

Anforderungen an den Prüfstandsaufbau

- Vorschläge und Diskussionsstand -

Dr.-Ing. J. Krauß
Dr.-Ing. F. Attia
Dr.-Ing. A. Bothe
Dipl.-Ing. D. Merbold
Dipl.-Ing. B. Reichert
Dipl.-Ing. H. Weber

(AG-AQS Arbeitsgruppe 1)

1 Zielsetzung

Die akustische Qualitätsprüfung geräuschverursachender Produkte wie Elektromotoren, Pumpen, Getriebe, etc. hat sich aufgrund des gestiegenen Umwelt-, Komfort- und Qualitätsbewußtseins einen festen Platz in der Industrie erobert.

Anstrengungen, die seither abhörende Prüfung durch technische Verfahren zu ergänzen bzw. zu ersetzen, blieb der schnelle Erfolg in der Regel versagt. Dabei ist auf den ersten Blick erstaunlich, daß die akustischen Meßgeräte ihre prinzipbedingte höhere Genauigkeit (u.a. Wiederholpräzision) gegenüber dem abhörenden Prüfer nicht ausspielen können. Eine Ursache dafür ist, daß die akustischen Meßgeräte wie auch der abhörende Prüfer an einem Prüfstand und in einer Prüfumgebung arbeiten, die für die Belange der akustischen Prüftechnik nicht oder nicht ausreichend ausgelegt wurden.

Um das Potential der akustischen Meßtechnik besser erschließen zu können, hat sich die Arbeitsgemeinschaft 'Akustische Qualitätssicherung' zum Ziel gesetzt, Anforderungen an den Prüfstandsaufbau als Handlungshilfe zu erarbeiten.

Dabei hat das nun vorliegende Arbeitsergebnis in '95 noch nicht den gewünschten Reifegrad als Handlungshilfe erreicht, um als Verhandlungsgrundlage in einer Kunden-/Lieferantenbeziehung Verwendung zu finden. Ein unreflektiertes Anwenden dieses Berichts kann zu unnötig hohen Prüfstandskosten führen, ohne dabei das gewünschte technische Ergebnis garantieren zu können.

Der folgende Bericht versteht sich deshalb als Diskussionsbeitrag. Die Weiterentwicklung zu einer allgemein verwendbaren Handlungshilfe ist deshalb auch auf förderliche Kritik durch den Leser angewiesen.

2 Bestandteile eines akustischen Prüfmittels

Mit der Aufgabenstellung 'Anforderungen an den Prüfstandsaufbau' wird deutlich, daß ein akustisches Prüfmittel nicht nur aus einem

- **Prüfgerät** (mit akustischer Sensorik und einem Signalauswertesystem zur Gewinnung qualitätsrelevanter Merkmale u. Entscheidungsfindung)

besteht, sondern zusammen mit dem

- **Prüfstand** (zur Aufnahme und der akustischen Anregung des Prüfobjektes)

und dem

- **Prüfraum**

eine funktionale Einheit bilden. Dabei hängt die Ausbildung des Prüfstandes und auch des Prüfraumes von der Art und Größe des Prüfobjektes ab. Der naheliegende Wunsch nach einem Standardprüfstand zur akustischen Qualitätsprüfung erscheint aufgrund der Vielfalt der Prüfobjekte nicht verwirklichtbar.

Damit wird die Handlungshilfe zu einem Rahmenplan für die Prüfstandsgestaltung.

3 Aufgaben der akustischen Qualitätsprüfung

Die Handlungshilfe will primär zu einem günstigen Kosten-/Nutzenverhältnis bei entsprechenden Anwendungen beitragen. Dazu gehört die gezielte Anpassung an den Bedarf bereits in der Projektierungsphase. Da kann z.B. die Forderung nach einem teuren, schalltoten Raum oder einem ähnlich aufwendigen Prüfraum, wie diesen eine Schalleistungsmessung nach dem Hüllflächenverfahren (DIN 45 635) voraussetzt, entfallen, wenn eine über unterschiedliche Prüfmittel hinweg vergleichbare Geräuschemissionsmessung nicht benötigt wird. Der Aufwand läßt sich also durch eine gezielte Analyse des speziellen Aufgabenprofils reduzieren.

Hat das akustische Prüfmittel die Aufgabe

- (3.1) nur die einfachste Form der Prüfung, als Messung zum Grenzwertvergleich (i.O./n.i.O.-Prüfung) durchzuführen ?
- (3.2) der statistischen Qualitätslenkung, ist also die Qualität der Prüfobjekte in einem weiten Dynamikbereich ($x_{\text{quer}}, \pm 2s$) zu messen ?
- (3.3) die n.i.O.-verursachenden Teilgeräuschquellen im Prüfobjekt zu benennen (Diagnose) ?
- (3.4) die Korrelation zum Geräuschverhalten im Endeinbauzustand der Prüfobjekte beim Kunden zu gewährleisten, d.h., daß alle als i.O./n.i.O. vom akustischen Prüfmittel getesteten Prüfobjekte definierte akustische Grenzwerte im Endeinbauzustand der Prüfobjekte beim Kunden nicht über-/unterschreiten (mit Angabe der maximal zulässigen Fehlentscheidungen in %) ?
- (3.5) übereinstimmende Meßwerte zu anderen akustischen Prüfmitteln zu erzeugen ?

4 Randbedingungen

Bei der Projektierung eines akustischen Prüfmittels als Kombination aus elektroakustischem Prüfgerät und Prüfstand sind zunächst Randbedingungen zu klären bzw. zu beachten, wie sie für den Anlagenbau allgemein gelten:

- (4.1) Automatisierungsgrad ?
- (4.2) Pfl egbarkeit (Anpaßbarkeit an neue Prüfobjektvarianten gegeben ?) ?
- (4.3) Wartbarkeit (Servicevertrag möglich ?) ?
- (4.4) Kalibrierbarkeit
- (4.5) Bedienbarkeit, Mensch-Maschine-Schnittstelle
- (4.6) Arbeitssicherheit, Unfallverhütungsvorschriften
- (4.7) Platzbedarf
- (4.8) Verfügbarkeit definierter Schnittstellen des Prüfgerätes nach außen
- (4.9) Dokumentation

Für die speziellen Belange der akustischen Qualitätsprüfung sind folgende Fragen für Kosten, Technik und Projektierung entscheidend:

- (4.10) Leistet das Prüfmittel nur die akustische Qualitätsprüfung oder muß der Prüfstand auch andere qualitätsrelevante Eigenschaften testen ?
- (4.11) Erfolgt die Lieferung des akustischen Prüfmittels bestehend aus Prüfraum, Prüfstand, ggfs. Werkstückträger, akustischem Prüfgerät aus einer Hand oder getrennt?
- (4.12) Wer gewährleistet bei getrennter Lieferung die Prüfmittelfähigkeit ?
- (4.13) Wird das Prüfobjekt bereits produziert (Testbarkeit der Prüfmittelfähigkeit ?) ?
- (4.14) Ist zusätzlich eine subjektive akustische Qualitätsprüfung vorzusehen ?

5 Leistungsmerkmale des Prüfstandaufbaus

Für den Prüfstand, als mechanischen Träger des Prüfobjektes, der Sensorik, etc., sind aus akustischer Sicht vier Eigenschaften leistungsentscheidend:

- Wie ist das Prüfobjekt am Prüfstand befestigt ?
- Wie regt der Prüfstand das Prüfobjekt zur akustischen Emission an ?
- Wie ist die akustische Sensorik integriert ?
- Wie leise ist der Prüfstand selbst und wie gut dämmt der Prüfstand Störschall ?

5.1 Die Aufspannung der Prüfobjekte

5.1.1 Beeinflussung des „Prüfobjektinneren“

Das Prüfobjekt ist so am Prüfstand aufzuspannen, daß sich

- die Geräuschquellen im Inneren des Prüfobjektes sowie
- die inneren Luft- und Körperschallübertragungswege

gegenüber dem kundenseitigen Einbau der Prüfobjekte nicht verändern.

Dazu reicht es in der Regel aus, eine statisch bestimmte Aufspannung vorzusehen, um Verspannungen des Prüfobjektes zu vermeiden. Beachten Sie dabei, daß auch Komponenten wie Antriebswellen zwischen Prüfobjekt und Prüfstand Verspannungen bzw. ungewollte Veränderungen bewirken können.

5.1.2 Beeinflussung des „Prüfobjektäußeren“

Das Prüfobjekt ist so am Prüfstand aufzuspannen, daß sich die für die Geräuschabstrahlung verantwortlichen Gehäuseschwingungen im interessierenden Frequenzbereich der verwendeten akustischen Merkmale

5.1.2.1 so ausprägen, wie im kundenseitigen Einbau.

Ist eine solche Aufspannung technisch nicht realisierbar oder nicht wirtschaftlich, empfiehlt sich eine Ausführung entweder als

5.1.2.2 Aufspannung gegen die 'starre Platte'

oder

5.1.2.3 Aufspannung überkritisch 'in Gummi' .

5.1.3 Wiederholbarkeit der Aufspannung

5.1.3.1 Unabhängig von der schwingungstechnischen Auslegung der Aufspannung (5.1.1 und 5.1.2) ist auf eine wiederholbare Aufspannung, u.a. durch konstruktiv vorgesehene Lagefixierung zu achten.

5.1.3.2 Hohe Prüfstückzahlen verlangen einen Verschleißschutz bei den vom Auf- und Abrüstvorgang beanspruchten Prüfstandskomponenten.

5.2 Die Anregung der Prüfobjekte

Eine prüfobjektspezifische Prüfanweisung legt in der Regel Art und Umfang der Prüfung fest. Die Art der akustischen Anregung der Prüfobjekte erscheint dabei so vielfältig wie die Prüfobjekte selbst:

(5.2.1.1) Akustische Anregung durch Shaker, Hammer, ..

(5.2.1.2) Anregung durch Eigenantrieb (Elektromotor, Verbrennungsmotor, ..)

(5.2.1.3) Anregung durch Fremdantrieb (Pumpe, Getriebe, ..)

(5.2.1.4) Anregung durch Betriebslast (mechanisch, hydraulisch, elektrisch, pneumatisch, usw.)

Soweit keine besonderen Anregungsbedingungen definiert sind, empfiehlt es sich, die Anregungsmöglichkeiten des Prüfstandes so auszulegen, daß diese die Anregungsbedingungen des typischen Kundenbetriebes bieten. Die Anregung ist hinsichtlich

(5.2.2.1) Art,

(5.2.2.2) Intensität, bzw. Intensitätsbereich,

(5.2.2.3) Toleranzangabe zur Intensität sowie

(5.2.2.4) der zugehörigen Kalibriertechnik

zu definieren. Bei mehreren Anregungsarten ist entsprechend mehrfach zu definieren.

5.3 Auswahl und Ankoppelung der Sensorik am Prüfobjekt

5.3.1 Auswahl der Sensorik

Soweit sich die Auswahl der Sensorik nicht schon aus der Aufgabenstellung (Kap. 3) oder Vorgaben des Prüfmittelkunden ergibt, sind zunächst

(5.3.1.1) Art,

(5.3.1.2) Anzahl und

(5.3.1.3) Positionierung (Ort sowie z.T. Richtung)

der benötigten Sensoren zu bestimmen.

Was die Sensorart betrifft, liefern für Mikrofone, Beschleunigungsaufnehmer, Laservibrometer, etc. Herstellerbroschüren ausführliche Informationen über Einsatzbereich und die zulässigen Umgebungsbedingungen.

Die Auswahl der Sensorik orientiert sich dabei zentral am

(5.3.1.4) interessierenden Frequenzbereich, der zur Charakterisierung guter und mit verschiedenen Fehlern behafteter Prüfobjekte benötigt wird.

(5.3.1.5) Zur Positionierung bei Einsensorenwendungen gilt, daß alle interessierenden Frequenzbereiche möglichst gleichverteilt im Signal vorliegen.

(5.3.1.6) Zur Positionierung bei Mehrsensenorenwendungen gilt, daß alle interessierenden Frequenzbereiche in der Summe möglichst gleichverteilt in den Signalen vorliegen.

(5.3.1.7) Eine Betriebsschwingformanalyse oder je nach Anregungstyp (Kap. 5.2) experimentelle Modalanalyse gibt ergänzend Auskunft über die Schwingform, womit sich die Suche nach geeigneten Sensorpositionen und Richtungen beschleunigen läßt.

- (5.3.1.8) Ein subjektiver Beurteilungsvergleich zwischen natürlichem Luftschall sowie den einzelnen Sensorkanälen prüft ergänzend, inwieweit alle fehlertypischen Geräuscheigenschaften in mindestens einem der Sensorkanäle enthalten sind.

Sind gute und fehlerhafte Prüfobjekte sowie ein prüfstandsähnlicher Aufbau bereits verfügbar, empfiehlt sich zur Klärung der Punkte 5.3.1.1 - .8 eine zwischen Prüfmittelkunde und Prüfmittellieferant zu vereinbarende Vorstudie.

Ist eine Vorstudie nicht möglich, ist die Sensorik anhand von Prüfmittelrealisierungen mit ähnlichen Prüfobjekten zu konzipieren. Das Risiko einer solchen Konzeption kann dann allerdings nicht allein bei dem Prüfmittellieferanten liegen.

5.3.2 Ankoppelung der Sensorik

Die Sensoranbringung ist

- (5.3.2.1) mit Toleranzangaben zu definieren (enge Toleranzangaben sind bei den punktuell messenden Beschleunigungsaufnehmern, noch engere bei Laservibrometern, erforderlich, umso mehr je höher interessierende Frequenzen (> 1 kHz) liegen,
- (5.3.2.2) so auszuführen, daß sich auch bei Teiletausch eine gute Reproduzierbarkeit von Position und Richtung gegenüber dem Prüfobjekt ergibt und
- (5.3.2.3) sich einfache Möglichkeiten zur Nutzung von Standardkalibratoren ergeben.

Zusätzlich sollten

- (5.3.2.4) Lageabweichungen des Prüfobjektes kompensiert werden und
- (5.3.2.5) bei Beschleunigungsaufnehmern die Sensorikteile spielfrei und mit überwachter konstanter Anpreßkraft mit dem Prüfobjekt kontaktieren.

5.4 Die Unterdrückung von Fremdgeräuschen und -schwingungen

5.4.1 Fremdgeräuschabstand

Neben dem Prüfobjekt selbst erzeugen die Prüfstandsantriebe, Hilfseinrichtungen etc. sowie Quellen außerhalb des Prüfraumes Geräusche und Schwingungen. Die für eine ausreichend genaue Messung der Prüfobjekte erforderliche Fremdgeräuschunterdrückung orientiert sich primär an der Geräuschemission der Prüfobjekte selbst.

- (5.4.1.1) Wird das akustische Prüfmittel nur zur i.O./n.i.O. Entscheidung genutzt (Kap. 3.1), reicht als Bezugswert für das Prüfobjektgeräusch der merkmalsbezogene Grenzwert zur i.O./n.i.O.-Entscheidung aus:

$$L_{\text{Fremd}} < L_{\text{Grenz}} - 10\text{dB}$$

An jedem Sensorpunkt muß für jedes Prüfmerkmal gelten, daß das Prüfobjektgeräusch stets um mindestens 10 dB (bei Pegelmaßen) lauter ist als die Summe der Fremdgeräusche- bzw. Fremdschwingungen.

(5.4.1.2) Muß das akustische Prüfmittel über die i.O./n.i.O.-Entscheidung hinaus höheren Ansprüchen z.B. zur statistischen Qualitätslenkung (Kap. 3.2) genügen, ist eine höhere Fremdgeräuschunterdrückung zu fordern. Als Bezugswert für das Prüfobjektgeräusch gilt das leiseste (-95%) Prüfobjekt der Prüfobjektserie:

$$L_{\text{Fremd}} < L_{-95\%} - 6\text{dB}$$

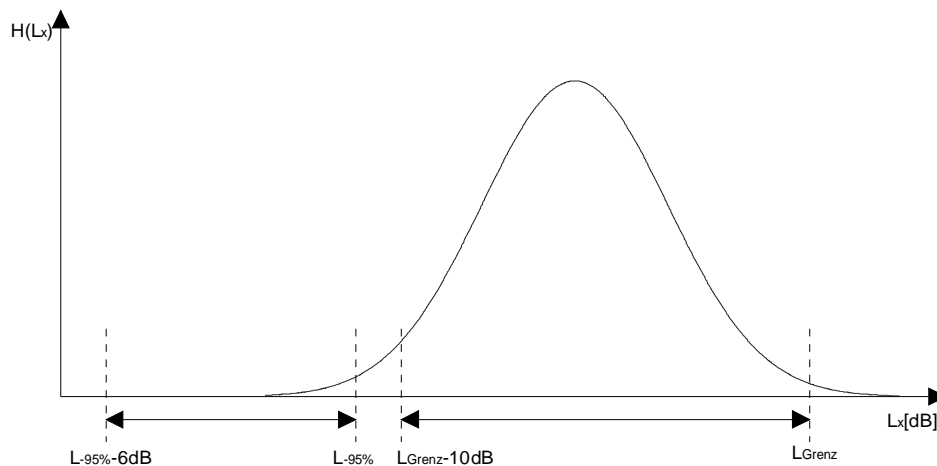


Bild 1: Fremdgeräuschabstände

(5.4.1.3) Bei Verwendung von kombinierten Merkmalen, z.B. zur Nutzung von Mustererkennungsverfahren gilt die Bedingung für jedes genutzte Eingangsmerkmal (soweit Pegelmaße bzw. Effektivwerte).

5.4.2 Anforderungen an den Prüfraum

Soweit keine mit anderen akustischen Prüfmitteln oder Labors vergleichbare Geräuschmeßergebnisse benötigt werden (hierzu gelten die Spezifikationen der DIN 45 635), reicht für den Prüfraum die Forderung nach gleichbleibenden akustischen Randbedingungen (Raumrückwirkung durch Reflexionen) aus. Da vom akustischen Prüfmittel häufig die Dokumentation der akustischen Qualität der Prüfobjekte über mehrere Produktionsmonate bzw. Jahre erwartet wird, muß die Forderung nach gleichbleibenden akustischen Eigenschaften des Prüfraumes über einen entsprechenden Zeitraum gelten, was in der Praxis meist nicht eingehalten wird.

Hier empfiehlt es sich, in der Konzeptphase bereits festzulegen, wie die Einhaltung dieser Forderung im laufenden Betrieb überprüft wird (Vorschläge: Fotos, Messung der Raumakustik).

5.5 Konstruktion eines störgeräuscharmen Prüfstandaufbaus

Je nach Vorstudienresultat und Aufgabenstellung sind folgende Präventivmaßnahmen möglich:

- Zeitliche Trennung von Beobachtungszeitraum und Prüfstands-Handling
- bei Fremdantrieben/Lastankopplung Antriebe/Kopplung verwenden, die das zu messende Prüflingsgeräusch nicht beeinflussen
- Wuchten der rotierenden Teile
- Vermeiden, Verringern des freien Spiels
- Abrollgeräusche bei Lager verringern, z.B. Gleitlager statt Wälzlager einsetzen

- Elektromechanik-, Hydraulik- und Pneumatikteile einsetzen, die das Prüfergebnis nicht verfälschen, z.B. Kontaktierung E-Motor, Hydraulik-Schläuche, bedämpfte Pneumatik-Zylinder
- Resonanzen vermeiden
- Ausrichten der Wellen/Triebstränge.

5.5.1 Körperschalldämmung und -dämpfung

Folgende Forderungen müssen zur Körperschalldämmung und -dämpfung gestellt werden:

- Verkleinerung der anregenden Kräfte
- Erhöhung der Eingangs-Impedanz
- Erhöhung der Übertragungs-Impedanz.

Zur Lösung bieten sich folgende Maßnahmen an:

- Schwingungs-Isolierung (elastische Lagerung des Prüfstands)
 - Tiefe Abstimmung, überkritischer Bereich
 - Hohe Abstimmung, unterkritischer Bereich
- Körperschalldämmende Materialien wie Elastomere, Polymerbeton etc. verwenden.

5.5.2 Luftschalldämmung

Zur Dämmung störenden Luftschalls sind folgende Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit hin zu prüfen:

- Verkleinerung von Abstrahlgrad und -fläche
- Kapselung von Prüfling und/oder Antrieb
- reflexionsarme Auskleidung
- Verwendung von Einfachwänden, ggfs. Doppelwänden
- Einbau von Schall-Nebenwegen.

6 Überprüfbarkeit der Forderungen und Ausblick

Die Berücksichtigung der Anforderungen sollte zu einem Prüfstand führen, der es gestattet, die akustische Qualitätsprüfung

- mit den gewünschten qualitätsrelevanten Merkmalen
- mit der gewünschten Differenzierung
- mit der gewünschten Wiederholpräzision und Langzeitstabilität

durchzuführen.

Eine Überprüfung der Prüfmittelfähigkeit (s. Handlungshilfe Beitrag 2) sichert das Gesamtergebnis der konstruktiven Bemühungen ab.

An der Vervollständigung des Anforderungskataloges sowie an einfachen Testmöglichkeiten zur Überprüfbarkeit der Einhaltung der Anforderungen wird weiter gearbeitet.