

Wahrnehmen – Bewerten - Messen von Schall und Schwingungen industrieller Produkte

**Benno Kotterba, md-pro GmbH, Karlsruhe
Armin Rohnen, BMW AG, Regensburg**

1 Einleitung

Unser Ohr ist eines unserer wachsamsten Sinnesorgane – selbst wenn wir schlafen, können wir unsere Ohren nicht verschließen. So wie alle anderen Sinne, dient auch unser Ohr unserem Schutz. Signale aus der Umgebung aufnehmen, sie analysieren und bewerten, um angemessene Reaktionen und Maßnahmen einzuleiten.

Unser Ohr dient uns also im erweiterten Sinn zur Kommunikation mit unserer Umwelt. Das ist natürlich zunächst die Sprache, die wir als Kinder erlernen zu verstehen und dann auch zu sprechen. Unser Ohr erschließt uns alle akustischen Phänomene, die chaotisch oder strukturiert, zufällig oder erwartet auftreten.

Verbinden wir nun die akustischen Signale noch mit Erkenntnissen der Informationstheorie, so gewinnen wir dort Information, wo wir Neues, Unerwartetes, empfangen und verstehen.

Beziehen wir diese theoretische Betrachtung auf die Geräusche und Schwingungen industrieller Produkte, so findet auch hier eine „Unterhaltung“, eine Kommunikation oder technisch gesprochen ein Informationsaustausch statt. Das Produkt strahlt aktiv oder passiv Schall oder Schwingungen ab, die entweder unmittelbar als Luftschall oder nach Umwandlung von Körperschall in Luftschall an unser Ohr gelangt, dort als Reiz aufgenommen und in unserem Gehör auf vielfältigen Arten verarbeitet werden.

In diesem Beitrag stellen wir den Zusammenhang zwischen Hören und Messen, die Bedeutung beider Funktionen sowie deren Bedeutung für die akustische Qualitätssicherung dar. Nach einer Definition und Erläuterung der Begriffe betrachten wir die Beanstandung auffälliger Geräusche, um über die Methoden und Vorgehensweise bei der Bestimmung messtechnischer Größen zur Ursachenerkennung zu gelangen. Ziel dieser Vorgehensweise ist die Identifikation nicht erwünschter Geräuschanteile und deren Reduktion, um das Produkt anforderungsgerecht zu optimieren.

Dieser Weg ist notwendig, um z.B. von der Aussage eines Kunden, der ein Produkt oder dessen Funktion beanstandet, die mögliche Ursache zu finden, diese zu beheben oder auch grundsätzlich konstruktive Maßnahmen einzuleiten, um das Produkt zu verbessern.

Das Ziel der akustische Qualitätssicherung ist, das Schallsignal so weit zu optimieren, dass der Kunde zufrieden ist. In manchen Fällen bedeutet das, dass das Produkt leise in anderen Fällen, dass das Geräusch möglichst gut zur erwarteten Funktion passt.

Industrielle Produkte und Prozesse sprechen – es gilt zu unterscheiden, wann wir zuhören müssen, sie hören müssen oder sie nicht hören wollen, weil ihr Sprechen stört.

2 Empfindung und Wahrnehmung

2.1 Definitionen

Empfindung

- ist die Reizaufnahme durch das Sinnesorgan.

Hörempfindung

- ist die Reizaufnahme durch das Gehörorgan.

Wahrnehmung

- ist die Reizaufnahme und Reizverarbeitung.
- ist die Verbindung aus Empfindung und Erfahrung.

Hörwahrnehmung

- ist die Reizaufnahme durch unser Hörorgan und die Reizverarbeitung
- ist die Verbindung aus Hörempfindung und Erfahrung.

In [HARDMANN2004] ist Wahrnehmung folgendermaßen beschrieben:

„Bei der Wahrnehmung von Außenreizen kommt es in einem ersten Schritt zur Aufnahme eines Reizes durch die Rezeptoren der Sinnesorgane. Diese Empfindung wird über das Nervensystem ins Gehirn geleitet und dort verarbeitet. Unter dem inneren Einfluss von Gedächtnisinhalten (Erfahrung) Stimmungen, Gefühlen (Emotion) und Überlegungen, Erwartungen bzw. Einstellungen (Kognition), entsteht dann im Gehirn ein aktiv konstruiertes Bild der Welt.

Die menschliche Wahrnehmung funktioniert nicht wie die Optik einer Kamera. Sie ist durch die Sinnesorgane beschränkt. Durch die Manipulation der Informationen im Gehirn wird der Objektivitätsanspruch menschlicher Wahrnehmung weiter in Frage gestellt.

Der Wahrnehmende hat das Ziel, Informationen zu gewinnen und sich in seiner Umwelt möglichst erfolgreich zu verhalten. Um von der Vielzahl der auf uns einströmenden Informationen nicht überfordert zu werden, greift das Gehirn zum Mittel der Selektion bzw. Filterung.

Wahrnehmung ist ein Organisationsprozess, ein Konstruktionsvorgang.“

2.2 Erkennung von Geräuschquellen

Hören wir ein Geräusch, so ist die Hörwahrnehmung das Ergebnis eines umfassenden Prozesses. Unser Hörsystem nimmt den akustischen Reiz auf, setzt die auf das Trommelfell wirkende Druckschwankung der Luftsäule in mechanische Schwingungen und Elektropotentiale um, bis schließlich das zentrale Nervensystem die über die Nervenbahn weitergeleiteten Reizsignale mit Gedächtnisinhalten (Erfahrungen) kombiniert und eine Aussage über die mögliche Ursache generiert.

Haben wir bereits vorher einmal einen Zusammenhang aus Geräusch und verursachender Schallquelle gelernt, so können wir aus der Erfahrung (aus dem Gelernten) bei Hören des Geräusches unmittelbar die Quelle klassifizieren. Diese Fähigkeit ist die Basis für die Sprechererkennung bei der Sprachkommunikation.

Im Laufe unseres Lebens erwerben wir vielfältige Erfahrungen über Zusammenhänge zwischen Geräuschen und Geräuschquellen. So erkennen wir am Geräusch z.B. ein Flugzeug, einen Dieselmotor, einen Staubsauger, eine Glocke, eine Trompete und den Gesprächspartner am Telefon. Wir lernen aber auch den Zusammenhang zwischen Schallsignal und dessen Bedeutung. So erkennen wir z.B. Warnsignale wie das sog. Martinshorn, die Signaltöne der Polizei, die Klang-

Klangmuster am Telefon, oder auch die Erkennungsmelodie für Ansagen am Flughafen, für Radio- und Fernsehsendungen wie z.B. die Tagesschau usw.

In diesen Fällen ist der Lernprozess abgeschlossen bzw. es findet im Laufe des Lebens ein „Nachlernen“ statt, wir verbinden neue Schallmuster mit deren Bedeutung oder der Zuordnung zu ihrer Quelle.

Geräuschanteil	Beispiele
Brummen	Sitzverstellung, Schiebedach, Waschmaschinenmotor
Bürste	Fensterheber, Sitzversteller, Kleinmotoren
Dröhnen	ABS, Schiebedach
Flöten	Kühlerventilator, Lüftungsgebläse
Grunzen	Antriebsschlupfregelung, ASR
Heulen	Klimaanlage, Wischermotor
Jaulen	Schiebedach, Sitzverstellung
Klopfen	Lenksäule, Zentralverriegelung, Antenne
Knacken	Federn
Mahlen	Wischer, Pumpen
Nageln	Scheibenheber, Verbrennungsmotor
Pfeifen	Lüftungsgebläse, Ventilatoren, Kraftstoffpumpe
Quietschen	Lüftung
Rasseln	Spiegelverstellung, Schiebedach, Ventilatoren
Rattern	Schiebedach, Scheibenheber, Getriebe, Flexwellen
Reiben	Scheibenheber
Singen	Servoantrieb, Servolenkung
Schlagen	Schiebedach, Wischer
Schnarren	Servoantrieb, Servolenkung
Schwanken	Sitzverstellung
Tackern	Lüftung
Trillern	Ventilator
Wimmern	Einspritzpumpe, Sitzverstellung
Wummern	Schiebedach
Zirpen	Lüftung
Zischen	Lüftung, Purrpen, Ventile

Tabelle 1: Attributive Beschreibungen von Geräuschanteilen

2.3 Beschreibung charakteristischer Geräuschanteile

Treten neue Schallsignale auf, so haben wir deren Bedeutung oder Zuordnung zur Schallquelle noch nicht gelernt und können deswegen kein Erkennungsergebnis angeben. In diesen Fällen ist ein mögliches Ergebnis der Hörwahrnehmung die Beschreibung der Geräuschanteile. Bei der Verarbeitung des Schallsignals zerlegen wir das Gesamtsignal in seine Anteile.

Hören wir z.B. ein Musikstück, das von einem Orchester gespielt wird, so sind wir in der Lage, die einzelnen Schallanteile der Instrumente zu differenzieren. Wir hören also wieder die verursachenden Schallquellen heraus. In diesem Fall sind allerdings die einzelnen Schallquellen gelernt, neu ist die Auflösung des komplexen Schallereignisses. An diesem Beispiel wird deutlich, dass unsere Hörwahrnehmung ein „Konstruktionsvorgang“ ist. Vielleicht wäre es besser, von einem De-Konstruktionsvorgang zu sprechen, da das Schallsignal in seine Bestandteile zerlegt wird.

Bei neuen komplexen Geräuschen – also Schallen, die sich aus tonalen und Rauschanteilen zusammensetzen, zerlegen wir das Geräusch ebenfalls in Bestandteile, die wir aber lediglich durch Geräuschbeschreibende Attribute kennzeichnen. Wir sprechen von brummen, quietschen, singen, sägen, rattern, zirpen, hämmern und ähnlichen Wahrnehmungsmustern. In Tabelle 1 sind Beispielen derartiger Geräuschbeschreibungen mit der Zuordnung zu möglichen Verursachern wiedergegeben.

Betrachtet man die Geräuschbeschreibungen genau, so stellt man fest, dass es sich dabei entweder um Klangbeschreibende Worte wie z.B. quietschen und brummen, zum überwiegenden Teil aber um Beschreibungen eines Vorgangs handelt wie z.B. nageln oder mahlen. Wir charakterisieren das Schallsignal also durch den möglicherweise zu Grunde liegenden Entstehungsprozess.

Auch hier trifft die Charakterisierung der Wahrnehmung als Konstruktionsvorgang zu. Wir schließen vom Gehörten auf den vermuteten verursachenden Prozess. Die Aussage ist also eine Hypothese, die es u.U. zu verifizieren gilt.

3 Von der Beanstandung auffälliger Geräusche zum messbaren Merkmal

Beanstandet ein Kunde ein Geräusch, so gilt es zunächst zu ergründen, was der Grund der Beanstandung ist. Wir unterscheiden zwischen den folgenden Aspekten:

- der Schallpegel des Geräusches entspricht nicht den vereinbarten Qualitätsforderungen, den Spezifikationen des Produktes;
- das Geräusch wird als laut, störend oder lästig beurteilt;
- die Geräuschwahrnehmung ruft den Eindruck einer Störung oder eines sich anbahnenden Fehlers hervor;
- das Geräusch deckt sich nicht mit der erwarteten Funktion des Produktes.

Die Spanne reicht also von der Herstellungsqualität über die erwartete Funktionalität bis hin zum Geräuschdesign. Deswegen sprechen wir heute von

- qualitätsbezogenen Geräuschen,
- funktionsgebundenen Geräuschen,
- komfortbezogenen Geräuschempfindungen.

Der Kompressor eines Kühlschranks muss möglichst leise sein, insbesondere wenn er als Mini-bar in einem Hotelzimmer steht. Der Antrieb eines Schiebedachs im Fahrzeug darf leise schnurren, die Kraftstoffpumpe im Tank eines Fahrzeugs darf nicht hörbar sein. Der Lüfter eines Bürorechners muss möglichst leise sein, da er sonst eine ständige Geräuschquelle darstellt und auf Dauer die Umgebung belastet.

Neben den selbsterregten Schallen kennen wir noch die Klänge und Geräusche, die durch Anschlagen des Produktes angeregt werden und die dazu dienen, die Produktqualität zu beurteilen. So kennen wir die Klangprüfung z.B. an Porzellan, um zu erkennen, ob eine Tasse oder ein Teller einen Riss hat und deswegen möglicherweise beim Transport oder Gebrauch zerbricht. Dachziegel z.B. werden angeklopft, um sie auf Risse zu prüfen, denn Risse können Ursache für Undichtigkeiten des Daches sein. Klangprüfungen an Gussteilen werden aus Sicherheitsgründen durchgeführt, um damit die Konformität mit Qualitätsforderungen nachzuweisen.

So lassen sich viele Beispiele aus der alltäglichen industriellen Praxis anführen, in denen Geräusch- oder Klangbeurteilungen zum Nachweis der Konformität mit Qualitätsvereinbarungen herangezogen werden oder zu Beanstandungen führen.

In vielen Fällen steht am Anfang der Kette der Mensch mit seiner Hörwahrnehmung. Er beanstandet ein Geräusch oder das Produkt bzw. den zugehörigen Prozess. So lautet z.B. das Urteil, das Getriebe ist laut oder der Lüfter ist laut. Damit ist zunächst die Mitteilung der Unzufriedenheit ausgedrückt, die Aussage drückt keine physikalische Größe aus, sondern beschreibt lediglich die Wahrnehmung. Übersetzt heißt das, „ich höre das Produkt oder den Prozess und das zugehörige Geräusch erwecken in mir den Eindruck, dass etwas nicht in Ordnung ist, also die Erwartungen nicht erfüllt. Man könnte auch sagen, das Geräusch oder der Klang wird subjektiv von der Erwartung abweichend wahrgenommen. Die Wirkung weicht von der Erwartung ab.

Um das Problem zu identifizieren, ist zunächst eine möglichst genaue Beschreibung der Wahrnehmung notwendig. Dabei sind Beschreibungen bezogen auf die Funktion, die mögliche Ursache, die verursachende Schallquelle oder eine attributive Beschreibung hilfreich. In jedem Fall muss versucht werden, die Wahrnehmung des Kunden so gut wie möglich kennen zu lernen. Hilfreich sind dabei natürlich auch Angaben über Betriebs- und Umgebungsbedingungen, Belastungszustand (bei Fahrzeugen z.B. Schub- oder Zug) oder auch Art der Veränderung. Die Aussage, ein Motor jault, gibt unmittelbar Hinweise auf ein veränderliches Geräusch.

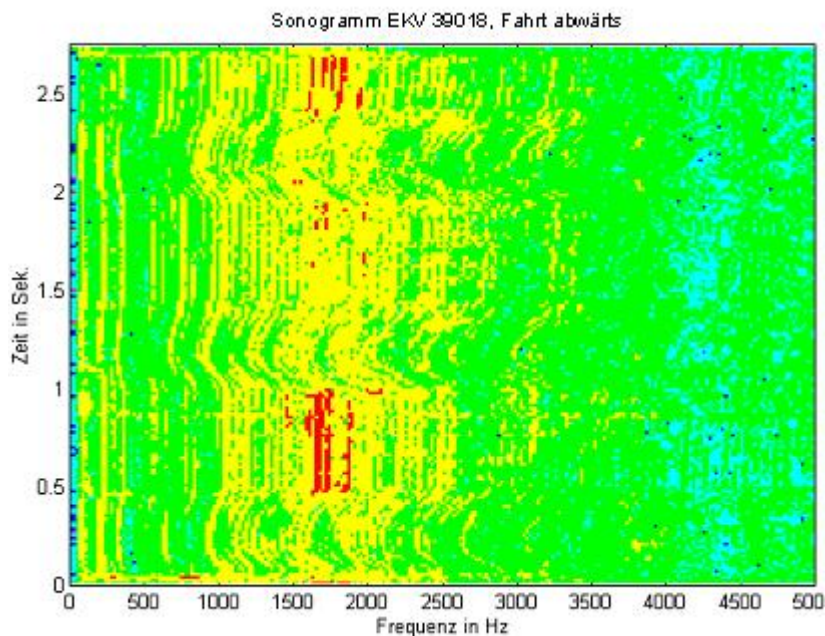


Abbildung 1: Spektrogramm eines Elektroantriebs mit Drehzahlschwankungen

Im Beispiel von Abbildung 1 nimmt man das Geräusch des Antriebs als jaulend oder „eiernd“ wahr. Etwa einmal pro Sekunde ändert der Antrieb seine Drehzahl und damit auch das Geräusch.

Mit der möglichst detaillierten Beschreibung kann man in die Ursachenanalyse einsteigen. Da wir bislang keine Erfahrung mit dem auftretenden Geräusch haben, werden einerseits Messungen vorgenommen und der Aufbau des Produktes bzw. seine Funktion herangezogen.

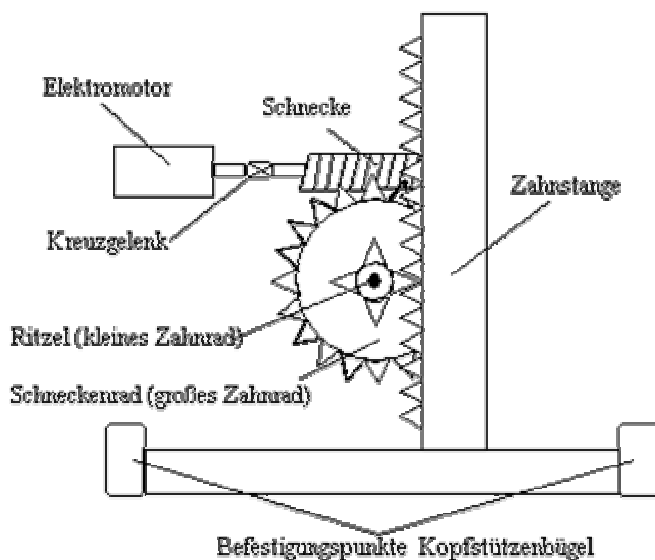


Abbildung 2; Schematischer Aufbau des Produktes

Im vorliegenden Beispiel handelt es sich um einen Elektroantrieb, der über eine Schnecke ein Schneckenrad und über das integrierte Abtriebsrad eine Zahnstange verschiebt. Die Analyse von Motordrehzahl, Schnecke, Schneckenrad, Zähnezahl des Schneckenrades, des Abtriebsrades sowie der Zahnstange ergeben, dass sich das Schneckenrad etwa einmal pro Sekunde dreht. Die Frequenzänderung ist also auf eine wechselnde Last zurückzuführen, die durch einen mechanischen Fehler des Schneckenrades verursacht wird..

Die Spektrallinien in Abbildung 1 verschieben sich um die Größe der Schwankung und erwecken die Wahrnehmung „jaulen“. Eine derartige Geräuschänderung ist besonders kritisch, weil unser Gehör vor allem auf Schwankungen und Modulationen sehr empfindlich reagiert.

In dem dargelegten Beispiel erhält man durch die detaillierte Beschreibung des Geräuschanteils „Jaulen“ den Hinweis, dass es sich bei der Ursache für die Geräuschwahrnehmung um einen langsam veränderlichen Geräuschanteil eher sogar um eine Modulation handeln muss. In der durchgeführten Messung der Schallsignale wird nun nach Anteilen gesucht, die sich im Rhythmus der Wahrnehmung ändern.

Die messtechnische Analyse führt einfacher zum Erfolg, wenn man Hörereignis und Messergebnis parallel zur Verfügung hat. Unser Gehör ist bislang ein unübertroffener Analysator. Durch die gleichzeitige Beobachtung des Spektrogramms (auch Sonogramm genannt) analysieren Ohr und Auge gleichzeitig und es ist möglich, die Hörereignisse der zeitlichen Abfolge zuzuordnen.

In Abbildung 3 sind der zeitliche Verlauf und das zugehörige Spektrogramm eines Elektroantriebs entsprechend der schematischen Darstellung aus Abbildung 2. Man erkennt deutlich die starke Schwankung der Signalamplitude und in Spektrogramm die Frequenzveränderung durch die veränderte Last. Man erkennt, dass durch die wechselnde Last die spektrale Verteilung der Pegel sich verändert.

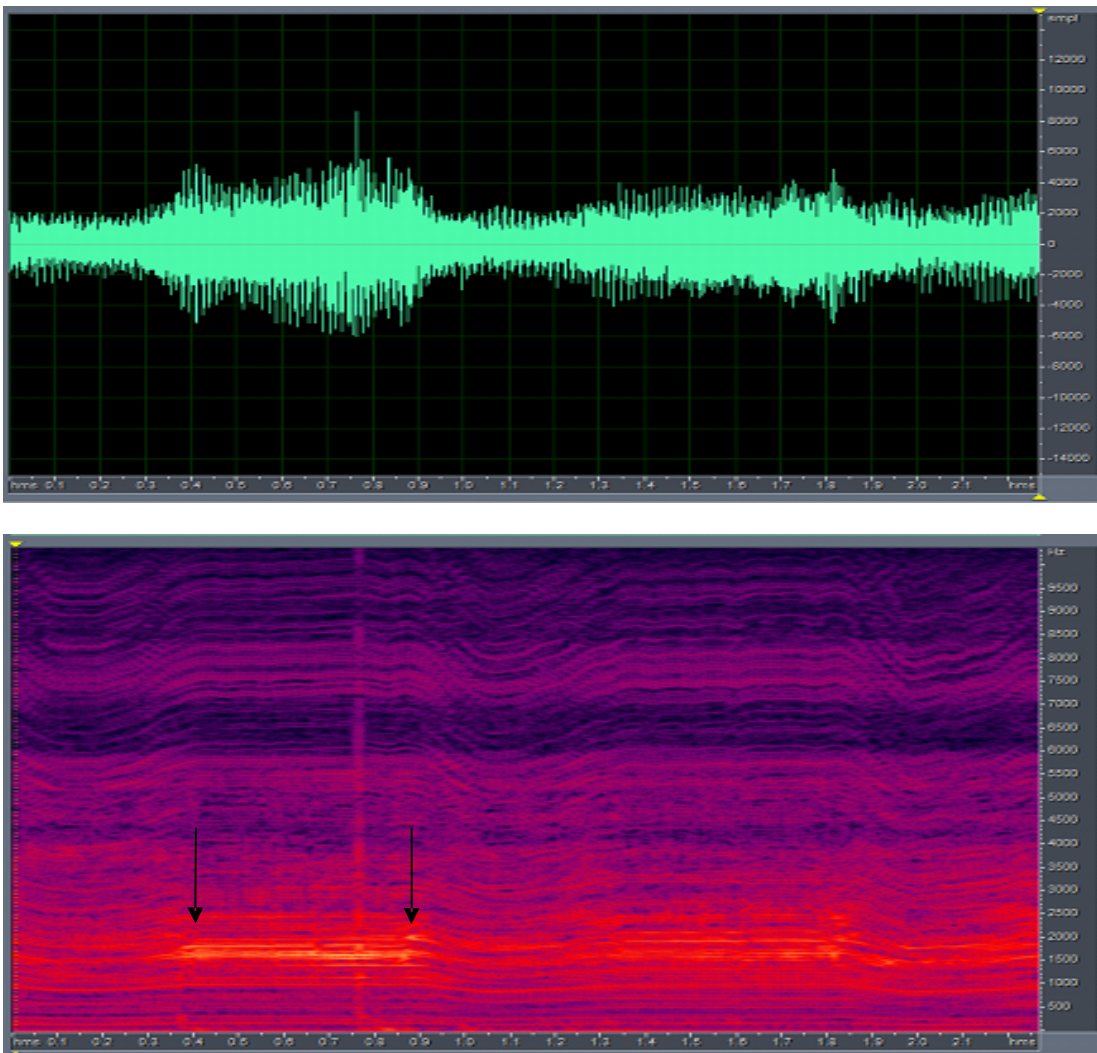


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf und Spektrogramm eines Elektroantriebs



Abbildung 4: Zeitlicher Ausschnitt aus dem in Abbildung 3 markierten Bereich

In dem Bereich zwischen den beiden Markierungspfeilen ist eine deutliche Wahrnehmung von Rauigkeit. Eine nähere Analyse dieses Bereiches zeigt eine ausgeprägte Amplitudenmodulation.

on. Die messtechnische Analyse bestätigt die Wahrnehmung. Die Modulationsfrequenz beträgt ca. 70 Hz

4 Methoden und Vorgehensweise bei der Feststellung auffälliger Geräusche

Beim methodischen Vorgehen zur Bewertung von Schall und Schwingung müssen wir zwei Fälle unterscheiden:

- Prüfung der Schall- oder Schwingungssignale zur Konformitätsbewertung am Ende der Fertigung
- Begutachtung von Beanstandungen, um zu entscheiden, ob der Kunde zu recht reklamiert.

Bei der Konformitätsprüfung werden Istwerte mit Vorgabewerten verglichen. Der Wunsch bei der Bewertung von Schall- und Schwingungssignalen geht nach sog. objektiven d.h. technisch messbaren Merkmalen. Bei vielen Aufgaben sind die Merkmale nicht oder nur aufwendig messbar, dort hilft nur das erfahrene Ohr des Prüfers.

Messbare Merkmale setzen immer voraus, dass wir die Beanstandung bzw. die Schall- und Schwingungsanteile bereits einmal gehört und dafür ein Messverfahren gefunden haben. Es muss zudem für die gesuchte Aufgabe geeignet sein, dass heißt eine ausreichend gute Trennschärfe zwischen in Ordnung (i.O.) und nicht in Ordnung (n.i.O.) aufweisen.

Die Kombination aus Wahrnehmen, Bewerten und Messen benötigen wir immer dann, wenn es neue Schallereignisse bzw. Beanstandungen gibt, deren Ursache und damit auch deren Merkmale die wir noch nicht kennen oder für die wir noch kein geeignetes Messverfahren gefunden (d.h. noch nicht gelernt) haben.

Um von einer Beanstandung zu einer messtechnisch bestätigten Ursache und damit auch zu Merkmalen und geeigneten Messverfahren zu gelangen, sind nachfolgend aufgezählte Schritte zu gehen:

1. Kundenbeanstandung (verbal – möglichst detailliert)
2. Signalaufzeichnung und Begutachtung
3. Kundenwahrnehmung (verbal – möglichst detailliert)
4. subjektive Beschreibung durch geräuschbeschreibende Worte
5. subjektives Merkmal definieren
6. Suche nach objektive Messgrößen
7. Analyse der Funktionsweise des Produktes und des mechanischen Aufbaus
8. gemeinsame Betrachtung der Wahrnehmungs-, Mess- und Aufbauparameter
9. synoptische Analyse von Hörwahrnehmung und Signaldarstellungen
10. Hypothese und Verifikation der Geräuschursache

Im Schritt 2 werden die Schall- und Schwingungssignale möglichst nahe den realistischen Hörbedingungen erfasst und gespeichert. Es muss gewährleistet werden, dass in den gespeicherten Signalen die beanstandeten Geräuschanteile auch hörbar sind oder wieder hörbar gemacht werden können. Diese Bedingung ist häufig allein schon notwendig, um sich mit dem Kunden gemeinsam die Geräusche anhören und so seinen Wahrnehmungseindruck nachvollziehen zu können. Da wir auf abstrakte verbale Beschreibungen angewiesen sind, müssen wir die Möglichkeit schaffen, die Geräuschanteile uns „zeigen“ zu lassen.

Haben wir die Kundenwahrnehmung verstanden und eine entsprechende Beschreibung dokumentiert, so setzt die Suche nach geeigneten Merkmalen ein. An dieser Stelle ist unsere Erfahrung mit gelernten Geräuschen und Geräuschanteilen bzw. deren Zuordnung zu Verursachern erforderlich. Aus der Beschreibung wird versucht, das subjektive Merkmal zu definieren.

Wir greifen dabei entweder auf Begriffe aus Tabelle 1 zurück oder verwenden messtechnische Merkmale wie Schalldruckpegel, Modulationsgrad, spektrale Leistungsdichte, Terz- oder Oktavpegel und andere. Weiterhin stehen uns die aus der Psychoakustik bekannten Empfindungsgrößen wie z.B. Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke und Wohlklang zur objektiven Beschreibung zur Verfügung.

Die Unterschiedlichkeit der Ergebnisse dieser verschiedenen Merkmale soll an einem kleinen Beispiel erläutert werden.

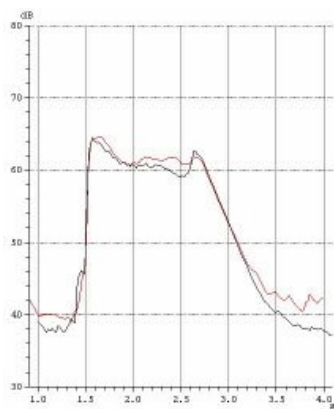


Abbildung 5: Geräusch beim motorisch angetrieben Öffnen und Schließen eines Flachbildschirms

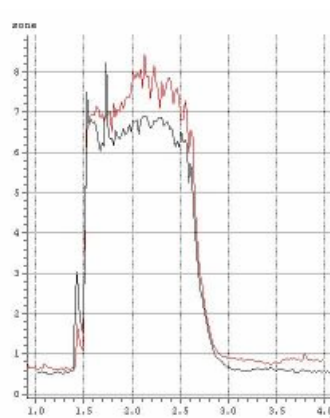
In Abbildung 5 ist der zeitliche Verlauf eines Geräusches dargestellt, das beim Öffnen und Schließen eines motorisch verstellbaren Flachbildschirms entsteht. Der links dargestellte Signalteil zeigt in der Mitte einen Impuls, der aus dem übrigen Signalverlauf herausragt. Er tritt auch bei Wiederholungsmessungen auf, ist aber aufgrund der zeitliche Kürze für das Ohr ohne Bedeutung. Anders verhält es sich mit dem im rechten Signalteil am Ende auftretenden „Amplitudenpaket“. Hier entsteht ein kurzes und eher dumpfes und dunkles „Flap“. Um dieses Geräusch zu kennzeichnen, fehlt ein aussagekräftiger Begriff, deswegen nehmen wir hier eine lautmalerische Silbenkombination zur Hilfe.

Was man aber dem Signal bei der Darstellung als Amplitudenverlauf nicht ansieht, sind ausgeprägte raue Geräuschanteile innerhalb des linken Signalteils, also beim Öffnen. Um die wahrnehmungsbestimmenden Geräuschanteile zu identifizieren, ist also das mehrfache Anhören und subjektive „De-Konstruieren“ notwendig. Mehrfaches Anhören ist erforderlich, da wir unsere Aufmerksamkeit auf die unterschiedlichen Aspekte entsprechend unserer Analysefähigkeiten lenken. Wir achten auf Schärfe, dann auf Rauigkeit, beim nächsten Mal auf Modulationen usw. Wir können dieses Vorgehen durch aus mit einer Differentialdiagnose vergleichen, bei der der Arzt aus den unterschiedlichen Symptomen auf die Krankheit schließt.

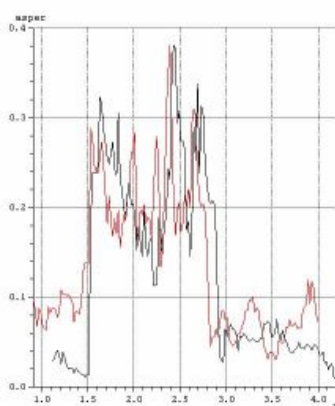
Die in Abbildung 6 dargestellten Verläufe der Merkmale Schallpegel, Lautheit, Rauigkeit, Schärfe und Schwankung zeigen unterschiedliche und verglichen mit dem Höreindruck nicht unbedingt der Wahrnehmung entsprechende Strukturen. Für die subjektiv empfundene Rauigkeit deckt sich allerdings die herausragende Merkmalanhebung mit dem subjektiven Eindruck.



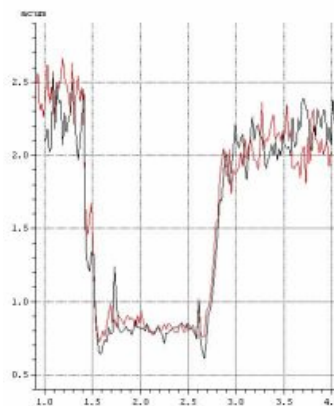
Pegelverlauf



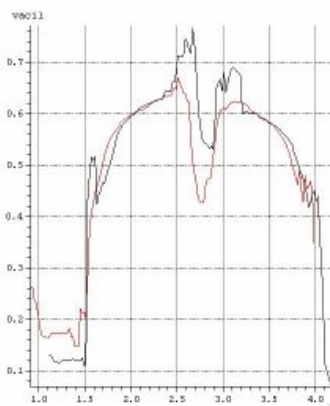
Verlauf der Lautheit



Verlauf der Rauigkeit



Verlauf der Schärfe



Verlauf der Schwankung

Abbildung 6: Darstellung der Merkmalverläufe für einen Geräuschschnitt aus Abbildung 5

Ursache für die wahrgenommene Rauigkeit ist wiederum eine Amplitudenmodulation bedingt durch die mechanischen Komponenten aus Antriebs- und Abtriebszahnrad. Durch Abweichungen in der Geometrie der Zahnräder, ungleichmäßige Zähne, Formfehler in den Zahnflanken, Materialeigenschaften usw. kommt es zu ungleichförmigen Zahneingriffen oder auch Lastveränderungen über dem Drehwinkel, die auf den Antrieb und damit auf die Motorschwingungen zurückwirken. Das Motorgeräusch stellt den breitbandigen Träger dar, der durch tieffrequenterer Signalanteile moduliert wird. Beispiele für derartige Signale sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 gezeigt.

Um Produkte zu verbessern, müssen wir nun konsequent den Schritt 7 zur Ursachenanalyse gehen. Es müssen aus den zeitlichen Verläufen und der spektralen Zusammensetzung der Geräusche bzw. der Modulationssignale die möglichen Verursacher identifiziert werden.

5 Ermitteln von Ursachen

In den nachfolgenden Beispielen soll für das Zusammenwirken zweier Zahnräder exemplarisch gezeigt werden, wie sich Formabweichungen in den Schall- und Schwingungssignalen auswirken können.

Das nachfolgende Beispiel geht von folgenden Verhältnissen aus::

- Großes Zahnrad: 40 Zähne; Drehfrequenz: 50 Hz; Zahneingriffsfrequenz: 2000 Hz
- Kleines Zahnrad: 25 Zähne; Zahneingriffsfrequenz: 2000 Hz; Drehfrequenz: 80 Hz.

Unter idealen Bedingungen greifen alle Zähne beider Zahnräder in identischer Art ineinander. Das zugehörige Schall- oder Schwingungssignal entsteht durch den Kraftstoß beim Zusammenreffen der Zahnflanken. Die Höhe aller Schall- oder Schwingungsimpulse ist gleich Abbildung 7. Wir hören abhängig von der Drehfrequenz einen Ton, der durch die Zahneingriffsfrequenz von 2000 Hz und deren Harmonischen. Das Geräusch wird also stark tonal sein und sich wie ein helles Singen anhören.

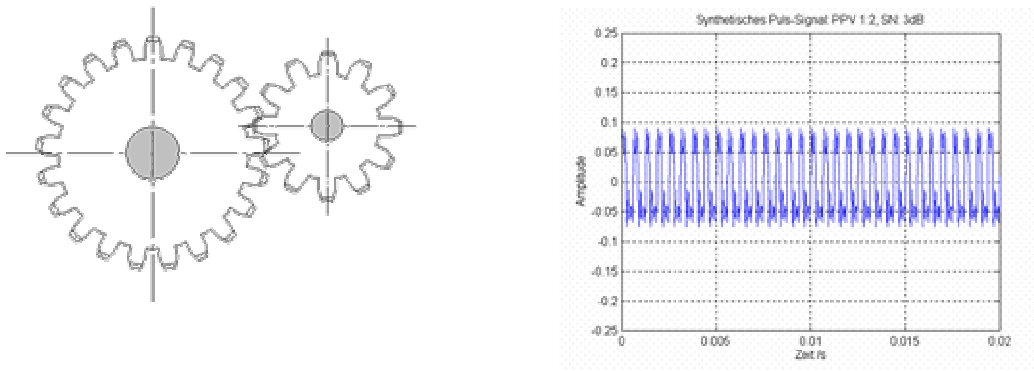


Abbildung 7: Zahnräder ohne Formabweichung und zugehöriges Schallsignal

Kommt es zu einer Formabweichung z.B. in Form einer Exzentrizität (Abbildung 8), so wird sich mit der Umdrehung des Großen Rades bei starrer Lagerung die Last zwischen den Zahnrädern ändern und damit das Schallsignal mit der Drehzahl des großen Rades (50 Hz) moduliert.

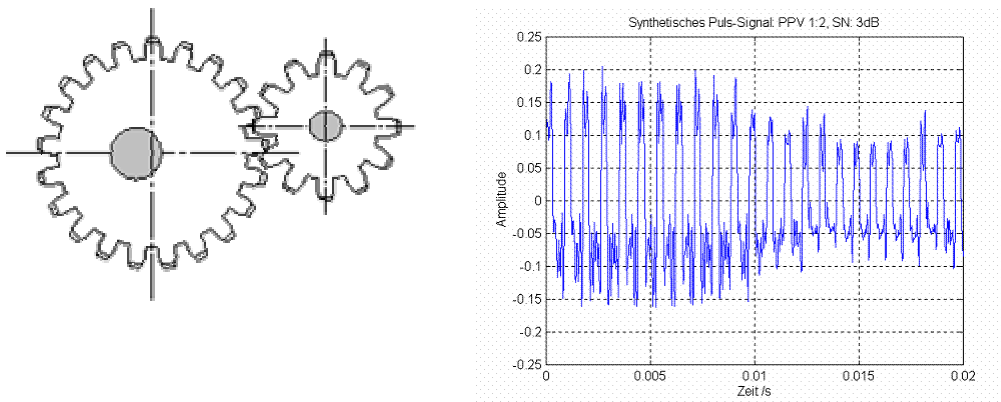


Abbildung 8: Zahnräder mit Formabweichung in Form einer Exzentrizität des linken Zahnrades

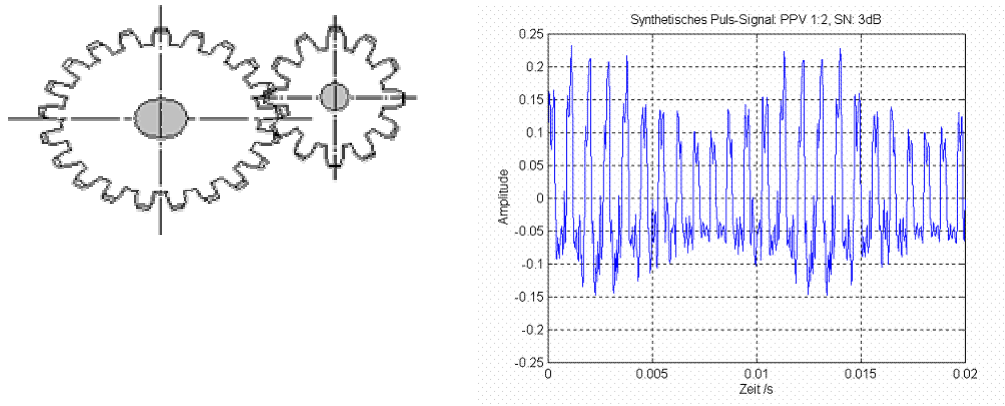
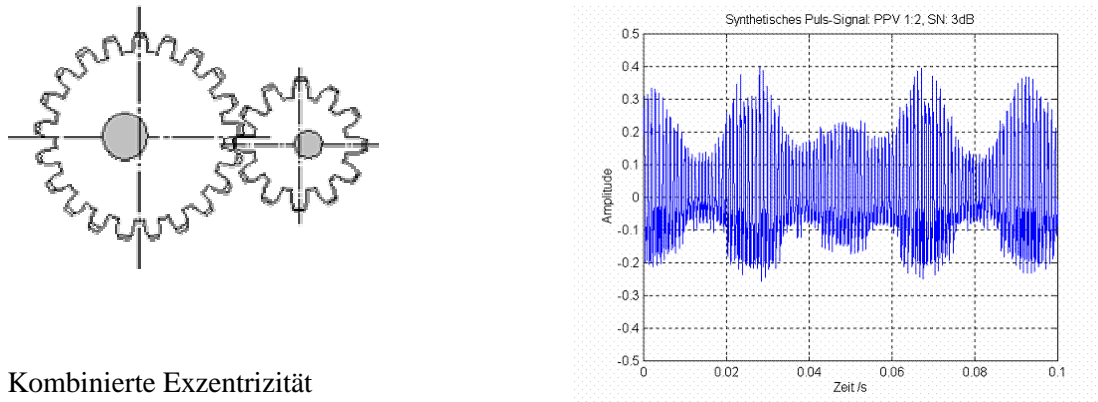


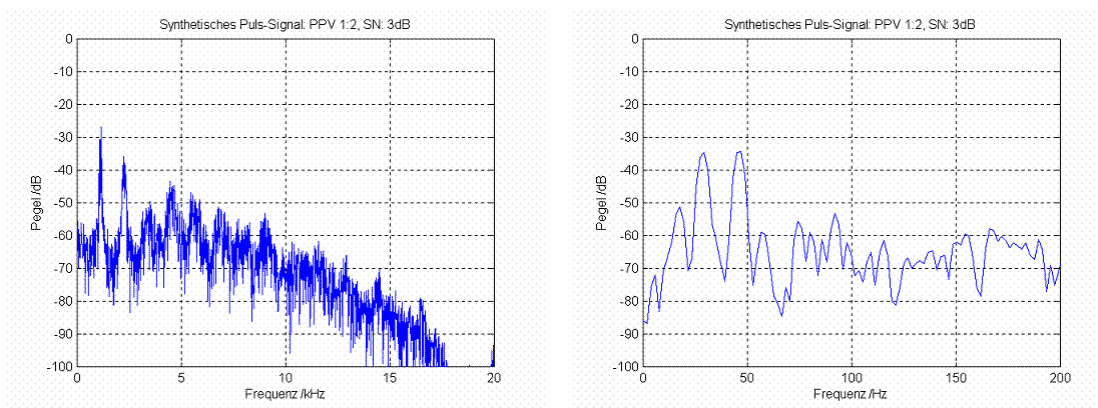
Abbildung 9: Formabweichung des großen Zahnrades: Ovale Form

Tritt eine Formabweichung in Gestalt eines Ovals auf, so wechselt beim Drehen des Zahnrades die Last zweimal und entsprechend erfolgt die Modulation des Schall- oder Schwingungssignals mit der doppelten Drehfrequenz (Abbildung 9).



Kombinierte Exzentrizität

Zeitlicher Verlauf des Signals



Frequenzspektrum

Modulationsanalyse

Abbildung 10: Kombination aus Formabweichung bei beiden Zahnrädern (Exzentrizitäten)

Treten Form- oder Materialabweichungen in Kombination auf, so wirken die entsprechenden Ursachen zusammen. In Abbildung 10 ist eine derartige Kombination am Modell vorgenommen worden. Dabei wurden folgende Parameter gewählt:

- Zahnrad 1: Drehfrequenz: 50 (45) Hz; Modulation: FM 10%, AM 50%; Zahneingriffsfrequenz: 1250 Hz
- Zahnrad 2: Drehfrequenz: 31,25 (28,125) Hz; Modulation: Z2: FM 1 %, AM 30 %

Die Größe der Formabweichung ist bei der Simulation der Signale in der Variation der Modulationsgrade berücksichtigt. Es gibt heute keine tabellarischen Angaben, wie sich die Größe der Formabweichung unmittelbar in der Größe des Modulationsgrades ausdrücken lässt. Umgekehrt kann heute keine allgemeingültige Aussage darüber gemacht werden, welche Toleranzen Formabweichungen maximal haben dürfen, um sich nicht oder zumindest nicht wahrnehmbar auf den Geräuscheindruck des Menschen auszuwirken.

In Abbildung 10 sind die kombinierten Formabweichung (Exzentrizitäten beider Zahnräder) schematisch und die zugehörigen simulierten Schallsignale in ihrem zeitlichen Verlauf, in der Darstellung als Frequenzspektrum und Modulationsfrequenzspektrum dargestellt. Die veränderliche Last hängt nun von dem Zusammentreffen der Formveränderungen und somit den veränderten Eingriffsverhältnissen beim Zusammentreffen der Zähne ab.

6 Optimierung des Geräusches

Sind auf dem Wege der Beurteilung und Beschreibung der beanstandeten Geräusche, dem Anhören und wenn möglich synoptischen Vergleichen zwischen Höreindruck und Messergebnissen die möglichen Verursacher gefunden, so setzt der mühsame Prozess der Produktverbesserung, der Änderung von Material- und Formeigenschaften und der nachfolgenden Messtechnischen Verifikation ein.

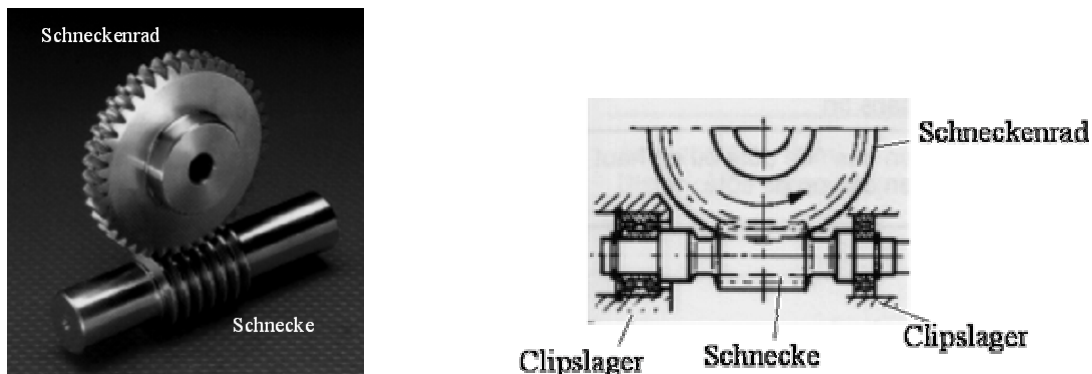


Abbildung 11: Kombination aus Schnecke und Schneckenrad

Wie das Beispiel in Abbildung 11 veranschaulichen soll, genügt es in der Regel nicht, sich ein Bauteil oder eine Komponente herauszugreifen, sondern das Zusammenspiel der am prozess beteiligten Komponenten zu betrachten. Schnecke und Schneckenrad bei einstufigen Getrieben sind zwar häufig Ursache für Geräuschteile, die durch die Rückwirkung der Wechsellast auf das Motorgeräusch sich auswirken, aber es können auch Abweichungen in den Lagern, Stellungsfehler, Einbaufehler, Verschmutzungen und vieles andere mehr sein.

Neben der Wahrnehmung der Geräusche, deren möglichst zutreffender Beschreibung und der messtechnischen Verifikation sind detektivischer Spürsinn und Intuition gepaart mit Erfahrung notwendig, um den Schuldigen für Geräuschbeanstandungen zu finden.

7 Literatur

- [HARDMANN2004] unbekannt: Wahrnehmung.
<http://www.hardman.at/psychophilo/content/psycho/wahrnehmung.html>, 2004
- [KOTTERBA2002] B. Kotterba: Getriebegeräusche messen – prüfen – analysieren. TAE Seminar „Getriebegeräusche“ 2002