

Spektrum der Akustik in der Fertigung

Ingolf Hertlin

RTE Gesellschaft für Datenverarbeitung in der Technik mbH,
76327 Pfinztal / Karlsruhe

Zusammenfassung

Die akustische Prüftechnik in der Fertigung ist noch nicht sehr breit eingeführt und noch entwicklungsfähig. Dennoch existieren eine ganze Reihe von erfolgreich arbeitenden Lösungen. In diesem Beitrag wird weniger auf spezifische Lösungen der akustischen Prüftechnik in der Fertigung eingegangen, sondern vielmehr auf die Möglichkeiten und Grenzen, die erforderlichen Voraussetzungen, Schritte zur erfolgreichen Umsetzung und die Zukunftsaspekte.

1. Aufgabenstellungen in der Fertigung

Die Fertigungsplanung und Arbeitsvorbereitung in einem Hochlohnland wie der Bundesrepublik Deutschland hat heutzutage folgende schwierige Aufgabe, nämlich

1. bestehende Anlagen so effizient wie möglich zu nutzen

Investitionen in neue Anlagen werden erst vorgenommen, wenn die Fertigungskapazität nicht mehr für die bestehenden oder erwarteten Aufträge ausreicht.

2. die Produktivität der Mitarbeiter zu optimieren

Wenn weniger Mitarbeiter mehr fertigen müssen, dann müssen die Arbeitsabläufe optimiert werden. Jede eingesparte Minute bei der Montage eines Produktes summiert sich schnell zu einem erheblichen Betrag: bei Arbeitskosten von DM 1,00 / min. und der Montage von 15 Teilen / h in zwei Schichten bewirkt eine Zeitersparnis von 30 Sekunden pro Teil in 4 Jahren eine Einsparung von DM 120.000 zuzüglich Gewinn durch Mehrfertigung!

3. einen hohen Qualitätsstandard zu sichern

Die Anforderungen an die Fertigungs- und Produktqualität sind enorm. In der Automobilindustrie werden beispielsweise bei Sitzen 50 ppm gefordert (max. 1 Fehler bei 20.000 Stück!). Komplexe, verkettete Prozesse erfordern die Gewährleistung der Produktqualität auf jeder Stufe des Fertigungsprozesses. Hierbei müssen die Prüfkosten so gering wie möglich gehalten werden: sie sind unproduktive Fehlerverhütungskosten!

4. die Anforderungen der DIN ISO 9000ff zu erfüllen

Der gesamte Fertigungsprozeß muß klar gegliedert sein. Prüfmittel müssen überwacht werden und kalibrierbar sein. Besondere Bedeutung erhält die Dokumentation des Fertigungsprozesses und der einzelnen Produkte.

5. die Fertigungskapazität flexibel der Nachfrage des Kunden anzupassen

Besonders die Automobilzulieferindustrie muß sich auf die stark schwankenden Lieferabrufe der Kunden einstellen, ohne Lagerkosten zu erzeugen. Dieses erfordert leicht umrüstbare Anlagen.

6. kostenoptimal bei kurzer Amortisationszeit zu fertigen

Nur eine hohe Anlagenverfügbarkeit und Auslastung gewährleistet einen Ratioeffekt und erlaubt dem Hersteller, seine Produkte konkurrenzfähig anzubieten.

Wenn auch eine dieser Aufgaben nicht oder nur unzureichend erfüllbar ist, besteht die Gefahr der Produktionseinstellung oder Verlagerung ins Ausland. Arbeitsplätze werden abgebaut.

2. Meß- und Prüftechnik

Eine automatisierte Serienfertigung mit hohen Stückzahlen erfordert bei dem heutigen Kostendruck eine rechnergestützte Steuerungs-, Meß- und Prüftechnik. Ursache hierfür sind nicht alleine die Stückzahlen oder die Ausbildung der Mitarbeiter, sondern die Dokumentation der Prüfergebnisse und der schnelle Eingriff in die Fertigung, wenn wiederholt Fehler festgestellt werden. Fertigungsdaten müssen online zur Verfügung stehen und unter verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet und verknüpft werden.

Diese Forderungen gelten selbstverständlich auch für die Geräusch- und Vibrationsbeurteilung von Produkten. Allerdings ist die Umsetzung in die Praxis weitaus schwieriger als z. B. beim Messen von physikalischen Größen wie Strom, Spannung oder Drehzahl und Drehmoment. Problematisch ist hierbei weniger die meßtechnische Erfassung (obwohl man auch hier sehr viele Fehler machen kann!!) als die Bewertung der akustischen Signale, denn als Referenz stehen nur die subjektiven Wahrnehmungen der Prüfer und deren Beurteilung zur Verfügung. Die subjektive Bewertung bildet die Grundlage für die objektive Entscheidung durch das Prüfsystem.

3. Klassifikation der akustischen Meß- und Prüftechnik

Die *Akustik* beschäftigt sich mit der Beschreibung von Schallfeldern und deren Phänomenen (Tabelle 1). Die *Psychoakustik* als Grenzdisziplin zwischen Akustik, Hörpsychologie und Gehörphysiologie beschäftigt sich mit der Wahrnehmung von Schall durch das menschliche Gehör [Heldmann 1995].

Akustik			
Schallenstehung	Schallausbreitung	Schallabstrahlung	Schallaufnahme

Tabelle 1: Kategorien der Akustik

Wir können verschiedene Schallarten (Tabelle 2) unterscheiden, die letztendlich alle elastodynamische Schwingungen und Wellen im jeweiligen Medium darstellen.

Schallarten		
Körperschall	Luftschall	Flüssigkeitsschall
Schwingung, Vibration	Geräusch, Lärm	Welle, Pulsation
Beschleunigungssensor Kraftsensor Nerven	Mikrofon Gehör	Drucksensor Hydrophon

Tabelle 2: Kategorien der Schallarten

Für die Qualitätsprüfung ist insbesondere die Art der Schallbeurteilung wichtig (Tabelle 3). Die subjektive Schallbeurteilung bedeutet hierbei die Zuordnung eines Urteils zu einem Produkt durch den menschlichen Prüfer aufgrund seines Empfindens (hören und fühlen). Diese Wahrnehmungen unterliegen zahlreichen, nicht bestimmbareren Einflußfaktoren.

Die "objektive" Schallbeurteilung (im strengen Sinne gibt es keine objektive, sondern nur eine meßtechnische Schallbeurteilung!) basiert auf Sensoren für die unterschiedlichen Schallarten und versucht, die Einflußfaktoren zu minimieren bzw. algorithmisch zu berücksichtigen. Um eine Beurteilung durchzuführen, müssen möglichst gut trennbare Merkmale gefunden werden, deren Werte einzeln oder verknüpft das Beurteilungsmaß bilden [Röpke, Filbert 1995].

Schallbeurteilung	
Subjektiv	Objektiv
Mensch	Maschine
Empfinden, Eindruck	Merkmale
physische und psychische Einflußfaktoren	technische Einflußfaktoren
begrenzt reproduzierbar	reproduzierbar

Tabelle 3: Kategorien der Schallbeurteilung

4. Akustische Qualitätsprüfung in der Praxis

Unter Geräuschprüfung in der Fertigung wird die Bewertung des Luftschalls verstanden, während die Schwingungsanalyse des Körperschallsignals sowohl die Vibrationen des Prüflings als auch dessen Einkopplung in die umgebende Struktur zum Gegenstand hat. Betrachtet man die Schallaufnahme für die Prüfung, so kann man hier aktive und passive Verfahren unterscheiden (Tabelle 4).

Schallprüfung	
Aktiv	Passiv
Anregen des Prüflings	Schallabstrahlung bei Betrieb

Tabelle 4: Arten der Schallprüfung

Kriterium für die Geräuschbeurteilung z. B. eines montierten und gepolsterten Sitzes ist das subjektive Hörempfinden des Prüfers beim Automobilherstellers im auszuliefernden Fahrzeug. Der Hersteller des Sitzes kann diese Bedingungen in seiner Fertigung nicht erreichen, er ist in der Regel auf eine Simulation angewiesen. Messen kann er jedoch die durch den Sitz verursachte Schwingungseinkopplung in den Fahrzeugboden.

Akustische Prüftechnik läßt sich nur dann erfolgreich im industriellen Umfeld einsetzen, wenn die nachfolgenden Voraussetzungen gegeben sind und die Zielrichtung klar definiert ist. Hierzu bedarf es einer exakten Aufgabenanalyse und Konzeption der gesamten Prüfanlage.

4.1. Voraussetzung

Für eine erfolgreiche Schallbeurteilung unter Fertigungsbedingungen müssen gemäß Tabelle 3 die Einflußfaktoren minimiert und reproduzierbare Bedingungen geschaffen werden. Hinzu kommt aber auch noch, daß die Beurteilung möglichst nahe dem Höreindruck des Menschen sein soll, da er ja die Basis für die "objektive" Beurteilung bildet.

- Sensorik:** robust, industriegerecht, einflußarm
- Prüfstand:** Schwingungsentkopplung von Umgebung;
auf Schwingungsprüfung abgestimmte Prüflingshalterung;
energetische Verhältnisse berücksichtigen (kleine Schwingungsenergie bei hohen Frequenzen)
- Meßbedingungen:** reproduzierbar, vergleichbar, Heranziehung sinnvoller Meßgrößen
- Merkmalsfindung,
Klassifikation:** trennwirksam, handhabbare Anzahl, aussagekräftig

4.2. Zielrichtungen

Mit akustischer Prüftechnik in der Fertigung lassen sich prinzipiell zwei Zielrichtungen verfolgen:

m Auffinden von Fertigungs- und Montagefehlern

Beispielsweise lassen sich bei den oben erwähnten Sitzgestellen folgende Fehler mit sinnvoll konzipierter Sensorik bzw. Prüfstandsgestaltung detektieren (Ausschnitt, subjektive Umschreibung):

- "gelegentliches Schlagen/Tackern",
- "regelmäßigem Schlagen/Tackern",

"Umschaltknacken",
"Brummen",
"Quietschen",
"Schaben",
"Modulation",
"unrunder Lauf".

Ursache hierfür ist eine fehlerhafte Montage bzw. das Verwenden schadhafter Teile (z. B. Zahneingriff, Zahnstange mit Schweißperlen, Bürstenfehler, Kollektorfehler).

m **Beurteilung des Geräuschverhaltens**

Unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen können Luftschallmessungen in der Fertigung nicht durchgeführt werden. Eine Simulation der gesamten Einbaubedingungen ist auf der anderen Seite wirtschaftlich nicht sinnvoll. Bei der Geräuschbeurteilung von Komponenten im Fahrzeug müßte eine Schallkabinen den Fahrzeuginnenraum realistisch nachbilden. Es ist leicht einsehbar, daß dieses angesichts der Varianten- und Ausstattungsvielfalt nicht möglich ist.

Aus diesem Grunde muß jedermann bewußt sein, daß es einen prinzipiellen Unterschied zwischen der subjektiven Beurteilungen im Fahrzeug und den objektiven Messungen am Prüfstand in der Fertigung gibt. Die maschinelle Geräusch- und Schwingungsbeurteilung kann den Höreindruck des menschlichen Prüfers nicht in der gleichen Weise erfassen, aber Fertigungsfehler erkennen und Kennzahlen für das Geräuschverhalten des Prüflings berechnen. In jedem Einzelfall sind Bedingungen in der Prüftechnik (Prüfstand, Sensorik, Verfahren) zu finden oder zu entwickeln, die den Bedingungen der "realen Welt" möglichst nahe kommen.

5. Vorgehen

Wie ist nun vorzugehen? Dieses läßt sich am besten anhand eines Beispiels - wiederum aus dem Bereich der Automobilindustrie für elektrisch verstellbare Fahrzeugsitze oder Fensterheber - darstellen:

- Typischerweise gibt es eine Vorschrift des Automobilherstellers für die Durchführung von Messungen im Fahrzeug. Die Forderung seitens des Automobilherstellers an den Lieferanten ist nicht die Ermittlung und der Vergleich der gleichen Kennwerte, was auch - wie oben dargestellt - nicht sinnvoll ist, sondern dient der Ermittlung von vergleichbaren Referenzwerten. Wesentlich für eine erfolgreiche akustische Prüftechnik ist, daß die Beurteilung (Gesamteindruck) übereinstimmt und keine Montage- und Fertigungsfehler zu störenden Geräuschen aufgrund von Schwingungen in der Fahrzeugstruktur führen.
- Das Prüfergebnis der Fertigung muß mit der Beurteilung der Prüfer des Automobilherstellers korrelieren. Diese Korrelation gilt es aufzufinden und in Merkmale für die Prüftechnik umzusetzen.
- Das Prüfkonzept ist so auszulegen, daß die Einbaubedingungen im Fahrzeug berücksichtigt werden und eine realistische Abbildung des Luftschalles auf die Körperschallmessung am Prüfstand entsteht.

- Die Sensorik muß so konzipiert und eingesetzt werden, daß sowohl alle Fehler erkannt werden und Kennwerte für den Höreindruck gewonnen werden können.
- Bei der Festlegung der noch akzeptierbaren Geräusche (Qualitätsvorgaben) ist der Kunde mit einzubeziehen.
- Die Konzeption, Entwicklung und Umsetzung von Prüfmerkmalen muß die Eigenschaften des Prüflings widerspiegeln (produktangepaßte Merkmalsextraktion). Standardmerkmale wie Oktavband- oder Terzspektralanalyse sind in der Regel nicht ausreichend.
- Eine weitere Optimierung der Korrelation zwischen Luftschallmessungen im Fahrzeug und Körperschallmessungen in der Fertigung (Übertragungsfunktion) kann algorithmisch erfolgen, z. B. durch frequenzselektive Bewertungsalgorithmen und gehörorientierte Merkmale.

Erst die Summe der Maßnahmen führt zu einer technisch und wirtschaftlich erfolgreichen akustischen Prüfung in der Fertigung.

6. Ausblick

In denn vergangenen Jahren hat die akustische Prüftechnik in der Fertigung große Fortschritte und Erfolge erreicht. Aber immer wieder erfährt man auch von Lösungen, die nicht zur Zufriedenheit der Anwender arbeiten und lediglich grobe Fehler erkennen, bei den schwierigeren aber bei weitem nicht das Wahrnehmungs- und Leistungsvermögen des Menschen erreichen. Es ist nicht immer sinnvoll, die Prüfaufgabe einem objektiv arbeitenden System zu übertragen; oft ist es weit sinnvoller, den menschlichen Prüfer in seiner subjektiven Beurteilung zu unterstützen (siehe [Heldmann 1995]). Wenn aber eine objektive Prüfung technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, dann führt nur eine systematische, oft auch pragmatische Vorgehensweise zum Ziel.

Die Systemtechnik für akustische Prüftechnik in der Fertigung ist noch nicht am Ende der Fahnenstange angelangt. Sowohl auf der Sensorseite wie auch bezüglich Analyseverfahren, Hard- und Softwaretechnik und Bedienbarkeit ist noch ein erhebliches Potential vorhanden. Für die Fertigung sind insbesondere einfach handhabbare Systeme erforderlich, die von den Fertigungs- und Instandhaltungsmitarbeitern bedient und eingestellt werden können.

Ein Ziel ist auch, statt der bisher merkmalsorientierten Qualitätsprüfung eine produktorientierte zu ermöglichen: allein die Produkteigenschaften in Verbindung mit dem zugordneten Qualitätsurteil bilden die Grundlage für die Klassifikation. Dieses ist aktueller Forschungsgegenstand von RTE und wird zu innovativen, breit einsetzbaren Systemen führen.

7. Literatur

- [HELDMANN 1995] K. Heldmann: Unterstützte subjektive Qualitätsprüfung. Kontrolle 6 (1995) 106
- [RÖPKE, FILBERT 1995] K. Röpke u. D. Filbert: Klassenziel - Qualität. Z. Messen, Prüfen, Automatisieren (MPA), 1/2 (1995) 44