

Simulation von Hörempfindungen mit einem digitalen Meßsystem zur Bestimmung von Qualitätsmerkmalen

**U. Widmann
Müller-BBM GmbH, Planegg b. München**

1 Einleitung

In der Qualitätssicherung ist aufgrund einer ständig steigenden Technisierung der Produkte neben der Frage der klassischen Funktionalität auch der Bedien- bzw. der Geräuschkomfort von Bedeutung.

Bei der Beurteilung von Betriebsgeräuschen in der Qualitätssicherung gehen Hersteller und Kunden derzeit oft andere Wege. Während Ingenieure des Herstellers meist nur rein physikalische Maßstäbe zur Schallanalyse heranziehen beurteilt der Kunde das Geräusch mit seinem Gehör. Dadurch können sich unterschiedliche Beurteilungen für ein und dasselbe Geräusch ergeben.

Werden in der Qualitätssicherung abhörende Prüfer durch Prüfsysteme mit digitalen Signalverarbeitungssystemen ersetzt, ergibt sich für immer mehr Produkte die Anforderung, die akustischen Auswirkungen auftretender Toleranzen unter gehörbezogenen, psychoakustischen Aspekten zu bewerten. Um unterschiedliche Merkmale eines Schalles, vom ersten Prototypen bis hin zum Produkt, das das Werk zum Kunden verläßt, vorauszusagen, müssen Bewertungskriterien erarbeitet werden, die die Akzeptanz durch den Kunden zuverlässig vorhersagen. Dabei müssen Eigenschaften des menschlichen Gehörs, des endgültigen Schallempfängers berücksichtigt werden. Objektive Bewertungsmaßstäbe für unterschiedliche Attribute eines Klages müssen abgeleitet werden, die die klassischen akustischen Bewertungskriterien ergänzen.

Nachfolgend werden grundlegende Eigenschaften von psychoakustischen Hörempfindungen für die Qualitätsbeurteilung von Schallen zusammengefaßt und ein universelles Meßsystem vorgestellt, das moderne gehörbezogene Analyseverfahren mit klassischen Analysemethoden ergänzt.

2 Hörempfindungen in der Qualitätssicherung

Während das Wissen um die physikalische Metrik weit verbreitet ist, ist das Wissen um die psychoakustische Metrik der Hörwahrnehmungen meist wesentlich weniger verbreitet. Im Bereich der Hörwahrnehmung sind als informationstragende Schalle die Hörempfindungen z.B. die Lautheit, die Tonhöhe bzw. deren Ausprägtheit, die Schärfe, die Rauigkeit und die Schwankungsstärke anzusehen. Die wesentliche Aufgabe einer gehörbezogenen Analyse in der Qualitätssicherung ist die Extraktion von Größen, welche diesen Hörwahrnehmungen möglichst genau entsprechen.

2.1 Lautheit

Die Hörempfindung Lautheit wird auf einer linearen Skale aufgetragen. Ihre Einheit ist das 'sone' ('sonare' (lat.): klingen). Der Bezugsschall für die Lautheit ist ein 1 kHz-Ton mit einem Pegel von 40 dB besitzt die Lautheit 1 sone. Ein Schall, der doppelt so laut empfunden wird besitzt die Lautheit 2 sone.

Die Lautheit eines Schalles kann mit hoher Genauigkeit durch das von Zwicker vorgeschlagene Funktionsmodell bestimmt werden [Zwicker 1958]. Diese Prozedur wurde in DIN 45631 standardisiert und Computerprogramme wurden entwickelt, die eine einfache Implementierung erlauben [Zwicker et al. 1991].

Die wesentliche Verarbeitungsschritte in einem Lautheitsmodell umfassen die Frequenzauflösung, angepaßt an das menschliche Gehör, die spektrale und zeitliche Maskierung, den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Schallintensität und Spezifischer Lautheit und die spektrale Lautheitssummation.

Spektrale Maskierung bedeutet, daß Signalanteile unhörbar werden, wenn ein anderer Schallanteil bei tiefen Frequenzen dominiert. Zeitliche Maskierung beschreibt das nichtlineare Ausklingverhalten der Erregung innerhalb des Gehörs die nachfolgende Schalle in deren Lautstärke drosseln kann.

Um diese Eigenschaften nachbilden zu können ist es von Bedeutung nicht nur einen Summenlautheitswert, sondern ein Lautheitsspektrum mit gehöradeguten Zeitkonstanten zu bestimmen. Eine ausführliche Beschreibung zur Bildung der Lautheit zeitvariabler Schalle ist in der Literatur beschrieben. [Zwicker&Fastl 1990]. Im PAK-System, das an neueste psychoakustische Erkenntnisse angepaßt ist, kann die Lautheit auch instationärer Schalle in Einklang mit der subjektiven Beurteilung bestimmt werden.

2.2 Schärfe

Im Hinblick auf die Geräuschqualität können Schalle nicht nur auf einer Skale laut leise eingeordnet werden, sie können ebenfalls stumpf oder scharf klingen. Schärfe ist eine Hörempfindung, die wir separat beurteilen können. Die Einheit dieser Hörempfindung ist das 'acum' ('acer' (lat.): scharf). Der Bezugsschall ist ein um 1 kHz zentriertes frequenzgruppenbreites Schmalbandrauschen mit einem Pegel von 60 dB. Die Schärfe dieses Schalles beträgt 1 acum.

Schalle mit dominanten Anteilen bei hohen Frequenzen werden besonders scharf bewertet. Schalle mit ausgeprägt tiefen Anteilen klingen wenig scharf. Schärfe beschreibt also wesentliche Elemente der Klangfarbenwahrnehmung von Schallen. Eine Berechnungsvorschrift für die Schärfe von Schallen kann aus der Spektralverteilung der Spezifischen Lautheit abgeleitet werden [Bismarck 1974].

2.3 Schwankungsstärke und Rauigkeit

Reale Laufgeräusche können aufgrund von Exzentrizitäten, unrundheiten, etc. ebenfalls andere Hörempfindungen auslösen. Bei langsamen Modulationen im Schallsignal wird die Lautheit um einen Mittelwert hörbar schwanken. Die Ausprägtheit dieser Lautheitsänderung wird als Schwankungsstärke bezeichnet. Schwankungen ergeben sich bei Modulationsfrequenzen zwischen 0.25 Hz und 25 Hz, am deutlichsten um etwa 4 Hz.. Der Bezugsschall für die

Schwankungsstärke ist ein mit 100% und 4 Hz amplitudenmodulierter 1-kHz Sinuston mit 60 dB Pegel. Er besitzt die Schwankungsstärke 1 ´vacil´ (´vacillare´ (lat.): schwanken).

Bei noch schnelleren Änderungen im Zeitverlauf eines Schalles nimmt der Lautheitswert stationäre Werte an und ein ´rauer´ Klangcharakter setzt ein. In der Psychoakustik wird diese Hörempfindung Rauigkeit genannt. Der Bezugschall für die Rauigkeit ist ein mit 100% und 70 Hz amplitudenmodulierter 1-kHz Sinuston mit 60 dB Pegel. Er besitzt die Rauigkeit 1 ´asper´ (´vox aspera´ (lat.): rauhe Stimme).

Aus psychoakustischen Arbeiten zur Schwankungsstärke und zur Rauigkeit kann abgeleitet werden, daß die wesentlichen Abhängigkeiten beider Größen aus zeitvariablen Lautheitsmustern nachgebildet werden können, wenn die korrekten Zeitkonstanten im Meßsystem eingesetzt werden können [Widmann 1992].

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, daß aus zeitvariablen Lautheitsmustern die wesentlichen Eigenschaften der Hörempfindungen Lautheit, Schärfe, Schwankungsstärke und Rauigkeit berechnet werden können. Auf dieser Basis kann also ein flexibles Meßsystem eingeführt werden, mit dem psychoakustische Analysen und konventionelle akustische Meßtechnik verknüpft werden kann.

3 PAK-Vielkanalmeßsystem in der akustischen Qualitätssicherung

Durch digitale Signalverarbeitung erlauben moderne Meßsysteme den Zugang zu Meßdaten aus unterschiedlichster Perspektive. Ist das Signal erst einmal erfaßt, kann die wesentliche Information mit verschiedenen Methoden aus dem Zeitbereich oder dem Frequenzbereich abgeleitet werden. Zeitbereichsanalysen, Ordnungsanalysen, FFT-Bestimmung decken versteckte Signalinformation leicht auf und psychoakustische Größen bewerten sie.

In der Qualitätssicherung werden heutzutage für diverse Meßaufgaben häufig spezielle Applikationen entwickelt. Nachfolgend wird ein universelles Meßsystem vorgestellt, das traditionelle akustische Meßgrößen und psychoakustische Bewertungsmodelle kombiniert und für Aufgabestellungen in der Produktentwicklung bis hin zur Qualitätssicherung geeignet ist.

3.1 Software

Bild 1 erläutert das Konzept des Prüf-AKustiksystems PAK. PAK ist ein modulares System zur akustischen und schwingungstechnischen Signalerfassung und -analyse.

Das Herz des PAK-Systems ist eine Workstation, welche ein- und ausgehende Datenströme verwaltet und vielseitige Möglichkeiten der Signalanalyse, digitaler Filterung und der Visualisierung bietet.

Es basiert auf Software-Standards, welche dem Anwender eine sichere Investition für die Zukunft bieten. Als Schlüsselwörter seien hier nur UNIX-Betriebssystem, ANSI-C als Programmiersprache, X11-Windows als Fensterverwaltung und OSF/MOTIF als Benutzer-Interface erwähnt.

Mehrere Softwaremodule für Signalerfassung und -auswertung (z. B. FFT-, n-tel-Oktav-, Ordnungsanalyse), Beschallung, Nachhallmessung, Betriebsschwingungsanalyse und psychoakustische Auswertungen sind verfügbar.

Zum Sound-Design in der Produktentwicklung steht dem Benutzer auch ein Audio-Editor zur Verfügung mit dem Schalle abgehört, Signale gemischt und durch Echtzeitfilterung manipuliert werden können. Damit kann der Benutzer sehr einfach die klanglichen Auswirkungen von Schallminderungsmaßnahmen simulieren. Änderungsmaßnahmen können damit einfach subjektiv beurteilt und die Auswirkungen den Kosten gegenübergestellt werden.

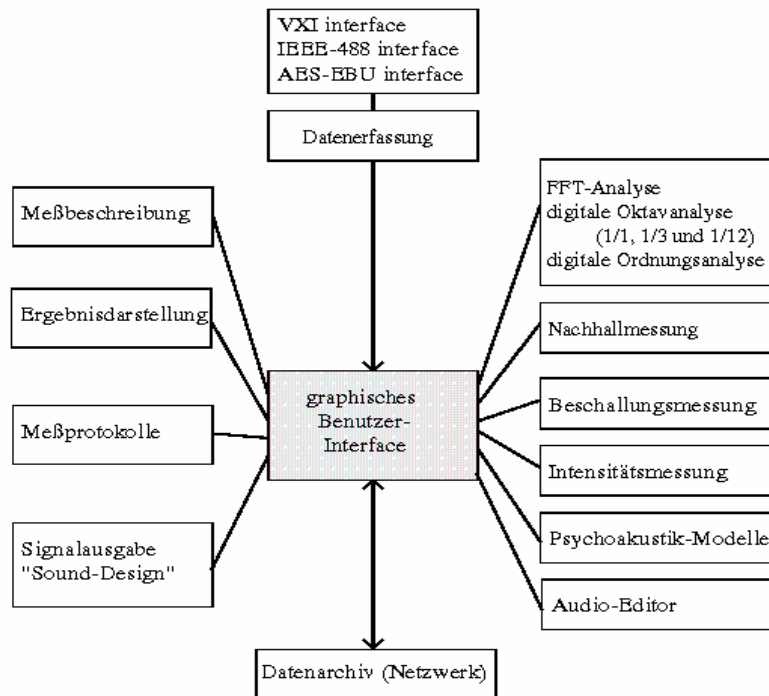


Bild 1: Modulares Konzept des PAK-Systems

Das Kernstück des Systems ist ein einfach handzuhabendes graphisches Benutzerinterface. Komplette Meßsetups inklusive Protokollerstellung und Online-Grafiken können unter benutzerdefinierten Namen abgelegt und verwaltet werden. Dies erlaubt sehr einfache Bedienung für wiederkehrende Messungen. Auch automatisierbare Meß- und Auswerteprozesse für die Qualitätssicherung in der Produktion sind konfigurierbar.

Ein mächtiges graphisches WYSIWYG-Interface erlaubt die benutzerdefinierbare Darstellung von gemessenen und ausgewerteten Daten. 2D und 3D-Diagramme (Campbell- und Wasserfall-Darstellung) können einfach visualisiert und auf unterschiedliche Druckmedien ausgegeben werden. Die Ausdrücke sind mm-genau skalierbar.

Insbesondere die zunehmende Bedeutung der psychoakustischen Analysen in der Qualitätssicherung erfordern die gleichzeitige Darstellung von traditionell ausgewerteten und psychoakustischen Analysedaten. Erst die Kombination verschiedener Größen im PAK-System erlaubt eine umfassende Signalrepräsentation und -beurteilung.

Ergebnisse mit absolut konstanten Analysefenster-Bandbreiten aus FFT-Analysen können damit zusammen mit Messungen mit relativ konstant breiten Filtern aus Terz-, Oktav-, und 1/12-Oktavanalyse verglichen werden. Damit kann ein problemangepaßter Kompromiß zwischen Zeit- und Frequenzauflösung gefunden werden. Psychoakustische Analysen mit gehörangepaßten Filterbandbreiten ergänzen dieses Angebot.

In allen Softwaremodulen sind drehzahlabhängige Auswertungen ebenso möglich wie die Darstellung über beliebige andere Führungsgrößen.

3.2 Hardware

Bild 2 zeigt eine vollständige Konfiguration eines Vielkanal-PAK-Systems bestehend aus Meßdatenerfassung, Auswerte- und Speichereinheit und Abhörplatz. Zur Meßdatenerfassung werden neben dem Vielkanalmeßsystem HP 3565S (Paragon) heute insbesondere der modernere VXI-Bus-Standard (HP 3587S) unterstützt. Dieses Konzept zeichnet sich durch sehr gutes Preis-/Leistungsverhältnis, Modularität und durch hohe Rechenleistung aus. Das PAK-System ist netzwerktransparent, d.h. Meßdaten und Analyseergebnisse können im Rechnernetz genutzt und bei der fortwährenden Erfassung können Meßergebnisse zur Verarbeitung an zentrale Stellen weitergeleitet werden.

In einem modernen VXI-Mainframe können 6 bzw. 13 Einschübe untergebracht werden. Dies beinhaltet eine komplette Workstation, SCSI-Festplatte, hochauflösende Eingangsmodule mit 8 Audiokanälen (Analysebereich ≤ 25.6 kHz), ein oder mehrere Prozessormodule mit bis zu 5 parallel arbeitenden DSP's für Online-Analysen.

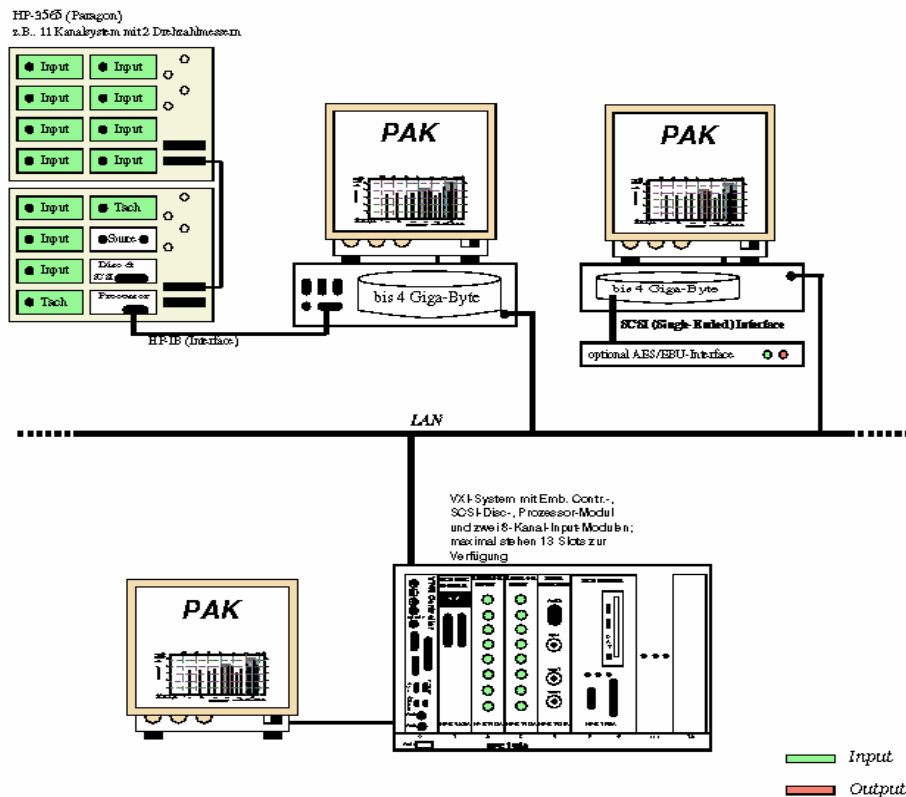


Bild 2: Vernetzte Systeme zur Meßdatenerfassung und Auswertung

Für kleinere Meßaufgaben sind auch Zweikanallösungen verfügbar. Digitale Schnittstellen zu kommerziellen Kunstkopfsystemen sind ebenfalls implementiert.

4 Zusammenfassung

Für die Beurteilung des Geräuschkomfort eines Produkts in der Qualitätssicherung müssen zunehmend psychoakustische Bewertungsmodelle eingebunden werden, die die Akzeptanz des Kunden besser beschreiben [Kohler, Kotterba 1992]. Die wesentlichen Eigenschaften der benötigten Hörempfindungen können heutzutage in modernen Signalanalysesystemen nachgebildet werden. Die wesentliche Größe ist die Lautheit, welche nicht nur als ganzzahliger Wert sondern auch als spektrale Verteilung im 2 ms-Raster berechnet werden muß. Zeitliche Verdeckung muß dabei ebenso berücksichtigt werden wie spektrale Maskierung. Signale mit dominanten Frequenzanteilen bei hohen Frequenzen erzeugen eine hohe Schärfe, während Schalle mit ausgeprägt niedrigen Frequenzanteilen geringe Schärfe erzeugen. Schärfe kann aus der Verteilung der Spezifischen Lautheit abgeleitet werden. Schwankungsstärke und Rauigkeit beziehen sich auf die zeitliche Änderung von Laufgeräuschen. Modulationsfrequenzen von 0.25Hz bis 25 Hz erzeugen den Höreindruck einer Schwankung. Schalländerungen mit Modulationsfrequenzen zwischen 32 Hz und etwa 300 Hz erzeugen die Hörempfindung Rauigkeit. Die wesentlichen Eigenschaften dieser Hörempfindungen können aus zeitvariablen Lautheitsmustern abgeleitet werden.

Commerzielle Software zur Nachbildung von Hörempfindungen sollte auf Software-Standards aufbauen, um nicht auf 'Specials' angewiesen zu sein und um eine möglichst sichere Investition in die Zukunft zu garantieren. Hardware-Komponenten des Meßsystems sollten sehr genau und möglichst anwendungsbezogen konfiguriert werden können.

Mit PAK ist es möglich in der Qualitätssicherung klassische akustische Analysegrößen (FFT-, n-tel-Oktav-, Ordnungsanalyse) mit gehörbezogenen Größen zu kombinieren. Automatische Meßabläufe sind konfigurierbar.

5 Literatur

- [Kohler, Kotterba 1992] Kohler, M., Kotterba, B.: Die Fusion gemessener Empfindungsgrößen zur objektiven Bestimmung des Wohlklangs. In: DAGA '94, 905-908.
- [Zwicker 1958] Zwicker, E.: Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit. *Acustica* 8, 237-258.
- [Zwicker&Fastl 1990] Zwicker, E., Fastl, H.: *Psychoacoustics-Facts and models*. Springer Verlag New York, Heidelberg Berlin, 1990
- [Bismarck 1974] v. Bismarck, G.: Sharpness as an attribute of the timbre of steady state sounds. *Acustica* 30, S. 157-172.
- [Zwicker et al. 1991] Zwicker, E., Fastl, H., Widmann, U., Kurakata, K., Kuwano, S., Namba, S.: Program for calculating loudness according to DIN 45631 (ISO532B). *J. Acoust. Soc. Jpn (E)* 12, 39-42.

- [Widmann 1992] Widmann, U.: Ein Modell der Psychoakustischen Lästigkeit von Schallen und seine Anwendung in der Praxis der Lärmbeurteilung. Diss. TU München, 1992.
- [Widmann 1994] Widmann, U.: Krach gemessen - Gehörbezogene Geräuschbewertung, c't 4, 1994

