

**D. Guicking**

**Aktive Lärm- und Schwingungsminderung  
– Ein Überblick –**

**Göttingen, Dezember 2008**

**Kontakt:**

**Dr. Dieter Guicking**  
**Schlözerweg 6**  
**D-37085 Göttingen**  
**Tel.: +49-551-4 61 06**  
**FAX: +49-551-39 77 20**  
**E-Mail: [Dieter.Guicking@phys.uni-goettingen.de](mailto:Dieter.Guicking@phys.uni-goettingen.de)**  
**Homepage: <http://www.guicking.de/dieter>**

**Akademischer Oberrat a. D.**  
**am Dritten Physikalischen Institut**  
**der Universität Göttingen**  
**Friedrich-Hund-Platz 1**  
**37077 Göttingen**

## VORWORT

Dieser Überblick ist eine erweiterte und aktualisierte Fassung früherer Publikationen zu deutschen (GUICKING 1987, 1989a, 1995, 1998, 2000) und internationalen Konferenzen (GUICKING 1991, 1992), Buchbeiträgen (GUICKING 2002, 2007) und Internet-Veröffentlichungen (<http://www.physik3.gwdg.de/~guicking> mit Links zum deutschen oder englischen Überblick). Es gibt zwar viele gute Bücher über die aktive Schall- und Schwingungsbeeinflussung, die sich aber immer auf bestimmte Aspekte dieses inzwischen sehr weit gefächerten Gebietes beschränken. Deshalb besteht auch ein Interesse an einem knapp gehaltenen Überblick über das Gesamtgebiet. Internet-Recherchen können natürlich mehr Informationen liefern, sind aber meistens sehr zeitraubend und garantieren nicht die Kompetenz von 30 Jahren eigener Erfahrung. Ein Schwerpunkt dieser Schrift liegt neben den Grundlagen und der historischen Entwicklung auf den neuesten Veröffentlichungen (aus den Jahren 2007 und 2008).

Die in dieser Broschüre angegebenen Zitate sind Kurzformen einer Auswahl aus der umfassenden Bibliographie des Autors, deren aktuelle Version 14 420 kommentierte Referenzen enthält und als CD-ROM mit einem komfortablen Such- und Bearbeitungsprogramm geliefert wird.

Ich danke den Direktoren des Dritten Physikalischen Instituts der Universität Göttingen, Prof. Dr. Werner Lauterborn und – seit 2007 – Prof. Dr. Christoph F. Schmidt und Prof. Dr. Jörg Enderlein dafür, dass ich auch nach meiner Pensionierung weiter am Institut arbeiten und seine Ressourcen nutzen kann.

Göttingen, Dezember 2008

Dieter Guicking

---

# INHALT

1.	Einleitung .....	5
2.	Aktive Lärminderung .....	5
2.1.	Frühe Untersuchungen .....	5
2.2.	Der Energie-Einwand .....	5
2.3.	Hüllflächenverfahren (JMC-Theorie) .....	6
2.4.	Eindimensionale Schallausbreitung, Algorithmen .....	7
2.5.	Wechselwirkung zwischen Primär- und Sekundärquellen .....	10
2.6.	Wellenformsynthese für (quasi)periodischen Lärm .....	11
2.7.	Kleine Volumina — persönlicher Schallschutz .....	12
2.8.	Lokale Kompensation .....	12
2.9.	Dreidimensionale Schallfelder in Innenräumen .....	14
2.10.	Freifeld-Anwendungen der Aktiven Lärminderung .....	16
3.	Aktive Schwingungsminderung .....	16
3.1.	Frühe Anwendungen .....	16
3.2.	Aktive Dämpfung von Stab-, Platten- und Strukturschwingungen .....	17
3.3.	Adaptive („intelligente“) Strukturen und Materialien .....	19
3.4.	Aktive Schwingungsisolierung .....	23
3.5.	Bauwerke .....	24
3.6.	Aktive und Adaptive Optik .....	25
3.7.	Lärminderung durch aktive Körperschallbeeinflussung .....	26
3.8.	Aktive Minderung des Schalldurchgangs .....	26
3.9.	Aktive Kontrolle nichtlinearer dynamischer Systeme .....	27
4.	Aktive Strömungsbeeinflussung .....	28
	Schlussbemerkung .....	29
	Literatur .....	31

---

---

# 1. EINLEITUNG

Die Idee zur Auslöschung störender Schwingungsvorgänge durch Überlagerung einer genau gegenphasigen Kompensationsschwingung ist nicht neu. In der Akustik sind die meisten frühen Veröffentlichungen Patentanmeldungen, was zeigt, dass man durchaus den technischen Einsatz im Sinn hatte. Trotzdem kamen die Experimente lange Zeit nicht über Labordemonstrationen hinaus, die vielfach als realitätsferne Kuriositäten belächelt wurden. Erst die moderne Elektronik machte technische Anwendungen möglich.

Anders ist es mit der Kompensation tieffrequenter mechanischer Schwingungen, wo sich schon sehr früh praktische Anwendungen finden. Im Folgenden wird ein Überblick über die historische Entwicklung, bisherige technische Realisierungen und gegenwärtige Forschungsaktivitäten gegeben.

---

## 2. AKTIVE LÄRMMINDERUNG

### 2.1. Frühe Untersuchungen

Die ersten Experimente zur Überlagerung von Schallfeldern dürfte LORD RAYLEIGH (1878) gemacht haben. Unter dem Titel „Points of Silence“ beschreibt er, wie er mit dem Ohr das Interferenzfeld zweier durch elektromagnetische Anregung streng synchronisierter Stimmgabeln abgetastet und dabei Maxima und Minima der Lautstärke gehört hat. Während hier wohl lediglich der Nachweis der aus der Optik schon seit Thomas Young bekannten Interferenzfähigkeit kohärenter Wellenfelder auch für die Akustik beabsichtigt war, zielten Patentanmeldungen von COANDA (1930, 1932) sowie von LUEG (1933) auf eine mögliche Lärminderung, allerdings nur bei Lueg physikalisch vernünftig. Luegs deutsche und vor allem die zugehörige US-Patentanmeldung (LUEG 1934a), der er ein Blatt mit instruktiven Zeichnungen zugefügt hat, gelten daher zu Recht als die ersten schriftlichen Zeugnisse zur aktiven Schallkompensation. Weniger bekannt sind Lueg's Patentanmeldungen in Österreich (LUEG 1934b) und Frankreich (LUEG 1934c).

Lueg hat schon den Einsatz elektroakustischer Komponenten vorgesehen, Laborexperimente sind allerdings erst von OLSON (1953, 1956) dokumentiert, der auch weit vorausschauend potentielle Anwendungen aufgezeigt hat. Technisch realisierbar waren sie damals wegen der unflexiblen und aufwändigen elektronischen Röhrengeräte nicht. Ein Problem liegt in unserem Gehör, nämlich der nahezu logarithmischen Abhängigkeit der Lautstärkeempfindung vom Schalldruck. Beispielsweise erfordert eine Senkung des Lärmpegels um 20 dB, dass die Amplitude des Kompensationsschalls höchstens um 1 dB und die Phase um nicht mehr als 6° vom Sollwert abweichen dürfen – und das für alle Frequenzanteile des Störsignals. Außerdem müssen die Ausbreitungsrichtungen der beiden Schallwellen gleich sein. Diese hohen Genauigkeitsansprüche, verbunden mit der Forderung nach zeitlicher Stabilität, haben den praktischen Einsatz von *Gegen-* oder *Antischallquellen*, wie man die kohärent-aktiven Kompensationssysteme auch nennt, lange Zeit verhindert, bis man in jüngster Zeit in adaptiven Digitalfiltern geeignete Hilfsmittel fand.

### 2.2. Der Energie-Einwand

Im Zusammenhang mit aktiver Schallfeldkompensation wird häufig die Frage nach dem Verbleib der Schallenergie gestellt (z. B. SCHREIBER 1971). Mit dem scheinbar überzeugenden Argument, die primär vorhandene Feldenergie lasse sich durch Zuschalten von Sekundärquellen nur noch vergrößern, keinesfalls aber vernichten, wird das Konzept der aktiven Absorber prinzipiell in Frage gestellt. Der Einwand ist richtig, wenn die Auslöschung nur auf Interferenz beruht; eine lokale Auslöschung wird dann mit einer Verdoppelung des Schalldrucks anderswo erkauft. Genauere Betrachtungen zeigen aber, dass die Sekundärquellen bei geeigneter Anordnung die Energie des Primärfeldes absorbieren können. In anderen Fällen beeinflussen sich die Quellen gegenseitig derart, dass die Strahlungsimpedanz verändert wird und sich damit die Schallerzeugung reduziert. Dies wird im Folgenden näher erläutert.

### 2.3. Hüllflächenverfahren (JMC-Theorie)

M. JESSEL und seine Mitarbeiter G. MANGIANTE und G. CANEVET haben die nach ihren Initialen so genannte *JMC-Theorie* entwickelt. Das von ihnen behandelte Problem (z. B. JESSEL 1972) ist in Abb. 1 skizziert. In einem Volumen  $V$  mit der Oberfläche  $S$  befinden sich Schallquellen  $Q$ . Auf  $S$  sollen Sekundärquellen so verteilt werden, dass sie das von  $Q$  in den Außenraum abgestrahlte Schallfeld kompensieren, aber das Feld in  $V$  nicht verändern. Nach dem Huygensschen Prinzip ist dies möglich: Kontinuierlich auf  $S$  verteilte Ersatzquellen  $q$  können danach im Außenraum das gleiche Schallfeld erzeugen wie die Primärquellen  $Q$ . Wenn man diese Ersatzquellen umpolt, erzeugen sie ein Feld, das gegenphasig zu dem von  $Q$  herrührenden ist. Denkt man sich solche umgepolten (und akustisch transparenten) Ersatzquellen gleichzeitig mit  $Q$  betrieben, so kompensieren sich die Schallfelder im Außenraum.

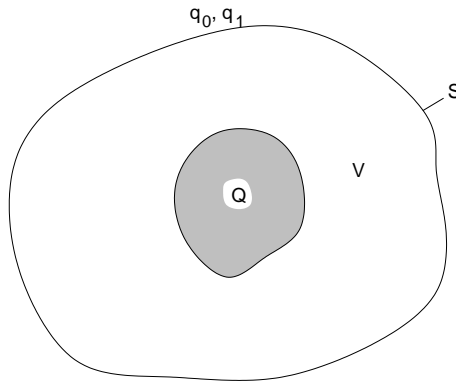


Abbildung 1: Hüllflächenverfahren.

Falls die Kompensationsquellen akustische Monopole sind, strahlen sie nicht nur nach außen, sondern auch nach innen; sie erzeugen stehende Wellen und erhöhen die Schallenergie in  $V$ . Durch Kombination von Monopolen  $q_0$  und Dipolen  $q_1$  kann man aber die Abstrahlung nach innen unterbinden und erreichen, dass sich das Primärfeld in  $V$  nicht ändert. Energetisch betrachtet, absorbieren die *Tripole* aus  $q_0$  und  $q_1$  (Richtstrahler mit Cardioidcharakteristik) den von  $Q$  ausgehenden Schall längs  $S$ ; sie wirken also wie perfekt angepasste Absorber mit einer akustischen Eingangsimpedanz, die gleich dem Feldwellenwiderstand des Ausbreitungsmediums ist.

Mit der gleichen Argumentation folgt, dass man ein quellenfreies Gebiet  $V$  gegen Schalleinstrahlung von außen aktiv abschirmen kann, indem man entsprechende Kompensationsquellen auf seiner Oberfläche  $S$  anbringt. Monopolverteilungen auf  $S$  reflektieren den einfallenden Schall, Tripole absorbieren ihn.

Quantitativ lassen sich die Ersatzquellen  $q_0(\vec{r})$  und  $q_1(\vec{r})$  bei gegebener Hüllfläche  $S$  und Primärquellenverteilung  $Q(\vec{r})$  aus der Helmholtz-Kirchhoffschen Integraldarstellung berechnen, die das Schallfeld in einem Raumgebiet mit dem Schalldruck und dem Druckgradienten auf seiner Oberfläche verknüpft (MANGIANTE 1977, EPAIN/FRIOT 2007).

In praktischen Anwendungen muss man natürlich die theoretisch geforderte kontinuierliche Sekundärquellenverteilung durch diskrete Quellen ersetzen. Ihre minimale Flächendichte ergibt sich aus ihrem Wirkungsquerschnitt  $A = \lambda^2/4\pi$  (NELSON/ELLIOTT 1992) und der kleinsten Schallwellenlänge  $\lambda$ , für die das System noch wirksam sein soll. Dieses Konzept ist in Rechnersimulationen (MANGIANTE/VIAN 1977) und Experimenten im reflexionsfreien Raum (PIRAUX/MAZZANTI 1985) bestätigt worden.

Einige Forscher haben sich auch weiterhin mit der JMC-Theorie beschäftigt (UOSUKAINEN 2003, TAKANE/SONE 2004).

## 2.4. Eindimensionale Schallausbreitung, Algorithmen

Weil die Ausbreitungsrichtungen von Primär- und Kompensationsschall übereinstimmen müssen, ist es verständlich, dass sich ebene, geführte Wellen in Kanälen (unterhalb der Grenzfrequenz für die erste Quermode) leichter kompensieren lassen als z. B. dreidimensionale Schallfelder in Räumen mit allseitiger Ausbreitung. Bei der in Abb. 2 skizzierten (und im Prinzip so schon von LUEG (1934a)

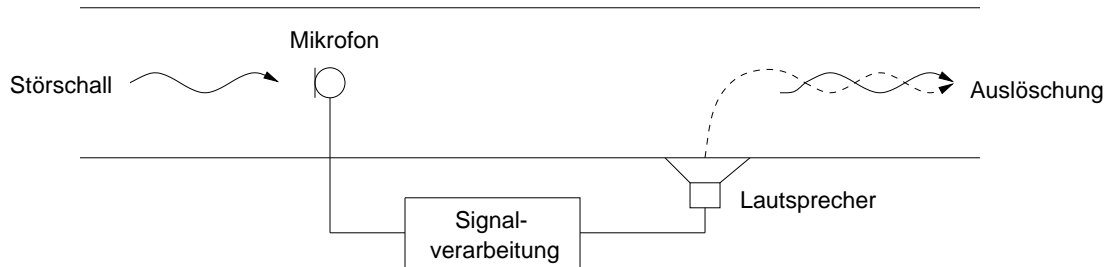


Abbildung 2: Prinzip der aktiven Schallkompensation im Rohr.

vorgeschlagenen) Anordnung nimmt man den von links einfallenden Störschall mit dem Mikrofon auf und steuert nach geeigneter Signalverarbeitung den Lautsprecher so an, dass sich rechts von ihm das primäre und das zusätzliche Signal aufheben.

Nach Luegs Vorstellung sollte die „Signalverarbeitung“ die Amplitudeneinstellung, die Vorzeichenumkehr und die Zeitverzögerung entsprechend der akustischen Laufstrecke umfassen. In dieser Form ist das System allerdings in der Praxis nicht einsetzbar. Zum einen muss man die akustische Rückkopplung zwischen Lautsprecher und Mikrofon unterbinden, und außerdem ist in der Regel die Übertragungsfunktion adaptiv nachzuführen, weil sich die Schalllaufzeit und das Signalspektrum durch Temperaturdrift, überlagerte Strömung und andere Umgebungsbedingungen zeitlich ändern können. Deshalb setzt man heute adaptive Digitalfilter ein, die auf echtzeitfähigen Signalprozessoren implementiert werden. Abb. 3 zeigt das Blockschaltbild einer typischen Anordnung (Verstärker, A/D- und D/A-Wandler sowie Antialiasing-Tiefpässe sind weggelassen).

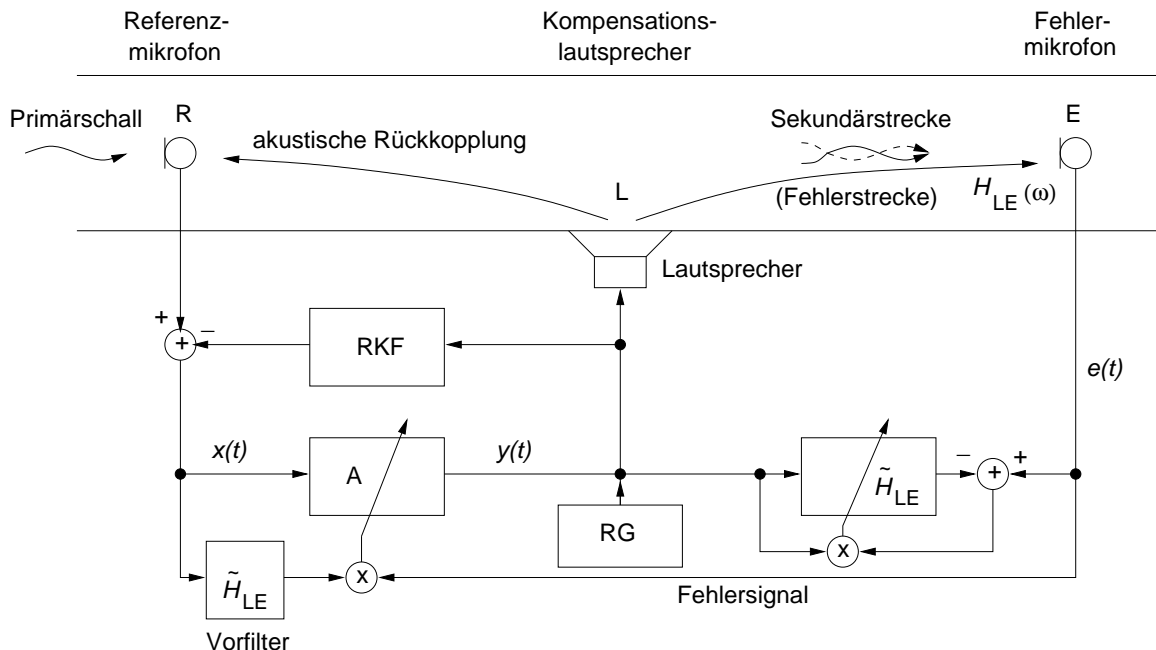


Abbildung 3: Aktive Lärmkompensation im Rohr durch adaptive Steuerung mit Rückkopplungskompensation und Sekundärstreckenadaptation für den „Filtered-X-LMS-Algorithmus“.

Die Übertragungsfunktion der akustischen Rückkopplungsstrecke vom Lautsprecher  $L$  zum Referenzmikrofon  $R$  wird durch das Rückkopplungs-Kompensationsfilter  $RKF$  nachgebildet, sodass das Filteringangssignal  $x(t)$  den von  $L$  herrührenden Anteil nicht mehr enthält. Das Fehlermikrofon  $E$  nimmt bei unvollständiger Kompensation des Primärschalls ein Fehlersignal  $e(t)$  auf, das zur Nachführung des adaptiven Hauptfilters  $A$  dient.  $A$  adaptiert sich so, dass es die akustische Übertragungsfunktion von  $R$  nach  $L$  nachbildet, einschließlich der (komplexen) Frequenzgänge von  $R$  und  $L$  selbst.  $A$  und  $RKF$  werden häufig als Transversalfilter (FIR-Filter, *finite impulse response*) konzipiert, und der gebräuchlichste Adaptionalgorithmus ist der *Filtered-X-LMS-Algorithmus* nach Widrow und Hoff (WIDROW/STEARNS 1985), wobei LMS für *least mean squares* steht. Er wird durch das Produkt  $e(t)x(t)$  gesteuert und verändert nach einem stochastischen Gradientenverfahren die Filterkoeffizienten von  $A$  so, dass  $x(t)$  und  $e(t)$  bestmöglich dekorreliert werden. Bei stochastischem Primärgeräusch sind  $x(t)$  und  $e(t)$  allerdings durch die Laufzeitverzögerung von  $L$  nach  $E$  oft bereits so stark dekorreliert, dass das aktive System nur noch wenig bewirken kann. Um diesen Einfluss der Sekundärstrecke (oder Fehlerstrecke)  $H_{LE}(\omega)$  aufzuheben, wird  $x(t)$  vor der Multiplikation mit  $e(t)$  über die Nachbildung  $\tilde{H}_{LE}$  von  $H_{LE}$  vorgefiltert. Der dazu nötigen „Sekundärstreckenerkennung“ dient der Rauschgenerator  $RG$  als Hilfssignalquelle und die rechts unten in Abb.3 gezeigte Adaptionsschaltung. Mit ihr werden entweder in einer Initialisierungsphase einmalig die Koeffizienten von  $\tilde{H}_{LE}$  (und entsprechend von  $RKF$ ) vorweg ermittelt, in die entsprechenden digitalen Filter kopiert und dann konstant gehalten, oder – bei zu starken zeitlichen Änderungen der akustischen Übertragungsstrecken – ständig unerschwerlich adaptiert. Dann bleibt allerdings das Hilfssignal als (schwaches) Restrauschen am Ausgang des Rohres hörbar, weil es vom Lautsprechersignal  $y(t)$  nicht kompensiert wird. Eine Möglichkeit, ohne Hilfssignal auszukommen, ist von IWAMATSU et al. (2007) und von FUJII et al. (2007) entwickelt worden, die sie *simultaneous equations method* nennen.

Nach der Adaption stellt der Lautsprecher einen schallweichen Reflektor für die von links einfallende Welle dar, sie wird also nicht absorbiert, sondern nach rechts reflektiert. Mit einer anderen Regelungsstrategie könnte man den Lautsprecher auch als „aktiven Absorber“ betreiben, allerdings maximal die Hälfte der einfallenden Schallleistung absorbieren; je ein Viertel der Leistung würden reflektiert bzw. durchgelassen. Der Grund dafür ist, dass mit einem einzigen seitlich angeordneten Lautsprecher keine Impedanzanpassung zu erreichen ist. Der linke Teil des Rohres „sieht“ die Parallelschaltung aus der Eingangsimpedanz des Lautsprechers und dem Wellenwiderstand des nach rechts weitergehenden Rohres. (Einen Lautsprecher am Ende eines Rohres kann man hingegen so ansteuern, dass er die einfallende Schallwelle vollständig absorbiert, GUICKING/KARCHER 1984.)

Wenn bei der Anordnung nach Abb.2 und 3 die resultierende Stehwelligkeit oder die stärkere Schallausbreitung nach links stören, kann man mit Lautsprecherpaaren oder -zeilen auch einen aktiven Absorber realisieren (SWINBANKS 1973, WINKLER/ELLIOTT 1994, GUICKING/FREIENSTEIN 1995).

Eine nach dem Prinzip der schallweichen Reflexion in den USA entwickelte kommerzielle Geräteserie für die aktive Unterdrückung von Lärm vor allem in Abluftkanälen wurde seit 1987 erfolgreich eingesetzt (ERIKSSON 1986). Bei ihnen sind die Filter  $A$  und  $RKF$  zu einem rekursiven Filter (IIR-Filter, *infinite impulse response*) zusammengefasst, das oft mit dem Feintuch-Algorithmus arbeitet (FEINTUCH 1976). Die Geräte benutzen schnelle Signalprozessoren und arbeiten damit im Frequenzbereich z. B. bis 500 Hz, unterdrücken tonale Anteile um bis zu 40 dB und Rauschanteile typischerweise um 15 dB. Ähnliche Anlagen werden inzwischen auch in Deutschland (HEESEN 1996, DEUS 1998, J. HANSEN 1999) und anderswo (C. H. HANSEN et al. 1996) kommerziell eingesetzt. Die untere Frequenzgrenze ist durch die Druckschwankungen aufgrund der turbulenten Strömung gegeben, die obere durch die Rechengeschwindigkeit des Signalprozessors und die Querabmessungen des Lüftungskanals. Wenn letztere in die Größenordnung der Schallwellenlänge kommen, treten höhere Moden auf, die nur mit deutlich höherem Hardwareaufwand zu kompensieren sind (ERIKSSON et al. 1988). Solche Systeme sind deshalb bislang nur vereinzelt installiert worden.

Um auch Nichtlinearitäten mit dem Filtered-X-LMS-Algorithmus zu beherrschen, haben C.-Y. CHANG und LUOH (2007) ein neuronales Netzwerk in den Kompensationszweig integriert.



Der Filtered-X-Algorithmus hat den Vorteil, geringe Rechenleistung zu erfordern (seine numerische Komplexität ist  $O(2N)$ , wenn  $N$  die Filterlänge ist), er konvergiert aber bei Rauschsignalen mit spektral gefärbtem Rauschen sehr langsam. Lüftergeräusche haben meist ein mit steigender Frequenz rasch abfallendes Spektrum, sodass dafür das Konvergenzverhalten oft unzureichend ist. Deshalb sind schnelle, ebenfalls echtzeitfähige Algorithmen entwickelt worden, z. B. der SFAEST-Algorithmus (MOUSTAKIDES 1989), der unabhängig von der Signalstatistik arbeitet und die Komplexität  $O(8N)$  hat. Da er außerdem die Koeffizienten für das optimale Filter in einem einzigen Schritt berechnet, eignet er sich besonders für instationäre Geräusche und Übertragungsstrecken. Stabilitätsprobleme in der Initialisierungsphase konnten inzwischen gelöst werden (FASPIS-Konfiguration, *fast adaptive secondary path integration scheme*, SCHIRMACHER/GUICKING 1994, POPOVICH 1997, JONES et al. 2007). Zu den Algorithmen vgl. auch TOKHI/LEITCH 1992 und KUO/MORGAN 1996. Die sehr schwierige Erweiterung der schnellen Algorithmen und der FASPIS-Konfiguration auf IIR-Filter gelang SCHIRMACHER (1995) in seiner Dissertation. Alternativen stellen adaptive IIR-Laguerre-Filter (YUAN 2007) und eine kürzlich veröffentlichte Modifikation des Filtered-X-LMS-Algorithmus durch Angleichen der Eigenwerte dar (THOMAS et al. 2008).

Anstatt im Zeitbereich kann man den Filtered-X-LMS-Algorithmus auch im Frequenzbereich implementieren. Die dabei nötigen Fouriertransformationen (FFT) erfordern eine Blockverarbeitung, die zu Verzögerungen um mindestens eine Blocklänge führt und folglich Probleme in der Echtzeitkompensation bereitet. X. QIU und HANSEN (2007) stellen Lösungen durch Aufspalten großer Blöcke in mehrere kleine vor, womit die Nachführung der Kompensationssignale schneller wird, ohne den Rechenaufwand zu erhöhen. Eine eingehende Diskussion verschiedener Varianten des Filtered-X-LMS-Algorithmus im Zeit- und Frequenzbereich findet sich bei DAS/PANDA/KUO (2007).

Die moderne Kontrolltheorie bietet fortgeschrittene Algorithmen an wie  $H_\infty$ ,  $H_2$ , Fuzzy Control, Optimalregelung mit LQR (*linear quadratic regulator*) und LQG (*linear quadratic Gaussian*), künstliche neuronale Netze, genetische Algorithmen und andere. Überblicke finden sich z. B. in den Büchern von LEVINE (1995) und MOHEIMANI et al. (2003).

Ein wichtiges Verfahren zur adaptiven Störsignalkompensation ist das *adaptive noise cancelling* (WIDROW et al. 1975). Abb. 4 zeigt das Prinzip. Ein „Primärsensor“ nimmt das Nutzsignal auf, dem

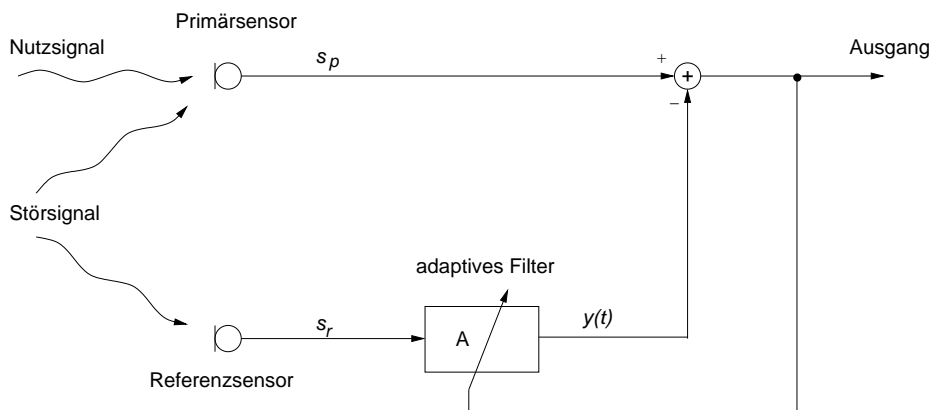


Abbildung 4: *Adaptive Störsignalkompensation, adaptive noise cancelling.*

ein Störsignal additiv überlagert ist, das Summensignal sei  $s_p(t)$ . Ein (oder mehrere) „Referenzsensoren“ sind so platziert, dass ihr Ausgangssignal  $s_r(t)$  mit dem Störsignal (in unbekannter Weise) korreliert ist, aber das Nutzsignal praktisch nicht enthält.  $s_r(t)$  wird adaptiv gefiltert und das so erhaltene Signal  $y(t)$  von  $s_p(t)$  subtrahiert. Das Ausgangssignal hat dann in der Regel ein wesentlich besseres Signal-Rausch-Verhältnis, weil das adaptive Filter das Ausgangssignal und  $s_r(t)$  dekorreliert. Dieses Konzept, realisiert mit einem linearen prädiktiven Filter und dem LMS-Algorithmus wurde 1981 patentiert (MCCOOL et al. 1979) und seitdem vielfach eingesetzt: unter anderem zur Sprachübertragung aus lauter Umgebung (SILVERBERG et al. 1993), in der seismologischen Exploration (WIDROW 1983a), bei der medizinischen EKG-Diagnostik (WIDROW 1983b), für ein Stethoskop

mit Störunterdrückung (HARLEY 1993), zur Verbesserung des Sprachempfangs in Einsatzfahrzeugen durch Kompensation des eigenen Martinshorns (DING et al. 2004), für Hörgeräte (VANDEN BERGHE/WOUTERS 1998) und für viele andere Probleme. In der experimentellen Kosmologie soll das Adaptive Noise Cancelling zum Nachweis der 21 cm-Wasserstofflinie aus dem frühen Universum eingesetzt werden, die durch die kosmische Expansion bis etwa 2 m Wellenlänge verschoben ist. Die Interferenz mit den um Größenordnungen stärkeren Signalen terrestrischer Radiosender soll adaptiv unterdrückt werden (FALCKE 2007).

Bei der adaptiven Steuerung nach Abb. 3 darf der Schalllaufweg vom Mikrofon  $R$  zum Lautsprecher  $L$  nicht zu kurz sein, damit genügend Zeit für die Aufbereitung des Lautsprecher-Speisesignals bleibt (die Kausalität muss gewahrt bleiben). Limitierend ist dabei meist nicht die Verarbeitungszeit im Signalprozessor, sondern die Gruppenlaufzeit in den für die digitale Signalverarbeitung nötigen Antialiasing-Tiefpassfiltern.

Ein technisches Problem bei der industriellen Anwendung aktiver Systeme stellen vielfach die Lautsprecher dar. Für Abluftanlagen müssen sie oft hohe Leistungen bei sehr tiefen Frequenzen erbringen und dabei robust gegen aggressive Gase und hohe Temperaturen sein. Ein glatter Frequenzgang spielt dagegen im Unterschied zu HiFi-Lautsprechern keine große Rolle, weil er durch das adaptive Filter ausgeglichen wird. An der Entwicklung von Lautsprechern für solche Anwendungen wird seit längerem gearbeitet (EATWELL et al. 1995, RAIDA/BSCHORR 1996, DANIELS 1996, CARME et al. 1997).

## 2.5. Wechselwirkung zwischen Primär- und Sekundärquellen

Die zuvor behandelten Anordnungen zum aktiven Lärmschutz zielten darauf ab, die von der Primärquelle erzeugte Schallenergie an geeigneter Stelle zu absorbieren oder wenigstens zu reflektieren; es wurde dabei stillschweigend angenommen, dass die abgestrahlte Leistung durch die Zusatzquellen nicht beeinflusst wird. Wenn es aber möglich ist, die primäre Schallerzeugung durch aktive Maßnahmen zu reduzieren, so ist dies eine besonders wirksame Methode zur Lärminderung.

Ein Monopolstrahler vom Radius  $a$  mit der Oberflächenschnelle  $v$  erzeugt einen Schallfluss  $q_0 = 4\pi a^2 v$ . Die von ihm in ein Medium der Dichte  $\rho$  und der Schallgeschwindigkeit  $c$  bei einer Frequenz  $\omega$  bzw. der Wellenlänge  $\lambda$  (Wellenzahl  $k = 2\pi/\lambda$ ) abgestrahlte Leistung ist  $P_0 = \rho\omega^2 q_0^2 / (4\pi c)$ . Fügt man einen zweiten Monopolstrahler im Abstand  $d \ll \lambda$  hinzu und speist ihn gegenphasig zum ersten, so erhält man einen Dipol, der die Leistung  $P_1 = P_0 (kd)^2 / 3$  abstrahlt. Ergänzt man diesen Dipol durch einen zweiten Dipol noch zum Quadrupol, so ist dessen Leistungsabstrahlung  $P_2 = P_0 (kd)^4 / 15$ , also bei  $kd \ll 1$  nochmals deutlich reduziert (MORSE/INGARD 1968, Chapter 7.1).

Diese Beziehungen gelten unter der Annahme, dass der Schallfluss  $q$  in den drei Fällen gleich ist, was aber nicht notwendigerweise der Fall ist. Denn bei der aktiven Lärminderung durch Zufügen einer dicht benachbarten Kompensationsquelle muss man neben der Erhöhung der Multipolordnung noch die Änderung der Strahlungsimpedanz  $Z_s = R_s + j\omega M_s$  beachten. Auf einen Monopol wirkt das umgebende Medium mit dem Strahlungswiderstand  $R_{s0} = 4\pi a^2 \rho c$  und der Massenbelastung  $M_{s0} = 4\pi a^3 \rho$  (dem Dreifachen der verdrängten Mediummasse), auf einen Dipol mit  $R_{s1} = R_{s0} \cdot (ka)^2 / 6$  und  $M_{s1} = M_{s0} / 6$ , auf einen Quadrupol mit  $R_{s2} = R_{s0} \cdot (ka)^4 / 45$  und  $M_{s2} = M_{s0} / 45$  (MORSE/INGARD 1968). Der Masseanteil führt zu einer Blindleistung, einem Hin- und Herpendeln kinetischer Energie zwischen Primär- und Sekundärquellen („akustischer Kurzschluss“), das Produkt  $v^2 R_s$  bestimmt die abgestrahlte (Wirk-)Leistung. Die Schnelle  $v$ , mit der der primäre Strahler schwingt, hängt von seiner inneren Impedanz und dem Strahlungswiderstand ab. Eine „niederohmige“ Quelle (Schalldruck nahezu belastungsunabhängig) reagiert auf verminderten Strahlungswiderstand  $R_s$  mit größerer Schallschnelle, sodass dadurch die aufgrund der höheren Multipolordnung geringere Schallabstrahlung zum Teil wieder aufgehoben wird. Hingegen führen bei angepassten und „hochohmigen“ (Schnelle-)Quellen die gegenphasigen Zusatzquellen im Nahfeld zum gewünschten Erfolg, nämlich der verminderten Schallabstrahlung.

Dieses Prinzip lässt sich z. B. zur aktiven Reduktion des von der Mündung von Abgasleitungen ausgehenden Lärms ausnutzen, wie etwa von Schiffs- und Industrieschornsteinen oder auch dem Auspuff von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Schon 1980 ist in einem Demonstrationsvor-

haben das tieffrequente Dröhnen eines Gasturbinen-Schornsteins bei  $20 \dots 50$  Hz durch einen Ring von Gegenquellen aktiv kompensiert worden (SWINBANKS 1984). Die Lautsprecher wurden hier von je einem Mikrofonpaar über Verstärker mit fest eingestellter Verstärkung und Phasendrehung betrieben. Bei dem sehr stationären Geräusch und dem schmalen Frequenzband reichte eine solche einfache Steuerung (im Gegensatz zu den sonst nötigen Regelungen) aus.

Ein Auspuff mit seinem pulsierenden Gasaustritt ist ein sehr effektiver „hochohmiger“ Monopol-Schallstrahler; eine gegenphasige Zusatzquelle macht daraus einen Dipol, bei ringförmiger Umschließung einen rotationsymmetrischen Quadrupol. Solche „aktiven Auspuffanlagen“ sind vielfach vorgeschlagen worden (z. B. CHAPLIN 1983), dem praktischen Einsatz bei Autos stehen jedoch noch technische und wirtschaftliche Probleme entgegen: Mikrofone und Lautsprecher unter dem Fahrzeug müssen geschützt werden vor Stößen und Schwingungen, Spritzwasser, hochgeschleuderten Steinchen sowie den heißen und aggressiven Abgasen (LEHRINGER/ZINTEL 1995), und außerdem müssen sie mit den weit entwickelten und vergleichsweise billigen herkömmlichen Schalldämpfern aus geformtem Blech konkurrieren. Ingenieure in der Auspuffindustrie entwickeln aber weiterhin aktive Schalldämpfer, fertigen Prototypen und sind optimistisch, dass ihr praktischer Einsatz durch niedrigeren Gegendruck die Motoreffizienz steigern kann; man sieht auch Perspektiven in der aktiven Klangbeeinflussung (engl. *sound quality design*) (KRÜGER et al. 2005, 2007). Die Autoindustrie ist auch aus Platzgründen an aktiven Auspuffschalldämpfern interessiert. Bei der ERAS GmbH in Göttingen wird zur Zeit ein viel versprechender Ansatz verfolgt, den pulsierenden Abgasstrom durch eine in das Auspuffrohr eintauchende oszillierende Klappe zu glätten. Probleme bereitet hier der (breitbandige) Antrieb und die nötige Kühlung. Labordemonstrationen zeigen, dass damit unter dem Auto viel Platz gespart werden könnte (WIMMEL/SIEBALD 2008). Ein anderer Ansatz wird in Zwickau verfolgt: ein Helmholtzresonator mit verschiebbarem Kolben zur Resonanzfrequenzanpassung an die Drehzahl des Motors, allerdings nur für monofrequente Absorption (FOKEN 2008).

## 2.6. Wellenformsynthese für (quasi)periodischen Lärm

Ein konzeptionell einfacher adaptiver Algorithmus wurde von einer englischen Forschergruppe entwickelt (CHAPLIN 1983). Er setzt (quasi)periodischen Störschall voraus, dessen Quelle zugänglich sein muss, um Synchronisationsimpulse zu bekommen (z. B. Motorenlärm). Abb. 5 erklärt das Prinzip. Neben der Mündung eines Auspuffrohres sieht man einen Lautsprecher, der von einem digitalelektronischen Wellenformgenerator gespeist wird. In einem Abstand ist ein Kontrollmikrofon angebracht, dessen Ausgangssignal dazu dient, das Lautsprecherspeisesignal zu optimieren. Die Synchronisationsimpulse (z. B. über ein mitlaufendes Zahnrad und einen induktiven Aufnehmer gewonnen) sorgen dafür, dass das Kompensationssignal Drehzahländerungen automatisch folgt. Die Wellenform adaptiert sich nach einem „Versuch-und-Irrtum“-Verfahren entweder im Zeitbereich oder, schneller, im Frequenzbereich. Im letzteren Fall werden die Amplituden und Phasen der (niedrigen) Harmonischen des Motorenlärms adaptiert. Die hervorstechende Eigenschaft dieses aktiven Systems ist, dass kein Mikrofon zur Aufnahme des Primärschalls nötig ist, sondern der Signalprozessor die Wellenformsynthese selbsttätig durchführt. Die Lautsprecher brauchen nur die geforderte Schalleistung zu liefern; Resonanzen, Nichtlinearitäten und Alterung werden automatisch ausgeglichen. Nachteilig ist die gegenüber „echten“ adaptiven Algorithmen längere Adaptionszeit.

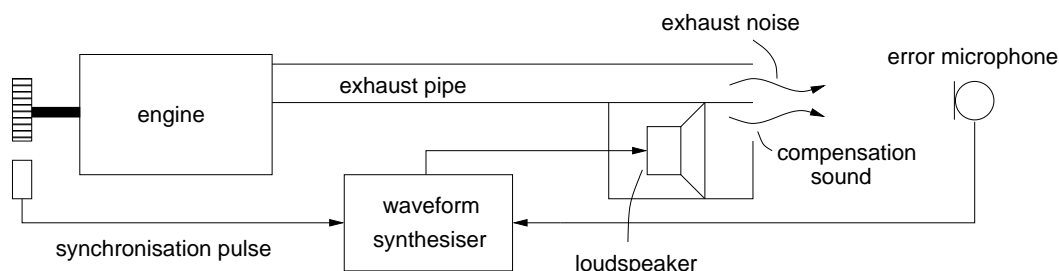


Abbildung 5: Aktive Auslöschung von (quasi)periodischem Lärm (nach CHAPLIN 1983).

Eine technische Anwendung hatte die aktive Lärminderung mit Wellenformsynthese in der Medizin gefunden, und zwar für Patienten in Kernspintomographen. Die Hochstromimpulse zum Aufbau der starken Magnetfelder erzeugen durch Magnetostriktion und „Drahtkräfte“ ein entnerwendendes knatterndes oder sonstwie periodisches Geräusch mit Pegeln bis zu 130 dB(A), das durch Kompensationsschall aus aktiven Kopfhörern (s. Abschnitt 2.7) gemildert wurde (EGHTESADI et al. 1993). Weil in die Tomographen wegen der Magnetfelder keinerlei Eisen gebracht werden darf und auch sonstige Metalle stören, hatte man hierfür pneumatische Kopfhörer mit langen Plastikschläuchen als Signalzuleitungen und eine einfache Steuerung mit fest eingestellten Filtern gewählt, womit allerdings die Kompensation nur unvollkommen und auch nur bei „einfachen“ Impulsmustern gelang, wie sie heute kaum noch angewandt werden. An einer Verbesserung durch ein (metallfreies) optisches Fehlermikrofon zur Ansteuerung eines adaptiven Filters wird gearbeitet (NIEHOFF 1999, BEHLER/LENTZ 2004, TYRRELL 2005, CHAMBERS et al. 2007). Ein alternativer Ansatz ist die aktive Kompensation der Wandschwingungen in der „Röhre“ (J. QIU/TANI 1995, ROOZEN et al. 2005, NESTOROVIC TRAJKOV et al. 2006).

## 2.7. Kleine Volumina — persönlicher Schallschutz

Den akustisch einfachsten Fall für eine aktive Kompensation stellt ein „Raum“ dar, dessen Abmessungen auch bei den höchsten in Frage kommenden Frequenzen klein gegen die Wellenlänge sind. Der Schalldruck ist dann räumlich nahezu konstant, und der Kompensationslautsprecher kann an beliebiger Stelle angebracht werden. Er wirkt bei richtiger Speisung als aktiver Absorber.

Ein solcher kleiner Raum ist das Volumen zwischen Kopfhörer und Trommelfell. Die Idee zu einem „persönlichen Schallschutz“ durch aktive Kopfhörer findet sich schon 1949 in einer russischen Patentschrift (BYCHOVSKIJ 1949), aber die zuverlässige Signalaufbereitung gelang trotz intensiver Arbeiten in vielen Ländern erst viel später. Parallel haben die Firmen BOSE in USA (MCKINLEY 1986) und SENNHEISER in Deutschland (VEIT 1988) aktive Kopfhörer für Flugzeugpiloten entwickelt und auf den Markt gebracht, inzwischen auch andere Hersteller. Es gibt sie als reine Gehörschützer in offener und geschlossener Bauweise (mit analoger Feedforward- bzw. Feedback-Regelung) und auch mit einem Signaleingang für den Funksprechverkehr. Auch die anfänglich noch hohen Preise der aktiven Kopfhörer sind inzwischen so weit gesunken, dass eine breitere Anwendung im Verkehr und an lärmbelasteten Arbeitsplätzen sinnvoll geworden ist. Seit kurzem werden auch digitale Regler in aktiven Kopfhörern und Gehörschützern eingesetzt (RAY et al. 2006).

## 2.8. Lokale Kompensation

Während man mit einer Gegenquelle im Nahfeld einer Lärmquelle einen „globalen“ Effekt erzielt (siehe Abschnitt 2.5), gibt es nur eine lokale Auslöschung durch Interferenz, wenn der Abstand der Quellen voneinander größer wird. Weil der Effekt auf einen sehr engen Bereich von etwa  $\lambda/10$  um den Aufpunkt beschränkt ist (NELSON/ELLIOTT 1992), eignet sich dieses Prinzip im Allgemeinen nicht zur Lärmkompensation. Bei akustischen Laborexperimenten ist aber eine lokale Kompensation mitunter nützlich, beispielsweise bei der kopfbezogenen Stereophonie, um Kunstkopfaufnahmen im reflexionsfreien Raum über Lautsprecher wiederzugeben (SCHROEDER et al. 1974). Damit der z. B. vom linken Lautsprecher abgestrahlte Schall nur das linke Ohr erreicht, wird vom rechten Lautsprecher ein Zusatzsignal ausgesandt, das den vom linken Lautsprecher herrührenden Schall am rechten Ohr kompensiert und umgekehrt, siehe Abb. 6. Im Unterschied zur Quellenlokalisation nur zwischen den beiden Lautsprechern bei herkömmlicher Stereophonie stellt diese Methode eine dreidimensionale Schallfeldreproduktion dar mit Quellenlokalisierung in allen Richtungen, einschließlich „oben“, und sie gibt auch einen verlässlichen Entfernungseindruck der Quelle. Bei dieser Anwendung handelt es sich zwar nicht um aktive Lärmbekämpfung, aber um eine Störschallkompensation mit den gleichen Methoden. In nicht echofreien Räumen reicht eine Übersprechkompensation nach Abb. 6 nicht aus. Eine Wiedergabeanlage mit drei Lautsprecherpaaren ist in Computersimulationen von AKEROYD et al. (2007) ausführlich untersucht worden.

Große Bedeutung hat die lokale Schallfeldkompensation für Freisprechtelefone und Telekonferenzanlagen zur Enthaltung der Raumimpulsantwort erlangt, um nämlich am Mikrofonort Echos

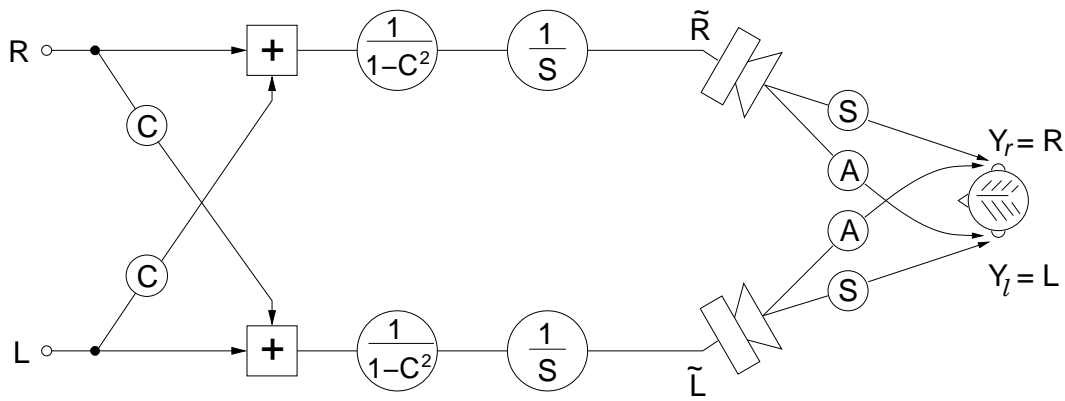


Abbildung 6: Übersprechkompensation durch Vorfilterung bei stereophonischer Schallfeldwiedergabe mit Lautsprechern.  $S = S(\omega)$  und  $A = A(\omega)$  sind die Übertragungsfunktionen von den Lautsprechern zum zugewandten bzw. abgewandten Ohr. Die großen Kreise bedeuten Filter mit den hinein geschriebenen Übertragungsfunktionen.  $C = C(\omega) = -A(\omega)/S(\omega)$ .

von den Raumwänden zu kompensieren, die die Sprachqualität beeinträchtigen und durch akustische Rückkopplung zur Selbsterregung führen können (HÄNSLER 1992, KUO et al. 1995). Echo-kompensation und Sprachqualitätsverbesserung im Auto ist von ORTEGA et al. (2005) beschrieben worden. Bei stereophoner Übertragung ist die Echokompensation aufwändiger als bei einkanaliger Wiedergabe, aber inzwischen möglich, siehe z. B. GÄNSLER/BENESTY (2002) und KHONG/NAYLOR (2006). Auch psychoakustische Aspekte wie Maskierung lassen sich zur Echoauslöschung bei gleichzeitiger subjektiv empfundener Störschallunterdrückung ausnutzen (GUSTAFSSON et al. 2002). Zur Echo-Unterdrückung in rasch veränderlicher Umgebung haben HOSHUYAMA und GOUBRAN (2004) einen speziellen Algorithmus entwickelt. Ein kostengünstiges Gerät mit nur einem Signalprozessor für Stereo-Echo-Unterdrückung beschreiben EMURA et al. (2007).

Ein älteres, entsprechendes Problem ist die Kompensation elektrischer Leitungsechos bei der Weitverkehrstelefonie über Satelliten, bei der der lange Übertragungsweg zu hörbaren Echos führt, die die Sprachübertragung erheblich stören (SONDHI 1970). Die Signale werden an Leitungsstoßstellen reflektiert, vor allem an der „Gabel“ (engl. *hybrid*), wo der Übergang vom Zweidrahtkabel zur Vierdrahtleitung im Telefonapparat einen Impedanzsprung darstellt. Die geostationären Fernmeldesatelliten sind in etwa 36 000 km Höhe positioniert, sodass der Echoweg (Sender → Satellit → Empfänger → Satellit → Sender)  $4 \times 36\,000$  km beträgt, was trotz der Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit zu einer Echolaufzeit von fast 0,5 s führt. Die Satelliten-Fernsprechverbindungen sind deshalb alle mit Echokompensatoren ausgestattet (z. B. HERTER/LÖRCHER 1990).

Anspruchsvollere Signalverarbeitung ist zur „blinden Quellentrennung“ (*blind source separation*) nötig, wo man keine direkten Informationen über die einzelnen Schallquellen bekommen kann, sondern nur Mikrofon-signale mit (additiver) Überlagerung der verschiedenen Quellen. Die Trennung gelingt mit Mikrofonzeilen und Algorithmen wie räumlicher Gradientenschätzung, unabhängiger Komponentenanalyse (*independent component analysis*, ICA), statistischer Quellenunterscheidung, Maximum Likelihood und Kalman-Filtern. Einen umfassenden Überblick über dieses Gebiet bietet das Buch von CICHOCKI und AMARI (2006).

Lokal wirkende Systeme mit kompakten Mikrofon-Lautsprecher-Anordnungen als aktiven Absorbern, die tieffrequenten Schall in einer engen Umgebung des Mikrofons absorbieren, hat OLSON schon 1956 beschrieben und Anwendungen für Flugzeugpassagiere und Maschinenarbeiter vorgeschlagen (siehe auch EATWELL 1991). Wegen des sehr engen Wirkungsbereiches haben sich solche Systeme aber nicht durchsetzen können. Bei neueren Experimenten dieser Art empfanden Versuchspersonen auch die starken Pegelschwankungen bei Kopfbewegungen als sehr störend. Als Okklusionseffekt ist die unnatürliche Wahrnehmung der eigenen Stimme (z. B. durch Knochenleitung) beim Tragen von Gehörschützern bekannt. Eine aktive Verbesserung der Situation haben MEIJA et al. (2008) beschrieben.

Eine Arbeitsgruppe in Hamburg befasst sich mit der lokalen aktiven Lärmkompensation im Frachtraum von großen Transportflugzeugen mit Propellerantrieb, und zwar an der Kopfposition des Lademeisters, der während des Fluges in einer nach vorn offenen Kabine sitzt (er muss die Ladung beobachten) und ohne Schutzmaßnahmen einem unzumutbaren Lärm ausgesetzt wäre. Mit mehreren Lautsprechern an den Kabinenwänden und Fehlermikrofonen in den Kopfstützen gelingt es, den Lärm auf ein erträgliches Maß zu senken (GERNER/SACHAU/BREITBACH 2005).

Die Kompensation akustischer Echos ist auch für die Ultraschallprüfung vorgeschlagen worden, bei der Fehlstellenechos oft von starken Oberflächenechos verdeckt werden. Man kann die letzteren vom Empfangssignal subtrahieren und dadurch den Nachweis von Fehlstellen verbessern (HUTCHENS/MORRIS 1989, GILBERT 1988). Mit derselben Technik lässt sich auch die Reflexion des Ultraschallimpulses am Empfänger auslöschen (HASSLER 1991).

## 2.9. Dreidimensionale Schallfelder in Innenräumen

Komplexe Schallfelder in großen Räumen – womöglich mit instationären Quellen und zeitlich variablen Randbedingungen – global zu kompensieren, erscheint nach dem gegenwärtigen Stand der Technik utopisch. Realistischer ist das Konzept, einem Raum die Halligkeit zu nehmen, indem man Lautsprecher als aktive Absorber an den Wänden anbringt. Der auf die Wand treffende Schall wird von Mikrofonen aufgenommen, die über eine geeignete Signalaufbereitung die Lautsprecher so ansteuern, dass sie sich wie angepasste Absorber verhalten, also der Schallwelle eine Impedanz gleich dem Wellenwiderstand der Luft bieten. Die Situation ist damit die gleiche wie in Abb. 1, wenn man die Wände des Raumes als die Hüllfläche ansieht. Man kann die Lautsprecher nicht nur als aktive Absorber betreiben, sondern auch in einem breiten Frequenzband fast beliebige akustische Impedanzen bzw. Reflexionsfaktoren (in Experimenten  $0,1 \leq |r| \leq 3$ ) einstellen. Dies würde es ermöglichen, einen Raum mit elektronisch in weiten Grenzen einstellbarer Nachhallzeit zu realisieren (WENZEL 1992), allerdings mit einem auch gegenwärtig noch zu hohen Hardwareaufwand. Neuere Experimente in Japan haben gezeigt, dass eine variable Akustik von Aufnahmestudios etc. auch durch absorbierende Wände und dahinter angebrachte Lautsprecher zu erreichen ist; die Mikrofone für die adaptive Ansteuerung sind vor der Wand platziert (NAGATOMO et al. 2007).

Das Konzept der aktiven Impedanzregelung in akustischen und Schwingungssystemen wurde von unserer Göttinger Arbeitsgruppe seit 1983 propagiert (GUICKING et al. 1983, GUICKING et al. 1989b) und hat weitere Aktivitäten stimuliert (z. B. ISE 1994, LACOUR et al. 2000, MELCHER 2001, GALLAND et al. 2005, COBO/CUESTA 2007, REMINGTON et al. 2008). Mitunter ist es günstiger, mit der Rezeptanz (dem komplexen Verhältnis von Kraft und Auslenkung statt Schnelle) zu arbeiten (RAM/MOTTERSHEAD 2007).

Tieffrequente Raumresonanzen lassen sich durch Lautsprecher dämpfen, deren Klemmen mit einem geeigneten passiven Netzwerk verbunden sind, sodass sie als Resonanzabsorber wirken; mit einem zusätzlichen Mikrofon kann man das Netzwerk adaptiv nachführen (FLEMING et al. 2007).

Ein intensiv untersuchtes Gebiet ist das der aktiven Lärmkompensation in kleinen Innenräumen wie Auto-, Flugzeug- und Hubschrauberkabinen. Vierzylinder-Verbrennungsmotoren haben eine inhärente Unwucht bei der doppelten Drehfrequenz (der „zweiten Motorordnung“), die über die Motorlager, Körperschallausbreitung im Chassis und Schallabstrahlung in den Innenraum z. B. in PKWs Hohlräumeigenschaften mit großen Amplituden anregen kann. Dieses mit der Motordrehzahl synchronisierte oft sehr lästige *Dröhnen* (engl. *boom*) lässt sich durch eine *Ausgleichswelle* reduzieren, eine zusätzliche, gegensinnig rotierende Kurbelwelle, die zwar eine beträchtliche Zusatzmasse darstellt, aber recht effektiv arbeitet. Mit relativ geringem Aufwand ist das Dröhnen aber auch aktiv zu kompensieren (ELLIOTT/NELSON 1988). Kommerziell angeboten wurde die aktive Kompensation allerdings bislang nur zeitweise von NISSAN für das Modell *Bluebird* auf dem japanischen Markt. Fast alle anderen Autohersteller führen ebenfalls Untersuchungen hierzu durch und haben zum Teil auch schon Prototypen gebaut, warten aber offenbar mit dem praktischen Einsatz (z. B. im Rahmen eines „Komfort-Pakets“ gegen Aufpreis) noch ab; ein mitunter zu hörendes Argument ist, dass die Kunden sich beklagen würden, wenn sie trotz des Mehrpreises immer noch (andere) störende Geräusche hören.

Aufwändiger ist die Kompensation breitbandiger Fahrgeräusche im Fahrzeuginneren, z. B. der Rollgeräusche. Hier sind bereits in Laborexperimenten Lösungsansätze erarbeitet worden, wobei die Instationarität der Geräusche und der Übertragungsfunktionen den Einsatz schneller Algorithmen für die Sekundärstreckenerkennung erfordert (BÖHM 1992, BRONZEL 1993, SCHIRMACHER/GUICKING 1994, SCHIRMACHER 1995). Mit der Tendenz zu immer sparsameren, leichteren Autos, z. B. mit 3-Zylinder-Motoren, werden die Lärm- und Schwingungsprobleme immer drängender. Man arbeitet in der Autoindustrie deshalb an Kombinationssystemen zur gleichzeitigen Reduzierung des Lärm- und Schwingungspegels im Fahrzeuginneren, wobei man die aktive Schwingungskompensation sowohl für den Motor („aktive Motorlager“) als auch für die Karosserie gegenüber dem Fahrgestell vorsieht (siehe auch Abschnitt 3.4). Für Autos der gehobenen Klasse geht der Trend in der Fahrzeugindustrie dahin, die aktive Lärm- und Schwingungsminderung mit „Klangbeeinflussung“ (*sound quality design*) im Innenraum zu kombinieren, sodass der Fahrer z. B. zwischen einem leisen Auto und einem „sportlichen Sound“ wählen kann (FREYMAN 1996, SCHEUREN et al. 1999, A. GONZÁLEZ et al. 2003, REES/ELLIOTT 2006). RUSTIGHI und ELLIOTT (2007) haben ein linearisiertes Modell der Rad–Straßen–Wechselwirkung entwickelt und schlagen zur Schwingungsminderung vor, radiale Kräfte auf den Reifen besonders an der Aufstandsfläche auszuüben.

Adaptive Systeme zur lokalen Kompensation breitbandiger Geräusche in Innenräumen sind am wirksamsten am Ort des Fehlermikrofons. Weil man dies aber nicht direkt am Ohr eines Fahrers oder Passagiers anbringen kann, hat man „virtuelle Mikrofone“ entwickelt (SCHAAF et al. 1992), Zweimikrofonanordnungen, bei denen man den effektiven Mikrofonort durch gewichtetes Summieren der Einzelsignale auf der Verbindungslinie verschieben kann. C. D. PETERSEN et al. (2007) erweitern das Verfahren auf die Nachführung des virtuellen Mikrofons bei bewegtem Zielort, z. B. bei Kopfbewegungen. Über den Einsatz virtueller Mikrofone in diffusen monofrequenten Schallfeldern berichten MOREAU et al. (2007) und über die Nachführung im Schallfeld mit hoher Modendichte MOREAU et al. (2008).

Die Flugzeugindustrie setzt aus wirtschaftlichen Gründen auf kürzeren Strecken wieder vermehrt Propellermaschinen ein, die aber in der Kabine viel lauter sind als Düsenflugzeuge. Mit relativ geringem Aufwand lässt sich der Lärmpegel durch eine als „Synchrophasing“ bezeichnete Betriebsart senken. Die von den Propellerspitzen ausgehenden Wirbelfäden schlagen gegen den Rumpf und regen Biegeschwingungen an, die Luftschall nach innen abstrahlen. Synchronisiert man den rechten und den linken Propeller so, dass ihre „Schläge“ nicht gleichzeitig auftreffen, sondern „auf Lücke“, so werden Zylinderschwingungen höherer Ordnung angeregt und die Schalldruckpegel gesenkt (FULLER 1986). Neben der Lärmreduktion ist auch die Schwingungsminderung wichtig, um z. B. in Frachtmaschinen empfindliches Transportgut gegen Erschütterungen zu schützen. Es hat sich gezeigt, dass statt fest eingestellter Phasenbeziehungen der Propeller eine Optimierung je nach Flugbedingungen von Vorteil ist (BLUNT/REBECCHI 2007). Pegelreduzierungen um 5 bis 10 dB sind für das Synchrophasing typisch. Bessere Ergebnisse, allerdings auch mit größerem Aufwand, erzielt man mit Lautsprecher- und Mikrofonarrays und adaptiven Mehrkanal-Regelsystemen. In einem unter dem Akronym ASANCA durchgeführten internationalen Projekt ist ein inzwischen auch serienmäßig eingesetztes System entwickelt worden (JOHANSSON et al. 1997).

Nicht unwichtig bei Anwendungen in dreidimensionalen Schallfeldern ist die Positionierung der Mikrofone und Lautsprecher. Neben der Kausalität ist auch auf *Beobachtbarkeit* und *Steuerbarkeit* zu achten, vor allem bei ausgeprägten stehenden Wellen im Raum. Wenn das Fehlermikrofon für eine bestimmte Frequenz in einem Knoten des Schallfeldes steht, nimmt es die entsprechende Frequenzkomponente bzw. Schwingungsmode nicht auf, sodass hierfür auch keine Adaption erfolgen kann. Steht der Lautsprecher in einem Knoten, kann ein vom Signalprozessor errechnetes Kompensationssignal nicht abgestrahlt werden, was durch die resultierende Aufschaukelung meist zu einem Fehlerabbruch durch Übersteuerung führt.

Ein besonders intensiv bearbeitetes Gebiet ist die elektroakustische Schallfeldwiedergabe, besonders in Räumen. Die dafür eingesetzten Verfahren von der Zweikanal-Stereophonie bis zu Vielkanalsystemen sind technisch mit denen der aktiven Schallfeldkompensation verwandt. Eine neuere Entwicklung stellt die Wellenfeldsynthese dar (GAUTHIER/BERRY 2008).

## 2.10. Freifeld-Anwendungen der Aktiven Lärminderung

Technische Anwendungen der aktiven Lärminderung für Freifeldprobleme gibt es nur wenige, es wurden aber schon viele Forschungsprojekte durchgeführt, und es gibt etliche Patente. Hierzu gehören z. B. die aktiven Auspuffanlagen, die in Abschnitt 2.5 behandelt sind. Ein technisch ähnliches Problem stellt das Überflug-Geräusch von Propellerflugzeugen dar, das im Wesentlichen aus zwei Komponenten besteht, den sich von den Propeller-Blattspitzen ablösenden Wirbelfäden und dem ebenfalls impulsförmigen Auspufflärm. KALLERGIS (1992) hat beschrieben, wie man durch destruktive Interferenz dieser beiden Lärmquellen eine Pegelsenkung um einige dB erreichen kann: die Auspuffmündung muss man in die Nähe der Propellerebene verlegen und die Winkellage des Propellers auf seiner Achse so einstellen, dass in Bodenrichtung die Schalldruckmaxima der einen Quelle mit den Minima der anderen koinzidieren.

Ein Vorschlag zur Reduzierung des Straßenverkehrslärms findet sich in einem Patent von VEIT (1997), wonach sich eine elektromagnetische Anregung der Stahleinlagen der Autoreifen zur Kompensation der Schallabstrahlung von den Reifenflanken ausnutzen ließe.

Schon oft vorgeschlagen wurde es, das lästige Brummen von im Freien stehenden Transformatoren aktiv zu kompensieren, das wegen der strengen Periodizität (Vielfache der Netzfrequenz von 50 Hz, in den USA 60 Hz) eigentlich besonders einfach sein sollte. Man dachte an eine „Lautsprecherhülle“ nach Art der JMC-Theorie (Abschnitt 2.3) (CONOVER/GRAY 1957, H.-J. LEE et al. 1997), Krafteinspeisung in das zur Kühlung dienende Öl, das den Transformator umgibt (CHAPLIN et al. 1979), oder in die Hüllbleche (HORI et al. 1980), oder an schalldämmende aktive Wände um den Transformator (GOSSMAN/EATWELL 1992, HILDEBRAND/HU 1993). Experimentelle Ergebnisse wurden von ANGEVINE (1992, 1995) diskutiert. Probleme bereitet allerdings die wetterabhängige Schallausbreitung mit Temperaturgradienten und gekrümmten Schallstrahlen (AI et al. 2000), außerdem hängt das Geräuschspektrum von der elektrischen Last des Transformators ab (X. QIU et al. 2002). Es wurde übrigens berichtet, dass Kühe, die in der Umgebung lauter Transformatoren grasen, weniger Milch gaben (SCHROEDER 2007).

Man hat auch versucht, die Wirkung von Schallschutzwänden an Straßen aktiv zu verbessern, insbesondere den tieffrequenten Lärm zu kompensieren, der durch Beugung an der Oberkante in die „Schattenzone“ gelangt. Dazu bringt man Lautsprecher an der Oberkante der Wand an und betreibt sie mit adaptiver Regelung oder Steuerung so, dass die Fehlersignale an Mikrofonen in der Schattenzone minimiert werden (ISE et al. 1991, KOH/MÖSER 2004). Die Wirksamkeit lässt sich durch zusätzliche Lautsprecherzeilen auf den Wandflächen (NAKASHIMA/ISE 2004) und durch Mehrfach-Referenzmikrofone sowie virtuelle Fehlermikrofone erhöhen (BERKHOF 2005). HAN und QIU (2007) haben gezeigt, dass die Adaption auf minimale Schallintensität bessere Ergebnisse liefert als die Minimierung des quadrierten Schalldrucks.

---

## 3. AKTIVE SCHWINGUNGSMINDERUNG

### 3.1. Frühe Anwendungen

Im Unterschied zum aktiven Lärmschutz gab es zur aktiven Schwingungsminderung schon sehr früh technische Anwendungen, vor allem in der Schiffstechnik. MALLOCK (1905) berichtet über die Schwingungsreduktion bei einem Dampfschiff durch gegenphasige Synchronisation der zwei Antriebsmaschinen, HORT (1934) über die Reduktion von Rollbewegungen durch einen aktiv unterstützten Frahmischen Schlingertank, und ALLAN (1945) über Rollstabilisierung durch Auftriebssteuerung über seitlich aus dem Rumpf ins Wasser ragende Hilfsrudder mit regelbarem Anstellwinkel. Dieses letztere Verfahren wird auch heute noch eingesetzt.

Die aktive Schwingungsdämpfung der Außenhaut von Flugzeugen durch eine Vielkanalregelung mit Wegsensoren und elektromagnetischen Aktuatoren (moderner: *Aktoren*) wurde schon früh erwogen (VANG 1942), vor allem mit dem Ziel, Ermüdungsbrüchen vorzubeugen.

Ebenfalls seit langem gibt es Pläne zur aktiven Dämpfung von Schwingungen auf Stäben, Platten und komplizierteren Strukturen. In mechanischen Wellenfiltern, wo der erwünschten Longitudinalwelle in einem Stab eine interferierende Biegewelle überlagert ist, sollte die letztere nach MASON



(1945) durch piezoelektrische Beläge auf den beiden Stabseiten gedämpft werden, die über einen elektrischen Widerstand verbunden sind (engl. *shunt damping*).

Für rotierende Aggregate im Hochvakuum, wo Schmiermitteldämpfe vermieden werden müssen, setzt man anstelle von Gleit-, Kugel- oder Walzenlagern bevorzugt die berührungslosen Magnetlager ein, deren inhärente Instabilität allerdings eine Rückkopplungsregelung erfordert, mit der sich zugleich die Regelschwingungen unterdrücken lassen (ANON. 1957).

In einem frühen Patent der NASA wird auch ein aktiver Resonanzabsorber zur Unterdrückung von Strukturschwingungen beschrieben (LEATHERWOOD et al. 1969).

Seit den 1980er Jahren hat man die durch den ungleichförmigen Vortrieb angeregten Längsschwingungen von Schiffsaufbauten nach dem Prinzip des dynamischen Absorbers mit Hilfe eines angekoppelten Zentrifugalpendels kompensiert, einem in Schiffs-Längsrichtung schwingenden Pendel, dessen Aufhängepunkt um eine ebenfalls in Längsrichtung weisende Achse rotiert. Über die Drehgeschwindigkeit wird die Zentrifugalkraft und damit die Pendel-Eigenfrequenz der jeweiligen Schwingungsfrequenz des Schiffes angepasst und die Phasenlage so eingestellt, dass das Pendel der Schiffsschwingung Energie entzieht (MANO 1985).

### 3.2. Aktive Dämpfung von Stab-, Platten- und Strukturschwingungen

Wesentliche Impulse bekam die Erforschung aktiver Schwingungsregelungen durch die Luft- und Raumfahrt. Im Unterschied zu den im vorigen Abschnitt angenommenen „Starrkörperschwingungen“ von Schiffen, die wegen der sehr tiefen Frequenzen relativ leicht zu regeln sind, handelt es sich hier in der Regel um elastische Strukturen, also Kontinua mit unendlich vielen Freiheitsgraden, bei deren Regelung besondere Probleme auftreten. Zum einen gibt es in Festkörpern verschiedene Wellentypen (vor allem Longitudinal-, Torsions- und BiegeWellen), deren Beeinflussung unterschiedliche Aktoren und Sensoren erfordert; außerdem ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit meist wesentlich höher als in Luft, sodass man bei breitbandigen adaptiven Steuerungen Kausalitätsprobleme bekommt. Meist begnügt man sich deshalb mit modalen Regelungen, wobei man (besonders bei sich überlappenden Moden) das Problem des „Spillover“ beachten muss, die unerwünschte Anregung anderer Moden. In Abb. 7 sei angenommen, dass die  $N$ -te Mode mit der Resonanzfrequenz  $f_N$  durch ein Kompensationssignal mit  $f_N$  und entsprechender Amplitude und Phase gedämpft werden soll. Die Ausläufer der Nachbarmoden haben aber bei  $f_N$  nicht vernachlässigbare Amplituden (Punkte auf der gestrichelten Linie) und werden durch das Kompensationssignal auch angeregt, und zwar wegen des Phasengangs in der Umgebung einer Resonanz in der Regel nicht gegenphasig, sodass sie gegenüber dem Anfangszustand verstärkt werden.

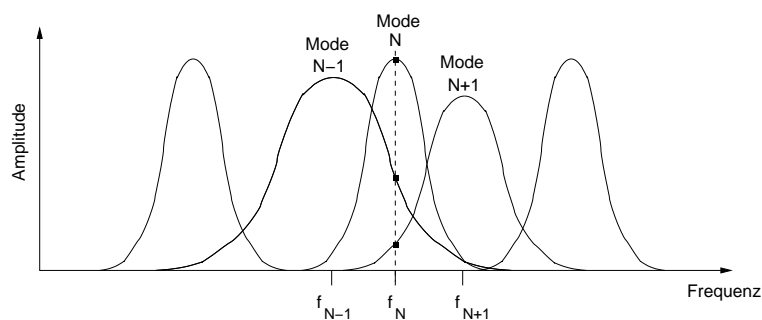


Abbildung 7: „Spillover“: die aktive Kompensation der  $N$ -ten Schwingungsmode bei der Resonanzfrequenz  $f_N$  regt Nachbarmoden (hier:  $N - 1$  und  $N + 1$ ) mit nicht vernachlässigbaren Amplituden an.

Die Ausbreitung von BiegeWellen auf mehrfach unterstützten Balken, z. B. manchen Typen von Brücken, ist auf gewisse Frequenzbänder beschränkt, während in anderen Frequenzbereichen keine Ausbreitung möglich ist. Wie man solche Strukturen aktiv mit piezoelektrischen Sensor- und Aktorschichten bedämpfen kann, behandeln RAO und NARAYANAN (2007).

In schnell laufenden Druckmaschinen neigt die Papierbahn zu störenden Schwingungen senkrecht zur Papierebene zwischen den Führungswalzen. GRECO et al. (2007) beschreiben eine aktive

Kompensation dieser Schwingungen durch Lautsprecher unterhalb der Papierbahn.

Gängige klassische Schwingungsabsorber sind die dynamischen Absorber (auch Tilger genannt), an die zu beruhigende Struktur gekoppelte mechanische Resonanzsysteme aus Masse, Feder und Dämpfer (SNOWDON 1968). Ihre Effizienz kann man durch aktive Modifikationen verbessern, z. B. durch veränderliche Federungen, um die Tilgerresonanz einer sich ändernden Strukturresonanzfrequenz folgen zu lassen (RUSCHEWEYH et al. 1988). GONZÁLEZ DÍAZ et al. (2008a und b) haben kleine Tilger entwickelt, um mehrkanalig Schwingungen dünner Platten zu dämpfen und die Schallabstrahlung zu reduzieren; sie setzen dazu dezentrale Regler mit Schnellerückkopplung ein. Neuere Untersuchungen haben ergeben, dass maximaler Energieentzug durch Umschalten der Federsteife (jeweils in den Nulldurchgängen) zwischen zwei Werten möglich ist (HOLDHUSEN/CUNEFARE 2008). Eine Weiterentwicklung der aktiven Tilger beschreiben SUN et al. (2007): zusätzlich zur adaptiv veränderlichen Federsteife sehen sie eine Resonanzanregung der Tilgermasse vor, um den Dämpfereinfluss zu kompensieren, der die Wirkung des Tilgers reduziert.

Für Satelliten ist es wichtig, die z. B. durch Ausrichtmanöver angeregten Eigenschwingungen aktiv zu dämpfen, weil Luftreibung wegfällt und die Material-Eigendämpfung häufig zu schwach ist. Die Optimierung von Zahl und Positionen der Sensoren und Aktoren für die meist eingesetzten adaptiven Rückkopplungsregelungen setzt genaue Kenntnis der Strukturmechanik voraus, sodass eine zuverlässige Modellierung im Zustandsraum und eine verlässliche Abschätzung der Diskretisierungsfehler nötig ist. Eine Einführung in dieses Gebiet gibt MEIROVITCH (1990). Auf die Bedeutung der richtigen Positionierung von Sensoren und Aktoren in Schallfeldern wurde schon gegen Ende des Abschnitts 2.9 hingewiesen; dies gilt natürlich auch für die aktive Schwingungsminde rung. Für Stabschwingungen haben RAMESH KUMAR und NARAYANAN (2008) die optimale Platzierung von piezoelektrischen Sensor-/Aktorpaaren theoretisch behandelt (Optimierung durch genetische Algorithmen). Wie zu erwarten sind Bereiche hoher modaler Dehnung besonders günstig. Beim Vergleich verschiedener Regelstrategien schneiden Schnelle-proportionale Rückkopplung und LQR-Optimalregler am besten ab.

Biegeschwingungen von Festplatten in Computern sind wegen der winzigen Abstände zum Lese- oder Schreibkopf problematisch. Man setzt deshalb zu ihrer Unterdrückung schon seit längerem aktive oder semiaktive Regler ein, sowohl für magnetische (OHTA et al. 1985, SWEI et al. 2001, ATSUMI et al. 2006, S. C. LIM/CHOI 2007a und 2007b, YAMADA et al. 2008) als auch für optische Speichermedien (S. LIM/JUNG 1999, CHAO et al. 2002, HSIAO et al. 2006).

Die Dämpfung und Steifigkeit mechanischer Gelenkverbindungen ist auch durch Regelung der trockenen Reibung zwischen den z. B. durch einen Bolzen verschraubten Schenkeln möglich, indem man den Anpressdruck mit einer piezoelektrischen „Unterlegscheibe“ durch Steuerung oder Regelung beeinflusst, typischerweise mit einem nichtlinearen Algorithmus, etwa einem neuronalen Netzwerk (GAUL 1997) oder mit Zweipunktregelung (BUAKA et al. 2005).

Für Flugzeuge sind aktive Regelungen zur Manöver- und Böenlastabminderung (TANG et al. 2004, TUZCU/MEIROVITCH 2006) und zur Flatterunterdrückung der Tragflächen entwickelt worden (FREYMAN 1986), für Hubschrauber zur Schwingungs- und Lärmreduktion (HELLER et al. 1993), insbesondere durch Einzelblattregelung (*individual blade control*, IBC) (Y. CHEN et al. 2005) und höherharmonische Regelung (*higher harmonic control*, HHC) (CLARK/GIBBS 1994), insbesondere mit Klappen an den Rotorblatt-Hinterkanten (VISWAMURTHY/GANGULI 2008). Zur Optimierung piezoelektrischer Aktoren für die Klappen setzen RADER et al. (2007) genetische Algorithmen und Finite-Elemente-Modelle (FEM) ein.

Eine populäre Anwendung findet die aktive Schwingungskompensation in Digitalkameras als *Bildstabilisator*. Die Bildunschärfe durch „Verwackeln“ während der Aufnahme wird dadurch kompensiert, dass der CCD-Chip z. B. mit Piezo-Aktoren nachgeführt wird; das Ansteuerungssignal liefert ein Bewegungssensor (z. B. CHIOU et al. 2007).

Recht neu ist die Idee, elektrische Energie aus der Dämpfung von Strukturschwingungen mit elektrodynamischen Aktoren zu gewinnen, engl. *energy harvesting* oder *energy scavenging* (LESIEUTRE et al. 2004, JIANG et al. 2005), was für die Stromversorgung kleiner tragbarer Geräte und auch für Satellitenanwendungen durchaus interessant sein kann. Energiegewinnung ist auch mit elek-

trohydraulischen (KOWAL et al. 2008) und magnetostriktiven Aktoren möglich (L. WANG/YUAN 2008). Einen Überblick über die bis 2006 publizierten Arbeiten hierzu geben ANTON und SODANO (2007). Für die Dämpfung von Transversalschwingungen einer schnell rotierenden Welle mit piezoelektrischen Aktoren haben SLOETJES und DE BOER (2008) ein Verfahren zur autonomen Stromversorgung entwickelt. Analytische Modelle für frei schwingende Stäbe in verschiedenen Moden haben ERTURK und INMAN (2008) angegeben. Eine einheitliche Theorie für optimales energy harvesting mit elektrodynamischen und piezoelektrischen Schwingern haben NAKANO et al. (2007) entwickelt; sie benutzen eine Vierpoldarstellung der Wandler und haben in Modellrechnungen gezeigt, dass der Piezoschwinger mehr Leistung liefert als der elektrodynamische. Weil der Wirkungsgrad dieser Anordnungen in Resonanzen der schwingenden Struktur am höchsten ist, haben CHALLA et al. (2008) vorgeschlagen, die Strukturresonanz aktiv an die Anregungsfrequenz anzupassen. Wie dies mit Membranen von Piezopolymeren möglich ist, beschreiben MORRIS et al. (2008).

Ein größeres deutsches Forschungsvorhaben war das „Adaptive Wing Project“ (HEYLAND et al. 2000) mit dem Ziel, den Strömungswiderstand von Flugzeugen zu vermindern und die Strömungsablösung zu beeinflussen. Dies ist möglich durch aktive Beeinflussung des Tragflächenprofils, speziell durch eine winzige Aufwölbung auf der ganzen Länge kurz vor der Hinterkante mit Hilfe piezoelektrischer oder Formgedächtnis-Aktoren. Dies ist ein Beispiel für „adaptive Strukturen“, siehe den folgenden Abschnitt 3.3.

Schwingungen in metallischen Strukturen lassen sich auch durch Wirbelstromdämpfer reduzieren, sowohl passiv mit Permanentmagneten als auch mit aktiver Regelung. SODANO und BAE (2004) geben einen Überblick über die früheren Arbeiten hierzu. Vorteile sind die kontaktlose Dämpfung, die die Strukturdynamik unbeeinflusst lässt, und die weitgehende Wartungsfreiheit, wodurch sich Wirbelstromdämpfer für Anwendungen bei Satelliten empfehlen. Einen aktiven Wirbelstromdämpfer mit Elektromagnet beschreiben SODANO und INMAN (2007).

Als *tensegrity structures* sind seit den 1960er Jahren dreidimensionale Gitterstrukturen bekannt, die aus (mindestens drei) Stäben unter Druckspannung und (mehr) Seilen unter Zugspannung bestehen (R. BUCKMINSTER FULLER 1959). Die festen Stäbe dürfen sich nicht berühren. Tensegrity ist ein Kunstwort aus *tensile integrity*, also etwa „unter Zugspannung stehende Einheit“. Bekannt geworden sind diese *Buckminster Fuller*-Konstruktionen durch große freitragende Kuppeln, und wegen der formalen Ähnlichkeit nennt man auch die erst vor einigen Jahren entdeckten Kohlenstoff-Gittermoleküle Fullerene. Tensegrity structures finden auch Verwendung in Satelliten, wo es auf geringes Gewicht und die Eignung zum Auseinanderfallen ankommt. Weil die tensegrity structures aber leicht zu Schwingungen und zu Formänderungen bei nur wenig variierenden Spannungen neigen, ist ihre aktive Kontrolle seit etlichen Jahren Gegenstand der Forschung (DJOUADI et al. 1998, FEST et al. 2004, DOMER/SMITH 2005, DE JAGER/SKELTON 2005, ADAM/SMITH 2007). Mit optimalen Rückkopplungsreglern sollten sich auch stochastische Schwingungen dieser Strukturen kompensieren lassen (GANESH RAJA/NARAYANAN 2007).

### 3.3. Adaptive („intelligente“) Strukturen und Materialien

Die Verschmelzung von Strukturen mit Aktoren und Sensoren, z. B. durch Einbetten von aktiven Fasern oder durch Verkleben von Struktur- und Aktor-Platten in Sandwichbauweise, ist seit Ende der 1980er Jahre ein wichtiges Forschungsgebiet geworden. Anfangs traten bei der Integration von Aktoren in die Strukturen technische Probleme u. a. dadurch auf, dass Aktormaterialien wie Piezokeramiken und -polymere, elektro- und magnetostriktive Materialien, Formgedächtnislegierungen und -polymere keine Konstruktionsmaterialien mit der nötigen Festigkeit für lasttragende Strukturen sind, oder auch zu spröde oder zu schwach für zuverlässige Konstruktionen. Diese Schwierigkeiten sind inzwischen größtenteils überwunden.

Bei weitem am häufigsten setzt man piezoelektrische Wandler ein. Die mit *Piezokeramiken* (z. B. PZT, Bleizirkonat-Titanat) erreichbaren Stellwege sind zwar klein, aber die ausgeübten Kräfte groß. Man kann die Amplituden mit Stapelaktoren vergrößern (z. B. VISWAMURTHY et al. 2007) und für manche Anwendungen „mechanische Transformatoren“ einsetzen, die über einen Hebelmechanismus größere Auslenkungen bewirken (z. B. S.-H. LEE et al. 2007). Die erreichbaren Auslenkungen

von PZT-Aktoren lassen sich auch durch Aussteuerung bis in den nichtlinearen (ferroelektrischen) Bereich erhöhen (KUSHNER/RABINOVITCH 2008). Piezopolymere, vor allem Polyvinylidenfluorid (PVDF), sind weich und weitgehend formbar, sodass man sie auch auf gekrümmten Flächen anbringen kann. Sie werden oft als Sensoren benutzt, als Aktoren üben sie aber vielfach zu geringe Kräfte aus; zur Anregung bzw. Kompensation von Strukturresonanzen sind sie allerdings durchaus geeignet (FEIN et al. 2005), weil die Struktur-Eingangsimpedanz in Resonanzen klein ist. Ein piezoelektrischer Aktor kann auch zugleich als Sensor dienen (*self-sensing actuator, sensoriactor*); das Ansteuersignal des Aktors kann man durch eine Brückenschaltung vom Sensorausgang fern halten (SIMMERS et al. 2004). Weil die Brückenschaltungen empfindlich auf Parameteränderungen reagieren und das ganze System destabilisieren können, haben MAKIHARA et al. (2007a) ein Verfahren entwickelt, das ohne Brückenschaltungen auskommt, und es an einem Gittermast praktisch erprobt.

Seltener als PZT benutzt man Quarzschwinger als Sensoren, die aber besonders zeitstabil sind. Zur Dämpfung störender Eigenschwingungen von Beschleunigungssensoren etc. schlagen Y. MEYER und COLLET (2008) einen aktiven Regler mit Schnellerückkopplung vor, weisen aber auf noch zu lösende technische Probleme hin.

Semiaktive Schwingungsdämpfer erhält man, indem man die Piezokontakte energiesparend mit passiven Schaltkreisen überbrückt (*shunt damping*), die aber auch aktiv geregelt sein können (J. KIM/J.-H. KIM 2004, GUYOMAR et al. 2006, BELLOLI et al. 2007a, ANDERSON et al. 2007). LIN (2007) beschreibt ein Verfahren zur Optimierung der Schaltelemente mit hierarchischem „fuzzy control“. ZHAO et al. (2007) führen die Schaltkreisadmittanz als Adaptionskriterium (Kostenfunktion) ein. Wichtig ist auch die geeignete Anzahl, Form und Platzierung der Aktoren. BELLOLI und ERMANNI (2007b) haben ein Rechenprogramm zur Optimierung der Aktor-Position mit einem evolutionären Algorithmus entwickelt. Besonders effektiv ist das „shunt damping“ in Resonanz; den Einfluss von Modellunsicherheiten diskutieren ANDREAUS und PORFIRI (2007).

Unter dem Akronym LIPCA (Lightweight Piezo-Composite Curved Actuator) ist eine Sandwichstruktur aus Piezokeramik und mehreren Epoxydharzschichten bekannt geworden, mit der sich z. B. Biegeschwingungen von Strukturen dämpfen lassen (GOO et al. 2001, SUHARIYONO et al. 2008). Um die Härte von PZT weiter zu erhöhen, schlagen RAY und BATRA (2007) eine Verstärkung mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen vor, die einen extrem hohen Elastizitätsmodul (im Terapascalbereich) aufweisen.

Als *constrained layer damping* (CLD) bezeichnet man die Dämpfung von Platten und Stäben durch Aufbringen einer viskoelastischen Schicht, deren freie Verformung durch eine feste Deckschicht behindert wird, sodass starke Scherungen und damit eine hohe Energiedissipation auftreten. Mit einem Aktor als Deckschicht und einer Sensorschicht zwischen der zu dämpfenden Struktur und der viskoelastischen Schicht kommt man zum *active constrained layer damping* (ACLCD). AHLAWAT et al. (2007) geben Hinweise, wie man ein solches Regelsystem plant und optimiert. GANESAN und SETHURAMAN (2007) haben ein analytisches Modell für einen Stab mit ACLCD entwickelt, das auch die Temperaturabhängigkeit des viskoelastischen Mediums berücksichtigt.

Mehrschichtstrukturen tendieren zur Delamination bei starker Beanspruchung. Seit 1993 werden deshalb Materialien mit stetig variierenden Eigenschaften entwickelt, z. B. Platten, deren Härte in Dickenrichtung zunimmt. Man nennt sie *functionally graded materials* (FGM). REDDY und RAY (2007) beschreiben einen Optimalregler für eine solche Platte mit einem (weichen) PVDF-Sensor auf einer Fläche und einem (härteren) Komposit-Aktor mit PZT-Fasern auf der anderen. MIRZAEIFAR et al. (2008) beschreiben ein Verfahren zur Verschiebung von FGM-Plattenresonanzen mit piezoelektrischen Sensor-Aktor-Paaren. RABINOVITCH (2007) schlägt vor, die Delamination im Randbereich von Verbundplatten und -balken, z. B. auch bei Stahlbeton, mit Piezoaktoren dadurch zu verhindern, dass man die Randspannung senkt.

Piezopolymere gehören zur größeren Gruppe der elektroaktiven Polymere, und zwar zur Untergruppe der elektronisch aktivierten Polymere. Zu ihnen zählen auch elektrostriktive, elektrostatische und ferroelektrische Polymere, die alle durch Coulombkräfte aktiviert werden. Die zweite Untergruppe der elektroaktiven Polymere sind *ionische Polymere*, bestehend aus zwei Elektroden und einem Elektrolyten. Sie werden seit etwa 1992 wegen ihrer Eignung als „künstliche Muskeln“ er-

forscht (SHAHINPOOR 1992). Weil sie sich ähnlich wie biologische Muskeln verhalten, nennt man sie auch „biomimetische Materialien“ (SHAHINPOOR et al. 1998). Seit einigen Jahren erforscht man insbesondere Kompositstrukturen aus ionischen Polymeren und Metallen als Aktoren. Auf elektrische Spannungen von wenigen Volt reagieren sie mit starker Dehnung oder Biegung, was sie z. B. als Aktoren für Roboter interessant macht. Weil der Aktionsmechanismus auf der Diffusion von Ionen (in flüssigem Medium) beruht, reagieren sie relativ langsam. Trotzdem eignen sie sich als aktive Dämpfer für flexible Manipulatoren (BANDOPADHYA et al. 2007, 2008). Auch als Sensoren sind Kompositstrukturen aus ionischen Polymeren und Metallen untersucht worden (Z. CHEN et al. 2007). Das Verhalten ionischer Polymere ist noch wenig verstanden und zeigt erhebliche Unsicherheiten. KANG et al. (2007) haben verschiedene Strategien untersucht, um trotzdem robuste Regelungen zu bekommen. Ein analytisches Modell für eine Kompositstruktur aus Metall und ionischem Polymer in Unterwasseranwendungen haben BRUNETTO et al. (2008) entwickelt. Auch eine modellbasierte adaptive Regelung ist bereits entwickelt und experimentell erprobt worden (BRUFAU-PENELLA et al. 2008).

In Korea werden seit wenigen Jahren elektroaktive Systeme auf Zellulosebasis erforscht („elektroaktives Papier“), insbesondere als Biegeaktoren (J. KIM/SEO 2002, G.-Y. YUN et al. 2008). Einige Nachteile wie geringes Biegemoment und Feuchtigkeitsempfindlichkeit versucht man durch Beimengung von Kohlenstoffnanoröhrchen zu vermeiden (S. YUN/KIM 2007).

In manchen Anwendungsumgebungen nehmen die Elektroden oder Zuleitungen adaptiver Strukturen elektrisches Rauschen auf, was das Regelverhalten beeinträchtigt. Aus diesen und anderen Gründen entwickelt man photostriktive Aktoren, die keine elektrischen Zuleitungen erfordern, z. B. PLZT: eine polarisierte Keramik  $(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  mit  $\text{WO}_3$ -Dotierung. Bei Bestrahlung mit UV-Licht dehnt sich eine PLZT-Platte zum einen direkt, zum zweiten entsteht durch den photoelektrischen Effekt eine hohe elektrische Spannung, die über den inversen Piezoeffekt eine Dehnung bewirkt, und zum dritten heizt sich das Material auf, was über den pyroelektrischen Effekt eine Zusatzspannung erzeugt. Über Anwendungsmöglichkeiten zur aktiven Schwingungsminderung berichten SHIH und TZOU für Stäbe (2002) und Kugelschalen (2007).

Eine weitere Klasse von Aktoren benutzt *magnetostriktive Materialien* (z. B. MEYER/GUICKING 1974). Sie reagieren auf ein äußeres Magnetfeld mit Längenänderungen, die bei *Terfenol-D*, einer Legierung aus Terbium, Eisen und Dysprosium etwa 0,2 % erreichen können. Der Effekt ist proportional zum Quadrat der Magnetfeldstärke, sodass zur Linearisierung eine Vormagnetisierung nötig ist, der die Wechselfeldanregung überlagert wird. Eine Anwendung zur aktiven Schwingungsdämpfung von Stäben beschreiben MOON et al. (2007), sowie NAKAMURA et al. (2007) zur Mikroschwingungskompensation in sechs Freiheitsgraden. Weil der magnetostriktive Effekt reversibel ist, kann man ihn auch sensorisch ausnutzen; KUHNEN et al. (2007) haben einen Sensori-Aktor mit Halleffekt-Sensor zur Rückkopplungsregelung entwickelt, den sie z. B. für Diesel-Einspritzpumpen vorschlagen. Einen Überblick über magnetostriktive Sensoren für Drehmoment, Dehnung, Kraft, Magnetfeld usw. geben CALKINS et al. (2007).

Eine ebenfalls interessante Klasse von Aktoren sind *Formgedächtnislegierungen*, z. B. die Nickel-Titan-Legierung NiTiNOL (NOL steht für Naval Ordnance Laboratory, wo dieses Material 1963 in den USA entwickelt wurde). Es zeigt eine temperaturabhängige Umwandlung der Kristallstruktur: martensitisch bei tiefen und austenitisch bei hohen Temperaturen. In der Martensitphase ist ein Draht aus NiTiNOL leicht plastisch verformbar, springt aber oberhalb der Umwandlungstemperatur in die ursprüngliche Gestalt zurück (z. B. JANOCHA 1992). Einen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten geben SAADAT et al. (2002). Wegen der recht langsamen thermischen Umschaltung lassen sich schnelle Schwingungen mit Formgedächtnisaktoren nicht direkt dämpfen; HEIONEN et al. (2008) nutzen aber eine Änderung der Federsteife zur aktiven Schwingungsisolierung aus. Mit zwei NiTiNOL-Drähten lässt sich eine Tragflügelklappe auf und ab bewegen; der Vorteil gegenüber herkömmlichen hydraulischen oder elektromagnetischen Antrieben liegt in der erheblichen Gewichtseinsparung (SONG/MA 2007). Neben NiTiNOL gibt es noch andere Legierungen, die den Formgedächtniseffekt zeigen, z. B. CuAlBe-Drähte. Ihre Eignung zur Dämpfung seismischer Gebäudeschwingungen diskutieren OZBULUT et al. (2007).

Außer den Formgedächtnislegierungen, also Metallen, gibt es auch Polymere auf Polyurethanbasis, die den Formgedächtniseffekt zeigen (GORDON 1993). Weil sie elektrisch nichtleitend sind, muss man die Strukturumwandlung durch direkte Wärmezu- oder -abfuhr erzeugen. Einer koreanischen Arbeitsgruppe ist es aber gelungen, durch Einbetten von Kohlenstoff-Nanoröhrchen das Polymer leitfähig zu machen, sodass die Umwandlung auch durch elektrischen Strom möglich ist, was die praktische Anwendung sehr erleichtert (GOO/PAIK/YOON 2007).

Hydraulische Aktoren für Stoßdämpfer enthalten oft *elektorrheologische* (ERF) oder *magnetorheologische Flüssigkeiten* (MRF). ERF sind Suspensionen dielektrisch polarisierbarer kleiner Partikel in einer unpolaren Basisflüssigkeit, z. B. Polyurethan in niederviskosem Silikonöl (ANON. 1995); die Viskosität lässt sich durch Anlegen eines elektrischen Feldes reversibel zwischen dünnflüssig und pastös einstellen, allerdings sind Feldstärken von einigen kV/mm nötig. Um Instrumente in Satelliten vor den extremen Beschleunigungen beim Raketenstart zu schützen, sind nichtlineare ERF-Dämpfer entwickelt worden, deren Wirkung besser ist als passive oder lineare aktive Systeme (MAKIHARA et al. 2007b). Über den Einsatz von ERF in hydraulischen Stoßdämpfern berichten MORISHITA und MITSUI (1992). YEH (2007) beschreibt eine Platte mit einem Kern aus flüssigem ERF zur Schwingungskontrolle. Eine medizinische Anwendung können ERF-Dämpfer in der Orthopädie finden, und zwar zur Drehmomentkontrolle bei künstlichen Kniegelenken (NIKITCZUK et al. 2007).

Alternativ lassen sich magnetorheologische Flüssigkeiten (MRF) einsetzen, Suspensionen feiner ferromagnetischer Partikel in einer Basisflüssigkeit. Die Viskosität der Suspension lässt sich durch ein Magnetfeld verändern. Zur Steuerung nimmt man üblicherweise Elektromagnete, die hohe Stromstärken anstelle der hohen Spannungen bei den ERF benötigen (TAKI et al. 1991). Um einen möglichst weiten Regelbereich der Viskosität zu bekommen, wählt man für ERF und MRF niederviskose Basisflüssigkeiten, was bei den spezifisch schwereren Partikeln in den MRF zu größeren Problemen mit der Absetzstabilität führte als bei ERF.

Trotzdem wird intensiv am Einsatz von MRF gearbeitet, z. B. zur Gebäudesicherung gegen Erdbeben (DYKE et al. 1996), Gleitlager für rotierende Maschinen (J. WANG/MENG 2003), für Gittermasten in Satelliten (OH 2004), Fahrzeuglager (SASSI et al. 2005), Sandwich-Balken (L. CHEN/HANSEN 2005), gegen Schwingungen von Freileitungen (ZHOU et al. 2006) und Spannseilbrücken (M. LIU et al. 2007a), als regelbare dynamische Absorber für flexible Strukturen (DENG et al. 2006, 2007) und für Quetschfilmdämpfer (*squeeze film damper*) (CARMIGNANI et al. 2006, PAHLAVAN/REZAEPAZHAND 2007). BATTERBY et al. (2007) haben hydropneumatische Stoßdämpfer mit MRF für Flugzeugfahrwerke entwickelt. Auch zur vorübergehenden Erhöhung der Dämpfung von Waschmaschinen beim Umschalten vom Wasch- auf den Schleudergang eignen sich MRF-Dämpfer, vor allem in der Form von magnetorheologischen Polymer-Gelen, bei denen die Absetzstabilität keine Rolle mehr spielt (AYDAR et al. 2007, DENG/GONG 2007). SAHIN et al. (2007) schlagen MRF-Dämpfer für schwere Lastwagen vor, um bei Unfällen das Umstürzen zu verhindern.

Das Verhalten von MRF-Dämpfern ist durch Hysterese nichtlinear. Ein neues Modell für Simulation und Systemdesign haben IKHOUANE und DYKE (2007) entwickelt. OR et al. (2008) stellen einen in Hongkong entwickelten MRF-Dämpfer mit integriertem PZT-Kraftsensor vor und diskutieren Einsatzmöglichkeiten bei Spannseilbrücken, Autositzen usw.

Am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den USA ist eine neue Art von adaptiven Materialien entwickelt worden: mit MRF gefüllte Polymer-Schäume, die sich besonders zur Absorption von Stoßkräften empfehlen, z. B. in Kopfstützen von Fahrzeugen (DESMOUKH/MCKINLEY 2007).

Als Alternative zu magnetorheologischen Flüssigkeiten hat man auch magneto-sensitive Gummi-Isolatoren entwickelt: dem Gummi ist ein hoher Prozentsatz magnetisierbarer (Eisen-)Teilchen beigemischt. Die Eignung als Schwingungsisolator wird von BLOM und KARI (2008) diskutiert.

In einer Forschungs Kooperation des DLR Braunschweig mit der TU Clausthal und dem Biozentrum der Universität Würzburg werden neuartige wabenförmige Aktoren aus Piezokeramik entwickelt, die gegenüber plattenförmigen etliche Vorteile bieten, vor allem Gewichtersparnis und optimale Kraft-Weiterleitung. Zur Herstellung der Wabenstruktur nutzt man einen thermisch kontrollierten Selbstorganisationsprozess (Laser-Sinterung bei ca. 1400 °C), der im Prinzip ähnlich abläuft wie die Bildung der Waben von Honigbienen. Die Übertragung biologischer auf technische Prozesse

ist ein aktuelles Entwicklungsgebiet der Bionik (MELCHER 2008).

Einen Überblick über Schwingungssysteme mit „intelligenten“ Materialien geben HURLEBAUS und GAUL (2006): Materialeigenschaften, semiaktive Schwingungsdämpfer, energy harvesting, aktive Schwingungsdämpfung und -isolierung, Erkennung von Strukturfehlern (*structural health monitoring*) und selbstheilende Vorrichtungen.

Viele aktuelle Arbeiten zu adaptiven Strukturen und Materialien findet man in den Zeitschriften „Journal of Composite Materials“ (seit 1967), „Journal of Intelligent Material Systems and Structures“ (seit 1990) und „Smart Materials and Structures“ (seit 1992), sowie den Proceedings der „International Conferences on Adaptive Structures and Technologies“ (ICAST) (seit 1989) und der „Adaptronic Congresses“ in Deutschland (seit 1996). Stichworte sind „intelligente Materialien“, „bifunktionale Elemente“, „adaptive (oder intelligente) Strukturen“, Adaptronik und Struktronik (MELCHER/BÜTER 1995, FULLER et al. 1996, MONNER et al. 2004).

### 3.4. Aktive Schwingungsisolierung

Im Abschnitt 2.9 wurden u. a. die Möglichkeiten zur aktiven Lärmkompensation in Kraftfahrzeugen diskutiert. Die Innenraumgeräusche rühren vor allem von Motor- und Radschwingungen her, die sich als Körperschall über die Karosserie ausbreiten und in den Innenraum abstrahlen. Es liegt daher nahe, aktive Motorlager und Stoßdämpfer zu entwickeln, die einerseits steif genug sind, um die statische Last zu tragen, andererseits aber dynamisch weich sein müssen, sodass Schwingungen nicht übertragen werden. Für Stellwege im Submillimeterbereich eignen sich piezokeramische Aktoren (EDBERG/VON FLOTOW 1992), für große Amplituden und Kräfte bei Frequenzen von wenigen Hz, z. B. zur Isolierung von Fahrersitzen in schweren Fahrzeugen, kann man hydraulische und pneumatische Lager einsetzen (STEIN 1997). CHOI und Mitarbeiter (2007a, 2007b) benutzen hierfür ERF-Dämpfer. Als *aktive Hydrolager* sind kompakte und robuste Kombinationen von herkömmlichen Gummilagern mit elektrodynamisch angetriebener Hydraulik entwickelt worden (WELTIN 1993, G. KIM/SINGH 1995). Aktive Lager werden z. B. im Mercedes CL-Coupé serienmäßig eingesetzt (MAACK/STÄBLER 2000). Um auch sehr tieffrequente Schwingungen (0,5 ··· 5 Hz) zu isolieren, haben C.-M. LEE et al. (2007) Federn mit variabler negativer Steifigkeit entwickelt.

Die Schwingungsisolierung von Automotoren wird vor allem bei neueren Modellen mit zeitweiliger Zylinderabschaltung (*variable displacement engine*, VDE) zur Kraftstoffersparnis kritisch. Die Probleme und Lösungsansätze diskutieren ARZANPOUR und GOLNARAGHI (2008).

In Hubschrauberkaabinen ist die hauptsächliche Lärmquelle die Getriebebox, deren Schwingungen über typischerweise 7 Verbindungsstreben (engl. *struts*) als Körperschall zur Kabinendecke übertragen und in die Kabine abgestrahlt werden, wobei tonale Komponenten zwischen 700 Hz und 4 kHz besonders lästig sind. Mit Piezoaktoren an den Streben hat man die Schwingungsübertragung so weit reduzieren können, dass der Lärm in der Kabine in Boden-Standversuchen deutlich gemildert wurde. An der Weiterentwicklung für den praktischen Einsatz wird gearbeitet (MAIER/BEBESEL 2000, ASIRI et al. 2006).

Serienmäßige technische Anwendung finden aktive Lagerungen bei schwingungsisolierten Tischen, u. a. für optische Experimente und die Rastermikroskopie, sowie für schwingungsempfindliche Prozesse in der Halbleiterfertigung. Kommerzielle Anbieter von Tischen mit aktiver Schwingungsisolierung sind z. B. die Firmen Newport (USA), Technical Manufacturing Corporation (TMC, USA), Halcyonics (Göttingen und Menlo Park, CA, USA) und Integrated Dynamics Engineering (IDE, Raunheim). Die letztere Firma bietet auch aktive, adaptive Kompensatoren für magnetische Streufelder an, die z. B. für hochauflösende Elektronenmikroskope wichtig sind. Informationen findet man auf den Homepages der Firmen.

Aufwändige Regelungen sind entworfen worden, um Satelliten-Antennen und Installationen z. B. für Mikrogravitationsexperimente gegen die Erschütterungen des Lageregelungs- und anderer Bordgeräte zu isolieren (EDBERG/VON FLOTOW 1992, J. WANG et al. 2006). JAENSCH und LAMPÉRTH (2007a) haben ein System zur gleichzeitigen Mikropositionierung, Schwingungsreduktion und -isolierung entwickelt, das 6 Piezoaktoren und optische Glasfasersensoren enthält. In einer Folgearbeit (2007b) beschreiben sie die Stabilität des Systems. Vor allem für Satellitenanwendungen

ist die sog. *Stewart-Plattform*, auch *Hexapod* genannt, entwickelt worden, die mit 6 schräg angeordneten Streben regelbarer Länge eine Montageplatte gegen die Grundplatte in den drei Raumrichtungen und gegen Drehungen um die drei Raumachsen aktiv isoliert (STEWART 1965). Eine Weiterentwicklung für besonders empfindliche Instrumente beschreiben PREUMONT et al. (2007). Um mikroelektronische Bauteile gegen Erschütterungen in (Militär-)Flugzeugen zu isolieren, ist in einen Siliziumrahmen eine Brücke gesetzt, die das zu schützende Bauteil trägt und mit PZT-Aktoren und -Sensoren aktiv gegen die Schwingungen isoliert (Y. MEYER et al. 2007a und 2007b).

CHOI et al. (2008) stellen einen neuartigen semiaktiven Isolator vor, der neben einem herkömmlichen Gummilager drei schräg angekoppelte aktive Tilger mit piezokeramischen Aktoren und seismischen Massen enthält, sodass Schwingungen in drei Raumrichtungen kompensiert werden können.

Auch für Fahrräder wird an semiaktive MRF-Isolatoren gegen die durch Fahrbahnebenheiten angeregten Schwingungen gedacht (PLAZA 2005), und für Rennräder an die Dämpfung von Lenkervibrationen durch Verbundaktoren mit PZT-Fasern (RO et al. 2007).

In Houston (Texas, USA) ist ein Demonstrator gebaut worden, an dem für Unterrichts- und Forschungszwecke die aktive Schwingungsisolierung einer Unwucht-erregten Plattform gegen das Fundament mit PZT-Sensoren, Formgedächtnisdrähten als Aktoren und MRF-Dämpfern studiert werden kann, sowohl mit manueller als auch Computer-unterstützter Regelung (OLMI et al. 2007).

### 3.5. Bauwerke

Windinduzierte Schwingungen von modernen, relativ leicht gebauten Hochhäusern mit mehreren hundert Metern Höhe können in den obersten Stockwerken Amplituden von etlichen Metern erreichen. Sie lassen sich durch Resonanzabsorber (engl. *tuned mass damper*, TMD) reduzieren: Massen in der Größenordnung von 1 % der Gebäudemasse sind im obersten Geschoss über Federn und Dämpfer mit dem Gebäude gekoppelt. Die Wirkung erhöht sich, wenn man die Relativbewegung aktiv verstärkt (*active mass damper*, AMD). Ein bekanntes Beispiel ist das Citycorp Center in New York (N. R. PETERSEN 1980). Weniger Zusatzmasse erfordern verstellbare Klappen an der Außenseite der Gebäude, bei denen man die Windkräfte zur Schwingungsunterdrückung ausnutzt (J. C. CHANG/SOONG 1980).

In den USA, Kanada, Korea, Japan und einigen anderen Ländern wird auch am aktiven Erdbebenschutz für Gebäude gearbeitet, wobei allerdings noch schwierige technische Probleme zu lösen sind (IZUMI 1991, LI et al. 2004). Die durch Erdbeben angeregten gefährlichen horizontalen Gebäudeschwingungen lassen sich wiederum mit AMDs dämpfen. Wegen der Nichtlinearität der Körperschallausbreitung im Boden und der Wechselwirkung von Boden- und Gebäudebewegung schlagen GUCLU und YAZICI (2007) vor, eine gekoppelte fuzzy logic und PID-Regelung einzusetzen. Auch die Kombination eines LQR-Reglers und eines rekursiven Schätzers (mit Kalman-Filter) für den Anregungsvektor ist vorgeschlagen worden (HO/MA 2007). Zur Umgehung der Modellunsicherheit der Gebäudemasse und -steifigkeit ist ein robuster  $H_\infty$ -Regler konzipiert und in Modellversuchen erprobt worden (HUO et al. 2008). H.-J. LEE et al. (2008) setzen stattdessen semiaktive Dämpfer mit magnetorheologischen Flüssigkeiten und eine modale Regelung mit neuronalem Netz ein. S.-H. LEE et al. (2007) haben in Modellversuchen die Gebäudeschwingungen durch Gelenkhebel und Dämpfer mit magnetorheologischen Flüssigkeiten reduziert. SHOOK et al. (2007) vergleichen theoretisch und experimentell verschiedene Regelstrategien zur semiaktiven Dämpfung horizontaler Gebäudeschwingungen: magnetorheologische Dämpfer mit Hystereseontrolle durch neuronale Netze, kollokale Regelung mit optimalem LQR-Regler und variabler Verstärkung, und fuzzy logic mit genetischen Algorithmen; dabei werden sowohl die Beschleunigungen als auch die Auslenkungen des Gebäudes drastisch reduziert. A.-P. WANG und LIN (2007) haben gezeigt, dass fuzzy sliding mode control besonders günstig ist.

Durch Erdbeben können auch Flüssigkeiten in Tanks zum Hin- und Herschwappen (engl. *sloshing*) angeregt werden. Diese durchaus nicht ungefährlichen Schwingungen lassen sich aktiv durch Gasblasen-Injektion dämpfen (HARA/SHIBATA 1987), oder auch mit elektrorheologischen Flüssigkeitsdämpfern (SAKAMOTO et al. 2001).



Für schlanke Strukturen wie Antennenmasten und Brücken wurden Spannseilverfahren (engl. *tendon control*) entwickelt, um Schwingungen durch gesteuerte Zugkräfte in verschiedenen Diagonalrichtungen zu unterdrücken (SOONG/NATKE 1988, HANAHARA/TADA 2004). Transversalschwingungen der Kabel von Spannseilbrücken hat man auch mit superelastischen Formgedächtnislegierungen in mehreren niedrigen Moden bis etwa 10 Hz gedämpft (M. LIU et al. 2007b), oder auch mit MRF-Dämpfern und Formgedächtnisaktoren (XU/ZHOU 2007).

Ein aktuelles Forschungsgebiet ist die aktive Dämpfung der Pendelschwingungen von Lasten an den Seilen von Kränen. Erfahrene Kranführer können den Transportablauf rasch und ohne gefährliche Schwingungen regeln. Um dies auch automatisch zu optimieren, setzt man erfolgreich *fuzzy control* ein (C.-Y. CHANG et al. 2008).

### 3.6. Aktive und Adaptive Optik

Die Qualität der mit optischen und radioastronomischen Spiegelteleskopen aufgenommenen Bilder hängt entscheidend von der Genauigkeit ab, mit der die optimale Spiegelform eingehalten wird. Bei heutigen schwenkbaren Großteleskopen spielt schon die Verformung unter dem Eigengewicht eine Rolle, die man anstatt durch gewichtsvermehrende zusätzliche Versteifungen erfolgreicher durch *aktive Verformungskontrolle* oder *Gestaltregelung* korrigiert. Diese Technik bezeichnet man als *aktive Optik* (MERKLE 1988, SCHWARZSCHILD 1993).

Während es sich hierbei wegen der sehr langsamen Bewegungen mit Zeitkonstanten über 0,1 s um vergleichsweise einfache Regelungen handelt, hat man mit der *adaptiven Optik* das viel kompliziertere Problem gelöst, die durch Luftunruhe (das sog. *Seeing*) hervorgerufene Bildunschärfe zu korrigieren, für die Schwankungen im Frequenzbereich um 1000 Hz charakteristisch sind. Der große Primärspiegel ist fest, aber der kleinere, flexible Sekundärspiegel ruht auf einer Matrix von Piezoelementen, die über einen adaptiven Vielkanalregler so angesteuert werden, dass ein benachbarter Referenzstern bestmöglich scharf abgebildet wird (MERKLE 1988). Wenn es in der Nähe des zu beobachtenden Objekts keinen geeigneten Stern gibt, kann man über einen starken Laserstrahl in etwa 100 km Höhe Resonanzstreuung an Natriumatomen erzeugen und so einen „künstlichen Referenzstern“ (*artificial guide star*, *laser guide star*) erzeugen und auf diesen fokussieren (FUGATE et al. 1991, BARANEC et al. 2005). Damit hat man das Auflösungsvermögen um etwa den Faktor 50 bis nahe an die beugungsbedingte Grenze verbessern können, allerdings bislang nur für Infrarotteleskope.

Die adaptive Optik wurde in den 1970er Jahren im Zusammenhang mit dem militärischen SDI-Projekt der USA entwickelt und erst im Mai 1991 zur Veröffentlichung freigegeben, nachdem die zivile Forschung bereits fast zu den gleichen Ergebnissen gekommen war (COLLINS 1992). Inzwischen wird diese Technik bei allen neuen Großteleskopen eingesetzt, z. B. dem *Gemini North Telescope* auf dem Mauna Kea auf Hawaii (SCHWARZSCHILD 1999) und dem *Very Large Telescope* (VLT) in Chile, und sicher auch bei zukünftigen noch größeren Anlagen (GILMOZZI 2006, YANG et al. 2006). Die adaptive Optik ist auch schon in der Infrarot-Astronomie für Beobachtungen in der Nähe des galaktischen Zentrums eingesetzt worden (SCHWARZSCHILD 2003).

Auch in der industriellen Fertigung setzt man adaptive optische Spiegel ein, etwa beim Laserschneiden und -schweißen (BELL 1997) und allgemein zur Optimierung der Strahlqualität von Lasern (BAUMHACKER et al. 2002, BURNS 2005). Weitere nicht-astronomische Anwendungen werden u. a. in der konfokalen Mikroskopie (BOOTH et al. 2002) und bei räumlichen Lichtmodulatoren (*spatial light modulators*, SLM) für die optische Kommunikation gesehen (HEMMATI/CHEN 2006), sowie bei Augenuntersuchungen (ZOMMER et al. 2006). Die meisten der kleinen deformierbaren Spiegel werden als mikro-elektromechanische Systeme (MEMS) gefertigt (VOGEL/YANG 2006, HEWETT/BIERDEN 2007), typischerweise mit elektrostatischer Anregung (BATRA et al. 2007). Einen Überblick über industrielle und medizinische Anwendungen der adaptiven Optik bieten GREENAWAY und BURNETT (2004). Für potentielle Anwender der adaptiven Optik gibt BALLESTA (2008) Entscheidungshilfen bezüglich der zu wählenden Konfiguration der Anlage aus Wellenfrontsensor, Korrekturspiegel und Software. Wie wichtig die adaptive Optik geworden ist, zeigt sich auch darin, dass es bereits etliche Monographien hierzu gibt (z. B. TYSON 1991, LUKIN 1996, HARDY 1998, RODDIER 1999, BUSER et al. 2002).

### 3.7. Lärminderung durch aktive Körperschallbeeinflussung

Die Entwicklungen der aktiven Dämpfung von Strukturschwingungen und Schallfeldern verliefen weitgehend unabhängig voneinander, auch mit verschiedenen Regelungskonzepten, nämlich adaptiven Steuerungen (*adaptive feedforward control*) in der Akustik und adaptiven Regelungen (*adaptive feedback control*) bei mechanischen Strukturschwingungen. Erst in jüngerer Zeit haben diese beiden Richtungen zueinander gefunden. Viele Lärmprobleme entstehen durch Körperschallabstrahlung, z. B. im Innenraum von Autos, Flugzeugen und auf Schiffen, durch schwingende Maschinenverkleidungen usw. Hier setzt ein unter dem Schlagwort ASAC (*Active Structural Acoustic Control*) bekanntgewordenes Konzept an, nämlich die Lärminderung nicht durch aktive Luftschallbeeinflussung mit entsprechend angesteuerten Lautsprechern zu erreichen, sondern durch Maßnahmen an der Struktur selbst (FULLER et al. 1991). Dies kann durch geeignet platzierte und angesteuerte Schwingerreger zur Unterdrückung der Strukturschwingung geschehen, was aber nicht immer die optimale Lösung darstellt.

Akustisch relevant sind besonders die Biegewellen, bei denen man wegen ihrer Dispersion ( $c_B \sim \sqrt{\omega}$ ) im Bereich  $\omega < \omega_g$  nicht abstrahlende und darüber abstrahlende Moden bekommt.  $\omega_g$  ist die Grenz- oder Koinzidenzfrequenz, bei der die Biegewellengeschwindigkeit  $c_B$  gleich der Schallgeschwindigkeit  $c_0$  im angrenzenden Medium ist. Bei  $c_B < c_0$  gibt es durch „akustischen Kurzschluss“ zwischen benachbarten Wellenbergen und -tälern nur eine schwache, bei  $c_B > c_0$  dagegen eine sehr effektive Abstrahlung. Der fehlende Faktor in der Proportionalität  $c_B \sim \sqrt{\omega}$  enthält die Biegesteife, sodass man durch ihre aktive Beeinflussung die Grenzfrequenz verschieben und so aus gut abstrahlenden schlecht abstrahlende Moden machen kann (*modal restructuring*). Häufig sind die Randbedingungen schwingender Platten, z. B. in Flugzeugen, nur ungenau bekannt oder zeitlich variabel. Wie man dennoch ein ASAC-System mit genetischen Algorithmen optimieren kann, beschreiben SPORFERA et al. (2007).

Auf dem Dach von Straßenbahn-Fahrerkabine sind oft Klimageräte montiert, die vor allem durch die Kompressorschwingungen den Lärmpegel in der Kabine beherrschen. Der lässt sich durch Tilger mit adaptiver Frequenzabstimmung deutlich reduzieren (BÖS et al. 2008).

Es wird auch intensiv untersucht, wie man etwa durch den Einsatz von Laminaten aus Blech und Piezoschichten als Sensoren und Aktoren adaptive Strukturen entwickeln kann, die z. B. in Propellerflugzeugen die bereits erwähnte Körperschallanregung durch die Propellerwirbel unterdrücken können und mit denen man eventuell auch die recht aufwändige aktive Lärmkompensation ersetzen oder ergänzen kann (CLARK/FULLER 1991, FULLER/ELLIOTT/NELSON 1996, KIDNER/WRIGHT 2005, K. CHEN et al. 2008). Auch die turbulente Grenzschichtströmung entlang der Flugzeug-Außenhaut regt Schwingungen an, die als Lärm ins Innere abgestrahlt werden. Diese Schwingungen und damit die Schallabstrahlung können durch Ankoppeln eines einzigen Tilgers pro Außenhautsegment reduziert werden, wenn man die Impedanz optimal anpasst (REMINGTON et al. 2008). Zur Gewichtsersparnis versteift man Flugzeuge, Fahrzeuge und Boote gern mit Wabenstrukturen, die aber wegen der hohen Biegesteife und der niedrigen Masse bezüglich Schwingverhalten und akustischer Eigenschaften ungünstiger sind als massive Platten. Mit Problemen bei der aktiven Schwingungsdämpfung solcher Wabenplatten setzen sich HONG und ELLIOTT (2007) auseinander.

### 3.8. Aktive Minderung des Schalldurchgangs

Der Schalldurchgang durch Wände, Fenster, Dämmplatten usw. lässt sich effektiv durch aktive Maßnahmen verringern. Oft wendet man dazu das ASAC-Verfahren an (siehe vorigen Abschnitt), mitunter aber auch andere Methoden. So lässt sich die Isolationswirkung von Doppelfenstern durch aktiv angesteuerte schmale Lautsprecher zwischen den Scheiben verbessern (JAKOB/MÖSER 2004). Aktiv unterstützte Doppelwände sind auch von CARNEAL und FULLER (2004) sowie von AKISHITA et al. (2004) beschrieben worden, im letzteren Fall zur besseren Trittschalldämmung. Zur großflächigen Anregung von Einfach-Fensterscheiben benötigt man lichtdurchlässige Aktoren mit ebenfalls transparenten Elektroden. YU et al. (2007) erreichen dies mit einer PVDF-Folie und beidseitig aufgetragenen, flexiblen leitfähigen Schichten auf der Basis von Kohlenstoff-Nanoröhrchen.

### 3.9. Aktive Kontrolle nichtlinearer dynamischer Systeme

Die aktive Beeinflussung nichtlinearer Schwingungen wird seit einiger Zeit intensiv erforscht, weil man sich vielfältige Anwendungen in Physik, Technik, Medizin und Kommunikation verspricht.

In der spanabhebenden Metallbearbeitung (z. B. mit Drehmaschinen und Langlochbohrern) tritt bei höheren Arbeitsgeschwindigkeiten leicht das „Rattern“ auf, eine selbsterregte Schwingung, die zu höherem Werkzeugverschleiß und rauen Oberflächen führt. Neben passiven Maßnahmen wie Erhöhung der Materialdämpfung oder Drehzahlsenkung sind auch aktive Regelungen erfolgreich getestet worden. Eine Übersicht über Stabilitätsanalysen sowie Methoden zur passiven und aktiven Schwingungsunterdrückung geben GANGULI et al. (2007). Ein Verfahren zur Unterdrückung der Reibungs-induzierten selbsterregten Schwingungen im Bohrgestänge (*stick-slip oscillation*) durch Modellierung der Fehlerkompensation geben PUEBLA und ALVAREZ-RAMIREZ (2008) an.

Selbsterregte Schwingungen sind auch die Ursache des Bremsenquietschens. Im Rahmen eines EU-Projektes wird versucht, diese Schwingungen aktiv zu bedämpfen, entweder mit einem adaptiven Tilger oder einem auf den Bremssattel geklebten Aktor, der die Dehnungen des Systems kompensiert (HONSEL 2007).

Bereits erwähnt wurde in Abschnitt 3.1 die unerlässliche aktive Stabilisierung von Magnetlagern. Ihr Einsatz für Ultrazentrifugen ist von JI und HANSEN (2005) untersucht worden. Beim Hochlauf von Rotoren aller Art treten oft gefährliche Resonanzen auf, die sich z. B. auch mit Formgedächtnis-Materialien in einer selbst-optimierenden Lagerung unterdrücken lassen (HE et al. 2007a und 2007b). Transienten in Magnetlagern kann man mit prädiktiven Reglern auf der Basis einer Waveletanalyse regeln (CADE et al. 2007).

Schwingungen von Flugzeugen, die durch Pilotenfehler entstehen (vor allem bei Militärmaschinen) lassen sich mit Modell-basierten Reglern dämpfen, werden aber durch Geschwindigkeits- oder Auslenkungsbegrenzungen nichtlinear. In einer chinesisch-japanischen Kooperation sind Lösungsmöglichkeiten erarbeitet worden, indem der Regler entweder parallel zum Piloten oder in Serie mit ihm eingreift (LIANG et al. 2007).

Besonders intensiv wird die *Chaoskontrolle* erforscht, um chaotische Schwingungen in einen stabilen periodischen Orbit zu zwingen (KAPITANIAK 1998, SCHUSTER 1999, SCHÖLL/SCHUSTER 2008). Im Vorwort zu dem letzteren Sammelband ist eine Grafik gezeigt, nach der die Zahl der jährlichen Publikationen zur Chaoskontrolle von einigen wenigen im Jahr 1990 auf inzwischen etwa 700 angestiegen ist.

Die bekannteste Eigenschaft chaotischer dynamischer Systeme ist, dass kleinste Änderungen des momentanen Schwingungszustands zu großen Abweichungen im zukünftigen Verlauf führen. Umgekehrt lassen sich daher gewünschte Änderungen im Schwingungsverlauf durch geringfügige Eingriffe erreichen. Die wichtigsten Regelungsstrategien sind: 1) aktive Steuerung (HÜBLER/LÜSCHER 1989); 2) Regelung durch schwache Beeinflussung eines zugänglichen Systemparameters, wenn die Trajektorie in die Nähe eines instabilen Orbits gerät, auf welchem man das System stabilisieren möchte; diese sogenannte OGY-Regelung ist benannt nach den Protagonisten dieser Methode: OTT, GREBOGI und YORKE (1990); 3) zeitverzögerte Autosynchronisation oder verzögerte Rückkopplung, wobei das rückgekoppelte Signal die Differenz zwischen dem aktuellen und einem früheren Wert des Ausgangssignals des chaotischen Systems ist (PYRAGAS 1992); und 4) „Sliding Mode Control“ (YAU et al. 2000) für nichtlineare Systeme hoher Ordnung mit Modellunsicherheiten. Hierbei wird durch schnelles Hin- und Herschalten des Reglers erreicht, dass der Systemzustand um eine stabile Hyperfläche im Zustandsraum pendelt und sich so dem Gleichgewichtszustand nähert (SONG/GU 2007, SUNG et al. 2007). Möglichkeiten zur Reduktion des dabei oft auftretenden, störenden „Ratterns“ (*chatter*) diskutieren H. LEE und UTKIN (2007) sowie GU et al. (2008). Über Modellversuche zur Schwingungsdämpfung mehrstöckiger Gebäude mit MRF-Dämpfern und Sliding Mode Control im Vergleich zur LQR-Regelung berichten LU et al (2008). Die Synchronisation zweier horizontaler chaotisch schwingender Plattformen durch lineare Rückkopplung haben WU et al. (2007) behandelt.

Eine frühe Realisierung der verzögerten Rückkopplung zur Stabilisierung eines nichtlinearen Systems wurde von SCHÜRER (1948) beschrieben, und zwar zur Theorie des Balancierens von Stäben auf der Hand und zum Radfahren.

Eine medizinische Anwendung könnte Chaoskontrolle in der Stabilisierung von Vorhofflimmern finden, einer chaotischen Störung des Blutflusses im Herzen (DITTO et al. 2000, OGORZALEK 2008).

Möglicherweise kann Chaoskontrolle auch zur abhörsicheren Kommunikation beitragen, indem man die zu übertragende Nachricht mit einem breitbandigen chaotischen Träger maskiert und empfangenseitig durch entsprechende Synchronisation entschlüsselt (KOCAREV/PARLITZ 1995). Allerdings scheint es, dass kaum Vorteile gegenüber herkömmlichen Verschlüsselungssystemen bestehen, sodass praktische Anwendungen wohl nur in speziellen (z. B. militärischen) Bereichen zu erwarten sind (CARROLL 2008).

Mit der verzögerten Rückkopplung („Pyragas-Regelung“) lassen sich z. B. die Pendelschwingungen der Last an einem Container-Portalkran dämpfen; ERNEUX und KALMÁR-NAGY (2007) haben dazu ein vereinfachtes nichtlineares Modell analytisch und numerisch untersucht, Bifurkationsdiagramme berechnet und Stabilitätsbereiche angegeben.

Eine Erweiterung der verzögerten Rückkopplung ist die „vielfach-verzögerte Rückkopplung“, bei der das Rückkopplungssignal mehrere frühere Ausgangssignal-Werte enthält. Damit sind z. B. ein Colpitts-Schwinger und ein frequenzverdoppelter Festkörperlaser erfolgreich stabilisiert worden (AHLBORN/PARLITZ 2008). Das Kontrollsignal für lineare und nichtlineare mechanische Schwingungssysteme lässt sich auch aus den gemessenen Beschleunigungssignalen synthetisieren (CHATTERJEE 2008).

Verwandt mit der Chaoskontrolle ist die Bifurkationskontrolle. Einen Überblick über die Theorie, Regelungsstrategien und mögliche Anwendungen geben G. CHEN et al. (2000).

Während die meisten Anwendungen der Chaoskontrolle auf die Stabilisierung eines sonst unvorhersagbaren Prozesses auf einen stabilen Orbit abzielen, gibt es auch den umgekehrten Fall, dass nämlich ein regelmäßiges Verhalten in eine chaotische Schwingung übergeführt werden soll (Antikontrolle oder Chaotifizierung), z. B. in Verbrennungsmotoren, wo das Chaos – hier die Turbulenz – die Vermischung von Kraftstoff und Verbrennungsluft verbessert und so zu einem besseren Wirkungsgrad führt. Ein anderes Beispiel ist die Verbesserung eines künstlichen neuronalen Netzwerks durch Zustandsregelung (X. F. WANG/CHEN 2000). Eine militärische Nutzung schlagen S.-Y. LIU et al. (2008) vor, nämlich die tonalen Geräusche von U-Booten durch Chaotifizierung in ein unspezifisches Rauschen zu wandeln und dadurch die passive Sonar-Ortung zu erschweren.

---

## 4. AKTIVE STRÖMUNGSBEEINFLUSSUNG

In der Anwendung aktiver Methoden gibt es Übergänge von der eigentlichen Lärmbekämpfung zu verwandten Bereichen. Dies gilt auch für die Strömungsphysik. Man kennt mannigfache Wechselwirkungen von Schall und Strömungen, z. B. schlägt die laminare Strömung in einer schlanken Gasflamme bei Beschallung in Turbulenz um. Umgekehrt ist es auch gelungen, die Turbulenz einer Flamme aktiv zu unterdrücken (DINES 1984, MORGANS/DOWLING 2007).

Resonanzschwingungen in überströmten Hohlräumen sind von KEGERISE et al. (2007a und 2007b) mit Piezo-Biegeschwingern an der Hinterkante der Öffnung unterdrückt worden, und zwar mit Reglern mit fest eingestellter Rückkopplungsverstärkung (2007a) als auch adaptiv (2007b).

In Laborexperimenten hat man seit etwa 1982 gezeigt, dass sich der Umschlag von laminarer in turbulente Strömung durch Beeinflussen der Tollmien-Schlichting-Wellen in der Grenzschicht zu höheren Reynoldszahlen verschieben lässt. Die damit verbundene Reduktion des Strömungswiderstandes (*drag reduction*) ist von erheblicher technischer Bedeutung. Man erreicht dies durch thermische Anregung (LIEPMANN/NOSENCHUK 1982), akustische bzw. Schwingungsanregung (EGELHOF 1985, MANGIAROTTY 1989, EVERT et al. 2000), oder auch durch Wellenanregung mit Hilfe einer „aktiven Haut“, bei der Biegewellen durch piezoelektrische Beschichtung angeregt werden (MANI et al. 2008).

Auch die durch Kompressorinstabilitäten ausgelösten gefährlichen Stoßwellen in fluidischen Leitungen (*compressor surge, stall*) lassen sich durch akustisches Gegensteuern aktiv unterdrücken (HARPER 1991). Es ist ein interessanter Aspekt, dass das Verfahren der linearen aktiven Schallfeldbeeinflussung in diesem Fall auch in einen nichtlinearen Prozess eingreift (FFOWCSWILLIAMS 1986 und

FFOWCSWILLIAMS/MÖHRING 1999).

Der Strom ionisierter Gase in Brennkammern (z. B. von Raketen) neigt zur Ausbildung instabiler Resonanzschwingungen. Diese kann man mit einem geregelten elektrischen Gleichstrom durch die Brennkammer unterbinden, wobei eine Photozelle als Schwingungssensor dient (BABCOCK/CATTANEO 1968). MORGANS und DOWLING (2007) haben Brennkammerschwingungen mit Modell-basierenden Reglern stabilisiert.

Ein mikro-elektromechanisches System (MEMS) zur Unterdrückung von Turbulenz hat S. LEE (1995) beschrieben. Es umfasst einen Turbulenzsensor, eine integrierte Schaltung und einen Aktor und lässt sich auch zum Anfachen der Turbulenz benutzen – etwa bei Wärmetauschern, um den Wärmeübergang zu beschleunigen. Experimente mit dieser interessanten Technik zur Flugkontrolle eines Flugzeuges mit Deltaflügeln haben HO et al. (1999) beschrieben, und BOIKO/KOZLOV (1999) haben gezeigt, wie sich der Umschlag laminar/turbulent an einem Tragflächenprofil im Windkanal beeinflussen lässt.

Das durch Wechselwirkung der Rotorblätter mit Wirbeln entstehende Hubschrauber-Knattern lässt sich durch Steuerklappen an der Rotorblatt-Hinterkante reduzieren (CHARLES et al. 1994, J. S. KIM et al. 2007). Auch das „Überziehen“ von Hubschraubern kann man durch solche Steuerklappen (GERONTAKOS/LEE 2006) oder mit Plasma-Aktoren (POST/CORLE 2006) vermeiden. Weiterhin ist vorgeschlagen worden, die sich von den Propellerblattspitzen ablösenden Wirbel bei Hubschrauberrotoren, Flugzeugtragflächen und Schiffspropellern durch gesteuertes Luft-Einblasen an der Überdruckseite des Auftriebskörpers zu reduzieren (NGO 1996, B.-H. KIM et al. 2005). Durch Druckluft-Einblasen lässt sich auch der Turbinenlärm von Flugzeug-Strahltriebwerken mindern, wodurch der Start leiser wird; Zacken an der Düsen-Hinterkante brechen die großen Wirbel in kleinere Turbulenzstrukturen auf, was den Lärmpegel weiter senkt (BAKE et al. 2008). Die gezackten Düsen sind als *Chevron-Düsen* bekannt; über ihre Lärm mindernde Wirkung wird seit 2004 auf Kongressen berichtet (CABELL et al. 2004).

Experimente zur dynamischen Stabilisierung der Strahl-Kanten-Strömung mit verschiedenen adaptiven Regelungsstrategien haben PRECKEL und RONNEBERGER (1999) beschrieben. Störende Resonanzen in einem großen Windkanal mit Freistrah-Teststrecke („Göttinger Modell“) sind durch adaptive akustische Mehrkanalregelung mit mehreren Lautsprechern unterdrückt worden (WICKERN 1997). Unter Ausnutzung einer aeroakustischen Instabilität ist mit aktiver Strömungsakustik auch eine tieffrequente Schallquelle hoher Intensität realisiert worden (LANGE/RONNEBERGER 1999 und 2003).

---

## SCHLUSSBEMERKUNG

In der Akustik werden aktive Systeme in einigen Bereichen bereits technisch eingesetzt, allerdings handelt es sich stets um akustisch in irgendeiner Weise „einfache“ Probleme: kleines Volumen, eindimensionale Ausbreitung, quasiperiodischer Lärm, isolierte Eigenfrequenzen. In der Schwingungstechnik gibt es deutlich vielfältigere Anwendungen, allerdings auch Bereiche, wo es auf den ersten Blick erstaunlich wirkt, dass gut entwickelte Verfahren in der Praxis nicht eingesetzt werden. Dazu gehört die seit mehr als 30 Jahren erforschte aktive Flatterregelung von Tragflächen. Man könnte damit die Fluggeschwindigkeit über die natürliche Flattergrenze hinaus erhöhen, tut dies aber aus Sicherheitsbedenken nicht: Wenn eine solche aktive Regelung versagt, und damit muss man bei komplizierteren Systemen immer rechnen, wäre die Gefahr des Tragflächenbruchs und damit eines Absturzes zu groß. Überhaupt wird bei sicherheitskritischen Anwendungen immer darauf geachtet, dass durch den Ausfall einer aktiven Regelung keine Katastrophe eintreten kann.

Das generelle Interesse an der aktiven Lärmbekämpfung und Schwingungsabwehr steigt offenbar noch an, was sich auch in der Zahl der Lehrbücher, Spezialkonferenzen und sonstigen Publikationen zu diesem Gebiet pro Jahr widerspiegelt. Basierend auf der Literatursammlung des Autors von mehr als 22 000 Referenzen zur aktiven Schall- und Schwingungsbeeinflussung, zeigt Abb. 8 ein Histogramm von kumulierten Werten für 5-Jahres-Intervalle. Von den 1950er Jahren an zeigt sich eine exponentielle Zunahme mit Verdoppelung nach jeweils 5 Jahren; die Werte für das letzte Jahrzehnt

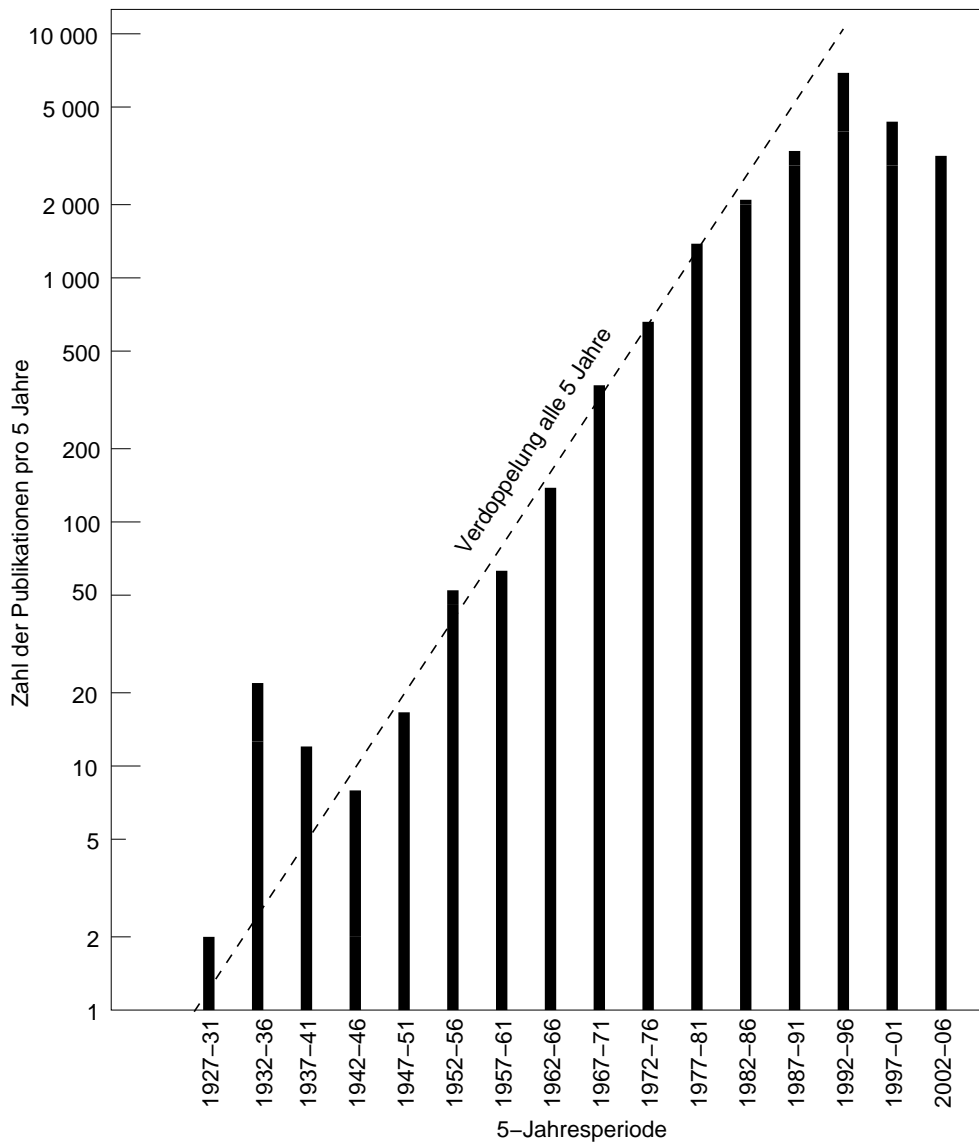


Abbildung 8: Fünf-Jahr-Kumulanten von ANVC-Veröffentlichungen.

sind wegen der sicher unvollständigen Erfassung nicht endgültig. Es gibt etwa doppelt so viele Publikationen zur aktiven Schwingungsregelung wie zur aktiven Schallfeldbeeinflussung, und etwa 7% sind Patentschriften. Das ist für ein Forschungsgebiet ziemlich hoch und beweist das beträchtliche kommerzielle Interesse (GUICKING 2005).

---

## LITERATUR

- ADAM, B.; SMITH, I. F. C. (2007): „Tensegrity Active Control: Multiobjective Approach.“ *J. of Computing in Civil Engng.* **21**, 3–10.
- AHLAWAT, S.; VIDYASHANKAR, B. R.; BHATTACHARYA, B. (2007): „Closed-form studies of a new hybrid damping technique using an active layer and hard-coated damping alloys.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 626–633.
- AHLBORN, A.; PARLITZ, U. (2008): „Multiple Delay Feedback Control.“ In: E. Schöll und H. G. Schuster (Eds.): „Handbook of Chaos Control“, 2nd ed., Chapter 11, pp. 197–220.
- AI, Y.; QIU, X.; HANSEN, C. H. (2000): „Minimizing wind effects on active control systems for attenuating outdoor transformer noise.“ *Noise Control Engineering J.* **48**, 130–135.
- AKEROYD, M. A. et al. (2007): „The binaural performance of a cross-talk cancellation system with matched or mismatched setup and playback acoustics.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 1056–1069.
- AKISHITA, S.; MITANI, A.; TAKANASHI, H. (2004): „Active Modular Panel System for Insulating Floor Impulse Noise.“ 18th International Congress on Acoustics (ICA 2004), Kyoto, JP, April 4–9, 2004. Proc.: Paper We4.D.5, pp. III-2165 – III-2168.
- ALLAN, J. F. (1945): „The Stabilization of Ships by Activated Fins.“ *Trans. Inst. Naval Architects* **87**, 123–159.
- ANDERSON, T. et al. (2007): „Response prediction of switched inductor/piezoelectric vibration suppression.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 135–139.
- ANDREAU, U.; PORFIRI, M. (2007): „Effect of Electrical Uncertainties on Resonant Piezoelectric Shunting.“ *J. of Intelligent Material Syst. Struct.* **18**, 477–485.
- ANGEVINE, O. L. (1992): „Active Cancellation of the Hum of Large Electric Transformers.“ *Internoise 92*, Toronto, CA. Proc.: pp. 313–316.
- ANGEVINE, O. L. (1995): „Active Systems for Attenuation of Noise.“ *Int. J. of Active Control* **1**, 65–78.
- ANON. (1957): „Perfectionnements apportés aux paliers pour corps tournants, notamment pour ensembles devant tourner à l’intérieur d’une enceinte étanche.“ *Französisches Patent FR 1 186 527*.  
Anmeldung: 18. 11. 1957. Erteilung: 23. 2. 1959.
- ANON. (1995): „Intelligente Lösungen. Chemiewerkstoffe machen das Auto umweltverträglicher.“  
In: *Chemie mit Chlor*. Bayer AG, Konzernzentrale Öffentlichkeitsarbeit, Leverkusen, April 1995, pp. 78–79.
- ANTON, S. R.; SODANO, H. A. (2007): „A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006).“ *Smart Materials and Structures* **16**, R1–R21.
- ARZANPOUR, S.; GOLNARAGHI, M. F. (2008): „A Novel Semi-active Magnetorheological Bushing Design for Variable Displacement Engines.“ *J. of Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 989–1003.
- ASIRI, S.; BAZ, A. M.; PINES, D. J. (2006): „Active periodic struts for a gearbox support system.“ *Smart Materials and Structures* **15**, 1707–1714.
- ATSUMI, T. et al. (2006): „Integrated Design of a Controller and a Structure for Head-positioning in Hard Disk Drives.“ *J. of Vibration and Control* **12**, 713–736.
- AYDAR, G. et al. (2007): „A Low Force Magneto-rheological (MR) Fluid Damper: Design, Fabrication and Characterization.“ *J. of Intelligent Material Syst. Struct.* **18**, 1155–1160.
- BABCOCK, W. R.; CATTANEO, A. G. (1968): „Method and Apparatus for Generating an Acoustic Output from an Ionized Gas Stream.“ *U.S. Patent US 3,565,209*. Anmeldung: 28. 2. 1968. Erteilung: 23. 2. 1971.
- BAKE, F.; RÖHLE, I.; ENGHARDT, L. (2008): „Laut – leise – leiser. DLR-Triebwerksakustiker erforschen Brennkammergeräusche.“ *DLR Nachrichten* **119**, 16–21.
- BALLESTA, J. (2008): „Choosing adaptive optics for precision applications.“ *Optics and Laser Europe (OLE)*, Issue 160 (April 2008) 31–35.
- BANDOPADHYA, D.; BHATTACHARYA, B.; DUTTA, A. (2007): „An active vibration control strategy for a flexible link using distributed ionic polymer metal composites.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 617–625.
- BANDOPADHYA, D.; BHATTACHARYA, B.; DUTTA, A. (2008): „Active Vibration Control Strategy for a Single-Link Flexible Manipulator Using Ionic Polymer Metal Composite.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 487–496.
- BARANEC, CH.; BAUMAN, B. J.; LLOYD-HART, M. (2005): „Concept for a laser guide beacon Shack-Hartmann wave-front sensor with dynamically steered subapertures.“ *Optics Letters* **30**, 693–695.

- BATRA, R. C.; PORFIRI, M.; SPINELLO, D. (2007): „Review of modeling electrostatically actuated microelectromechanical systems.“ *Smart Materials and Structures* **16**, R23–R31.
- BATTERBEE, D. C. et al. (2007): „Magnetorheological landing gear: 1. A design methodology.“ und: „... 2. Validation using experimental data.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 2429–2440 und 2441–2452.
- BAUMHACKER, H. et al. (2002): „Correction of strong phase and amplitude modulations by two deformable mirrors in a multistaged Ti:sapphire laser.“ *Optics Lett.* **27**, 1570–1572.
- BEHLER, G. K.; LENTZ, T. (2004): „A Tube Headphone without Metallic Parts to be Used for Functional NMR.“ CFA/DAGA '04, Congrès Joint 7ème Congrès Français d'Acoustique / 30. Deutsche Jahrestagung für Akustik, Strasbourg, FR. Proc.: pp. 1035–1036.
- BELL, J. (1997): „Adaptive optics clears the view for industry.“ *Opto & Laser Europe (OLE)* No. 45 (Nov. 1997), pp. 17–20.
- BELLOLI, A. et al. (2007a): „Structural Vibration Control via R-L Shunted Active Fiber Composites.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **18**, 275–287.
- BELLOLI, A.; ERMANNI, P. (2007b): „Optimum placement of piezoelectric ceramic modules for vibration suppression of highly constrained structures.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1662–1671.
- BERKHOFF, A. P. (2005): „Control strategies for active noise barriers using near-field error sensing.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **118**, 1469–1479.
- BLOM, P.; KARI, L. (2008): „Smart audio frequency energy flow control by magneto-sensitive rubber isolators.“ *Smart Materials and Structures* **17** (1), Paper No. 015043.
- BLUNT, D. M.; REBBECCHI, B. (2007): „Propeller Synchrophase Angle Optimisation Study.“ 28th AIAA Aeroacoustics Conference, Rome, IT, Paper AIAA 2007-3584.
- BÖHM, W. (1992): „Untersuchungen zur breitbandig wirksamen aktiven Kompensation instationär angeregter Schallfelder.“ Dissertation Göttingen.
- BOIKO, A. V.; KOZLOV, V. V. (1999): „Strategy of the Flow MEMS Control at Laminar-Turbulent Transition in a Boundary Layer.“ In: IUTAM Symposium on Mechanics of Passive and Active Flow Control. Proc.: pp. 203–208.
- BOOTH, M. J.; NEIL, M. A. A.; WILSON, T. (2002): „New modal wave-front sensor: application to adaptive confocal fluorescence microscopy and two-photon excitation fluorescence microscopy.“ *J. Optical Soc. Am. (JOSA) A* **19**, 2112–2120.
- BÖS, J. et al. (2008): „Reduction of compressor vibrations by means of an active tuned vibration absorber.“ In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2008, S. 315–316.
- BRONZEL, M. (1993): „Aktive Schallfeldbeeinflussung nicht-stationärer Schallfelder mit adaptiven Digitalfiltern.“ Dissertation Göttingen.
- BRUFAU-PENELLA, J. et al (2008): „Model reference adaptive control for an ionic polymer metal composite in underwater applications.“ *Smart Materials and Structures* **17**(4), Paper 045020.
- BRUNETTO, P. et al. (2008): „A model of ionic polymer–metal composite actuators in underwater operations.“ *Smart Materials and Structures* **17** (2), Paper 025029.
- BUAKA, P.; MICHEAU, P.; MASSON, P. (2005): „Optimal energy dissipation in a semi-active friction device.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **117**, 2602 (Abstract).
- BURNS, D. (2005): „University of Strathclyde: intracavity adaptive-optic control of lasers.“ *Opto & Laser Europe (OLE)*, No. 126 (March 2005), p. 27.
- BUSHER, D. T.; MYERS, R. M.; LOVE, G. D. (2002): „Adaptive Optics.“ John Wiley & Sons, Ltd., New York etc., ISBN 3-527-40298-5.
- BYCHOWSKIJ, A. V. (1949): „Sposob polawlenija schuma w sluchowom organe [Verfahren zur Lärminderung im Ohr].“ Patent der UdSSR, SU 133 631. Anmeldung: 24. 8. 1949. Veröffentlichung: Erf.-Bulletin Nr. 22, 1960.
- CABELL, R. H. et al. (2004): „Feedback Control of a Morphing Chevron for Takeoff and Cruise Noise Reduction.“ ACTIVE 04. The 2004 International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Williamsburg, VA, US. Proc. on CD ROM: Paper a04.097.pdf
- CADE, I. S.; KEOGH, P. S.; SAHINKAYA, M. N. (2007): „Rotor/active magnetic bearing transient control using wavelet predictive moderation.“ *J. Sound Vib.* **302**, 88–103.
- CALKINS, F. T.; FLATAU, A. B.; DAPINO, M. J. (2007): „Overview of Magnetostrictive Sensor Technology.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **18**, 1057–1066.



- CARME, C.; MONTASSIER, A.; REGNIER, J. L. (1997): „Haut-parleur linéaire.“ Französische Patentanmeldung FR 2766 650 A1. Anmeldung: 23. 7. 1997. Veröffentlichung: 29. 1. 1999.
- CARMIGNANI, C.; FORTE, P.; RUSTIGHI, E. (2006): „Design of a novel magneto-rheological squeeze-film damper.“ *Smart Materials and Structures* **15**, 164–170.
- CARNEAL, J. P.; FULLER, C. R. (2004): „An analytical and experimental investigation of active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems.“ *J. Sound Vib.* **272**, 749–771.
- CARROLL, T. L. (2008): „Noise Robust Chaotic Systems.“ In: E. Schöll and H. G. Schuster (Eds.): „Handbook of Chaos Control“, 2nd ed., Chapter 15, pp. 325–347.
- CHALLA, V. R. et al. (2008): „A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability.“ *Smart Materials and Structures* **17**, Paper No. 015035.
- CHAMBERS, J. et al. (2007): „Developments in active noise control sound systems for magnetic resonance imaging.“ *Applied Acoustics* **68**, 281–295.
- CHANG, C.-Y.; LUOH, F.-B. (2007): „Enhancement of active noise control using neural-based filtered-X algorithm.“ *J. Sound Vib.* **305**, 348–356.
- CHANG, C.-Y. et al. (2008): „Modified Fuzzy Variable Structure Control Method to the Crane System with Control Deadzone Problem.“ *J. of Vibration and Control* **14**, 953–969.
- CHANG, J. C. H.; SOONG, T. T. (1980): „The use of aerodynamic appendages for tall building control.“ In: H. H. E. Leipholz (ed.): *Structural Control*, North-Holland Publ. Co., pp. 199–210.
- CHAO, P. C.-P.; HUANG, J.-S.; LAI, C.-L. (2002): „Robust sliding-mode control design of a four-wire-type optical lens actuator for high-density CD/DVD pickups.“ *Proc. of ACTIVE 2002*, 1177–1188.
- CHAPLIN, G. B. B.; SMITH, R. A.; BEARCROFT, R. G. (1979): „The Cancelling of Vibrations Transmitted through a Fluid in a Containing Vessel.“ International Patent Application WO 81/01479 A1. Veröffentlichung: 28. 5. 1981. Priorität (GB): 10. 11. 1979.
- CHAPLIN, G. B. B. (1983): „Anti-sound — The Essex breakthrough.“ *Chartered Mechanical Engineer (CME)* **30** (Jan. 1983), pp. 41–47.
- CHARLES, B. D. et al. (1994): „Blade Vortex Interaction Noise Reduction Techniques for a Rotorcraft.“ U.S. Patent US 5,588,800. Anmeldung: 31. 5. 1994. Erteilung: 31. 12. 1996.
- CHATTERJEE, S. (2008): „Vibration control by recursive time-delayed acceleration feedback.“ *J. Sound Vib.* **317**, 67–90.
- CHEN, G.; MOIOLA, J. L.; WANG, H. O. (2000): „Bifurcation control: Theories, methods, and applications.“ *Int. J. of Bifurcation and Chaos (IJBC)* **10**, 511–548.
- CHEN, K. et al. (2008): „Secondary actuation and error sensing for active acoustic structure.“ *J. Sound Vib.* **309**, 40–51.
- CHEN, L.; HANSEN, C. H. (2005): „Active Vibration Control of a Magnetorheological Sandwich Beam.“ *Acoustics 2005 – Australian Acoustical Society Annual Conference. Proc.*: pp. 93–98.
- CHEN, Y.; WICKRAMASINGHE, V.; ZIMCIK, D. G. (2005): „Experimental evaluation of the Smart Spring for helicopter vibration suppression through blade root impedance control.“ *Smart Materials and Structures* **14**, 1066–1074.
- CHEN, Z. et al. (2007): „A dynamic model for ionic polymer–metal composite sensors.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1477–1488.
- CHIOU, J.-C. et al. (2007): „Micro-optical image stabilizer.“ U.S. Patentanmeldung US 2008/0273092 A1. Veröffentlichung: 6. 11. 2008. Priorität (TW): 2. 5. 2007.
- CHOI, S.-B.; HAN, Y.-M. (2007a): „Vibration control of electrorheological seat suspension with human-body model using sliding mode control.“ *J. Sound Vib.* **303**, 391–404.
- CHOI, S.-B. et al. (2007b): „Field Test on Vibration Control of Vehicle Suspension System Featuring ER Shock Absorbers.“ *J. of Intelligent Material Syst. Struct.* **18**, 1169–1174.
- CHOI, S.-B. et al. (2008): „Dynamic Characteristics of Three-axis Active Mount Featuring Piezoelectric Actuators.“ *J. of Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 1053–1066.
- CICHOCKI, A.; AMARI, S.-I. (2006): „Adaptive Blind Signal and Image Processing.“ John Wiley & Sons, New York etc., ISBN 0-471-60791-6.
- CLARK, R. L.; FULLER, C. R. (1991): „Active Structural Acoustic Control with Adaptive Structures Including Wavenumber Considerations.“ In: *Proc. of the 1st Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration*, pp. 507–524.

- CLARK, R. L.; GIBBS, G. P. (1994): „A novel approach to feedforward higher-harmonic control.“ J. Acoust. Soc. Am. **96**, 926–936.
- COANDA, H. (1930): „Procédé de protection contre les bruits.“ Französisches Patent FR 722.274. Anmeldung: 21. 10. 1930. Erteilung: 29. 12. 1931.
- COANDA, H. (1932): „Procédé et dispositif de protection contre les bruits.“ Französisches Patent FR 762.121. Anmeldung: 31. 12. 1932. Erteilung: 18. 1. 1934.
- COBO, P.; CUESTA, M. (2007): „Hybrid passive-active absorption of a microperforated panel in free field conditions.“ J. Acoust. Soc. Am. **121** (6), EL251–EL255.
- COLLINS, G. P. (1992): „Making Stars to See Stars: DOD Adaptive Optics Work is Declassified.“ Physics Today **45** (2), 17–21. Comments: COOPER, G.: „Has Defense Research Held Science Back?“ Physics Today **45** (7), 13–14.
- CONOVER, W. B.; GRAY, W. F. M. (1957): „Noise Reducing System for Transformers.“ U.S. Patent US 2,776,020. Anmeldung: 9. 2. 1955. Erteilung: 1. 1. 1957.
- DANIELS, M. A. (1996): „Loudspeaker Phase Distortion Control Using Velocity Feedback.“ U.S. Patent US 5,771,300. Anmeldung: 25. 9. 1996. Erteilung: 23. 6. 1998.
- DAS, D. P.; PANDA, G.; KUO, S. M. (2007): „New block filtered-X LMS algorithms for active noise control systems.“ IET Signal Processing **1**, 73–81.
- DE JAGER, B.; SKELTON, R. E. (2005): „Input-output selection for planar tensegrity models.“ IEEE Trans. Control Syst. Technol. **13**, 778–785.
- DENG, H.-X.; GONG, X.-L.; WANG, L.-H. (2006): „Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer.“ Smart Materials and Structures **15**, N111–N116.
- DENG, H.-X.; GONG, X.-L. (2007): „Adaptive Tuned Vibration Absorber based on Magnetorheological Elastomer.“ J. Intelligent Material Syst. Struct. **18**, 1205–1210.
- DESHMUKH, S. S.; MCKINLEY, G. H. (2007): „Adaptive energy-absorbing materials using field-responsive fluid-impregnated cellular solids.“ Smart Materials and Structures **16**, 106–113.
- DEUS, S. (1998): „Aktive Schalldämpfung im Ansaugkanal von Gebläsen.“ In: Fortschritte der Akustik – DAGA 98, S. 686–687.
- DINES, P. J. (1984): „Active control of flame noise.“ Ph. D. Thesis, Cambridge, England.
- DING, H.; QIU, X.; XU, B. (2004): „An adaptive speech enhancement method for siren noise cancellation.“ Applied Acoustics **65**, 385–399.
- DITTO, W. L. et al. (2000): „Control of human atrial fibrillation.“ Int. J. of Bifurcation and Chaos **10**, 593–601.
- DJOUADI, S. et al. (1998): „Active Control of Tensegrity Systems.“ J. of Aerospace Engng. **11**, 37–44.
- DOMER, B.; SMITH, I. F. C. (2005): „An Active Structure that Learns.“ J. of Computing in Civil Engng. **19**, 16–24.
- DYKE, S. J. et al. (1996): „Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction.“ Smart Materials and Structures **5**, 565–575.
- EATWELL, G. P. (1991): „The Use of the Silentseat in Aircraft Cabins.“ In: Proceedings of the 1st Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration, pp. 302–310.
- EATWELL, G. P.; MACHACEK, S. L.; PARRELLA, M. J. (1995): „Piezo Speaker for Improved Passenger Cabin Audio Systems.“ International Patent Application WO 97/17818 A1. Veröffentlichung: 15. 5. 1997. Priorität (US): 25. 9. 1995.
- EDBERG, D. L.; FLOTOW, A. H. VON (1992): „Progress Toward a Flight Demonstration of Microgravity Isolation of Transient Events.“ World Space Congress, 43rd Congress of the Intl. Astronaut. Federation, Paper IAF-92-0781.
- EGELHOF, D. (1985): „Einrichtung zur Schwingungsdämpfung.“ Deutsche Patentanmeldung DE 35 41 201 A1. Anmeldung: 21. 11. 1985. Veröffentlichung: 27. 5. 1987.
- EGHTESADI, KH. et al. (1993): „Industrial Applications of Active Noise Control.“ NOISE-93. International Noise and Vibration Control Conference. Proc.: Vol. 2, pp. 147–152.
- ELLIOTT, S. J.; NELSON, P. A. (1988): „Multichannel active sound control using adaptive filtering.“ ICASSP '88, Paper A3.4. Proc.: pp. 2590–2593.
- EMURA, S. et al. (2007): „New stereo echo canceller operating on single digital signal processor.“ Acoust. Sci. Technol. **28**, 172–180.

- EPAIN, N.; FRIOT, E. (2007): „Active control of sound inside a sphere via control of the acoustic pressure at the boundary surface.“ *J. Sound Vib.* **299**, 587–604.
- ERIKSSON, L. J. (1986): „Active Attenuation System with On-line Modeling of Speaker, Error Path and Feedback Path.“ U.S. Patent US 4,677,676. Anmeldung: 11. 2. 1986. Erteilung: 30. 6. 1987.
- ERIKSSON, L. J.; ALLIE, M. C.; HOOPS, R. H. (1988): „Active Acoustic Attenuation System for Higher Order Mode Non-Uniform Sound Field in a Duct.“ U.S. Patent US 4,815,139. Anmeldung: 16. 3. 1988. Erteilung: 21. 3. 1989.
- ERNEUX, T.; KALMÁR-NAGY, T. (2007): „Nonlinear Stability of a Delayed Feedback Controlled Container Crane.“ *J. of Vibration and Control* **13**, 603–616.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. (2008): „On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters.“ *J. of Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 1311–1325.
- EVERT, F.; RONNEBERGER, D.; GROSCHE, F.-R. (2000): „Application of linear and nonlinear adaptive filters for the compensation of disturbances in the laminar boundary layer.“ *Z. angew. Math. und Mech. (ZAMM)* **80**, Suppl. 2, pp. 85–88.
- FALCKE, H. (2007): „Lofar und die Epoche der Reionisation.“ *Spektrum der Wissenschaft*, Jan. 2007, S. 51.
- FEIN, O. M.; GAUL, L.; STÖBENER, U. (2005): „Vibration Reduction of a Fluid-loaded Plate by Modal Control.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **16**, 541–552.
- FEINTUCH, P. L. (1976): „An Adaptive Recursive LMS Filter.“ *Proc. IEEE* **64**, 1622–1624.  
Comments: **65** (1977) 1399 und 1402.
- FEST, E.; SHEA, K.; SMITH, I. F. C. (2004): „Active Tensegrity Structure.“ *J. of Structural Engng.* **130**, 1454–1465.
- FFOWCSWILLIAMS, J. E. (1986): „The Aerodynamic Potential of Anti-Sound.“  
ICAS 15th Congress, London, Sept. 7–12, 186. Proc.: Paper 86-01 (14 pp.).  
Auch: *J. de Mécanique Theorique et Appliquée* **6** (1987) 1–21.
- FFOWCSWILLIAMS, J. E.; MÖHRING, W. (1999): „Active Control of Kelvin-Helmholtz Waves.“ In: IUTAM Symposium on Mechanics of Passive and Active Flow Control. Kluwer Academic Publishers, pp. 343–348.
- FLEMING, A. J. et al. (2007): „Control of Resonant Acoustic Sound Fields by Electrical Shunting of a Loudspeaker.“ *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* **15**, 689–703.
- FOKEN, W. (2008): „Untersuchungen an einem aktiven Resonator für den Kfz-Einsatz.“ In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2008, S. 483–484.
- FREYMAN, R. (1986): „Dynamic Interactions Between Active Control Systems and a Flexible Aircraft Structure.“ *Proc. 27th AIAA/ASME/SAE SDM Conference*, pp. 517–524, AIAA Paper 86-0960.
- FREYMAN, R. (1996): „Von der Pegelakustik zum Sounddesign.“ In: Fortschritte der Akustik – DAGA '96, S. 32–42.
- FUGATE, R. Q. et al. (1991): „Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide-star.“ *Nature* **353** (Sept. 12, 1991) 144–146.
- FUJII, K. et al. (2006): „Verification of simultaneous equations method by an experimental active noise control system.“ *Acoust. Sci. Technol.* **27**, 270–277.
- FULLER, RICHARD BUCKMINSTER (1959): „Tensile-integrity systems.“ U.S. Patent US 3,063,521.  
Anmeldung: 31. 8. 1959. Erteilung: 13. 11. 1962.
- FULLER, C. R. (1986): „Analytical model for investigation of interior noise characteristics in aircraft with multiple propellers including synchrophasing.“ *J. Sound Vib.* **109**, 141–156.
- FULLER, C. R.; HANSEN, C. H.; SNYDER, S. D. (1991): „Active Control of Sound Radiation from a Vibrating Rectangular Panel by Sound Sources and Vibration Inputs: An Experimental Comparison.“ *J. Sound Vib.* **145**, 195–215.
- FULLER, C. R.; ELLIOTT, S. J.; NELSON, P. A. (1996): „Active Control of Vibration.“  
Academic Press, London etc., ISBN 0-12-269440-6.
- GALLAND, M.-A.; MAZEAUD, B.; SELLEN, N. (2005): „Hybrid passive/active absorbers for flow ducts.“ *Applied Acoustics* **66**, 691–708.
- GANESAN, N.; SETHURAMAN, R. (2007): „Dynamic modeling of active constrained layer damping of composite beam under thermal environment.“ *J. Sound Vib.* **305**, 728–749.
- GANESH RAJA, M.; NARAYANAN, S. (2007): „Active control of tensegrity structures under random excitation.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 809–817.

- GANGULI, A.; DERAEMAERKER, A.; PREUMONT, A. (2007): „Regenerative chatter reduction by active damping control.“ *J. Sound Vib.* **300**, 847–862.
- GÄNSLER, T.; BENESTY, J. (2002): „New Insights to the Stereophonic Acoustic Echo Cancellation Problem and an Adaptive Nonlinearity Solution.“ *IEEE Trans. Speech and Audio Processing* **10**, 257–267.
- GAUL, L. (1997): „Aktive Beeinflussung von Fügstellen in mechanischen Konstruktionselementen und Strukturen.“ Deutsche Patentanmeldung DE 197 02 518 A1. Anmeldung: 24. 1. 1997.  
Veröffentlichung: 12. 6. 1997.
- GAUTHIER, P.-A.; BERRY, A. (2008): „Adaptive wave field synthesis for active sound field reproduction: Experimental results.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 1991–2002.
- GERNER, C.; SACHAU, D.; BREITBACH, H. (2005): „Optimization of Actuator and Sensor Positions for Active Noise Reduction (ANR).“ 12th Intl. Congr. Sound Vib. (ICSV), Paper 348.
- GERONTAKOS, P.; LEE, T. (2006): „Dynamic Stall Flow Control via a Trailing-Edge Flap.“ *AIAA J.* **44**, 469–480.
- GILBERT, D. H. (1988): „Echo Cancellation System.“ U.S. Patent US 4,875,372. Anmeldung: 3. 5. 1988.  
Erteilung: 24. 10. 1989.
- GILMOZZI, R. (2006): „Riesenteleskope der Zukunft.“ *Spektrum der Wissenschaft*, Aug. 2006, 28–36.
- GONZÁLEZ, A. et al. (2003): „Sound quality of low-frequency and car engine noises after active noise control.“ *J. Sound Vib.* **265**, 663–679.
- GONZÁLEZ DÍAZ, C.; PAULITSCH, C.; GARDONIO, P. (2008a): „Active damping control unit using a small scale proof mass electrodynamic actuator.“ *J. Acoust Soc. Am.* **124**, 886–897.
- GONZÁLEZ DÍAZ, C.; PAULITSCH, C.; GARDONIO, P. (2008b): „Smart panel with active damping units. Implementation of decentralized control.“ *J. Acoust Soc. Am.* **124**, 898–910.
- GOO, N. S. et al. (2001): „Behaviors and Performance Evaluation of a Lightweight Piezo-Composite Curved Actuator.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **12**, 639–646.
- GOO, N. S.; PAIK, I. H.; YOON, K. J. (2007): „The durability of a conducting shape memory polyurethane actuator.“ *Smart Materials and Structures* **16**, N23–N26.
- GORDON, R. F. (1993): „The properties and applications of shape memory polyurethanes.“ *Mater. Technol.* **8**, 254–258.
- GOSSMAN, W.; EATWELL, G. P. (1992): „Active High Transmission Loss Panel.“ U.S. Patent US 5,315,661.  
Anmeldung: 12. 8. 1992. Erteilung: 24. 5. 1994.
- GRECO, D. et al. (2007): „Active vibration control of flexible materials found within printing machines.“ *J. Sound Vib.* **300**, 831–846.
- GREENAWAY, A.; BURNETT, J. (2004): „Industrial and Medical Applications of Adaptive Optics.“ Institute of Physics (IOP) Publishing, Bristol, GB, 2004.
- GU, H.; SONG, G.; MALKI, H. (2008): „Chattering-free fuzzy adaptive robust sliding-mode vibration control of a smart flexible beam.“ *Smart Materials and Structures* **17** (3), Paper No. 035007.
- GUCLU, R.; YAZICI, H. (2007): „Fuzzy Logic Control of a Non-linear Structural System against Earthquake Induced Vibration.“ *J. of Vibration and Control* **13**, 1535–1551.
- GUICKING, D.; KARCHER, K.; ROLLWAGE, M. (1983): „Active control of the acoustic reflection coefficient at low frequencies.“ *Internoise 83, International Congress on Noise Control Engineering, Edinburgh, UK. Proc.:* pp. 419–422.
- GUICKING, D.; KARCHER, K. (1984): „Active Impedance Control for One-Dimensional Sound.“ *ASME J. Vib. Acoust. Stress Rel. in Design* **106**, 393–396.
- GUICKING, D. (1987): „Zur Entwicklung der aktiven Schwingungs- und Lärmbekämpfung.“ *Fortschritte der Akustik – DAGA '87*, S. 501–504.
- GUICKING, D. (1989a): „Aktiver Lärmschutz – Erfolge, Probleme und Perspektiven.“ *Fortschritte der Akustik – DAGA '89*, S. 23–36.
- GUICKING, D.; MELCHER, J.; WIMMEL, R. (1989b): „Active Impedance Control in Mechanical Systems.“ *Acustica* **69**, 39–52.
- GUICKING, D. (1991): „Active Noise Control – Achievements, Problems and Perspectives.“ *International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Tokyo, JP. Proc.:* pp. 109–118.
- GUICKING, D. (1992): „Recent Advances in Active Noise Control.“ *2nd International Congress on Recent Developments in Air- and Structure-Borne Sound and Vibration, Auburn, AL, US. Proc.:* Vol. 1, pp. 313–320.

- GUICKING, D. (1995): „Aktive Lärm- und Schwingungsminderung – von der Laborkuriosität zum technischen Produkt.“ In: *Aktive Lärmbekämpfung und Schwingungsabwehr. Veranstaltungsunterlagen, Haus der Technik e.V., Essen, 28.–29. Juni 1995, No. 2* (15 S.).
- GUICKING, D.; FREIENSTEIN, H. (1995): „Broadband Active Sound Absorption in Ducts with Thinned Loudspeaker Arrays.“ In: *ACTIVE 95, Newport Beach, CA, US. Proc.*: pp. 371–382. Auch: FREIENSTEIN, H.; GUICKING, D. (1996): „Experimentelle Untersuchung von linearen Lautsprecheranordnungen als aktive Absorber in einem Kanal.“ In: *Fortschritte der Akustik – DAGA 96*, S. 112–113.
- GUICKING, D. (1998): „Aktive Lärm- und Schwingungsminderung. Von der Laborkuriosität zum technischen Produkt.“ In: *Antischallsysteme im Schallschutz und für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen – Möglichkeiten und Grenzen. Veranstaltungsunterlagen, Haus der Technik, Essen, 23. Juni 1998* (14 S.).
- GUICKING, D. (2000): „Aktive Lärm- und Schwingungsminderung. Von einer Laborkuriosität zum technischen Produkt.“ In: *Aktive Schall- und Schwingungsminderung. Veranstaltungsunterlagen, Haus der Technik e.V., Essen, 18. Oktober 2000* (23 S.).
- GUICKING, D. (2002): „An overview of ASVC: from laboratory curiosity to commercial products.“ In: M. O. Tokhi, S. M. Veres (eds.): *Active Sound and Vibration Control – theory and applications. IEE Control Engineering Series, Vol. 62, London, UK, 2002, Chapter 1*, pp. 3–24.
- GUICKING, D. (2005): „Patents on Active Control of Sound and Vibration – an Overview“, 125-seitige Broschüre. Dazu umfassendes Datenfile auf CD-ROM mit komfortablem Bearbeitungsprogramm GOPI (Guicking's Online Patent Information). Näheres unter <http://www.physik3.gwdg.de/~guicking> und <http://www.guicking.de>.
- GUICKING, D. (2007): „Active control of sound and vibration – History – Fundamentals – State of the art.“ In: T. Kurz, U. Parlitz, and U. Kaatz (Eds.): *Oscillations, Waves, and Interactions – Sixty Years Drittes Physikalisches Institut – A Festschrift. Universitätsverlag Göttingen, ISBN 978-3-938616-96-3*, pp. 107–138.
- GUSTAFSSON, S. et al. (2002): „A Psychoacoustic Approach to Combined Acoustic Echo Cancellation and Noise Reduction.“ *IEEE Trans. Speech and Audio Processing* **10**, 245–256.
- GUYOMAR, D. et al. (2006): „Wave reflection and transmission reduction using a piezoelectric semipassive nonlinear technique.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 285–298.
- HAN, N.; QIU, X. (2007): „A study of sound intensity control for active noise barriers.“ *Applied Acoustics* **68**, 1297–1306.
- HANAHARA, K.; TADA, Y. (2004): „Dynamics of Geometry Adaptive Truss with Wire Member Actuators.“ In: *13th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST 2002), Potsdam. Proc. (2004)*: pp. 403–412.
- HANSEN, C. H. et al. (1996): „Practical implementation of an active noise control system in a hot exhaust stack.“ *Acoustics 1996 – Australian Acoustical Society Annual Conference, Brisbane, AU*.
- HANSEN, J. (1999): „Eine anwendungsreife Lösung für die aktive Minderung von Abgasgeräuschen industrieller Dieselmotoren und Drehkolbenpumpen.“ *VDI Bericht Nr. 1491*.
- HÄNSLER, E. (1992): „The hands-free telephone problem – An annotated bibliography.“ *Signal Processing* **27**, 259–271.
- HARA, F.; SHIBATA, H. (1987): „Experimental Study on Active Suppression by Gas Bubble Injection for Earthquake Induced Sloshing in Tanks.“ *Japan Soc. Mech. Eng. (JSME) Intl. J.* **30** (260), 318–323.
- HARDY, J. W. (1998): „Adaptive Optics for Astronomical Telescopes.“ Oxford University Press, New York. ISBN 0-19-509019-5.
- HARLEY, T. R. (1993): „Active Noise Control Stethoscope.“ U.S. Patent US 5,610,987. Erstanmeldung: 16. 8. 1993. Erteilung: 11. 3. 1997.
- HARPER, M. F. L. (1991): „Active Control of Surge in a Gas Turbine Engine.“ In: *Proc. of the 1st Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration. Blacksburg, VA, April 1991*, pp. 133–149.
- HASSLER, D. (1991): „Apparatus and Method for Suppressing Reflections at an Ultrasound Transducer.“ U.S. Patent US 5,245,586. Erteilung: 14. 9. 1993. Priorität (EP): 15. 11. 1991.
- HE, Y.-Y. et al. (2007a): „Vibration control of a rotor-bearing system using shape memory alloy: I. Theory.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 114–121.
- HE, Y.-Y. et al. (2007b): „Vibration control of a rotor-bearing system using shape memory alloy: II. Experimental study.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 122–127.
- HEESEN, W. VON (1996): „Practical Experience with an Active Noise Control Installation in the Exhaust Gas Line of a Co-Generator Plant Engine.“ *ACUSTICA – acta acustica* **82**, Suppl. 1, p. S195.

- HEINONEN, J. et al. (2008): „Controlling stiffness of a frame spring by changing the boundary condition with an SMA actuator.“ *Computers and Structures* **86**, 398–406.
- HELLER, H. H.; SPLETTSTOESSER, W. R.; SCHULTZ, K.-J. (1993): „Helicopter Rotor Noise Research in Aeroacoustic Wind Tunnels – State of the Art and Perspectives.“ *NOISE-93. International Noise and Vibration Control Conference, St. Petersburg. Proc.: Vol. 4*, pp. 39–60.
- HEMMATI, H.; CHEN, Y. (2006): „Active optical compensation of low-quality optical system aberrations.“ *Optics Lett.* **31**, 1630–1632.
- HERTER, E.; LÖRCHER, W. (1990): „Nachrichtentechnik.“ Carl Hanser-Verlag, München und Wien, 5. Aufl., Abschnitt 7.5.6. ISBN 3-446-15964-9.
- HEWETT, J.; BIERDEN, P. (2007): „Deformable mirrors reach pivotal point.“ *Optics and Laser Europe (OLE)*, No. 149 (April 2007) 19–21.
- HEYLAND, D. et al. (2000): „The adaptive wing project (DLR): Survey on targets and recent results from active/adaptive structures viewpoint.“ In: *Tenth Int. Conf. on Adaptive Structures and Technologies (ICAST '99)*, Proc. (2000): pp. 178–185.
- HILDEBRAND, S.; HU, Z. Q. (1993): „Global Quieting System for Stationary Induction Apparatus.“ U.S. Patent US 5,617,479. Erstanmeldung: 3. 9. 1993. Erteilung: 1. 4. 1997.
- HO, CHIH-MING et al. (1999): „Active Flow Control by Micro Systems.“ In: *IUTAM Symposium on Mechanics of Passive and Active Flow Control*, Kluwer Academic Publishers, pp. 195–202.
- HO, CHIH-CHERNG; MA, CHIH-KAO (2007): „Active vibration control of structural systems by a combination of the linear quadratic Gaussian and input estimation approaches.“ *J. Sound Vib.* **301**, 429–449.
- HOLDHUSEN, M.; CUNEFARE, K. A. (2008): „Investigation of the Two-state, Maximum Work Extraction Switching Rule of a State-switched Absorber for Vibration Control.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 1245–1250.
- HONG, C.; ELLIOTT, S. J. (2007): „Local feedback control of light honeycomb panels.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 222–233.
- HONSEL, G. (2007): „Quietschfrei anhalten.“ *Technology Review – Das M.I.T. Magazin für Innovation*, Deutsche Ausgabe, No. 6 (Juni 2007) 10.
- HORI, Y. et al. (1980): „Vibration/Noise Reduction Device for Electrical Apparatus.“ U.S. Patent US 4,435,751. Erteilung: 6. 3. 1984. Priorität (JP): 3. 7. 1980.
- HORT, H. (1934): „Beschreibung und Versuchsergebnisse ausgeführter Schiffsstabilisierungsanlagen.“ *Jahrb. Schiffbautechn. Ges.* **35**, 292–312.
- HOSHUYAMA, O.; GOUBRAN, R. A. (2004): „A new adaptation algorithm for echo cancellation in fast changing environments.“ *18th International Congress on Acoustics (ICA 2004)*, Kyoto, JP. Proc.: Paper Th.P1.13, pp. IV-3147 – IV-3150.
- HSIAO, C. C.; LIU, T. S.; CHIEN, S. H. (2006): „Adaptive inverse control for the pickup head flying height of near-field optical disk drives.“ *Smart Materials and Structures* **15**, 1632–1640.
- HÜBLER, A.; LÜSCHER, E. (1989): „Resonant stimulation and control of nonlinear oscillators.“ *Die Naturwissenschaften* **76**, 67–69.
- HUO, L. et al. (2008): „ $H_\infty$  robust control design of active structural vibration suppression using an active mass damper.“ *Smart Materials and Structures* **17** (1), Paper No. 015021.
- HURLEBAUS, S.; GAUL, L. (2006): „Smart structure dynamics – a Review.“ *Mechanical Systems and Signal Processing* **20**, 255–281.
- HUTCHENS, C. G.; MORRIS, S. A. (1989): „Method for Acoustic Reverberation Removal.“ U.S. Patent US 4,796,237. Anmeldung: 28. 1. 1987. Erteilung: 3. 1. 1989.
- IKHOUANE, F.; DYKE, S. J. (2007): „Modeling and identification of a shear mode magnetorheological damper.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 605–616.
- ISE, S.; YANO, H.; TACHIBANA, H. (1991): „Basic study on active noise barrier.“ *J. Acoust. Soc. Japan (E)* **12**, 299–306.
- ISE, S. (1994): „Theory of Acoustic Impedance Control for Active Noise Control.“ *Internoise 94, International Congress on Noise Control Engineering*, Yokohama, JP. Proc.: pp. 1339–1342.
- IWAMATSU, Y.; FUJII, K.; MUNAYASU, M. (2006): „Frequency domain method to estimate the coefficients of feedback control filter for active noise control systems.“ *Acoust. Sci. Technol.* **27**, 264–269.

- IZUMI, M. (1991): „Control of Structural Vibration — Past, Present and Future.“ International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Tokyo, JP. Proc.: pp. 195–200.
- JAENSCH, M.; LAMPÉRTH, M. U. (2007a): „Development of a multi-degree-of-freedom micropositioning, vibration isolation and vibration suppression system.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 409–417.
- JAENSCH, M.; LAMPÉRTH, M. U. (2007b): „Investigations into the stability of a PID-controlled micropositioning and vibration attenuation system.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1066–1075.
- JAKOB, A.; MÖSER, M. (2004): „Parameter Study with a Modal Model for Actively Controlled Double-Glazed Windows.“ *Acta Acustica/Acustica* **90**, 467–480.
- JANOCHA, H. (ed.) (1992): „Aktoren.“ Springer-Verlag, Berlin etc., ISBN 3-540-54707-X.
- JESSEL, M. J. M. (1972): „La question des absorbeurs actifs.“ *Revue d’Acoustique* **5**, No. 18, pp. 37–42.
- Jl, J. C.; HANSEN, C. H. (2005): „Hopf Bifurcation of a Magnetic Bearing System with Time Delay.“ *ASME J. Vib. Acoust.* **127**, 362–369.
- JIANG, S. et al. (2005): „Performance of a piezoelectric bimorph for scavenging vibration energy.“ *Smart Materials and Structures* **14**, 769–774.
- JOHANSSON, S. et al. (1997): „Performance of a Multiple versus a Single Reference MIMO ANC Algorithm Based on a Dornier 328 Test Data Set.“ In: Proceedings of ACTIVE 97, The 1997 International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Budapest, pp. 521–528.
- JONES, R. W.; OLSEN, B. L.; MACE, B. R. (2007): „Comparison of convergence characteristics of adaptive IIR and FIR filters for active noise control in a duct.“ *Applied Acoustics* **68**, 729–738.
- KALLERGIS, M. (1992): „Experimental Results on Propeller Noise Attenuation Using an ‘Active Noise Control’ Technique.“ 14th DGLR/AIAA Aeroacoustics Conference, Aachen. Proc.: pp. 907–918. AIAA Paper 92-02-155.
- KANG, S. et al. (2007): „Robust control of ionic polymer–metal composites.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 2457–2463.
- KAPITANIAK, T. (1998): „Chaos for Engineers.“ Springer-Verlag, Berlin etc., 1998 und 2000 (2nd ed.)
- KEGERISE, M. A.; CABELL, R. H.; CATTAFESTA III, L. N. (2007a): „Real-time feedback control of flow-induced cavity tones – Part 1: Fixed-gain control.“ *J. Sound Vib.* **307**, 906–923.
- KEGERISE, M. A.; CABELL, R. H.; CATTAFESTA III, L. N. (2007b): „Real-time feedback control of flow-induced cavity tones – Part 2: Adaptive control.“ *J. Sound Vib.* **307**, 924–940.
- KHONG, A. W. H.; NAYLOR, P. A. (2006): „Stereophonic Acoustic Echo Cancellation Employing Selective-Tap Adaptive Algorithms.“ *IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Processing* **14**, 785–796.
- KIDNER, M. R. F.; WRIGHT, R. I. (2005): „Global control of sound radiation from a plate using several adaptive vibration neutralisers with local control schemes.“ *Acoustics 2005, Australian Acoustical Society Annual Conference, Busselton, AU. Proc.*: pp. 55–60.
- KIM, B.-H. et al. (2005): „Modeling Pulsed-Blowing Systems for Flow Control.“ *AIAA J.* **43**, 314–325.
- KIM, G.; SINGH, R. (1995): „A study of passive and adaptive hydraulic engine mount systems with emphasis on non-linear characteristics.“ *J. Sound Vib.* **179**, 427–453.
- KIM, J.; SEO, Y. B. (2002): „Electro-active paper actuators.“ *Smart Materials and Structures* **11**, 355–360.
- KIM, J.; KIM, J.-H. (2004): „Multimode shunt damping of piezoelectric smart panel for noise reduction.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **116**, 942–948.
- KIM, J.-S.; WANG, K. W.; SMITH, E. C. (2007): „Development of a resonant trailing-edge flap actuation system for helicopter rotor vibration control.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 2275–2285.
- KOCAREV, L.; PARLITZ, U. (1995): „General approach for chaotic synchronization with application to communication.“ *Phys. Rev. Lett.* **74**, 5028–5031.
- KOH, H.-I.; MÖSER, M. (2004): „Improved shielding effect of noise screens by means of actively controlled headpieces.“ CFA/DAGA ’04, Congrès Joint 7ème Congrès Français d’Acoustique / 30. Deutsche Jahrestagung für Akustik, Strasbourg, FR. Proc.: pp. 77–78.
- KOWAL, J. et al. (2008): „Energy Recovering in Active Vibration Isolation System – Results of Experimental Research.“ *J. of Vibration and Control* **14**, 1075–1088.
- KRÜGER, J.; CASTOR, F.; JEBASINSKI, R. (2005): „Aktive Abgas-Schalldämpfer für PKW – Chancen und Risiken.“ In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2005, S. 21–22.
- KRÜGER, J. (2007): „Aktive Gestaltung des Abgasgeräusches – Stand und Perspektiven.“ In: „Fahrzeugaußen-geräusche.“ Konferenz-Unterlagen, Haus der Technik e.V., Essen, 30.–31. Jan. 2007, No. 13.

- KUHNEN, K.; SCHOMMER, M.; JANOCHA, H. (2007): „Integral feedback control of a self-sensing magnetostrictive actuator.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1098–1108.
- KUO, S. M.; HUANG, Y. C.; PAN, Z. (1995): „Acoustic Noise and Echo Cancellation Microphone System for Videoconferencing.“ *IEEE Trans. Consumer Electronics* **41**, 1150–1158.
- KUO, S. M.; MORGAN, D. R. (1996): „Active Noise Control Systems. Algorithms and DSP Implementations.“ John Wiley & Sons, New York etc., SBN 0-471-13424-4.
- KUSHNIR, U.; RABINOVITCH, O. (2008): „Non-linear Piezoelectric and Ferroelectric Actuators – Analysis and Potential Advantages.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 1077–1088.
- LACOUR, O.; GALLAND, M.-A.; THENAIL, D. (2000): „Preliminary experiments on noise reduction in cavities using active impedance changes.“ *J. Sound Vib.* **230**, 69–99.
- LANGE, B.; RONNEBERGER, D. (1999): „Control of Pipe Flow by Use of an Aeroacoustic Instability.“ In: IUTAM Symposium on Mechanics of Passive and Active Flow Control, Kluwer Acad. Publ., pp. 305–310.
- LANGE, B.; RONNEBERGER, D. (2003): „Active Noise Control by Use of an Aeroacoustic Instability.“ *Acta Acustica/ Acustica* **89**, 658–665.
- LEATHERWOOD, J. D.; STEPHENS, D. G.; DIXON, G. V. (1969): „Active Vibration Isolator for Flexible Bodies.“ U.S. Patent US 3,566,993. Anmeldung: 26. 3. 1969. Erteilung: 2. 3. 1971.
- LEE, C.-M.; GOVERDOVSKIY, V. N.; TEMNIKOV, A. I. (2007): „Design of springs with „negative“ stiffness to improve vehicle driver vibration isolation.“ *J. Sound Vib.* **302**, 865–874.
- LEE, H.; UTKIN, V. I. (2007): „Chattering suppression methods in sliding mode control systems.“ *Annual Reviews in Control* **31**, 179–188.
- LEE, H.-J. et al. (1997): „An Active Noise Control System for Controlling Humming Noise Generated by a Transformer.“ *Internoise 97, Budapest. Proc.: Vol. I*, pp. 517–520.
- LEE, H.-J. et al. (2008): „An Experimental Study of Semiactive Modal Neuro-control Scheme Using MR Damper for Building Structure.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 1005–1015.
- LEE, S. (1995): „Noise Killing System of Fans.“ U.S. Patent US 5,791,869. Erteilung: 11. 8. 1998. Priorität (KR): 18. 9. 1995.
- LEE, S.-H. et al. (2007): „Bracing Systems for Installation of MR Dampers in a Building Structure.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **18**, 1111–1120.
- LEHRINGER, F.; ZINTEL, G. (1995): „Aktive Pegelminderung bei Abgasanlagen von Kraftfahrzeugen.“ *Haus der Technik, Essen, Informationsmappe zur Tagung „Aktive Lärmbekämpfung und Schwingungsabwehr“ am 21.2.1995, No. 14.*
- LESIEUTRE, G. A.; OTTMAN, G. K.; HOFMANN, H. F. (2004): „Damping as a result of piezoelectric energy harvesting.“ *J. Sound Vib.* **269**, 991–1001.
- LEVINE, W. S. (1995): „The Control Handbook.“ CRC Press / IEEE Press, 1995. ISBN 0-8493-8570-9.
- LI, Q. S. et al. (2004): „Combinatorial optimal design of number and positions of actuators in actively controlled structures using genetic algorithms.“ *J. Sound Vib.* **270**, 611–624.
- LIANG, X.-H. et al. (2007): „Model Predictive Controller Design to Suppress Rate-Limiter-Based Pilot-Induced Oscillations.“ *Trans. Japan Soc. Aeron. Space Sci.* **49** (166), 239–245.
- LIEPMANN, H. W.; NOSENCHUK, D. M. (1982): „Active control of laminar–turbulent transition.“ *J. Fluid Dynamics* **118**, 201–204.
- LIM, S.; JUNG, T.-Y. (1999): „Dynamics and robust control of a high speed optical pickup.“ *J. Sound Vib.* **221**, 607–621.
- LIM, S.-C.; CHOI, S.-B. (2007a): „Vibration control of an HDD disk-spindle system utilizing piezoelectric bimorph shunt damping: I. Dynamic analysis and modeling of the shunted drive.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 891–900.
- LIM, S.-C.; CHOI, S.-B. (2007b): „Vibration control of an HDD disk-spindle system using piezoelectric bimorph shunt damping: II. Optimal design and shunt damping implementation.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 901–908.
- LIN, J. (2007): „An active–passive absorber by using hierarchical fuzzy methodology for vibration control.“ *J. Sound Vib.* **304**, 752–768.
- LIU, M.; SONG, G.; LI, H. (2007a): „Non-model-based semi-active vibration suppression of stay cables using magneto-rheological fluid dampers.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1447–1452.



- LIU, M.; SONG, G.; OU, J. (2007b): „Investigation of vibration mitigation of stay cables incorporated with superelastic shape memory alloy dampers.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 2202–2213.
- LIU, S.-Y.; YU, X.; ZHU, S.-J. (2008): „Study on the chaos anti-control technology in nonlinear vibration isolation system.“ *J. Sound Vib.* **310**, 855–864.
- LU, K.-C. et al. (2008): „Decentralized sliding mode control of a building using MR dampers.“ *Smart Materials and Structures* **17** (5), Paper No. 055006.
- LUEG, P. (1933): „Verfahren zur Dämpfung von Schallschwingungen.“ DRP Nr. 655 508. Anmeldung: 27. 1. 1933. Erteilung: 30. 12. 1937.
- LUEG, P. (1934a): „Process of Silencing Sound Oscillations.“ U.S. Patent US 2,043,416. Anmeldung: 8. 3. 1934. Erteilung: 9. 6. 1936.
- LUEG, P. (1934b): „Verfahren zur Dämpfung von Schallschwingungen.“ Österreichische Patentschrift AT 141998. Anmeldung: 23. 2. 1934. Erteilung: 15. 1. 1935.
- LUEG, P. (1934c): „Procédé pour amortir les vibrations sonores.“ Französisches Patent FR 769.51. Anmeldung: 2. 3. 1934. Erteilung: 9. 6. 1934.
- LUKIN, V. P. (1996): „Atmospheric Adaptive Optics.“ SPIE Press Vol. PM23, ISBN: 0-8194-1871-4.
- MAACK, L.; STÄBLER, J. (2000): „Active Body Control in Production.“ *dSPACE NEWS*, Fall 2000, pp. 2–3.
- MAIER, R.; BEBESEL, M. (2000): „Helicopter Interior Noise Reduction.“ *dSPACE NEWS*, Fall 2000, pp. 6–7.
- MAKIHARA, K.; ONODA, J.; MINESUGI, K. (2007a): „A self-sensing method for switching vibration suppression with a piezoelectric actuator.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 455–461.
- MAKIHARA, K.; ONODA, J.; MINESUGI, K. (2007b): „Numerical Analysis of Powerful Shock Absorber Utilizing Particle-Dispersion ER Fluid.“ *Trans. Japan Soc. Aeron. Space Sci.* **49** (166), 203–210.
- MALLOCK, A. (1905): „A Method of Preventing Vibration in Certain Classes of Steamships.“ *Trans. Inst. Naval Architects* **47**, 227–230.
- MANGIANTE, G. A. (1977): „Active Sound Absorption.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 1516–1523.
- MANGIANTE, G. A.; VIAN, J. P. (1977): „Application du principe de Huygens aux absorbeurs acoustiques actifs. II: Approximations du principe de Huygens.“ *Acustica* **37**, 175–182.
- MANGIAROTTY, R. A. (1989): „Control of Laminar Flow in Fluids by Means of Acoustic Energy.“ U.S. Patent US 4,802,642. Anmeldung: 14. 10. 1986. Erteilung: 7. 2. 1989.
- MANI, R.; LAGOUDAS, D. C.; REDINIOTIS, O. K. (2008): „Active skin for turbulent drag reduction.“ *Smart Materials and Structures* **17** (3), Paper No. 035004
- MANO, M. (1985): „Ship Design Considerations for Minimal Vibration.“ *Ship Technology and Research (STAR) 10th Symposium of the Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME)*, Proc.: pp. 143–156.
- MASON, W. P. (1945): „Piezoelectric Damping Means for Mechanical Vibrations.“ U.S. Patent US 2,443,417. Anmeldung: 29. 3. 1945. Erteilung: 15. 6. 1948.
- MCCOOL, J. M. et al. (1979): „Adaptive detector.“ U.S. Patent US 4,243,935. Anmeldung: 18. 5. 1979. Erteilung: 6. 1. 1981.
- MCKINLEY, R. L. (1986): „Development of Active Noise Reduction Earcups for Military Applications.“ *ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, CA, Session NCA-8B*.
- MEIROVITCH, L. (1990): „Dynamics and Control of Structures.“ John Wiley & Sons, New York etc. ISBN 0-471-62858-1.
- MEJIA, J.; DILLON, H.; FISHER, M. (2008): „Active cancellation of occlusion: An electronic vent for hearing aids and hearing protectors.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, 235–240.
- MELCHER, J.; BÜTER, A. (1995): „Adaptive Structures Technology for Structural Acoustic Problems.“ 1st Joint CEAS/AIAA Aeronautics Conference (16th AIAA Aeroacoustics Conference). Proc.: pp. 1213–1220.
- MELCHER, J. (2001): „Adaptive Impedanzregelung an strukturmechanischen Systemen.“ Dissertation Magdeburg, März 2001, Shaker Verlag, Aachen.
- MELCHER, J. (2008): „Der Trick der Bienen. Piezowaben – eine bionische Innovation in der Adaptronik.“ *DLR Nachrichten* **119**, 36–39.
- MERKLE, F. (1988): „Aktive und adaptive Optik in der Astronomie. Neue Technologien für zukünftige Großteleskope.“ *Physikalische Blätter* **44**, 439–446.
- MEYER, E.; GUICKING, D. (1974): „Schwingungslehre.“ Vieweg-Verlag, Braunschweig, ISBN 3 528 08254 2.

- MEYER, Y. et al. (2007a): „Active isolation of electronic micro-components with piezoelectrically transduced silicon MEMS devices.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 128–134.
- MEYER, Y.; COLLET, M. (2007b): „Mixed control for robust vibration isolation: numerical energy comparison for an active micro suspension device.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1361–1369.
- MEYER, Y.; COLLET, M. (2008): „Active damping of ‘parasitic’ vibration modes of a quartz sensor.“ *Smart Materials and Structures* **17** (6), Paper No. 065006.
- MIRZAEIFAR, R.; BAHAI, H.; SHAHAB, S. (2008): „Active control of natural frequencies of FGM plates by piezoelectric sensor/actuator pairs.“ *Smart Materials and Structures* **17** (4), Paper No. 045003.
- MOHEIMANI, S. O. R.; HALIM, D.; FLEMING, A. J. (2003): „Spatial Control of Vibration: Theory and Experiments.“ World Scientific Press (UK), London, ISBN 981-238-337-9.
- MONNER, H.-P.; BREITBACH, E. J.; HANSELKA, H. (2004): „Recent Results and Future of the German Major Project Adaptronics.“ 13th Intl. Conf. on Adaptive Structures and Technologies (ICAST 2002), Proc. (2004): pp. 259–269.
- MOON, S.-J. et al. (2007): „Structural vibration control using linear magnetostrictive actuators.“ *J. Sound Vib.* **302**, 875–891.
- MOREAU, D. J. et al. (2007): „Active Noise Control with a Virtual Acoustic Sensor in a Pure-Tone Diffuse Sound Field.“ ICSV14, 14th International Congress on Sound and Vibration, Cairns, AU. Proceedings (8 pp.)
- MOREAU, D. J. et al. (2008): „Active noise control at a moving location in a modally dense three-dimensional sound field using virtual sensing.“ Acoustics '08/155th Meeting of the Acoustical Society of America, Paris, June 29 – July 4, 2008. Abstract: *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 3063.
- MORGANS, A. S.; DOWLING, A. P. (2007): „Model-based control of combustion instabilities.“ *J. Sound Vib.* **299**, 261–282.
- MORISHITA, S.; MITSUI, J. (1992): „An Electronically Controlled Engine Mount Using Electro-Rheological Fluid.“ SAE Special Publication **936**, 97–103.
- MORRIS, D. J. et al. (2008): „A resonant frequency tunable, extensional mode piezoelectric vibration harvesting mechanism.“ *Smart Materials and Structures* **17** (6), Paper No. 065021.
- MORSE, P. M.; INGARD, K. U. (1968): „Theoretical Acoustics.“ McGraw-Hill Book Co., New York etc., ISBN 0-12-515425-0.
- MOUSTAKIDES, G. V. (1989): „Correcting the Instability Due to Finite Precision of the Fast Kalman Identification Algorithms.“ *Signal Processing* **18**, 33–42.
- NAGATOMO, Y. et al. (2007): „Variable reflection acoustic wall system by active sound radiation.“ *Acoust. Sci. Technol.* **28**, 84–88.
- NAKAMURA, Y. et al. (2007): „Application of Active Micro-vibration Control System using a Giant Magnetostrictive Actuator.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **18**, 1137–1148.
- NAKANO, K.; ELLIOTT, S. J.; RUSTIGHI, E. (2007): „A unified approach to optimal conditions of power harvesting using electromagnetic and piezoelectric transducers.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 948–958.
- NAKASHIMA, T.; ISE, S. (2004): „Active noise barrier for far field noise reduction.“ 18th International Congress on Acoustics (ICA 2004). Proc.: Paper We4.D.4, pp. III-2161 – II-2164.
- NELSON, P. A.; ELLIOTT, S. J. (1992): „Active Control of Sound.“ Academic Press, London. ISBN 0-12-515425-0.
- NESTOROVIC TRAJKOV, T.; KÖPPE, H.; GABBERT, U. (2006): „Vibration control of a funnel-shaped shell structure with distributed piezoelectric actuators and sensors.“ *Smart Materials and Structures* **15**, 1119–1132.
- NGO, H. T. (1996): „Tip Vortex Reduction System.“ U.S. Patent US 5,791,875. Anmeldung: 10. 9. 1996. Erteilung: 11. 8. 1998.
- NIEHOFF, W. (1999): „A simple optical microphone.“ *J. Acoust. Soc. Am.* 105 (1999) 1052 (Abstract) oder *ACUSTICA/acta acustica* 85 (1999), Suppl. 1, p. S126 (Abstract).
- NIKITCZUK, J.; WEINBERG, B.; MAVROIDIS, C. (2007): „Control of electro-rheological fluid based resistive torque elements for use in active rehabilitation devices.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 418–428.
- OGORZALEK, M. (2008): „Electronic Chaos Controllers – From Theory to Applications.“ In: E. Schöll and H. G. Schuster (Eds.): *Handbook of Chaos Control*, 2nd ed., Chapter 34, pp. 751–770.
- OH, HYUN-UNG (2004): „Experimental demonstration of an improved magneto-rheological fluid damper for suppression of vibration of a space flexible structure.“ *Smart Materials and Structures* **13**, 1238–1244.
- OHTA, H.; NARUSE, J.; HIRATA, T. (1985): „Vibration Reduction of Magnetic Disk Drive Mechanism. (1st Report, Vibration Reduction of Rotary Actuator Mechanism).“

- Bull. Japan Soc. Mech. Engrs. (JSME) **28** (241), 1489–1496.
- OLMI, C.; SONG, G.; MO, Y. L. (2007): „An innovative and multi-functional smart vibration platform.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1302–1309.
- OLSON, H. F. (1953): „Electronic Sound Absorber.“ U.S. Patent US 2,983,790. Anmeldung: 30. 4. 1953. Erteilung: 9. 5. 1961.
- OLSON, H. F. (1956): „Electronic Control of Noise, Vibration, and Reverberation.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **28**, 966–972.
- OR, S. W. et al. (2008): „Development of Magnetorheological Dampers with Embedded Piezoelectric Force Sensors for Structural Vibration Control.“ *J. of Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 1327–1338.
- ORTEGA, A.; LLEIDA, E.; MASGRAU, E. (2005): „Speech Reinforcement System for Car Cabin Communications.“ *IEEE Trans. Speech and Audio Processing* **13**, 917–929.
- OTT, E.; GREBOGI, C.; YORKE, Y. A. (1990): „Controlling chaos.“ *Phys. Rev. Lett.* **64**, 1196–1199.
- OZBULUT, O. E. et al. (2007): „A fuzzy model of superelastic shape memory alloys for vibration control in civil engineering applications.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 818–829.
- PAHLAVAN, L.; REZAEPAZHAND, J. (2007): „Dynamic response analysis and vibration control of a cantilever beam with a squeeze-mode electrorheological damper.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 2183–2189.
- PETERSEN, C. D. et al. (2007): „A moving zone of quiet for narrowband noise in a one-dimensional duct using virtual sensing.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 1459–1470.
- PETERSEN, N. R. (1980): „Design of large scale tuned mass dampers.“ In: H. H. E. Leipholz (ed.): *Structural Control*, North-Holland Publ. Co., pp. 581–596.
- PIRAUX, J.; MAZZANTI, S. (1985): „Broadband active noise attenuation in three-dimensional space.“ *Internoise 85, München. Proc.*: pp. 485–488.
- PLAZA, K. (2005): „Semiactive control strategies for a fully suspended bicycle.“ *Mechanics* **24**, 135–139.
- POPOVICH, S. R. (1997): „Fast Adapting Control System and Method.“ U.S. Patent US 5,602,929. Anmeldung: 30. 1. 1995. Erteilung: 11. 2. 1997.
- POST, M. L.; CORLE, T. C. (2006): „Separation Control Using Plasma Actuators: Dynamic Stall Vortex Control on Oscillating Airfoil.“ *AIAA J.* **44**, 3125–3135.
- PRECKEL, H.; RONNEBERGER, D. (1999): „Dynamic Control of the Jet-Edge-Flow.“ In: *Proc. of the IUTAM Symp. on Mechanics of Passive and Active Flow Control*, Kluwer Acad. Publ., p. 349–354.
- PREUMONT, A. et al. (2007): „A six-axis single-stage active vibration isolator based on Stewart platform.“ *J. Sound Vib.* **300**, 644–661.
- PUEBLA, H.; ALVAREZ-RAMIREZ, J. (2008): „Suppression of stick-slip in drillstrings: A control approach based on modeling error compensation.“ *J. Sound Vib.* **310**, 881–901.
- PYRAGAS, K. (1992): „Continuous control of chaos by self-controlling feedback.“ *Phys. Lett. A* **170**, 421–428.
- QIU, J.; TANI (1995): „Vibration control of a cylindrical shell used in MRI equipment.“ *Smart Materials and Structures* **4**, A75–A81.
- QIU, X.; LI, X.; AI, Y.; HANSEN, C. H. (2002): „A waveform synthesis algorithm for active control of transformer noise: Implementation.“ *Applied Acoustics* **63**, 467–479.
- QIU, X.; HANSEN, C. H. (2007): „Multidelay Adaptive Filters for Active Noise Control.“ *ICSV14, 14th International Congress on Sound and Vibration. Proceedings* (8 pp.)
- RABINOVITCH, O. (2007): „Piezoelectric Control of Edge Debonding in Beams Strengthened with Composite Materials: Part I – Analytical Modeling.“ *J. of Composite Materials* **41**, 525–546.
- RADER, A. et al. (2007): „Optimization of Piezoelectric Actuator Configuration on a Flexible Fin for Vibration Control using Genetic Algorithms.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **18**, 1015–1033.
- RAIDA, H.-J.; BSCHORR, O. (1996): „Gerichteter Stabstrahler.“ *Deutsches Patent DE 196 48 986 C1*. Anmeldung: 26. 11. 1996. Erteilung: 9. 4. 1998.
- RAM, Y. M.; MOTTERSHEAD, J. E. (2007): „Receptance Method in Active Vibration Control.“ *AIAA J.* **45**, 562–567.
- RAMESH KUMAR, K.; NARAYANAN, S. (2008): „Active vibration control of beams with optimal placement of piezoelectric sensor/actuator pairs.“ *Smart Materials and Structures* **17** (5), Paper No. 055008.
- RAO, M. S.; NARAYANAN, S. (2007): „Active control of wave propagation in multi-span beams using distributed piezoelectric actuators and sensors.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 2577–2594.

- RAY, L. R. et al. (2006): „Hybrid feedforward–feedback active noise reduction for hearing protection and communication.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 2026–2036.
- RAY, M. C.; BATRA, R. C. (2007): „A single-walled carbon nanotube reinforced 1–3 piezoelectric composite for active control of smart structures.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1936–1947.
- RAYLEIGH, LORD (1878): „The Theory of Sound“, Vol. II, Chapter XIV, § 282: „Two Sources of Like Pitch; Points of Silence; Experimental Methods“. MacMillan & Co, London etc., 1st ed. 1877/78: pp. 104–106; 2nd ed. 1894/96 und Reprints (Dover, New York): pp. 116–118.
- REDDY, B. A.; RAY, M. C. (2007): „Optimal Control of Smart Functionally Graded Plates Using Piezoelectric Fiber Reinforced Composites.“ *J. of Vibration and Control* **13**, 795–814.
- REES, L. E.; ELLIOTT, S. J. (2006): „Adaptive Algorithms for Active Sound-Profiling.“ *IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Processing* **14**, 711–719.
- REMINGTON, P. J. et al. (2008): „Reduction of turbulent boundary layer induced interior noise through active impedance control.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 1427–1438.
- RO, J. J. et al. (2007): „Flexural Vibration Control of the Circular Handlebars of a Bicycle by Using MFC Actuators.“ *J. of Vibration and Control* **13**, 969–987.
- RODDIER, F. (ed.) (1999): „Adaptive Optics in Astronomy.“ Cambridge University Press, New York. ISBN 0-521-55375-X.
- ROOZEN, N. B. et al. (2005): „Active vibration isolation applied to a Magnetic Resonance Imaging (MRI) scanner.“ 12th Intl. Congress on Sound and Vibration (ICSV), Lisbon, PT, Paper 236.
- RUSCHEWEYH, H.; GALEMANN, T.; MARSICO, C. (1988): „Ein frequenzgeregelter dynamischer Schwingungsdämpfer zur Dämpfung von Bauwerksschwingungen.“ *VDI-Berichte* **695**, 19–34.
- RUSTIGHI, E.; ELLIOTT, S. J. (2007): „Stochastic road excitation and control feasibility in a 2D linear tyre model.“ *J. Sound Vib.* **300**, 490–501.
- SAADAT, S. et al. (2002): „An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy.“ *Smart Materials and Structures* **11**, 218–229.
- SAHIN, H. et al. (2007): „Full-Scale Magnetorheological Fluid Dampers for Heavy Vehicle Rollover.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **18**, 1161–1167.
- SAKAMOTO, D.; OSHIMA, N.; FUKUDA, T. (2001): „Tuned sloshing damper using electro-rheological fluid.“ *Smart Materials and Structures* **10**, 963–969.
- SASSI, S. et al. (2005): „An innovative magnetorheological damper for automotive suspension: from design to experimental characterization.“ *Smart Materials and Structures* **14**, 811–822.
- SCHAAF, K. et al. (1992): „Aktive Geräuschkompensation im Fahrzeuginnenraum mit Hilfe virtueller Mikrofonpositionierung.“ *Fortschritte der Akustik – DAGA '92*, 917–920.
- SCHEUREN, J.; WIDMANN, U.; WINKLER, J. (1999): „Active Noise Control and Sound Quality Design in Motor Vehicles“. SAE Technical Paper Series, No. 1999-01-1846.
- SCHIRMACHER, R.; GUICKING, D. (1994): „Theory and implementation of a broadband active noise control system using a fast RLS algorithm.“ *Acta Acustica* **2**, 291–300.
- SCHIRMACHER, R. (1995): „Schnelle Algorithmen für adaptive IIR-Filter und ihre Anwendung in der aktiven Schallfeldbeeinflussung.“ *Dissertation Göttingen. Abstract: ACUSTICA – acta acustica* **82** (1996) 384.
- SCHÖLL, E.; SCHUSTER, H. G. (Eds.) (2008): „Handbook of Chaos Control.“ Wiley-VCH Verlag GmbH, Berlin etc., 2nd edition, ISBN 978-3-527-40605-0.
- SCHREIBER, L. (1971): „Schallschutz durch „Antilärmquellen“? Wirkliche Lärminderung nur durch Vernichtung der Schallenergie.“ *VDI-Nachrichten Nr. 15* (14. 4. 1971), S. 13.
- SCHROEDER, M. R.; GOTTLOB, D.; SIEBRASSE, K. F. (1974): „Comparative Study of European Concert Halls. Correlation of Subjective Preference with Geometric and Acoustic Parameters.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **56**, 1195–1201.
- SCHROEDER, M. R. (2007): persönliche Mitteilung.
- SCHÜRER, F. (1948): „Zur Theorie des Balancierens.“ *Math. Nachr.* **1**, 295–331.
- SCHUSTER, H. G. (ed.) (1999): „Handbook of Chaos Control.“ Wiley-VCH, Weinheim etc., ISBN 3-527-29436-8.
- SCHWARZSCHILD, B. (1993): „First of the Twin 10-Meter Keck Telescopes Starts Doing Astronomy.“ *Physics Today* **46** (10), 17–18.
- SCHWARZSCHILD, B. (1999): „Adaptive Optics at the New 8-Meter Gemini Telescope.“ *Physics Today* **52** (9), 23.

- SCHWARZSCHILD, B. (2003): „Infrared Adaptive Optics Reveals Stars Orbiting Within Light-Hours of the Milky Way’s Center.“ *Physics Today* **56** (2), 19–21.
- SHAHINPOOR, M. (1992): „Conceptual design, kinematics and dynamics of swimming robotic structures using ionic polymer gel muscles.“ *Smart Materials and Structures* **1**, 91–94.
- SHAHINPOOR, M. et al. (1998): „Ionic polymer-metal composites (IPMC) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles – a review.“ *Smart Materials and Structures* **7**, R15–R30.
- SHIH, H.-R.; TZOU, H. S. (2002): „Segment Method for Optimal Vibration Control of Photostrictive Smart Beams.“ 40th Anniversary Conference on Developments in Theoretical and Applied Mechanics. Proc.: Vol. 21, 444–448.
- SHIH, H.-R.; TZOU, H. S. (2007): „Photostrictive actuators for photonic control of shallow spherical shells.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1712–1717.
- SHOOK, D. et al. (2007): „A comparative study in the semi-active control of isolated structures.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1433–1446.
- SILVERBERG, M. H.; BENNING, R. D.; THOMPSON, N. B. (1993): „Outbound Noise Cancellation for Telephonic Handset.“ U.S. Patent US 5,406,622. Anmeldung: Sept. 2, 1993. Erteilung: April 11, 1995.
- SIMMERS Jr., G. E. et al. (2004): „Improved Piezoelectric Self-sensing Actuation.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **15**, 941–953.
- SLOETJES, P. J.; DE BOER, A. (2008): „Vibration Reduction and Power Generation with Piezoceramic Sheets Mounted to a Flexible Shaft.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 25–34.
- SNOWDON, J. C. (1968): „Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems.“ John Wiley & Sons, New York etc., Chapter 4: „Vibrations of the Dynamic Absorber.“
- SODANO, H. A.; BAE, J.-S. (2004): „Eddy Current Damping in Structures.“ *The Shock and Vibration Digest* **36**, 469–478.
- SODANO, H. A.; INMAN, D. J. (2007): „Non-contact vibration control system employing an active eddy current damper.“ *J. Sound Vib.* **305**, 596–613.
- SONDHI, M. M. (1970): „Closed Loop Vibration Echo Canceller Using Generalized Filter Networks.“ U.S. Patent US 3,499,999. Anmeldung: 31. 10. 1966. Erteilung: 10. 3. 1970.
- SONG, G.; GU, H. (2007): „Active Vibration Suppression of a Smart Flexible Beam Using a Sliding Mode Based Controller.“ *J. of Vibration and Control* **13**, 1095–1107.
- SONG, G.; MA, N. (2007): „Robust control of a shape memory alloy wire actuated flap.“ *Smart Materials and Structures* **16** (6), N51–N57.
- SOONG, T. T.; NATKE, H. G. (1988): „From Active Control to Active Structures.“ *VDI-Berichte* **695**, 1–18.
- SPROFERA, J. D. et al. (2007): „Structural acoustic control of plates with variable boundary conditions: Design methodology.“ *J. Acoust. Soc. Am.* **122**, 271–279.
- STEIN, G. J. (1997): „A Driver’s Seat with Active Suspension of Electropneumatic Type.“ *ASME J. of Vibration and Acoustics* **119**, 230–235.
- STEWART, D. (1965): „A platform with six degrees of freedom.“ *Proc. IMechE* **180**, 371–386.
- SUHARIYONO, A.; GOO, N. S.; PARK, H. C. (2008): „Use of Lightweight Piezo-composite Actuators to Suppress the Free Vibration of an Aluminum Beam.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 101–112.
- SUN, H. L. et al. (2007): „A novel kind of active resonator absorber and the simulation on its control effort.“ *J. Sound Vib.* **300**, 117–125.
- SUNG, K.-G. et al. (2007): „Discrete-time fuzzy sliding mode control for a vehicle suspension system featuring an electrorheological fluid damper.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 798–808.
- SWEI, S.-M.; GAO, P.; LIN, R. (2001): „A dynamic analysis for the suspension structure in hard disk drives using piezofilm actuators.“ *Smart Materials and Structures* **10**, 409–413.
- SWINBANKS, M. A. (1973): „The active control of sound propagation in long ducts.“ *J. Sound Vib.* **27**, 411–436.
- SWINBANKS, M. A. (1984): „The active control of noise and vibration and some applications in industry.“ *Proc. IMechE* **198A** (13), 281–288.
- TAKANE, S.; SONE, T. (2004): „A new theory for active suppression of reflected sound waves from the walls based on Kirchhoff-Helmholtz boundary integral equation.“ *Acoustical Science and Technology* **25**, 37–44.
- TAKI, M.; MORI, T.; MURAKAMI, S. (1991): „Sound Attenuating System“. U.S. Patent US 5,347,585. Anmeldung: 10. 9. 1991. Erteilung: 13. 9. 1994.

- TANG, D.; GAVIN, H. P.; DOWELL, E. H. (2004): „Study of airfoil gust response alleviation using an electromagnetic dry friction damper. Part 1: Theory“ and „... Part 2: Experiment.“ J. Sound Vib. **269**, 853–874 and 875–897.
- THOMAS, J. K. et al. (2008): „Eigenvalue equalization filtered-x algorithm for the multichannel active noise control of stationary and nonstationary signals.“ J. Acoust. Soc. Am. **123**, 4238–4249.
- TOKHI, M. O.; LEITCH, R. R. (1992): „Active Noise Control.“ The Oxford Engineering Sciences Series, Vol. 29. Clarendon Press (Oxford University Press), Oxford, UK. ISBN 0-19-856243-8.
- TUZCU, I.; MEIROVITCH, L. (2006): „Control of flying flexible aircraft using control surfaces and dispersed piezoelectric actuators.“ Smart Materials and Structures **15**, 893–903.
- TYRRELL, J. (2005): „Optical microphone aids MRI scans.“ Opto & Laser Europe (OLE), No. 126, p. 11 (March 2005).
- TYSON, R. K. (1991): „Principles of Adaptive Optics.“ Academic Press, San Diego, CA, US, ISBN 0-12-705900-8.
- UOSUKAINEN, S. (2003): „Active sound scatterers based on the JMC method“. J. Sound Vib. **267**, 979–1005.
- VANDEN BERGHE, J.; WOUTERS, J. (1998): „An adaptive noise canceller for hearing aids using two nearby microphones.“ J. Acoust. Soc. Am. **103**, 3621–3626.
- VANG, A. (1942): „Vibration Dampening.“ U.S. Patent US 2,361,071. Anmeldung: 23. 9. 1942. Erteilung: 24. 10. 1944.
- VEIT, I. (1988): „Gehörschutz-Kopfhörer. Elektronik kontra Lärm.“ Funkschau **60** (23), 50–52.
- VEIT, I. (1997): „Anordnung und Verfahren zur aktiven Reduzierung von Reifenschwingungen.“ Deutsches Patent DE 19723 516 C1. Anmeldung: 5. 6. 1997. Erteilung: 29. 10. 1998.
- VISWAMURTHY, S. R.; RAO, A. K.; GANGULI, R. (2007): „Dynamic hysteresis of piezoceramic stack actuators used in helicopter vibration control: experiments and simulations.“ Smart Materials and Structures **16**, 1109–1119.
- VISWAMURTHY, S. R.; GANGULI, R. (2008): „Using the Complete Authority of Multiple Active Trailing-edge Flaps for Helicopter Vibration Control.“ J. of Vibration and Control **14**, 1175–1199.
- VOGEL, C. R.; YANG, Q. (2006): „Modeling, simulation, and open-loop control of a continuous facesheet MEMS deformable mirror.“ J. Optical Soc. Am. (JOSA) A **23**, 1074–1081.
- WANG, A.-P.; LIN, Y.-H. (2007): „Vibration control of a tall building subjected to earthquake excitation.“ J. Sound Vib. **299**, 757–773.
- WANG, J.; MENG, G. (2003): „Experimental study on stability of an MR fluid damper-rotor-journal bearing system.“ J. Sound Vib. **262**, 999–1007.
- WANG, J. et al. (2006): „Active vibration control of a plate-like structure with discontinuous boundary conditions.“ Smart Materials and Structures **15**, N51–N60.
- WANG, L.; YUAN, F. G. (2008): „Vibration energy harvesting by magnetostrictive material.“ Smart Materials and Structures **17**, Paper No. 045009.
- WANG, X. F.; CHEN, G. (2000): „Chaotification via arbitrarily small feedback controls: Theory, method, and applications.“ Int. J. of Bifurcation and Chaos **10**, 549–570.
- WELTIN, U. (1993): „Aktive Schwingungskompensation bei Verbrennungsmotoren.“ Fortschrittsberichte VDI, Reihe 12, Nr. 179.
- WENZEL, M. (1992): „Untersuchungen zur breitbandigen Messung und Regelung der akustischen Wandimpedanz an einer aktiven Schallwand mit adaptiven Filtern.“ Dissertation Göttingen.
- WICKERN, G. (1997): „Windkanal.“ Deutsche Patentanmeldung DE 197 02 390 A1. Anmeldung: 24.1.1997. Veröffentlichung: 30.7.1998.
- WIDROW, B. et al. (1975): „Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications.“ Proc. IEEE **63**, 1692–1716.
- WIDROW, B. (1983a): „Seismic Exploration Method and Apparatus for Cancelling Interference from Seismic Vibration Source.“ U.S. Patent US 4,556,962. Anmeldung: 21. 4. 1983. Erteilung: 3. 12. 1985.
- WIDROW, B. (1983b): „ECG Enhancement by Adaptive Cancellation of Electrosurgical Interference.“ U.S. Patent US 4,537,200. Anmeldung: 7. 7. 1983. Erteilung: 27. 8. 1985.
- WIDROW, B.; STEARNS, S. D. (1985): „Adaptive Signal Processing.“ Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA. ISBN 0-13-004029-0.
- WIMMEL, R.; SIEBALD, H. (2008): persönliche Mitteilung.

- WINKLER, J.; ELLIOTT, S. J. (1994): „Aktive Kompensation von breitbandigem Schall in Kanälen mittels zweier Lautsprecher.“ In: Fortschritte der Akustik – DAGA '94, DPG-GmbH, 529–532. Auch: „Adaptive Control of Broadband Sound in Ducts Using a Pair of Loudspeakers.“ *Acustica* **81** (1995) 475–488.
- WU, X.; CAI, J.; WANG, M. (2007): „Robust synchronization of chaotic horizontal platform systems with phase difference.“ *J. Sound Vib.* **305**, 481–491.
- XU, Y. L.; ZHOU, H. J. (2007): „Damping cable vibration for a cable-stayed bridge using adjustable fluid dampers.“ *J. Sound Vib.* **306**, 349–360.
- YAMADA, H.; SASAKI, M.; NAM, Y. (2008): „Active Vibration Control of a Micro-Actuator for Hard Disk Drives using Self-Sensing Actuator.“ *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **19**, 113–123.
- YANG, Q.; FTACLAS, C.; CHUN, M. (2006): „Wavefront correction with high-order curvature adaptive optics systems.“ *J. Optical Soc. Am. (JOSA) A* **23**, 1375–1381.
- YAU, H.-T.; CHEN, C.-K.; CHEN, C.-L. (2000): „Sliding mode control of chaotic systems with uncertainties.“ *Int. J. of Bifurcation and Chaos* **10**, 1139–1147.
- YEH, J.-Y. (2007): „Vibration control of a sandwich annular plate with an electrorheological fluid core layer.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 837–842.
- YU, X. et al. (2007) „Active Control of Sound Transmission Through Windows With Carbon Nanotube-Based Transparent Actuators.“ *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* **15**, 704–714.
- YUAN, J. (2007): „Adaptive Laguerre filters for active noise control.“ *Applied Acoustics* **68**, 86–96.
- YUN, G.-Y.; KIM, H. S.; KIM, J. (2008): „Blocked force measurement of an electro-active paper actuator using a cantilevered force transducer.“ *Smart Materials and Structures* **17** (2), Paper No. 025021.
- YUN, S.; KIM, J. (2007): „A bending electro-active paper actuator made by mixing multi-walled carbon nanotubes and cellulose.“ *Smart Materials and Structures* **16**, 1471–1476.
- ZHAO, L. J.; KIM, H. S.; KIM, J. (2007): „Noise Reduction Using Smart Panel with Shunt Circuit.“ *AIAA J.* **45**, 79–89.
- ZHOU, Q.; NIELSEN, S. R. K.; QU, W. L. (2006): „Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with magnetorheological dampers.“ *J. Sound Vib.* **296**, 1–22.
- ZOMMER, S. et al. (2006): „Simulated annealing in ocular adaptive optics.“ *Optics Letters* **31**, 939–941.