

## Maschinenakustik – quo vadis?

Rainer Storm, Jochim BöS

Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, Technische Universität Darmstadt  
Magdalenenstraße 4, 64289 Darmstadt, E-Mail: rainer.storm@vdi.de; boes@szm.tu-darmstadt.de

### Wie begann die „Maschinenakustik“?

Die eigenständige Entwicklung der *Maschinenakustik* setzt gegen Ende der sechziger Jahre ein. Sie hat sich als spezifisches Forschungs- und Lehrgebiet aus der *Technischen Akustik* zu einem Zeitpunkt etabliert, als die ersten Forderungen nach geräuscharmen Produkten proklamiert wurden. Die Erforschung der Anregungsmechanismen und deren Ausbreitungswege, welche die maßgebende Ursache für die Körperschallanregung und für die Schallentstehung bei kräfteerregten Maschinen sind, erforderte besonderen Sachverstand hinsichtlich konstruktiver, kinematischer, werkstoff-, beanspruchungs-, herstellungs-, auslegungs- und funktionsgerechter Kenntnisse, den nur physikalisch und akustisch geschulte Maschinenbauingenieure hatten. Dies erforderte auch eine geänderte Denkweise bei den Konstrukteuren. Neben der Auslegung einer Maschine nach statischen und quasistatischen Beanspruchungskriterien war auch deren dynamisches Verhalten im akustischen Frequenzbereich zu berücksichtigen. Das Dimensionieren in Millimetern wurde durch frequenzabhängige BiegeWellenlängen erweitert.

Mit der Gründung des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Getriebe im Jahr 1965 an der TH Darmstadt durch **Prof. Dr.-Ing. H.W. Müller** lag der Forschungsschwerpunkt auf der Erforschung der Anregungsmechanismen von Motoren, Getrieben und Axialkolbenpumpen und deren Modifizierung, weil diese sehr verbreiteten Maschinen besonders lärmintensiv waren. Seine Idee war, den Schall mittels **Primärmaßnahmen** gar nicht erst entstehen zu lassen. Er grenzte sich dabei von den Sekundärmaßnahmen ab, welche allein dazu dienen, die Ausbreitung von bereits entstandenem Luft- und Körperschall zu reduzieren. H.W. Müller prägte erstmals den Begriff „**Maschinenakustik**“ (Abk. *MA*) als adäquate Bezeichnung dieser neuen Ausrichtung der technischen Akustik.

Mehr als zwei Jahrzehnte lang lag der Fokus der *MA* gemäß „leiser ist besser“ auf der Konstruktion geräuscharmer Maschinen und folgte damit den Vorschriften und Kundenwünschen. Lastenhefte enthielten oft aus Unwissenheit unerfüllbare Luft- und Körperschallpegelangaben – jedoch mit produktiven Auswirkungen auf die Forschung und Entwicklung. Neben den Anregungskräften musste man die akustischen Struktureigenschaften erforschen, um daraus Regeln für „Geräuscharmes Konstruieren“ abzuleiten zu können. Rasant wachsende Rechnerleistungen und leistungsfähige Software beschleunigten einen Prozess, durch den zuverlässige Simulationen und Prognoserechnungen möglich wurden und sich die Produktentwicklungszeiten erheblich verkürzten.

Ein wesentliches Ergebnis dieser zielgerichteten Forschung zur Reduzierung dynamischer Betriebskräfte, zur Verringerung der Körperschallsensitivität und der Körperschalleitung sowie zur Verminderung der Schalleistungsemission ist in der **Maschinenakustischen Grundgleichung** abgebildet. Sie

beschreibt den Zusammenhang zwischen der abgestrahlten Schalleistung  $P$  im umgebenden Medium  $Z_{\text{Medium}}$  und den anregenden Betriebskräften  $F$  in Verbindung mit dem Antwortverhalten der Maschinenstruktur, das durch die Kopplung der Eingangsimpedanzen  $Z_E$  mit dem Körperschalltransferverhalten  $T_v$  auf der Struktur Oberfläche  $S$  und mit dem Abstrahlgrad  $\sigma$  bestimmt wird:

$$P(f) = \tilde{F}^2(f) \cdot \left\{ \left[ Z_E^{-2}(f) \cdot T_v^2(f) \cdot \sigma(f) \right] \cdot S \right\}_{\text{Struktur}} \cdot Z_{\text{Medium}}$$

Die Bedeutung dieser Gleichung liegt darin, dass sie das Grundprinzip jeder Geräuscherzeugung durch dynamische Kräfte anschaulich und nachvollziehbar beschreibt und einen „roten Faden“ für eine systematische Vorgehensweise zur Reduzierung der Schalleistung vorgibt, nämlich die 1.) Verringerung der dynamischen Kraftamplituden ohne Beeinträchtigung der Maschinenfunktion, 2.) Reduzierung der akustischen Übertragungsfunktion der Maschinenstruktur (Ausdruck in der eckigen Klammer) 3.) Verkleinerung der abstrahlenden Oberfläche (sehr begrenzt möglich), 4.) Verwendung eines umgebenden Mediums mit kleinerer Kennimpedanz (gewöhnlich unmöglich).

### Wo steht die „Maschinenakustik“ heute?

Das Studium dieser Einflussgrößen (untersuchen, bewerten, testen und validieren) für eine bestmögliche akustische Geräuschminderung unter Beachtung anderer in Pflichtenheften geforderter Randbedingungen ist die Domäne von **Soundengineering**. Die konstruktive Umsetzung ist in den meisten Konstruktionsabteilungen Stand der Technik. Noch leisere Maschinen zu entwickeln wird jedoch immer schwieriger, weil die Schallreduktion mit immer kleineren Schritten und mit immer größerem Aufwand gegen physikalische Grenzen läuft. Diesen Grenzen ist man in einigen Branchen (Fahrzeug-/Transport- die Haushaltsmaschinenbranche) schon sehr nahe. Eine mit der Geräuschreduzierung verknüpfte nachlassende Maskierung lässt jedoch zunehmend Nebengeräusche hervortreten, die zuvor unauffällig waren. Jetzt bestimmen sie aber vermehrt das Klangbild, das häufig als lästig und unangenehm empfunden wird. Das Ergebnis sind zwar objektiv nachweisbare, geräuscharme Produkte, die aber subjektiv empfunden oft keine produktkonformen Klangfarben und Klangarten aufweisen und damit inakzeptabel werden. Die *MA* befasst sich deshalb zunehmend mit dem Thema **Audio-Branding** und bedient sich dabei der Metriken der **Psychoakustik** mit dem Ziel, eine produktspezifische akustische Identität und Kundenakzeptanz einer Marke zu kreieren. Eine ästhetische Bindung zur gesamt sinnlichen Produkterscheinung und die Vermeidung aufdringlicher Klangwirkungen sind essenziell geworden. Mit derartigen Herausforderungen befasst sich das Forschungsgebiet **Sound Design**. Die Arbeit am perfekten Klang schon in einer frühen Entwicklungsphase vermeidet beschwerliche Justierungen und Kosten, denn das „richtige“ Geräusch kann frühzeitig synthetisiert und mithilfe bestehender Soundquality-Analysesoftware durch Hörversu-

che optimiert werden, sodass es bereits vorliegt, wenn die eigentliche Produktgestaltung beginnt. Sounddesign generiert ferner Werthaltigkeit. Die Klanggestaltung ist aber auch eine besondere Ingenieursaufgabe der MA hinsichtlich der Schallimmission, denn selbst laute aber angenehme Geräusche werden bei gleichem Pegel eher akzeptiert als lästiger Lärm.

**Schallquellenlokalisierung** und **akustische Schwachstellenanalysen** gehören dank entsprechender Messmöglichkeiten (SI- und STI-Verfahren, akustische Kamera, Arraytechniken, PU-Sonden) zu den wichtigsten Aufgaben der MA, denn weiteres Potenzial für Geräuschminderung findet man oft nur noch in der Beseitigung schalldominanter Teilsysteme. Auch das Wissen um das **Körperschallverhalten angeregter Strukturen**, deren **Eigenmoden** und **Betriebschwingformen** sind heute State of the Art.

### Wohin wird die „Maschinenakustik“ gehen?

Die meisten konstruktiven Geräuschminderungsmaßnahmen gehören zu den „passiven“ Techniken, bei denen kein zusätzlicher Energieeintrag in die Maschinenstruktur erfolgt. Ihre Wirkung ist nahezu ausnahmslos breitbandig.

Tabelle 1: systematische Unterteilung der konstruktiven Geräuschminderungsmaßnahmen

Maßnahmen	Primärmaßnahmen (an der Quelle)	Sekundärmaßnahmen
<b>aktiv</b> (mit Energieeintrag)	Active Vibration Control (AVC), Active Structural Acoustic Control (ASAC), struktur- oder werkstoffintegrierte Aktuatoren	Active Noise Control (ANC); adaptive Tilger
<b>passiv</b> (ohne Energieeintrag)	Massen- und Steifigkeitsverteilung, Verstimmung von Resonanzfrequenzen, Anpassung der Anregungskräfte, Strukturdämpfung, Eingangsimpedanzen, Körperschalltransferverhalten, Gehäuseform, neue Konstruktionswerkstoffe, Impedanzschaltungen, usw.	Schalldämpfer, Kapseln, Abkoppellemente und passive Tilger, raum- und bauakustische Maßnahmen, Schallschutzwände/-wälle, Schallschirme, usw.

Neue Aktorentwicklungen auf der Basis piezoelektrischer Effekte ermöglichen zunehmend die Geräuschbeeinflussung technischer Geräusche. Neben den primären und sekundären Passivmaßnahmen erweisen sich die primären und sekundären **Aktivmaßnahmen** (Tabelle 1: ANC, AVC, ASAC) als besonders effizient. „Aktiv“ besagt, dass bei solchen Anwendungen mittels Aktoren in Verbindung mit schnellen Regelalgorithmen Energie in die Maschinenstruktur frequenz- und phasenrichtig eingespeist wird. Somit ist deren Wirkung tonal oder frequenzselektiv. Damit wird es möglich, auf diskrete Komponenten in einem Amplitudenspektrum einzuwirken oder Eigenmodenanregungen zu vermeiden. Das setzt eine genaue Kenntnis der Struktureigenschaften (z.B. Eigenmoden mit FEM-Berechnungen, Modalanalysen, **Sensitivitätsanalysen** mit DoE-Techniken), der **Strukturintensität** und der Anregungsspektren (z.B. mit Anregungssignalanalyse, Campbelldiagrammen, Ordnungsanalysen) voraus. Es lassen sich mit Aktoren aber auch Töne und Klänge erzeugen sowie Klangelemente und Soundscapes gestalten, die für das Sounddesign neue Anwendungsbereiche erschließen. Man kann damit u.a. besondere akustische Ereignisse (Erzeugung von Aufmerksamkeit, akustisches Feedback) neu definieren.

Diese Eigenschaft wird gerade bei neuartigen, künftigen Produkten (z. B. Hybridfahrzeuge, Elektromobilität) unverzichtbar sein. **Aktive Maßnahmen** werden deshalb für die MA **richtungweisend** sein.

Die Instrumente der Psychoakustik lassen sich auch für einen neuen Zweig der MA, nämlich für die **akustische Maschinenzustandsüberwachung**, für die **Schallemissionsanalyse zur Schadensfrüherkennung** sowie für die **akustische Qualitäts- und Prozesskontrolle** nutzen. Dazu wendet sie die für die Sinneswahrnehmung „Hören“ entwickelte Soundquality-Analysesoftware auf die Auswertung gemessener Körperschallsignale an. Es können damit für die Endabnahme von Serienprodukten an End-of-Line-Prüfständen Entscheidungshilfen definiert, für schwierige Überwachungsaufgaben rechtzeitige Wartungsmaßnahmen in die Wege geleitet und Wartungszyklen nach Bedarf durchgeführt werden. Sie werden sich auch auf die **akustische Freigabeverantwortung** neuer Produkte besonders im Premiumsegment auswirken. Die Auswertung akustischer Signale zur Ermittlung von Ausfallursachen liefert auch Informationen für die Qualitätssicherung und für akustisch bessere Folgekonstruktionen. Sie strahlen damit auch auf das Rapid Prototyping, das Product Live Cycle Management und sogar auf das Digitale Mock Up aus.

**Hightechwerkstoffe** und **multifunktionale Werkstoffe** (Faserverbundwerkstoff/Composite, Metallschäume, Spark-Prisma-Sinter-Werkstoff, Formgedächtnislegierungen, elektroaktive Polymere, Kunststoff/Metall-Hybride, usw.) werden die Domänen der MA wesentlich verändern und originelle Gestaltungs- und Konstruktionsfreiheiten mit unverhofften Lösungen für Lärmarmut und Klangdesign bieten. Im Fokus neuer Konstruktionstechniken stehen auch Bauteile mit intelligenten Eigenschaften (extremer Leichtbau mit strukturintegrierten Aktuatoren und/oder mit Aktuatoren aus Formgedächtnislegierungen, gentelligente Bauteile, u.a.m.). Damit werden sich eine Abkehr vom traditionellen Design und ein Paradigmenwechsel in der akustischen Produktentwicklung mit neuen maschinenakustischen Herausforderungen für die Geräuschbeeinflussung sowie Geräuschnutzung entwickeln. Adaptronik und MA werden unausweichlich zusammenwachsen und das Wissen der Systemzuverlässigkeit voraussetzen.

Wegweisende Erkenntnisse für geräuschoptimierte Produkte werden durch Berechnungen der **Strukturintensitäten** unter besonderer Berücksichtigung von aktiven Techniken (z. B. mit adaptiven Tilgern oder mit eingebetteten Aktuatoren) zustande kommen. Damit wird auch Auslegung von **Impedanzschaltungen aus passiven und aktiven Elementen** im inner- und interstrukturellen Kraftfluss für die gezielte Steuerung der Körperschallleitung und Körperschallausbreitung in Maschinenstrukturen zunehmend bedeutsam.

**Akustische Modellgesetze** werden für Produkte in Einzel- oder Kleinserienfertigung unter Nutzung von Hardware-in-the-Loop-Methoden an Bedeutung gewinnen.

Im Spannungsfeld von Entwicklungszeiten, Kostendruck, Emissionsgrenzen und Leistungssteigerungen werden sich **Experten- und Schulungssysteme**, in denen das stets aktualisierte und gesicherte, vielseitige maschinenakustische Knowhow abrufbereit vorliegt, zu einem unverzichtbaren Werkzeug der Produktentwicklung herausbilden.

[www.szm.tu-darmstadt.de](http://www.szm.tu-darmstadt.de) und [www.lbf.fraunhofer.de](http://www.lbf.fraunhofer.de)