	keine	keine
		Ansaug	mit Schacht	schwach	schwach ¹
		Auslass	ohne Schacht	keine	keine
		Auslass	mit Schacht	schwach	deutlich ¹
WP2	Stiebel Eltron WPL18	Ansaug	ohne Schacht	keine	keine
		Ansaug	mit Schacht	keine	keine
		Auslass	ohne Schacht	keine	keine
		Auslass	mit Schacht	keine	keine
WP3	Stiebel Eltron WPL15	Ansaug	ohne Schutzgitter	keine	keine
		Ansaug	mit Schutzgitter	z.T. schwach	schwach ¹
		Auslass	ohne Schutzgitter	keine	keine
		Auslass	mit Schutzgitter	z.T. schwach	schwach ¹
WP4	Heliotherm WP19L	Ansaug		stark	deutlich
		Auslass		stark	deutlich

¹ Stärkster Tongehalt wiedergegeben; abhängig von der Messdistanz auch schwächere Beurteilungen.

WP4 wird als deutlich tonhaltig beurteilt, obwohl diese Wärmepumpe im Hörvergleich als stark tonhaltig klassiert wurde. Eine genauere Betrachtung zeigt aber, dass Beurteilungswerte von 24.0 dB und 24.4 dB betragen, also nur wenig unter dem für eine „stark tonhaltige“ Bewertung notwendigen Grenzwert von 25 dB liegen. Abweichungen wie diese werden bei einem Verfahren, das auf Terzpegeln basiert, kaum zu vermeiden sein.

Interessant ist hier auch ein Vergleich mit der Beurteilung nach DIN 45681. Diese beurteilt das Ansauggeräusch als deutlich tonhaltig (Tonzuschlag 4 dB) und das Auslassgeräusch als deutlich bis stark tonhaltig (Tonzuschlag 5 dB), also sehr ähnlich wie der Höreindruck oder die Beurteilungshilfe.

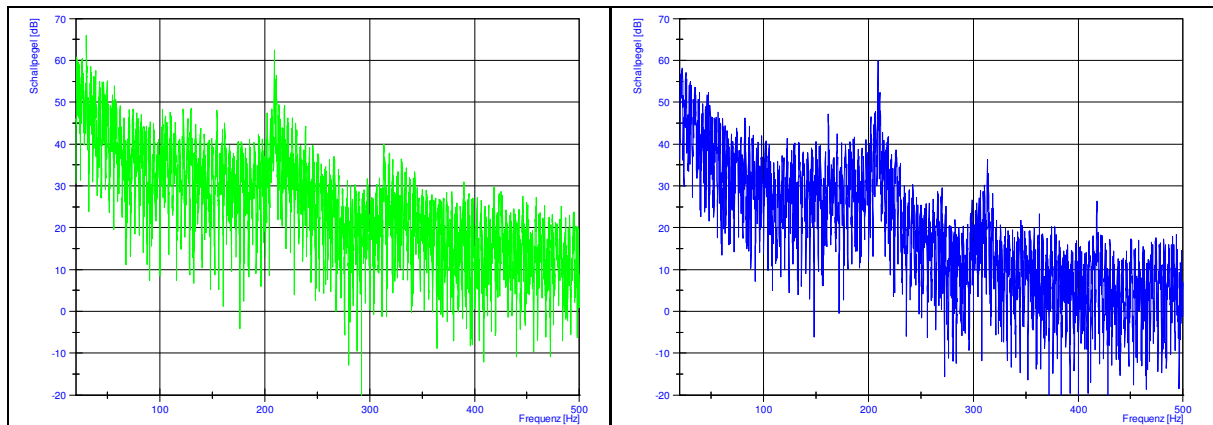


Abbildung 4: Schmalbandanalyse der Ansaug- (links) und Auslassgeräusche (rechts) der WP4

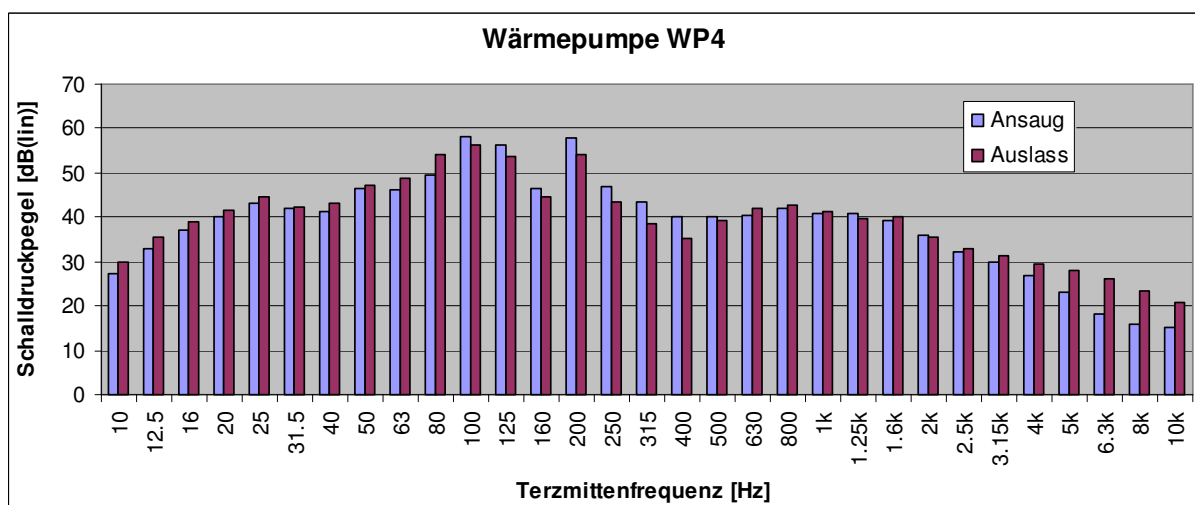


Abbildung 5: Terzbandanalyse der Ansaug- und Auslassgeräusche der Wärmepumpe WP4

5.2 Beurteilung der gemessenen Ventilatoren

Der Vergleich zeigt auch hier weitgehende Übereinstimmung zwischen dem Höreindruck und der berechneten Beurteilung (Tabelle 9).

Tabelle 9: Vergleich der Beurteilung der Tonhaltigkeit zwischen Beurteilungshilfe und Höreindruck bei Ventilatoren

	Objekt	Drehzahl [min^{-1}]	Beurteilung Tonhaltigkeit	
			Höreindruck	Beurteilungshilfe
V1	Neoplan alt	2880	deutlich	deutlich
		2190	deutlich	deutlich
		1460	deutlich	deutlich
V2	Neoplan neu1	1460	keine	keine
V3	Neoplan neu2	1460	keine	schwach
		1570	keine	keine
		1680	keine	keine
V4	Neoplan neu2	1945	stark	deutlich
		2200	deutlich	schwach
V5	Lüftung Mästerei	Volllast	keine	keine

Allerdings wird bei V3 ein schwach hörbarer Tongehalt bei einer Frequenz von 2 kHz angegeben, der beim Hörvergleich nicht festgestellt wurde. Es liegt hier also eine leichte Überbewertung vor.

Andererseits wird bei V4 bei 2200 min^{-1} ein schwach hörbarer Tongehalt angegeben, während beim Hörvergleich ein deutlich hörbarer Tongehalt festgestellt wurde.

Gerade diese beiden Fälle zeigen auch die Grenzen der Beurteilungshilfe auf. Es kann Fälle geben bei denen im Hörvergleich ein Tongehalt hörbar ist, die Beurteilungshilfe aber keinen hörbaren Tongehalt angibt, oder umgekehrt. Die Verwendung eines Terzspektrums anstelle einer Schmalbandanalyse ist sicher zum Teil eine Ursache. Allerdings war auch die Beurteilung nach DIN45681, der eine Schmalbandanalyse zugrunde liegt, oft nicht befriedigend.

Um auch den tieffrequenten Bereich genügend beurteilen zu können, sollte das Terzspektrum mit dem 10 Hz Terzband beginnen. Zwingend muss es aber bei 25 Hz beginnen, damit eine Beurteilung ab 31.5 Hz möglich wird. (Wegen der Differenzbildung bei der Berechnung der Überhöhung muss das Spektrum um eine Terz tiefer beginnen, als das tiefste zu beurteilende Terzband.)

Als obere Grenze empfehlen die Autoren das 10 kHz Terzband.

5.3 Beurteilung der Terzspektren von Wärmepumpenmessungen der EMPA

Tabelle 10 zeigt den Vergleich der Beurteilungen der Tonhaltigkeit zwischen der Beurteilungshilfe und der von einer Person anhand von Terzspektren durchgeführten (vergleiche Abschnitt 2.1).

Die Beurteilungen fallen weitgehend gleich aus. In wenigen Fällen bewertet die Beurteilungshilfe etwas zu milde. Diese Ergebnisse dürfen aber nicht zu kritisch betrachtet werden, da bei all diesen Messungen ein direkter Hörvergleich fehlt.

Tabelle 10: Vergleich der Beurteilung der Tonhaltigkeit zwischen Beurteilungshilfe und einer Person anhand von Terzspektren

Wärmepumpe - Bericht Nr.	Beurteilung Tonhaltigkeit	
	Höreindruck	Beurteilungshilfe
273	stark	stark
287	deutlich	deutlich
288	keine	keine
290	keine	keine
292	schwach	keine
293	keine	keine
295	schwach	keine
296	keine	keine
300	keine	keine
302	deutlich	deutlich
303	stark	stark
305	deutlich	deutlich
306	deutlich	schwach
310	schwach	keine
311	keine	keine
312	keine	keine

6 Pegelkorrektur K2 nach LSV

In der LSV Anhang 6 sind Pegelkorrekturen von 0, 2, 4 oder 6 dB vorgeschrieben entsprechend nicht, schwach, deutlich oder stark hörbarem Tongehalt. Diese Unterteilung ist durchaus sinnvoll, sind doch feinere Unterteilungen bei einem Hörvergleich kaum differenzierbar.

Bei einer analytischen Unterteilung, wie bei der vorliegenden Beurteilungshilfe, ist die Situation aber anders. Zum Beispiel erfolgt die Beurteilung des schwach hörbaren Tongehalts von WP3 mit Schutzgitter aufgrund eines Beurteilungswerts von 15.3 dB. Im Gegensatz dazu basiert die Beurteilung „kein hörbarer Tongehalt“ der gleichen WP3 bei der Auslassöffnung ohne Gitter auf einem Beurteilungswert von 14.7 dB. Damit verursacht eine Differenz von 0.6 dB in diesem Fall einen Zuschlag von 2 dB. Eine solch kleine Differenz liegt noch weit innerhalb der Messungenauigkeit, oder kann sich durch eine geringe Verschiebung des Messortes ergeben.

Solche Grenzfälle liegen zwar in der Natur jeder Grenzziehung, aber die starke Differenzierung kann gemindert werden, wenn eine feinere Unterteilung gewählt wird. Aus diesem Grund liefert die Beurteilungshilfe neben der Aussage kein, schwach, deutlich oder stark hörbarer Tongehalt und einer empfohlenen Pegelkorrektur K2, auch einen Korrekturwert zwischen 0 und 6 dB mit 1 dB-Auflösung. Dies darf nicht als Ersatz für die Pegelkorrektur nach LVS Anhang 6 betrachtet werden, sondern als zusätzliche Information über den Grad der Tonhaltigkeit.

Ganz im gleichen Sinn liefert die Beurteilung der Tonhaltigkeit nach DIN45681 ebenfalls Korrekturwerte zwischen 0 und 6 dB mit 1 dB-Auflösung, obwohl die deutsche Gesetzgebung in der TA Lärm [10] nur die Zuschläge 0, 3 oder 6 dB zulässt.

7 Schlussbemerkungen

Mit der entwickelten Beurteilungshilfe kann die Beurteilung der Hörbarkeit des Tongehalts einer Wärmepumpe auf einfache Weise objektiviert werden. Nach der Eingabe eines unbewerteten Terzspektrums, beurteilt das Programm den Tongehalt entsprechend Anhang 6 der LSV als nicht, schwach, deutlich oder stark hörbar und gibt einen Korrekturwert an.

Bei den betrachteten Versuchen stimmte die Beurteilung mit dem Höreindruck weitgehend überein. In Einzelfällen kann die Beurteilungshilfe aber auch vom Höreindruck abweichende Beurteilungen treffen. Die Verwendung eines Terzspektrums anstelle einer Schmalbandanalyse ist sicher zum Teil eine Ursache dafür.

Auch die Beurteilung nach DIN45681, der eine Schmalbandanalyse zugrunde liegt, war oft nicht befriedigend. Auch kann deren Anwendung vielen Personen, die mit der Beurteilung der Tonhaltigkeit konfrontiert werden, nicht zugemutet werden.

Trotz den festgestellten Mängeln dürfte die Beurteilungshilfe objektiver urteilen, als Personen dies tun, besonders in den Fällen, wo ein Hörvergleich nicht möglich ist.

Bei einer breiten Anwendung der Beurteilungshilfe durch die Behörden würden überall gleiche Beurteilungen vorgenommen. Dadurch hätten die Hersteller bessere Voraussetzungen zur Weiterentwicklung ihrer Produkte.

Die Beurteilungshilfe soll nun in einer Testphase auf ihre Tauglichkeit überprüft werden.

8 Dank

Die Autoren danken den folgenden Personen und Firmen für ihre grosszügige Unterstützung dieser Arbeit:

- Herrn Helmut Reiner von Novelan AG, Dällikon,
- Herrn Gräflein und Herrn Schaub von Stiebel Eltron AG, Pratteln,
- Herrn Hans Jakob Eggenberger vom Trainingszentrum Wärmepumpen TZWP, Füllinsdorf.

9 Literatur

- [1] Lärmschutzverordnung (LSV). 28. März 2000.
- [2] Bruno Buchmann. *Ton- und Impulshaltigkeit nach LSV*. Abschlussarbeit Lärm und Akustik, NDS-U. Fachhochschule beider Basel. März 2003.
- [3] E DIN 45681:2002-11. *Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschemissionen*. Entwurf November 2002.
- [4] DIN 45680:1997-03. *Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft*. März 1997.
- [5] VDI 2058 Blatt 1. *Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft*. Juni 1973.
- [6] ISO 1996-2:87 (E). *Acoustics – Description and measurement of environmental noise – Part 2: Acquisition of data pertinent to land use*. 15. April 1987.
- [7] ÖNORM S 5004. *Messung von Schallimmissionen*. 1. März 1998.

- [8] Matthew A. Nobile, Gordon R. Bienvenue. *A procedure for determining the prominence ratio of discrete tones in noise emissions*. Proc. of Noise-Con 91, 475-482. Noise Control Foundation, 1991.
- [9] Matthew A. Nobile, Gordon R. Bienvenue. *The prominence ratio technique in characterizing perceptions of noise signals containing discrete tones*. Proc. of Inter-Noise 92, 1115-1118. Noise Control Foundation, 1992.
- [10] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm). August 1998.
- [11] SN ENV 12102:1996 de. *Luftkonditionierer, Wärmepumpen und Entfeuchter mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Messung der Luftschallemissionen – Bestimmung des Schallleistungspegels*. 1. September 1996.
- [12] DIN 45635 Teil 1. *Geräuschmessung an Maschinen – Luftschallemission, Hüllflächenverfahren – Rahmenverfahren für 3 Genauigkeitsklassen*. April 1984.
- [13] DIN 45635 Teil 35. *Geräuschmessung an Maschinen – Luftschallemission, Hüllflächenverfahren – Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern*. April 1986.
- [14] ISO 13261-1:1998(E). *Sound power rating of air-conditioning and air-source heat pump equipment – Part 1: Nonducted outdoor equipment*. 1. April 1998.
- [15] ISO 13261-2:1998(E). *Sound power rating of air-conditioning and air-source heat pump equipment – Part 2: Nonducted indoor equipment*. 1. April 1998.

Nusshof, 27. April 2004

Trefzer Rosa + Partner GmbH



Prof. Ercolino Rosa



Prof. Dr. Urs Bopp

Anhang A K-Bewertung

Tabelle 11: Frequenzabhängige Korrekturwerte der K-Beurteilung

Frequenz [Hz]	K [dB]
10	-40.0
12.5	-36.0
16	-32.0
20	-28.0
25	-24.0
31.5	-20.0
40	-16.0
50	-12.0
63	-8.0
80	-4.0
100	-2.0
125	-1.0
160	-0.5
200	0.0
250	0.0
315	0.0
400	0.0
500	0.0
630	0.0
800	0.0
1k	0.0
1.25k	0.0
1.6k	0.0
2k	0.0
2.5k	0.0
3.15k	0.0
4k	0.0
5k	-0.5
6.3k	-1.0
8k	-2.0
10k	-4.0