Entwicklung, Bedeutung und Perspektiven der Ingenieurakustik zwischen physikalischer Wissenschaft und angewandter Technologie

Joachim Scheuren
Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg, E-Mail:Joachim.Scheuren@mbbm.com

Kurzfassung

Es war der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts vorbehalten, die damals als abgeschlossen, ohne neue Herausforderungen unterschätzte Akustik an den Erfordernissen des schnellen Wiederaufbaus und der damit einhergehenden rasanten Technisierung neu auszurichten. Dabei gewann die Ingenieurakustik schlagartig an Bedeutung, weil immer effizientere Bau- und Produktionsmethoden gleichzeitig wachsende Qualitätsansprüche erfüllen mussten. Seitdem hat sie sich von einer vereinzelt hinzugezogenen Spezialdisziplin zu einer unverzichtbaren, breit eingesetzten Querschnittsdisziplin entwickelt, ohne die der optimierte Betrieb, die Umweltverträglichkeit sowie weithin akzeptierte Klangattribute technischer Produkte und Prozesse nicht erreichbar sind.

Mit Beiträgen zur akustischen Forschung, der Umsetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in praktische Lösungskonzepte, der darauf aufbauenden Unterstützung bei der technischen Realisierung und schließlich mit der Anwendung neuer Methoden zur Lösung praktischer akustischer Probleme hat die Ingenieurakustik dem iterativen Zyklus akustischer Forschung, Entwicklung und Anwendung viele wichtige Impulse gegeben und damit die aktuelle Bedeutung der gesamten Akustik stark mitgeprägt.

Der Vortrag zeigt dies und die resultierende Leistungsfähigkeit moderner Ingenieurakustik an exemplarischen Beispielen der Lärmbekämpfung und Klanggestaltung auf und weist an den Leistungsgrenzen der heute verfügbaren Verfahren und Lösungen die Notwendigkeit weiterer technisch/wissenschaftlicher Fortschritte nach. Denn die wachsende Technisierung und Mobilisierung kann auch in Zukunft nur mit einer leistungsfähig weiterentwickelten und interdisziplinär gut eingebundenen Ingenieurakustik anspruchsvoll und umweltkompatibel gestaltet werden.

Einleitung

Obwohl die Akustik zu den grundlegenden, auch ältesten Zweigen der klassischen Physik gehört, war es wohl selbst im 19. Jahrhundert noch kaum vorstellbar, welch immense technologische Alltagsbedeutung ihr einmal zukommen sollte. Es bedurfte schon einer weit fortgeschrittenen Technisierung und Industrialisierung, um festzustellen, dass die damit verbundenen Anforderungen eine systematische Einbindung akustischer Aspekte erfordern. In wachsendem Maße brauchten und nutzten Ingenieure die von ihnen benötigte Akustik – die Ingenieurakustik.

Heute ist die Ingenieurakustik nicht nur ein bedeutender Zweig moderner Akustik sondern, durch ihre wichtige interdisziplinäre Stellung, auch ein unverzichtbarer Bestandteil des gesamten Ingenieurwesens, ohne den die Funktionalität und Akzeptanz weiter Bereiche moderner Technik nicht zufriedenstellend erreicht werden können.

Neben der großen Bedeutung, die die Ingenieurakustik somit als wichtige attributive Technik hat, trägt auch die Vielfalt ihrer interdisziplinären Vernetzung, ihrer Stellung *zwischen* den unterschiedlichen Ingenieurdisziplinen zu ihrer großen Faszination bei. Diese Faszination steigert sich - zumindest für den Verfasser - durch eine weitere *Zwischen*stellung, die sich aus der kontinuierlichen Umsetzung wissenschaftlicher Einsichten in die technologische Praxis und - umgekehrt - aus der praxisbezogenen Formulierung von neuen Anforderungen an die Wissenschaft ergibt. Beides, das progressive Vorantreiben eines iterativen Entwicklungsprozesses zwischen wissenschaftlicher Forschung und technologischer Anwendung wie auch die bewusste Aktivierung der vielen iterativen Schnittstellen zu anderen Ingenieurdisziplinen prägen den Erfolg angewandter Ingenieurakustik entscheidend. Deshalb wird im Folgenden versucht, die Ingenieurakustik, ihre Entwicklung, Bedeutung und Perspektiven im Interaktionsfeld dieser Zwischenstellungen beispielhaft darzustellen.

Nach einem kurzen Abriss der historischen Entwicklung wird das Spezifische der interaktiven Wechselbeziehung zwischen anderen Ingenieurdisziplinen wie auch zwischen Forschung und Technologie am Beispiel der Reifen/Fahrbahn-Rollgeräuschminderung aufgezeigt und erläutert. Daraus lassen sich wichtige Grundeinsichten über das spezielle Wesen rechnerischer Modellbildungen in der Akustik ableiten, die exemplarisch auch an anderen akustischen Anwendungsfeldern aufgezeigt und erläutert werden.

Abschließend werden den bei der Rollgeräuschminderung gewonnen Einsichten zur Ergänzung und Abrundung die Entwicklungsschritte des in vielerlei Hinsicht anders gelagerten Bereichs der aktiven Schall- und Schwingungsbeeinflussung gegenübergestellt.

Entwicklung der Ingenieurakustik

Die folgenden Anmerkungen zur historischen Entwicklung der Ingenieurakustik orientieren sich an früheren Aufsätzen des Verfassers ([1],[2]), in denen insbesondere die Geschichte der technischen Lärmminderung ausführlich nachgezeichnet wurde.

Akustik vor 1900

Auch wenn der Begriff „Akustik“ erst im Jahr 1693 erstmalig auftaucht: die Lehre vom Schall kann bis zur Wiege unserer Kultur (z.B. Pythagoras) zurückverfolgt und nachgewiesen werden. Ausgehend von der Rückführung qualitativer Hör/Ton-Erlebnisse auf quantitative Zahlenverhältnisse durch Pythagoras haben die Kulturen unserer Welt über viele Jahrhunderte ein kontinuierlich weiterentwickeltes Verständ-

nis des Hörens und seiner physikalischen Ursachen und Zusammenhänge entwickelt und bereitgestellt.

Folgerichtig konnte das wissenschaftliche Verständnis der Akustik schon im 19. Jahrhundert zu umfassenden Darstellungen und Theorien des Schalls zusammengefasst werden. Eindrucksvolle Beispiele sind Hermann von Helmholtz' „Lehre von den Tonempfindungen" (1863, [3]), in der dieser das akustische Wissen seiner Zeit (Physik, Physiologie und Psychologie) erheblich weiterentwickelt und umfassend dargestellt hat, sowie Lord Rayleigh's „Theory of Sound" (1877/78, [4]), mit der die physikalischen und mathematischen Grundlagen der Akustik theoretisch durchdrungen und geschlossen dargestellt wurden.

Neben diesen hervorstechenden Repräsentanten der physikalischen Akustik haben selbstverständlich viele weitere hervorragende Wissenschaftler den damaligen Stand des Wissens fortgeschrieben, etwa Tyndall oder Kirchhoff. Wieder andere, z.B. Reis, Bell und Edison, haben mit ihren Entdeckungen und Erfindungen auch der ingenieurbezogenen Akustik schon im 19. Jahrhundert große Erfolge beschert, die sich schon damals in einer rasanten Entwicklung elektroakustischer Technologien wiederspiegelten ([5]).

Akustik von 1900 bis 1950

Die umfassende theoretisch-physikalische Durchdringung der Akustik im 19. Jahrhundert fand im 20. Jahrhundert einen weiteren Höhepunkt in der rigorosen mathematischen Behandlung der akustische Felder bestimmenden Differentialgleichungen. Die diesbezüglichen Ergebnisse langjähriger systematischer und überaus erfolgreicher Arbeiten der „Göttinger Schule" wurden 1924 in der zweibändigen Abhandlung „Methoden der Mathematischen Physik" von R. Courant und D. Hilbert ([6]) umfassend dargestellt.

Im Übrigen war die Entwicklung der Akustik im 20. Jahrhundert in wachsendem Maße von der Auseinandersetzung mit dem im 19. Jahrhundert begonnenen Industriezeitalter geprägt. Sie machte spezielle, auch praxisorientierte Untersuchungen und Entwicklungen notwendig, die sich an den Erfordernissen der zunehmenden Technisierung und der benötigten Messtechnik ausrichteten. Beispiele waren:

- Entdeckung und Formulierung des Bergerschen Massegesetzes zur Abschätzung der Schalldämmung von Wänden (1910),
- Untersuchung und erste systematische Formulierung raumakustischer Zusammenhänge durch W.C. Sabine,
- Einführung des dB, der Lautstärke (in Phon) und des Lautstärkemessers durch Barkhausen (1926)
- Viele praktische, aus Abschätzungen und messtechnischen Untersuchungen resultierende Näherungsbeziehungen wir z.B. die sog. Piening Formel (1937) zur Abschätzung der Kanaldämpfung von Schalldämpfern.
- Herleitung (1942) und experimenteller Nachweis (1948) des Koinzidenzeffekts zur Erklärung der Abstrahlung von ebenen Flächen durch L. Cremer
- Theorie des Klopfschalls (Cremer, 1942)
- Entwicklung und Einsatz neuartiger mess- und prüftechnischer Geräte wie Pegelschreiber und Hammerwerk (sog. „Normtrampler")
- Konstituierung und erfolgreiche Arbeit des VDI-Fachausschusses „Lärmminderung" (1930)
- Erstveröffentlichung einer DIN 4109 – Schallschutz im Wohnungsbau (1944)
- Entwicklung und Einsatz von Lärmschutztechnik, etwa als Ohrenschutz, isolierende Bauweisen oder Lärmminderungsmaßnahmen an Maschinen.

Hinweise zum Stand der Lärmschutztechnik um 1950 finden sich in [1] und [7].

Diese technisch/physikalischen Entwicklungen gingen einher mit der Entwicklung des öffentlichen Interesses an den aktuell gewordenen Fragen des Lärms und der Lärmbekämpfung. Nach der literarischen Überlieferung vieler wortreicher Klagen (Nietzsche: „…frecher, hirnlähmender Lärm ..") hat der 1908 in Deutschland gegründete „Antilärmverein" nachdrücklich auf die Lärmproblematik hingewiesen und damit wesentlich zur allmählichen Verankerung des Lärmbegriffs im öffentlichen Bewusstsein beigetragen. Zusammen mit der Einsicht, dass Lärm Krankheiten verursachen kann, führte dies dazu, dass der Lärm und seine Bekämpfung durch lärmbezogene Verfügungen, Beschränkungen und Auflagen als öffentliche Aufgabe anerkannt wurden.

Akustik nach 1950

Um die Mitte des 20 Jahrhunderts wurde die physikalisch gut verstandene Akustik vielfach als abgeschlossen, ohne neue Herausforderungen unterschätzt. Das änderte sich freilich schlagartig, als der schnelle und billige Wiederaufbau von Wohnungen und Industrie zwangsläufig zu unzureichendem Schallschutz führte. Dies wurde umso bewusster wahrgenommen, als die rasant eingeleitete Technisierung mit wachsendem Wohlstand auch von wachsenden Ansprüchen an Lebensqualität und Umweltverträglichkeit begleitet wurde. Auf diese Weise entwickelte sich die Ingenieurakustik schon bald und dann immer mehr zu einer unverzichtbaren Querschnittsdisziplin, ohne deren frühzeitige Einbindung ein optimaler Betrieb wie auch die Umweltverträglichkeit technischer Systeme, Anlagen und Prozesse, aber auch steigende Funktions- und Komfortansprüche technischer Produkte immer schwerer realisierbar wurden.

Gefördert wurde die daraus resultierende wachsende Verankerung akustischer Fragestellungen in der ingenieurtechnischen Planung und Realisierung durch fortschrittliche Richtlinien und Vorschriften, die die zunächst aus dem Unversehrtheitsanspruch des BGB abgeleiteten Schallschutzmaßnahmen mehr und mehr zum Gegenstand eines verbindlichen Regelwerks machten. Beispiele für solche kontinuierlich ausgebaute Vorschriften sind die zahlreiche damals entstandene VDI-Richtlinien und DIN Normen sowie die 1968 erstmals veröffentlichte „Technische Anleitung (TA) Lärm".

Wegen seiner direkten Verbindung zu praktischen technischen Aufgabestellungen war der durch den unmittelbaren Nachkriegsbedarf ausgelöste Impuls eine Herausforderung für alle technisch/physikalischen Wirkungsebenen: die akustische Forschung, die technologische Umsetzung und die praktische Anwendung. Zur Erweiterung akustischer Forschungskapazitäten entstanden neben den traditionsreichen Akustik-Instituten an den Universitäten Dresden und

Göttingen neue, zukunftsweisende Einrichtungen etwa in Berlin mit dem Institut für Technische Akustik der TU Berlin (1958) und dem (außeruniversitären) Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung (HHI,1945) oder in Southampton mit dem Institute of Sound and Vibration Research (ISVR,1963).

Aus diesen wissenschaftlichen Zentren heraus bildeten sich alsbald akustische Ingenieurbüros, die den mit akustischen Fragestellungen neu konfrontierten Unternehmen und Behörden ihr Spezialwissen und geeignete Lösungen zur Verfügung stellten und dabei oft auch den Impuls für den Aufbau eigener akustische Fachabteilungen in zahlreichen Unternehmen gaben. Der dabei erarbeitete Stand des Wissens kann in vielen Kompendien und ihren Folgeauflagen nachvollzogen werden (z.B.[8],[9]).

Obwohl immer mehr private und öffentliche Einrichtungen über eigene akustische Fachkompetenzen verfügen, kommt spezialisierten akustischen Ingenieurunternehmen bis heute eine zentrale Bedeutung zu, die sich neben dem spezifischen Wissens- und Erfahrungspotential vor allem auch auf den Austausch akustischer Einsichten und Methoden zwischen unterschiedlichen Anwendungsfeldern und insbesondere zwischen Forschung, Entwicklung und Anwendung gründet.

Genau diese mehrfache *Zwischen*stellung, diese interdisziplinäre Beteiligung, oft auch Mitwirkung an allen Stationen des iterativen Zyklus akustischer Forschung, Entwicklung und Anwendung trägt erheblich zur Faszination, zur prozessualen und fachlichen Vielseitigkeit ingenieurakustischer Aufgaben bei. Abbildung 1 verdeutlicht dies an einer schematischen Darstellung des zyklischen Ablaufs, in dem die Ingenieurakustik in akustische Forschung eingebunden sein kann, dann mithilft, wissenschaftliche Ergebnisse in praktische Lösungskonzepte umzusetzen, auch notwendige Entwicklungen bis hin zur technischen Realisierung unterstützt, somit immer wieder neue Methoden für die Lösung praktischer akustischer Probleme bereitstellt und schließlich aus den Erfahrungen der Praxis konkreten Forschungsbedarf identifiziert und formuliert.

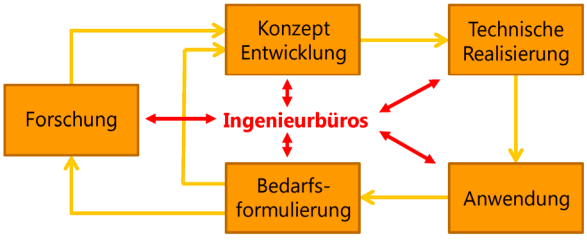

Abbildung 1: Iterativer Zyklus aus Forschung, Entwicklung, technischer Realisierung, Anwendung und Formulierung zusätzlichen Forschungsbedarfs.

Fachlich konzentrierten sich die Interessen und Bemühungen in der Nachkriegszeit zunächst auf Anwendungen im Wohnungsbau, auf Industrie- und Gewerbeanlagen sowie auf passive Maßnahmen zum Schutz vor Verkehrs- und Arbeitslärm. Bedingt durch den hohen Wiederaufbaubedarf waren die 50er und frühen 60er Jahre die Jahre der Bauakustik, in denen der Schallschutz an Gebäuden die Arbeit der Ingenieurakustik beherrschte und den Grundstein für vertieftes, auch in der Praxis anwendbares physikalisches Verständnis, daraus abgeleitete praktische Verbesserungen des baulichen Schallschutzes sowie die Entwicklung und Einführung handhabbarer bauakustischer Begriffe, Kenngrößen und Regelwerke.

Als dann die gröbsten Wohnungsbaudefizite der Nachkriegszeit Mitte der 60er Jahre behoben waren, trat der Schallschutz an Industrie- und Gewerbeanlagen in den Vordergrund. Auch hier gelang es, weiter entwickeltes physikalisches Verständnis vielfältiger Schallentstehungsmechanismen in erheblich verbesserte Schallschutztechnik umzusetzen und so aufzuzeigen und sicherzustellen, dass Industrieanlagen auch in dicht besiedelten Gebieten umweltverträglich betrieben werden können.

Nachdem in den ersten zwei bis drei Jahrzehnten nach 1945 der Schallschutz in Gebäuden und in der Industrie im Vordergrund stand, rückte auch der (zunehmende) Verkehrslärm mehr und mehr in den Mittelpunkt ingenieurakustischer Interessen. Genau wie in den anderen Anwendungsbereichen zog dies zunächst individuelle Einzelmaßnahmen, dann geeignete Vorschriften und Richtlinien und schließlich systematische Untersuchungen nach sich.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen als Ergebnis einer solchen Einzelmaßnahme die mutmaßlich erste, aus einer Prognoserechnung in unebenem Gelände abgeleitete Lärmkarte einer Autobahn und den damit ausgelegten ersten Lärmschutzwall in Deutschland ([10]). Anders als heute war diese Lärmkarte nicht das Ergebnis von in Regelwerken genau vorgegebenen Ausbreitungsrechnungen. Da solche Regelwerke noch nicht existierten wurden Lärmkarten vielmehr individuell errechnet, dienten dann später aber als Ausgangspunkt für die Erstellung künftiger Regelwerke.

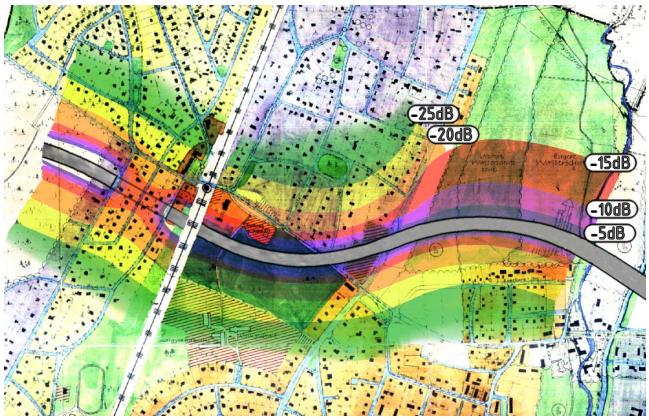

Abbildung 2: Erste Lärmkarte in Deutschland (1966)

Abbildung 3: Erster Lärmschutzwall in Deutschland (1970)

Im Unterschied zur Bau- und Industrieakustik, wo wirksame Schallschutzmaßnahmen bevorzugt auf die Quellen des

Schalls (primärer Schallschutz) ausgerichtet waren, beschränkten sich damals die meisten Maßnahmen zum Schutz vor Verkehrslärm auf die Beeinflussung des schon entstandenen, sich ausbreitenden Schalls (sekundärer Schallschutz). Das lag daran, dass in den 70er Jahren noch kein ausreichendes Verständnis für die komplexen Mechanismen der Rollgeräuschentstehung vorhanden war. Schall lässt sich aber umso wirkungsvoller beeinflussen, je besser man seine Entstehung verstanden hat.

Getrieben von der wachsenden Belastung durch Verkehrslärm und der seit den späten 60er Jahren anerkannten Dominanz des Reifenrollgeräuschs ab ca. 30 km/h Fahrgeschwindigkeit wurde die systematische Erforschung der Schallentstehungsmechanismen beim Rollen dann seit den 70er Jahren auf breiter Grundlage in Angriff genommen.

Diese Entwicklung wird im Folgenden in ihren wesentlichen Schritten nachgezeichnet. Dabei kommt es hier nicht nur auf eine logisch plausible Beschreibung der aufeinander aufbauenden Modellansätze unterschiedlicher Komplexität sondern mehr noch auf die exemplarische iterative Entwicklung solcher Modellansätze im Interessenfeld von physikalischer Wissenschaft und praktischer Anwendbarkeit an.

Minderung von Rollgeräuschen (Reifen/Fahrbahn)

Am Beginn systematischer Bemühungen, die Mechanismen der Schallentstehung beim Rollen von Reifen auf Fahrbahnen zu verstehen und durch geeignete Modelle zu charakterisieren, standen umfassende empirisch/phänomenologische Untersuchungen. Dabei gelang es in zahlreichen Messreihen, systematische Abhängigkeiten des Rollgeräuschs von wesentlichen Parametern wie Fahrgeschwindigkeit, Material- und Oberflächenparametern zu erkennen und Modellansätzen zugrunde zu legen.

Der daraus resultierende Stand von Wissenschaft und Technik wurde 1979 auf einer internationalen Fachkonferenz in Schweden ([11]) präsentiert und intensiv diskutiert. In der Folge wurden weiterführende Forschungen in mehreren Ländern auf eine breite Grundlage gestellt. Auch in Deutschland waren die 80er Jahre durch breitangelegte Forschungsprogramme und –initiativen gekennzeichnet, bei denen zunächst die Eignung unterschiedlicher Reifenmodelle untersucht und durch Validierungsmessungen überprüft wurde. Die große Bedeutung, die diesen Aktivitäten beigemessen wurde, ist auch aus der breiten Diskussion einer deutschen Initiative für ein „Nationales Rollgeräuschinstitut“ Ende der 80er Jahre ersichtlich. Obwohl ein solches nicht gegründet wurde, haben konzertierte nationale und später auch europäische Förderprogramme wesentlich dazu beigetragen, das Verständnis der komplexen Rollvorgänge voranzutreiben.

Beim Abrollen von Reifen wird der abgestrahlte Schall im Wesentlichen von zwei Entstehungsmechanismen bestimmt. Die mechanische Anregung des Reifens führt zu radialen und tangentialen Schwingungen, die die sie umgebende Luft ihrerseits zu Schwingungen anregen und als Schall abgestrahlt werden können. Die umgebende Luft kann aber auch unmittelbar durch Einschluss, Kompression und Freigabe eingeschlossener Luftvolumina in Profilnischen zu Schallschwingungen angeregt werden. Man spricht dann von aerodynamischer Anregung (air-pumping). Beide Entstehungsmechanismen sind heute prinzipiell anerkannt und gut verstanden.

Der letztendlich vom rollenden Reifen abgestrahlte Schall hängt jedoch nicht nur von diesen Quellen sondern entscheidend auch von der Strahlungsimpedanz ab, auf die die Schallquellen einwirken. Dabei kommt dem mit der Vergrößerung des Abstands von Reifen und Fahrbahn in unmittelbarer Umgebung des Kontaktbereichs verbundenen Horneffekt eine besondere Bedeutung zu. Weil hier, zusätzlich zum Reifen, auch die relevanten Eigenschaften der Fahrbahn ins Spiel kommen, ist die Strahlungsimpedanz nicht nur für das physikalische Verständnis sondern auch für Maßnahmen zur Geräuschbeeinflussung von großer Bedeutung.

Im Hinblick auf solche Maßnahmen ist es wichtig, über ein praktikables Modell zu verfügen, das den Einfluss wichtiger Entwurfs und Konstruktionsparameter korrekt abbildet. Wenn man aber alle physikalischen Abhängigkeiten berücksichtigen will, kann die Zahl der benötigten Parameter mit wachsender Modellierungsgenauigkeit beliebig groß werden. Für die praktischen Aufgaben und Ziele der Ingenieurakustik ist es daher wichtig, Modelle und Modellparameter zu finden und zu identifizieren, deren wichtigste, auch für Maßnahmen wesentliche Einfluss- und Beeinflussungsgrößen mit handhabbarem Aufwand ermittelt werden können.

Entscheidend für die Praktikabilität solcher parametrischer Modelle sind Rechenzeiten, die in den typischen iterativen Arbeitsprozess eines Entwurfsingenieurs integriert werden können. Denn nur dann fügen sich die notwendigen Modifikationsrechnungen nahtlos in die interaktiven Arbeitsabläufe ein. Dies ist auch der Grund, weshalb physikalisch begründete Modelle in der Regel große praktische Vorteile gegenüber rein oder überwiegend numerischen Modellen besitzen. Trotz immenser Fortschritte in der Rechentechnik wird es sich deshalb auch in der absehbaren Zukunft immer lohnen, Modelle auf bekannte physikalische Abhängigkeiten zu stützen bzw. auch durch vereinfachte Ersatzmodelle anzunähern, für die solche parametrischen Abhängigkeiten bekannt sind.

Für ingenieurakustische Anwendungen brauchbare Modelle setzen also einen Kompromiss zwischen ausreichender Modellierungsgenauigkeit und handhabbarem Berechnungsaufwand voraus. Wie solche Kompromisse schrittweise gefunden werden können, wird im Folgenden exemplarisch an der sukzessiven Entwicklung parametrischer Reifenmodelle verdeutlicht.

Reifenmodellierung

Einen wichtigen Ausgangspunkt für die rechnerische Modellierung des Schwingungsverhaltens rollender Reifen durch ein vereinfachtes mechanisches Ersatzmodell bildete in den 60er Jahren ein Ringmodell ([12]), bei dem der Reifen gemäß Abbildung 4 durch einen mit der Felge elastisch gekoppelten Ring geeigneten Materials modelliert wurde. Der wesentliche Vorteil solcher Ersatzmodelle ist, dass ihr dynamisches Verhalten durch ein System partieller Differentialgleichungen beschrieben wird, die von einer vorgege-

benen Zahl von Parametern (z.B. Materialkonstanten) abhängen und somit ein parametrisches Modell definieren. Durch die physikalischen Annahmen und Einsichten folgende Zugrundelegung parametrischer Modellansätze (wie z.B. Differentialgleichungen) wird die vollständige Beschreibung des physikalischen Systemverhaltens auf die Bestimmung einer vorgegebenen Menge von Parametern zurückgeführt. Es ist daher immer lohnend, einem Modell bekannte physikalische Gesetzmäßigkeiten zugrunde zu legen und nur die verbleibenden unbekannten Systemeigenschaften anderen, z.B. rein numerisch oder auch statistisch ermittelten Zusammenhängen zu überlassen.

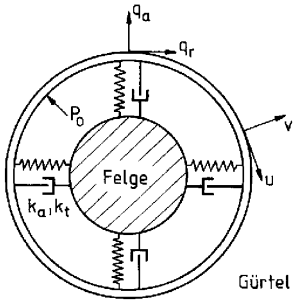

Abbildung 4: Ringmodell als vereinfachtes mechanisches Ersatzmodell des rollenden Reifens.

Die Eignung des hier betrachteten Ringmodells bei Anregung durch den Fahrbahnkontakt kann zunächst anhand der Eingangsadmittanz überprüft werden. Abbildung 5 zeigt den gemessenen Frequenzverlauf des Betrags der Punkteingangsadmittanz (Mobilität) eines typischen Reifens (blaue Kurve, [13]).

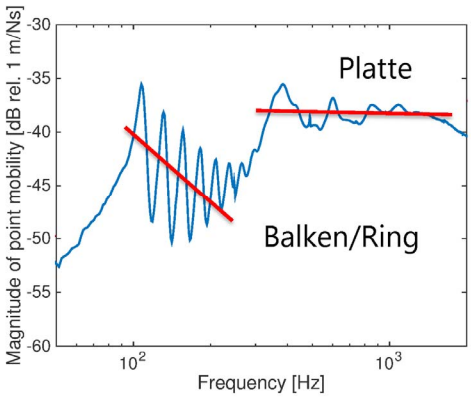

Abbildung 5: Gemessener Betrag der Punkteingangsadmittanz (Mobilität, blaue Kurve) eines Reifens und qualitative Verläufe der Eingangsadmittanz eines Balkens/Rings und einer Platte.

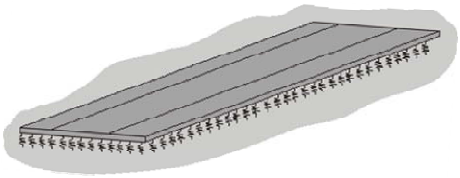

Abbildung 6: Elastisch gelagertes Plattenmodell als vereinfachtes mechanisches Ersatzmodell des rollenden Reifens.

Man erkennt, dass dieser Frequenzverlauf nur im unteren Frequenzbereich dem typischen Verlauf eines Rings entspricht, im oberen Frequenzbereich aber eher ein plattentypisches Verhalten aufweist. Es war daher naheliegend, die Ringersatzanordnungen wie in Abbildung 6 schematisch dargestellt durch elastisch gelagerte Plattenmodelle zu ersetzen. Vergleicht man auch hier wieder die in Abbildung 7 wiedergegebene, rechnerisch ermittelte Punkteingangsadmittanz mit der gemessenen, so stellt man fest, dass mit einer geeigneten Parameter- bzw. Materialkonfiguration eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modellrechnung erzielt werden kann, ([14]).

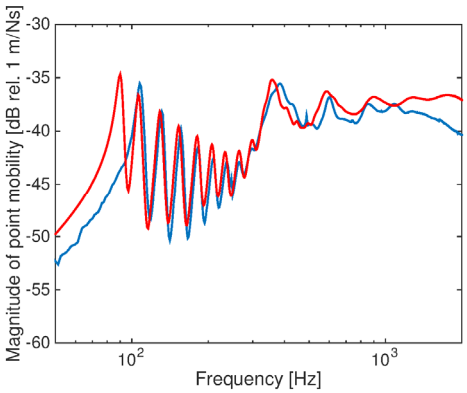

Abbildung 7: Gemessener Betrag der Punkteingangsadmittanz (Mobilität) eines Reifens (blaue Kurve) und berechneter Betrag der Punkteingangsadmittanz eines Plattenmodells (rote Kurve).

Diese gute Übereinstimmung gilt freilich nur für die Punkteingangsadmittanz, bei der die Lauffläche des Reifens in einem Punkt angeregt wird. Ersetzt man die punktuelle Anregung durch eine Anregung über kleine Kontaktflächen (Abbildung 8, [14]), so erhält man von der Kontaktfläche abhängige Verläufe der Eingangsadmittanz, wie sie in Abbildung 9 (durchgezogene Kurven, ([15]) wiedergegeben sind.

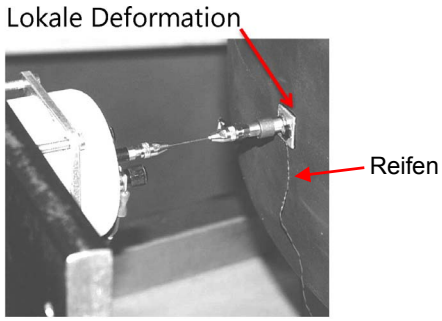

Abbildung 8: Anregung über quadratische. Kontaktflächen.

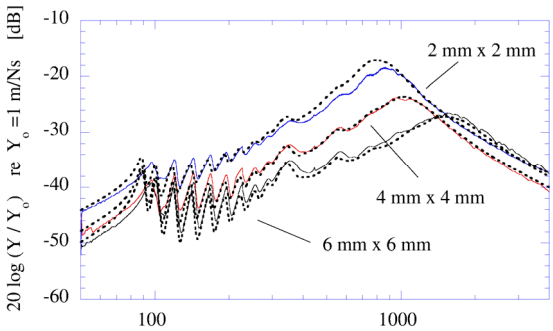

Abbildung 9: Gemessene (durchgezogen) und berechnete (punktiert, Ersatzmodell gemäß Abb.10) Verläufe des Betrags der Eingangsadmittanz eines Reifens bei Anregung über quadratische Kontaktflächen unterschiedlicher Größe.

Um den Einfluss endlicher Kontaktflächen auch im Modell abbilden zu können, wird das Plattenmodell der Abbildung 6 um eine zusätzliche elastische Deckschicht erweitert (Abbildung 10, [15]). Mit geeigneten Materialparametern erhält man auch für diese Ersatzanordnung wieder Lösungen (punktierte Kurven in Abbildung 9, [15]), die mit den gemessenen Eingangsadmittanzen sehr gut übereinstimmen.

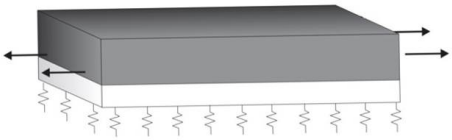

Abbildung 10: Ersatzmodell zur Berücksichtigung des Einflusses endlicher Kontaktflächen.

Damit hat man ein einfaches Ersatzmodell gefunden, das die Reaktion des Reifens bei Anregung über kleine Kontaktflächen am Ort dieser Anregung gut beschreibt und damit auch vorhersagen kann. Da mit seiner Reaktion auch die Rückwirkung des Reifens auf die anregende Kontaktfläche gegeben ist, kann dieses Reifenmodell zu einem vereinfachten Kontaktmodell erweitert werden, aus dem sich dann die im Kontaktbereich wirksamen Kontaktkräfte ermitteln lassen.

Das lokale Verhalten des Reifens sagt freilich noch wenig über die auf ihm insgesamt angeregten Schwingungen aus. Dazu muss das Modell weiter verfeinert werden, indem die Geometrie und Materialdaten des Profilquerschnitts detailliert nachgebildet werden. Auch dann bleibt es lohnend, das Gesamtmodell auf physikalisch begründete Annahmen bzw. Modellelemente zu stützen, etwa auf die Anregung und Ausbreitung von Wellen in Umlaufrichtung. Trägt man dem durch die Verwendung sog. finiter Wellenleitungselemente Rechnung, so erhält man ein Finite-Elemente-Modell, das diese physikalisch begründete Vereinfachung mit kurzen, interaktionstauglichen Rechenzeiten belohnt.

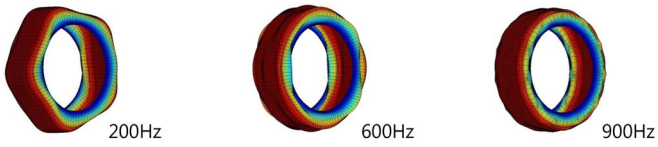

Abbildung 11: Berechnete Schwingungsmoden eines mit finiten Wellenleitungselementen modellierten Reifens.

Abbildung 11 zeigt 3 typische Schwingungsformen des so modellierten Reifens ([14]), aus denen dann der jeweils abgestrahlte Schall ermittelt werden kann. Dass die Berechnungen des verfeinerten Modells auch durch Messungen verifiziert werden können, zeigt die aus Abbildung 12 ersichtliche gute Übereinstimmung der Transferimpedanzen ([16]).

Trotz der erweiterten Aussagekraft des zuletzt betrachteten FE-Modells schränkt die hierzu erforderliche Kenntnis des konstruktiven Reifenaufbaus und der dabei verwendeten Materialien die Eignung des Modells für viele praktische Aufgaben erheblich ein. Deshalb wird das Modell - wie auch andere FE-Modelle des Reifens - überwiegend von Reifenherstellern für Untersuchungen und konstruktive Hinweise eingesetzt. Für schalltechnische Hinweise insbesondere bei der Auslegung geräuschmindernder Fahrbahnbeläge ist es gelungen, aussagekräftige und praxistaugliche Prognosemodelle auf der Basis des einfacheren, in Abbildung 10 wiedergegebenen Ersatzmodells zu entwickeln.

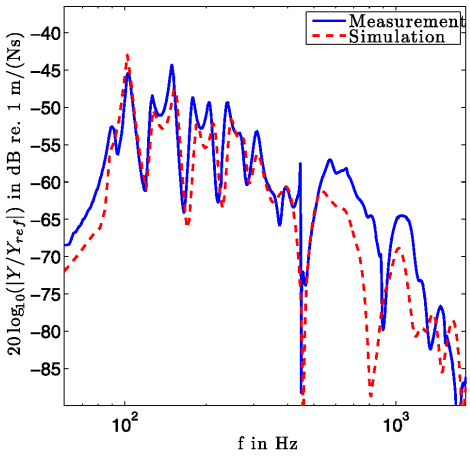

Abbildung 12: Vergleich der gemessenen und der (mit FE-Modell) berechneten Transferadmittanz des Reifens.

Einfluss der Fahrbahnoberfläche und Gesamtmodellierung

Wie oben erwähnt, erlaubt das Ersatzmodell der Abbildung 10 die Erweiterung zu einem vereinfachten Kontaktmodell, das den Gegebenheiten im Kontaktbereich allerdings durch wesentliche Nichtlinearität Rechnung tragen muss. Zusammenfassend zeigt Abbildung 13 schematisch, wie das aus Messungen erhaltene dynamische Reifenmodell zusammen mit der Fahrbahnrauigkeit, den Profileigenschaften des Reifens und einer nichtlinearen Steife über ein nichtlineares Kontaktmodell die Berechnung im Kontaktbereich wirksamer Kontaktkräfte erlaubt ([14]). Der große praktische Nutzen des Modells liegt darin, dass zwischen den so ermittelten Kontaktkräften, die ja einer direkten Messung nicht zugänglich sind, und dem mit ihnen verknüpften Reifen/Fahrbahn-Rollgeräusch ein linearer Zusammenhang besteht, der zudem in einem aus zahlreichen Messdaten abgeleiteten sog. statistischen Modell festgelegt werden kann ([17]).

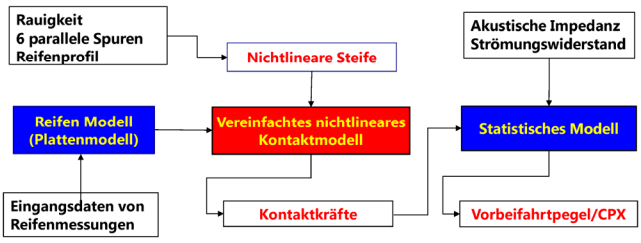

Abbildung 13: Physikalisch/Statistisches Rollgeräuschmodell: Zusammenwirkung von physikalischem Modell zur Berechnung der Kontaktkräfte und statistischem Modell zur Berechnung des Reifen/Fahrbahn-Rollgeräuschs.

Hierzu wurden und werden weiterhin die relevanten Schallpegel für unterschiedlichste Kombinationen von Reifen und Fahrbahnbelägen als Vorbeifahrtpegel oder auch mit CPX-Anhängern erfasst und zu den errechneten Kontaktkräften in Beziehung gesetzt ([17]). Nachdem das daraus abgeleitete Modell insgesamt auch hinreichend validiert wurde, kann es zuverlässig zur Prognose von Vorbeifahrtpegeln und damit auch zur konstruktiven Auslegung von geräuschmindernden Fahrbahnbelägen eingesetzt werden.

Bevor dies im nächsten Abschnitt an Beispielen illustriert wird, kann festgehalten werden, dass die schrittweise Erhöhung der Modellkomplexität mit Verbesserungen bei der Beschreibung des dynamischen Verhaltens, aber natürlich auch mit einem höheren Berechnungsaufwand verbunden ist. Als optimal für die Zwecke der Rollgeräuschprognose erwies sich das auf dem Plattenmodell gemäß Abbildung 10 aufbauende Kontaktmodell, weil es trotz geringem Berechnungsaufwand ausreichend genaue Schallprognosewerte ermöglicht. Deshalb wurde dieses Modell der unter dem Namen „SPERoN“ (**S**tatistical **P**hysical **E**xplanation of **Ro**lling **N**oise) realisierten Implementierung des Physikalisch/Statistischen Reifen/Fahrbahn-Rollgeräuschmodells (Abb. 13) zugrunde gelegt (www.speron.net, [17]).

Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge

Wie man entsprechenden Beitragsanalysen entnehmen kann, weisen Fahrbahnen ein signifikant höheres Geräuschminderungspotential auf als Reifen oder auch der Antrieb von Fahrzeugen. Es ist daher besonders lohnend, die Auslegung und konstruktive Gestaltung von Fahrbahnen für die Minderung des beim Abrollen von Reifen entstehenden Geräuschs zu nutzen ([18]). Im Folgenden wird an Beispielen exemplarisch verdeutlicht, wie die schrittweise Entwicklung und Umsetzung verbesserter Lösungen auch hier im Wechsel zwischen wissenschaftlicher Forschung und technologischer Anwendung iterativ voranschreitet.

Ausgelöst von der eher zufälligen Entdeckung, dass an einem porösen, wasserabflussoptimierten Straßenbelag in Belgien auch ein verringertes Rollgeräusch registriert wurde, wurden seit etwa 1980 auch die geräuschrelevanten Eigenschaften von Fahrbahnen und Fahrbahnbelägen mit dem Ziel einer verbesserten Modellbildung systematisch untersucht. Die daraus abgeleiteten Maßnahmen konzentrierten sich zunächst auf schallabsorbierende Fahrbahnen, deren geräuschmindernde Eigenschaft wegen der offenporigen Deckschicht jedoch mit schnellerer Verschmutzung erkauft wird, die auch das Absorptionsvermögen verringert und deshalb insgesamt eine deutlich geringere Lebensdauer aufweist.

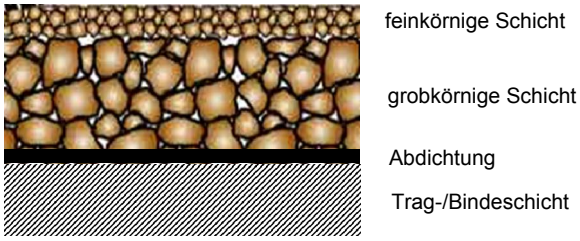

Abbildung 14: Prinzipieller Aufbau einer zweilagigen offenporigen Absorberdeckschicht.

Abhilfe konnte hier eine zweilagige Bauweise schaffen, die, wie in Abbildung 14 schematisch dargestellt, eine feinporige und somit verschmutzungsresistentere Oberschicht besitzt. Da die Zweilagigkeit gleichzeitig auch zwei getrennte Maxima im Frequenzgang des Absorptionsgrads aufweist, kann mit zweilagigen Deckschichten auch eine größere Absorptionsbandbreite erreicht werden. Zudem erlaubt die Festlegung der konstruktiven Parameter (Korngröße, Abmessungen usw.) und der Frequenzlage der Absorptionsmaxima eine Anpassung des Fahrbahnbelags an konkrete Verkehrssituationen (Zusammensetzung und Geschwindigkeit des Verkehrs, [19]). Die Skizze der Abbildung 15 veranschaulicht dies schematisch.

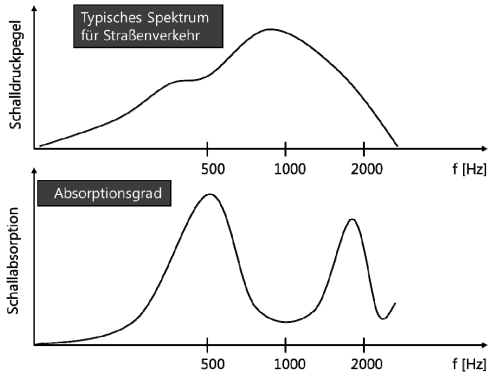

Abbildung 15: Prinzipieller Verlauf des Absorptionsgrads einer zweilagigen offenporigen Absorberdeckschicht.

Die Wirksamkeit zweilagiger offenporiger Asphaltdeckschichten (2OPA) konnte 2003 in einem Pilotprojekt auf der Bundesstraße B17 in Augsburg nachgewiesen werden. Abbildung 16 zeigt das Ergebnis einer CPX Messung auf dem geräuschmindernden Straßenabschnitt ([19]).

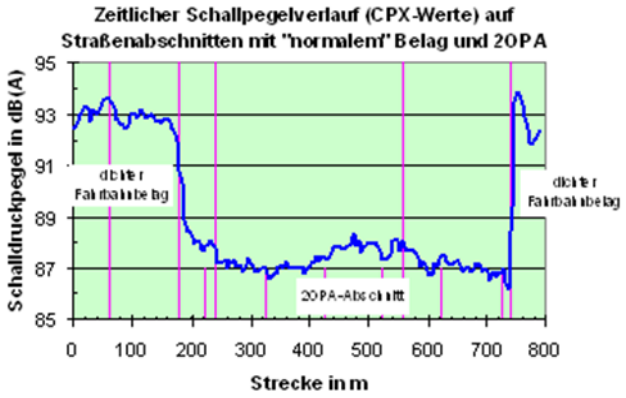

Abbildung 16: CPX-Werte des Schallpegelverlaufs bei Fahrt über eine 2-lagige offenporige Asphaltdeckschicht (2OPA).

Man erkennt, dass mit zweilagigen Absorberdeckschichten Pegelminderungen von 6 bis 7 dB möglich sind. Allerdings nimmt diese Wirkung, die mitunter auch 8 bis 9 dB betragen kann, trotz regelmäßiger Reinigung typisch um ca. 0,5 dB pro Betriebsjahr ab. Da dies die mittlere Wirksamkeit einschränkt bzw. in der Kostengesamtrechnung erheblich zu Buche schlägt, stellt die Praxis berechtigten Forschungsbedarf fest und fordert verbesserte Lösungen und Weiterentwicklungen.

Gleichwohl sind lärmmindernde Fahrbahndeckschichten schon heute zum festen Bestandteil der Lärmminderungsplanung und ihrer Umsetzung in die Praxis geworden. Dies ist auch aus den zugehörigen Technologie-Reifegraden (TRL, Technology Readiness Level) ersichtlich, mit denen auch in aktuellen Forschungsprogrammen der Entwicklungsstand und die Einsatzfähigkeit neuer Technologien in zunehmendem Maß auf einer Skala von 1 bis 9 eingestuft wird. Absorbierende Deckschichten weisen heute den höchsten Technologie-Reifegrad TRL 9 eines „*qualifizierten Systems mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes*“ auf.

Verbesserte Lösungen und Weiterentwicklungen konzentrieren sich in den letzten Jahren vor allem auf die Verbesserung der Haltbarkeit und die Verbesserung der Absorptionswirkung, mit der eine vorgegebene Minderungsanforderung ja auch über einen längeren Zeitraum eingehalten werden kann. Dabei kommen auch andere Materialien und neuartige Oberflächenkonzepte zum Einsatz. Dies soll an zwei aktuellen ingenieurakustischen Arbeitsbeispielen erläutert werden.

Grundsätzlich kann die Verbesserung der Haltbarkeit zur Verlängerung der Absorptionswirkung über eine Verringerung der Verschmutzungsneigung angestrebt werden. Trotz akustischer Zielvorgabe ist dies eine nichtakustische Materialanforderung, die durch Verwendung oder Präparierung verschmutzungsresistenter Materialien erreicht werden kann.

Da Beton eine geringere Verschmutzungsneigung aufweist als der zunächst ausschließlich verwendete offenporige Asphalt, haben sich jüngere Untersuchungen und Entwicklungen intensiv mit allen, auch fertigungstechnischen Aspekten der Verwendung von Beton auseinandergesetzt. Ein anderer Ansatz strebt an, die Verschmutzungsneigung der verwendeten Materialien durch nanotechnische Behandlung zu verringern. Während beim Einsatz von Beton große Fortschritte erzielt werden konnten, steht der Nachweis für einen wirtschaftlich und praxistauglich erfolgreichen Einsatz der Nanotechnologie einstweilen noch aus.

Der Ansatz für eine Verbesserung der Absorptionswirkung kann unmittelbar aus Abbildung 15 abgeleitet werden. Während der Frequenzgang der Absorption eines zweilagigen offenporigen Asphalts in den beiden Maxima hohe Werte aufweist, sinkt er bei den verbleibenden Frequenzen auf niedrige Werte ab.

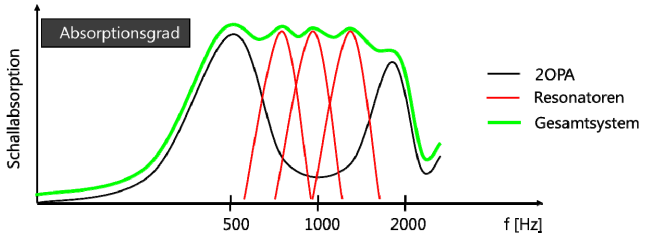

Abbildung 17: Erweiterung des Frequenzbereichs der Absorptionswirkung durch Resonatoren.

Um eine bessere Anpassung des Absorptionsverhaltens an das anregende Straßenverkehrsspektrum zu erhalten, müssten zusätzliche Absorber das fehlende Absorptionsverhalten kompensieren. Wie auch in anderen Anwendungsbereichen der technischen Akustik bieten sich hierfür speziell abgestimmte Helmholtz-Resonatoren an, mit denen der absorbierende Frequenzbereich entsprechend der Skizze der Abbildung 17 erweitert werden kann.

Die Herausforderung beim Einsatz derart bewährter, einfach auszulegender Resonatoren in Fahrbahnbelägen besteht darin, ihn unter den robusten Bedingungen des Straßenbaus so einzubauen, dass die empfindliche Abstimmung zwischen dem Resonatorvolumen und den Abmessungen des Halses funktionstüchtig erhalten bleibt.

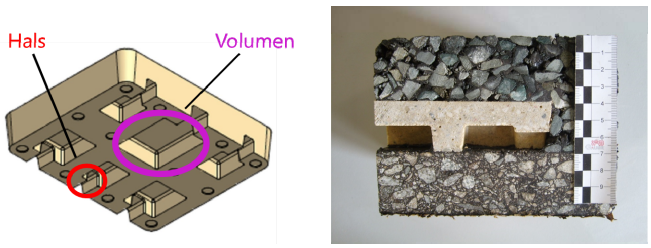

Abbildung 18: Prinzipieller Aufbau eines Resonatorelements mit drei unterschiedlich abgestimmten Helmholtz-Resonatoren und Einbausituation im Querschnitt.

Abbildung 18 zeigt den Aufbau eines Resonatorelements. Man erkennt links die Anordnung von drei Hohlräumen unterschiedlichen Volumens, die eine Abstimmung auf drei Frequenzen ermöglichen. Rechts ist im Querschnitt die bautechnische Realisierung mit vorgefertigten, zwischen den porösen Schichten eines zweilagigen offenporigen Asphalts angeordneten Resonatorelementen wiedergegeben ([20]).

Abbildung 19: Aufbringen der feinkörnigen Deckschicht eines 2OPA auf die vorher verlegten Resonatorelemente.

Dass es beim Einbau dieser Elemente in die Fahrbahn großer Sorgfalt bedarf ist aus der Abbildung 19 unmittelbar ersichtlich. Der unbeschadete Erhalt der akustischen Wirksamkeit aller Resonatorelemente erfordert eine Präzision der Einbaubedingungen, die für den traditionellen Straßenbau eine große Herausforderung darstellt. Wenn diese Präzision jedoch erreicht wird, kann mit einer zusätzlichen Pegelminderung des Rollgeräuschs gerechnet werden. Bei der Teststrecke betrug diese, verglichen mit der Wirkung des 2OPA ohne Resonatoren, zusätzliche Minderung 2-3 dB ([20]).

Da der zugehörige Technologie-Reifegrad vorerst nur TRL6 (*Prototyp in Einsatzumgebung*) beträgt, kann noch nicht mit einer eigenständigen Übernahme der Technologie durch die Straßenbau-Industrie gerechnet werden. Die Voraussetzungen hierfür müssten durch Erreichen von TRL 7 (*Prototyp im Einsatz*) in weiteren F&E-Vorhaben geschaffen werden.

In einem dritten Beispiel soll aufgezeigt werden, wie mit Betonsteinpflaster nicht nur anderes Material sondern auch ein alternativer Ansatz für lärmmindernde Straßenbeläge umgesetzt werden kann. Neben der erheblichen Minderung der Schallabstrahlung durch absorbierende Beläge kann das Rollgeräusch ja auch durch eine verminderte Schwingungsanregung des Reifens reduziert werden. Dies erreicht man im Prinzip durch glatte Straßenbeläge, die freilich für den

Abfluss von Wasser ein geeignetes Rillenprofil aufweisen müssen ([18],[20]).

Abbildung 20 zeigt nicht nur auf, wie solche Oberflächen prinzipiell beschaffen sind, sondern verdeutlicht anhand von Einzelbeispielen auch typische Entwicklungsschritte vom akustischen Konzept bis zur einsatzreifen Lösung.

Abbildung 20: Ausführungsbeispiele glatter Straßenbeläge.

Nachdem die Konzepterprobung mit handlichen Einzelplatten erfolgreich abgeschlossen werden konnte (TRL 4 – *Laboraufbau*, [21]), ist ein Versuch, glatte Oberflächen mit Asphalt zu realisieren, erfolglos an den straßenbaulichen Möglichkeiten gescheitert und somit über eine Anwendungsbeschreibung (TRL 2) nicht hinausgekommen ([22]). Erst die Umsetzung mit ultrahochfesten (UHPC) Betonfertigteilen lieferte aussichtsreiche Ergebnisse (TRL 6 - *Prototyp in Einsatzumgebung*, [23]). Die mit diesem Ansatz erreichbare Geräuschminderung kann am Beispiel eines Betonsteinpflasters aufgezeigt werden.

Ausgehend von den in Abbildung 21 wiedergegebenen, geeignet ausgelegten Betonelementen wurden alle Einbauoptionen und –parameter, insbesondere Breite und Kantenform der Pflastersteine, zulässige Einbauhöhendifferenz sowie Breite, Tiefe und Winkel (zur Fahrtrichtung) der Einbaufugen rechnerisch mit dem Reifen/Fahrbahn-Rollgeräuschmodell SPERoN optimiert. Bei der mit diesen Parameterwerten realisierten Erprobung konnten Pegelminderungen von 4 dB für das gefügedichte Pflaster und 7,6 dB für das offenporige Betonsteinpflaster nachgewiesen werden ([24]). Da mit diesem Ansatz schrittweise ein Technologie-Reifegrad von TRL 7 erreicht wurde, kann mittelfristig davon ausgegangen werden, dass diese Technologie gute Aussichten hat, von der Straßenbau-Industrie übernommen zu werden.

Abbildung 21: Geräuschmindernde Betonpflastersteine mit gefügedichter, texturoptimierter Oberfläche (links) und in offenporig absorbierender Ausführung (rechts).

Zusammen mit den zugehörigen Entwicklungsschritten zeigen die aufgeführten Beispiele, dass es im iterativen Wechsel von Forschung, technologischer Umsetzung und Anwendung gelungen ist,

- wesentliche Potentiale der Rollgeräuschminderung auszuschöpfen, dabei
- elementare akustische Prinzipien im rauen Umfeld des Straßenbaus wirksam umzusetzen und
- für unterschiedliche Konzepte die zur Marktübernahme notwendige technologische Reife zu erzielen.

Dies war insbesondere deshalb möglich, weil auf der Grundlage eines handhabbaren physikalischen Modells mit SPERoN ein interaktives Prognosewerkzeug zur Verfügung stand, das in der Lage war und ist, zielgerichtete und erfolgversprechende Entwicklungsschritte zu definieren und zu realisieren und dabei fast ausnahmslos eine kontinuierliche Verbesserung der jeweiligen Technologie-Reifegrade zu erreichen. Neben dieser geordneten Abfolge hat die Entwicklung geräuschmindernder Fahrbahnbeläge auch großen Nutzen aus der konsequenten Einbindung aller interdisziplinären Schnittstellen gezogen. Dadurch war es möglich, alle technologischen und anwendungsbezogenen Aspekte frühzeitig zu berücksichtigen und somit konzeptionelle und technische Fehlentwicklungen weitestgehend zu vermeiden.

Rechnerische Modellbildung in der Akustik

Eine nachvollziehbare Modellierung ist eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis von Schallentstehungs- und –ausbreitungsmechanismen und damit auch für eine gezielte Beeinflussung von Schall- und Schwingungsfeldern. Denn je unmittelbarer eine Maßnahme auf den ursächlichen Entstehungsmechanismus einwirkt, umso effizienter darf ihre diesbezügliche Wirkung erwartet werden. Auch die konkrete Auslegung einer Maßnahme kann qualitativ und quantitativ umso treffsicherer erfolgen, je zuverlässiger sie sich auf eine Prognose stützen kann, die ihre Wirkung vorhersagt. Genau das leisten gute Rechenmodelle und deshalb kommt der rechnerischen Modellbildung in der Ingenieurakustik eine so große Bedeutung zu.

Obwohl die wesentlichen Eigenschaften akustischer Schwingungs- und Wellenfelder durch eindeutige mathematische Zusammenhänge beschrieben und somit theoretisch auch modelliert werden können, scheitern praktische Modellrealisierungen an der Schwierigkeit, die betreffenden Differentialgleichungssysteme für gegebene Anordnungen und Systemkopplungen konkret zu lösen. Wenn man sich dann noch vor Augen führt, dass der große Bereich interessierender Frequenzen und Wellenlängen einen weiten Bereich physikalischer Konzepte und Phänomene abdeckt, so leuchtet unmittelbar ein, dass solche Ansätze vereinfachende Annahmen erfordern, um erfolgversprechende Berechnungen, Simulationen und Modelle bereitstellen zu können. Natürlich hängen sinnvolle, vor allem auch zulässige Vereinfachungen entscheidend von der jeweiligen akustischen Aufgabenstellung ab und deshalb ist es die Anwendung selbst, die auf sich zugeschnittene Modellannahmen und –vereinfachungen vorgibt.

Zusammen mit der im vorigen Abschnitt begründeten Forderung, in jedem Modell schon aus Gründen der schnellen Berechenbarkeit physikalische Zusammenhänge zu berücksichtigen und einer rein numerischen Berechnung vorzuziehen, lassen sich zwei Postulate formulieren, die für den Erfolg und praktischen Nutzen akustischer Rechenmodelle von großer Bedeutung sind:

- Jede rechnerische Modellierung sollte bekannte Abhängigkeiten von physikalischen Parametern nutzen und zugrunde legen: sie sollte „so physikalisch wie möglich“ sein.

- Jede akustische Anwendung verdient einen speziell auf sie zugeschnittenen, vereinfachten Modellansatz, dessen Komplexität sich an der gewünschten Zielprognose orientiert: das Modell sollte auch „so einfach wie möglich“ bzw. „so komplex wie nötig“ sein

Für die ingenieurakustische Praxis ergibt sich aus diesen Postulaten die folgende Vorgehensweise:

- Relevante Einfluss- und Beschreibungsparameter identifizieren und einem möglichst einfachen Modell zugrunde legen (vereinfachte Ersatzanordnung)
- Modellkomplexität für „bessere“ Ergebnisse schrittweise steigern, bis die Aussagekraft der zugeordneten Ergebnisse dem Bedarf entspricht, also brauchbar ist.

Genau diese Vorgehensweise hat bei den zuvor beschriebenen Arbeiten zur Reifen/Fahrbahn-Rollgeräuschminderung auf sehr direktem Weg zum Erfolg geführt, und zwar in beiden Fällen: bei der Modellierung der Rollgeräuschentstehung wie auch bei der konzeptionellen und konstruktiven Auslegung geräuschmindernder Fahrbahnbeläge.

Abschließend soll noch an zwei weiteren Beispielen verdeutlicht werden, wie und mit welchem Erfolg anwendungsspezifische Modellierungen auf die konkreten Erfordernisse jeder Anwendung zugeschnitten werden können.

Neben dem Straßenverkehr trägt auch der Schienenverkehr erheblich zur Lärmbelastung bei. Es war deshalb naheliegend, die Rollgeräuschentstehung auch beim Rad/Schiene System systematisch zu untersuchen. Wie beim Straßenverkehr dominiert das Rollgeräusch einen weiten Frequenzbereich, der sich für Schienenfahrzeuge von ca. 60 Hz bis ca. 300 Hz definieren lässt ([25]). Abhängig von der verwendeten Oberbauart tragen dazu wesentlich das Rad, die Schiene und mitunter auch die Schwelle bei. Da sich die Schallabstrahlung von diesen Komponenten bei bekannter Anregung gut abschätzen lässt, ist eine Modellierung schon dann sehr wertvoll, wenn sie die jeweiligen anregenden Kräfte berechnen kann.

Den Zusammenhang zwischen Bewegungen und Kräften stellen definitionsgemäß die jeweiligen Impedanzen bzw. Admittanzen her und so ist es nicht verwunderlich, dass die Modellierung der Rad/Schiene-Rollgeräuschentstehung sich schon früh auf Impedanzmodelle konzentriert hat, bei denen die im Kontaktbereich erfolgende Anregung auf hintereinandergeschaltete Impedanzen wirkt, wagenseitig auf das Rad, die Primär-und Sekundärfedern des Drehgestells und den Wagenkasten, oberbauseitig auf Schiene und Schwelle, elastische Zwischenelemente und die Gleisbettung ([25]). Abbildung 22 illustriert an einer schematischen Skizze, wie die Summe der Rauigkeiten zwischen Rad und Schiene auf die beteiligten Impedanzen bzw. Komponenten einwirkt und diese zu Schwingungen anregt, aus denen dann der abgestrahlte Schall berechnet werden kann.

Nach erfolgreicher Validierung konnten mit solchen Impedanzmodellen, z.B. RIM und TWINS ([25]), weitreichende Analysen und Prognosen erstellt werden. Eine wichtige Anwendung war die erfolgreiche vergleichende Beitragsanalyse für Schotteroberbau und Feste Fahrbahn in den 90er Jahren. Da solche Beitragsanalysen damals noch nicht aus Messauswertungen ermittelt werden konnten, kam ihrer rechnerischen Ermittlung große Bedeutung zu. Insbesondere für die damals im Bereich der Deutschen Bahn eingeführte Feste Fahrbahn konnte die im Vergleich mit Schotteroberbauten festgestellte Erhöhung des Vorbeifahrtpegels um 2 bis 3 dB nur mit Modellrechnungen analysiert werden. Wie die verwendeten Impedanzmodelle zeigen konnten, wird diese Pegelerhöhung durch größere Schwingungsamplituden und Schallbeiträge von Schiene und Schwelle verursacht ([25],[26]). Damit konnte die Pegelerhöhung nicht nur erklärt werden, vielmehr ließen sich aus ihrer Analyse auch Hinweise für entsprechende Minderungsmaßnahmen ableiten.

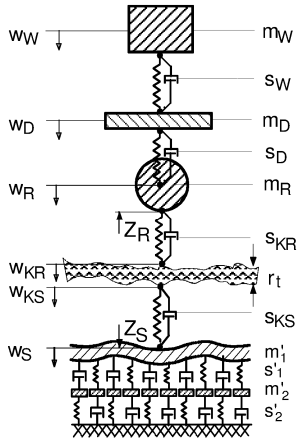

Abbildung 22: Impedanzmodell zur Berechnung und Simulation der Rollgeräuschentstehung aus dem Rad/Schiene-Kontakt.

Vollkommen andere Modellierungsansätze finden sich in der Raumakustik. Da das empfangende Ohr seine räumliche Klangwahrnehmung wesentlich aus der Feinstruktur der räumlichen Impulsantwort ableitet, macht es viel Sinn, der Analyse raumakustischer Gegebenheiten wie auch der entsprechenden Entwurfsplanung Impulsantworten zugrunde zu legen. Die Tatsache, dass die Zeitstruktur der Impulsantwort im Wesentlichen durch die zeitliche Aufeinanderfolge zahlreicher Reflexionen bestimmt wird, veranlasst den planenden Akustikingenieur, die Versorgung des Publikumsbereichs mit ausreichend vielen Reflexionen sorgfältig zu prüfen bzw. sicherzustellen ([27]).

Es ist dann aber nur folgerichtig, wenn auch raumakustische Berechnungen und Modelle sich in enger Analogie auf die Ausbreitung der Impulsantwort bzw. der sie bestimmenden Schallstrahlen abstützen. Die heute verfügbaren Strahlverfolgungsmodelle sind in der Lage, die akustische Versorgung und Gestaltung auch großer Konzertsäle bis hin zur Prognose raumakustischer Parameter wirkungsvoll zu unterstützen und damit die These, jede akustische Anwendung benötige und verdiene einen eigenen, speziell auf sie zugeschnittenen Modellansatz, eindrucksvoll zu bestätigen.

Aktive Systeme zur Beeinflussung von Schall und Schwingungen

Wenn man die Ingenieurakustik in ihrer spezifischen Entwicklung zwischen physikalischer Wissenschaft und angewandter Technologie betrachtet, dann ist es aufschlussreich,

der zielstrebig aber unaufgeregt geordneten Entwicklung bei der Rollgeräuschminderung rückblickend die ganz anders geartete und auch verlaufene Entwicklung im Bereich der aktiven Schall- und Schwingungsminderung gegenüberzustellen.

Historischer Rückblick

Im Folgenden wird die Entwicklung aktiver Methoden der Schall- und Schwingungsbeeinflussung insbesondere im Hinblick auf ihren Einsatz in praktischen Anwendungen und Produkten kurz zusammengefasst. Eine ausführliche Darstellung ihrer physikalischen und methodischen Grundlagen und Möglichkeiten findet sich in [28] und [29].

Nachdem der Kerngedanke, Schall mit gegenphasigem Schall zu kompensieren oder doch zumindest zu reduzieren, schon in einer Patentschrift in den 30er Jahren fixiert worden war, hat es viele Jahrzehnte gedauert, bis den Ideen Taten folgten. Diese setzten in den 50er Jahren ein, als insbesondere in den USA erste einfache Experimente durchgeführt wurden, um das Phänomen der absichtsvollen Schallauslöschung durch gesteuerte Interferenz konkreter zu untersuchen. Bei aller Faszination des Konzepts schienen die praktischen Hindernisse auf dem Weg zu erfolgreichen technischen Anwendungen jedoch zu groß, um optimistische Ziele konkret ins Auge zu fassen. Neben dem nur eingeschränkt vorhandenen Verständnis der physikalischen Möglichkeiten waren es vor allem die Komplexität der Aufgabe, die beschränkten Möglichkeiten analoger Steuerungs- und Regelungstechnik sowie die Grenzen technischer Schallwandler insbesondere bei den besonders interessierenden tiefen Frequenzen, die damals einer technischen Umsetzung im Weg standen. Folgerichtig kamen die erreichten Technologie-Reifegrade nicht über einen Wert TRL 4 (*Versuchsaufbau im Labor*) hinaus. Deshalb beschränkte sich die weitere Beschäftigung mit diesem Thema in der Regel auf punktuelle theoretische Überlegungen, vor allem analytische Betrachtungen zur aktiven Beeinflussung der Anregung und Ausbreitung von Wellen- und Schwingungsfeldern.

Erst in den siebziger Jahren wurden diese zunächst in Frankreich und England, später auch in den USA und Deutschland systematisch aufgegriffen und in umfassende Untersuchungen zu den allgemeinen Möglichkeiten aktiver Feldbeeinflussung überführt. Mit parallel entwickelten Demonstratoren konnten vereinzelt sogar schon Technologie-Reifegrade von TRL 6 (*Prototyp in Einsatzumgebung*) erreicht werden.

Als dann auch die immensen Zukunftsmöglichkeiten der digitalen Signalverarbeitung erkennbar wurden, schlug die existierende Faszination in euphorische Zukunftserwartungen um. Damit begann eine Entwicklung, die mit extrem überzogener Zuversicht und zum Teil unhaltbaren Versprechungen hohen Erwartungsdruck auch bei Investoren erzeugte. Die damit einhergehende äußerst hektische Betriebsamkeit („hype“), die auch zu einer völlig abgehobenen Patenteuphorie führte, hat eine kontinuierliche, übersichtlich geordnete Abfolge der ingenieurakustischen Entwicklung erheblich behindert. Ohne die so verhinderte realistische Einschätzung aktiver Forschung und Technologie haben marketingmotivierte Fehleinschätzungen und die Verunsicherung durch lückenlose, kontraproduktive Präventivpatente Ende der achtziger Jahre zu einer ersten, die Methodik betreffenden Ernüchterung geführt. Obwohl mit den bis dahin realisierten Demonstrationsprojekten ganz vereinzelt sogar der Technologie-Reifegrad TRL 7 (*Prototyp im Einsatz*) erreicht worden war, mündete die Verunsicherung erst nach einer Konsolidierung von Technik und Erwartung wieder in neue Zuversicht. In den neunziger Jahren standen dann Versuche mit vielkanaligen Steuerung- und Regelungsaufgaben sowie die Integration verteilter Aktoren in sog. intelligente Strukturen im Vordergrund. Wegen des damit verbundenen großen Stell- und Regelaufwands werden die dabei erprobten Ingenieur-Lösungen aber wohl auf absehbare Zeit singulären Einzelanwendungen vorbehalten bleiben.

Die Weichen für eine größere Einsatzbasis aktiver Technologien wurden um das Jahr 2000 mit der Beschränkung auf machbare Anwendungen (sog. „einfache Fälle“) gestellt. Zu diesen aussichtsreichen Anwendungsfällen gehören neben

- aktiv unterstützten Ohrschützern und Kopfhörern auch
- aktive Lagerungen (Körperschallisolierelemente),
- aktive Rohr- und Kanalschalldämpfer und insbes. die
- aktive Beeinflussung von Fahrzeuginnenräumen mit kleinen Volumina.

Während aktive Ohrschützer schon als Massenware erhältlich sind, gehören aktive Lagerungen zu den heute verfügbaren Technologien, deren Einsatz meist allerdings (auch aus Kostengründen) besonderer Umstände bedarf. Dies gilt wohl auch für aktive Rohr- und Kanalschalldämpfer, deren Einsatzmöglichkeiten jedoch zusätzlich durch akustische Leistungs- und thermische Belastungsgrenzen eingeschränkt sind.

Methodisch sind aktive Methoden heute sehr gut verstanden und dies gilt für jede der beiden Teilkomponenten, den physikalisch/akustischen wie auch den regelungs- und steuerungstechnischen Teil des elektroakustischen Gesamtsystems, als das jedes aktive System sich ja darstellen lässt. Sowohl die physikalischen als auch die signaltheoretischen bzw. signalverarbeitenden Möglichkeiten wurden systematisch untersucht und dargestellt ([28],[29]). Bei den technischen Werkzeugen erlauben die heute verfügbaren Signalprozessoren auch noch bei hoher algorithmischer Komplexität aufwändige Echtzeitberechnungen. Deshalb werden technologische Grenzen derzeit vor allem von den besonders bei tiefen Frequenzen in ihrer Leistung physikalisch begrenzten Schallwandlern gezogen. Leider steht dies der prinzipiell besonderen Eignung aktiver Systeme für tiefe Frequenzen entgegen.

Aktive Beeinflussung des Fahrzeuginnengeräuschs

Die derzeit größte Einsatzplattform aktiver Methoden zeichnet sich bei Systemen zur aktiven Beeinflussung von Innenräumen, insbesondere von Fahrzeuginnenräumen ab. Nachdem es im Jahr 2000 gelungen war, in einem Pkw die Kompensation der zweiten Motorordnung und die authentische Erzeugung anderer, zusätzlich eingespielter und geregelter Motorordnungen nachzuweisen ([30],[31]), Abb. 23), bildete diese als „Active Sound Design“ eingeführte Technik die Grundlage für produktorientierte Weiterentwicklungen.

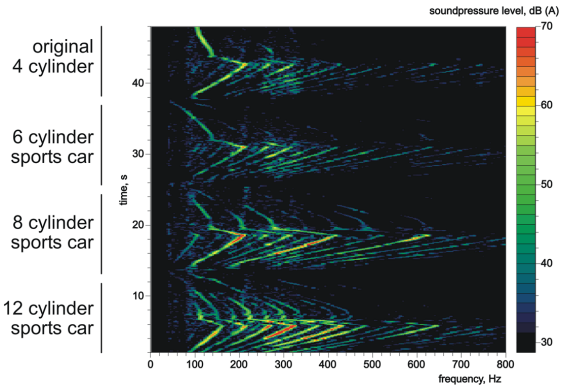

Abbildung 23: Aktive Beeinflussung des Fahrzeuginnengeräuschs (Active Sound Design, ASD.

Man erkennt in Abbildung 23, wie die Motorordnungen für unterschiedliche Fahrabschnitte gezielt geändert wurden, um die Klangcharakteristik des Motors zu wechseln. Die elektroakustisch erzeugten Motorklänge wurden dabei als vollkommen authentisch wahrgenommen, und zwar sowohl bzgl. der lastabhängigen Verbrennungscharakteristik als auch bzgl. ihrer räumlichen und örtlichen Zuordnung. Deshalb wurde diese Lösung in der Folge auf einer flexiblen, einbaufähigen Plattform realisiert, die an einzelne Zielfahrzeuge angepasst werden konnte. Mit ihr konnten dann unterschiedliche Motorklänge in der realen Betriebsumgebung des Zielfahrzeugs untersucht und verglichen sowie auf ihre klanglich/funktionelle Übereinstimmung mit der Erwartung und Wahrnehmung der übrigen Fahrzeugcharakteristika im Gesamtkontext überprüft werden.

Mit diesem ersten Produkt der späteren m|klang® Serie ([32]) realisierten sich die meisten Fahrzeughersteller fahrende, fahrzeugspezifische Akustiklabore, mit denen sie die virtuelle Realität ihre stationären Labore und Simulatoren um die reale Virtualität von Klängen in echter Betriebsumgebung erweiterten.

Ausgehend vom Erfolg dieses Laborsystems, mit dem zuletzt auch der Technologie-Reifegrad TRL 9 (*Qualifiziertes System mit erfolgreichem Einsatznachweis*) erreicht wurde, war es nur konsequent, die Technologie zum Ausgangspunkt modellspezifischer Serienlösungen weiter zu entwickeln. Unabhängig davon, ob sie der Kompensation bzw. Nullregelung (ANC, Active Noise Control) oder der gezielten Sollwertregelung vorgegebener Motorordnungen (ASD) dienen, ist der typische Systemaufbau für Pkw-Innenräume durch 4 bis 5 Türlautsprecher/Subwoofer, 3 bis 6 Mikrofone im Dachhimmel sowie die Bereitstellung ausreichender Leistungsverstärker und Signalprozessorkapazität gekennzeichnet. Mit dem CAN-Bus-Zugriff auf relevante Fahrzeugdaten lassen sich typisch bis zu 8 Motorordnungen im Frequenzbereich von etwa 30 bis 250 Hz sowie im gesamten Fahrzeuginnenraum last- und drehzahlabhängig regeln. Zusätzlich können zur tonalen Klangsynthese oberhalb 250 Hz noch weitere Frequenzen synchron eingespielt werden.

Wie aus dem Blockdiagramm der Abbildung 24 ersichtlich ist, hat die adaptive Signalverarbeitungseinheit die Aufgabe, die Abweichung des gemessenen sog. Fehlersignals vom erwarteten Sollwertverlauf zu minimieren und somit das verbleibende Fehlersignal auf den Sollwertverlauf einzuregeln. Die technische Realisierung dieses ANC/ASD-Systems hat sich in der Alltagspraxis bewährt und ist derzeit bei 5 Fahrzeugherstellern im Serieneinsatz.

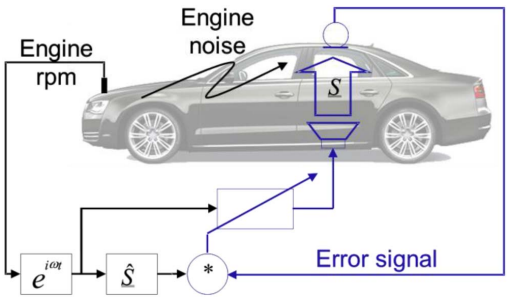

Abbildung 24: Blockdiagramm eines ANC/ASD Systems mit rückgekoppelter adaptiver Steuerung zur aktiven Beeinflussung des Pkw-Innengeräuschs

Eine der Anwendungsmöglichkeiten besteht in der akustischen Unterstützung von Zylinderabschaltungen (COD, cylinder on demand technology). Ein in der Audi S-Serie realisiertes ANC System hat dabei die Aufgabe, die bei der Umschaltung vom Acht- in den Vierzylindermodus auftretende 4. Ordnung zu kompensieren und damit die akustische Wahrnehmbarkeit der Umschaltung zu verringern.

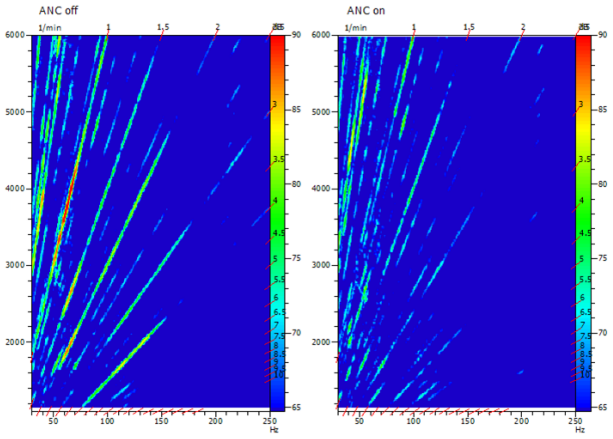

Abbildung 25: Schalldruckverlauf im Audi S8 hinten rechts bei 8-Zylinder Betrieb im 4 Gang unter Volllast ohne (links) und mit (rechts) ANC.

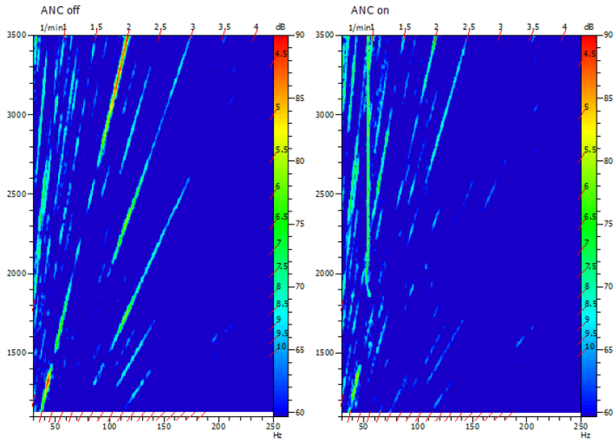

Abbildung 26: Schalldruckverlauf im Audi S8 hinten rechts bei 4-Zylinder Betrieb im 4 Gang unter Volllast ohne (links) und mit (rechts) ANC.

Die Funktionalität dieses Systems kann aus den Abbildungen 25 und 26 abgelesen werden. Man erkennt durch Vergleich der rechten mit den linken Diagrammen, dass in beiden Zylinderbetriebsarten mehrere Motorordnungen gleichzeitig kompensiert werden können. Durch direkten Vergleich der Diagramme für Acht- und Vierzylinderbetrieb erkennt man auch, dass die Klangunterschiede zwischen den beiden Betriebsarten durch ANC wesentlich reduziert werden, sodass die akustische Wahrnehmung des Umschaltprozesses deutlich verringert wird.

Aktive Beeinflussung der Raumakustik

Auch wenn sie - anders als die bisher betrachteten Systeme - keine elektronisch geregelte Interferenz anstreben, sind elektronische Systeme zur Veränderung und Verbesserung der akustischen Eigenschaften von Musikräumen und Sälen auch aktive Systeme in dem Sinne, dass auch sie dem betrachteten Raum zusätzliche, gezielt geregelte Schallanteile zuführen. Vom Prinzip her entspricht dieser Ansatz der oben erwähnten ungeregelten Einspielung zusätzlicher Frequenzanteile (oberhalb 250 Hz) zur tonalen Klangsynthese in Pkw. Allerdings orientiert sich die konzeptionelle Realisierung in Musikräumen - in Übereinstimmung mit der subjektiven Klangwahrnehmung - an der gezielten Beeinflussung der empfangenen Impulsantworten.

Um Veränderungen der Klangcharakteristik eines Raumes durch aktive Modifikation der Impulsantworten leisten zu können, muss der Raum mit einer ausreichenden Anzahl von Lautsprechern ausgerüstet sein, die um die Zuhörer herum angeordnet sind und sie mit zusätzlichen, elektroakustisch erzeugten Klanganteilen versorgen. Diese Klanganteile werden aus den mit hochwertigen Studiomikrofonen an sorgfältig ausgewählten Aufnahmeorten registrierten Eingangssignalen abgeleitet. Die dabei zum Einsatz kommenden Algorithmen zielen unmittelbar auf die Beeinflussung der resultierenden Impulsantworten, die sich bei ausreichender Zahl von Lautsprechern auch positionsabhängig einstellen lassen.

Als Orientierungshilfe kann bei der Einstellung des gewünschten Raumklangs von gemessenen Impulsantworten aus bevorzugten, akustisch hervorragenden Sälen ausgegangen werden, die dann im Rahmen von Proben und Konzerten feinabgestimmt und an konkrete Wunschvorstellungen im betrachteten Raum angepasst werden können.

Auch dieses aktive System hat unter dem Namen Vivace® ([33]) den Übergang vom Laborsystem zum marktgängigen Produkt realisieren können und wird heute weltweit genutzt, um die Akustik von Sälen zu verbessern, an individuelle Wunschvorstellungen anzupassen oder um nutzungsabhängig variable Klangeinstellungen realisieren zu können.

Fazit Aktive Systeme

Anders als bei der logischen Abfolge sinnvoll geordneter und abgestimmter Entwicklungsschritte, mit denen die Ingenieurakustik den Weg zu technologisch ausgereiften Lösungen für geräuschmindernde Straßenbeläge beschritten hat, war der Weg zu praxistauglichen aktiven Systemen von allzu euphorischen Zukunftserwartungen und vielen daraus resultierenden Fehleinschätzungen gekennzeichnet. Das hat diesen Weg sicher aufwendiger und ineffizienter gemacht, hat ihn durch manchen Verlust an Glaubwürdigkeit mitunter vielleicht sogar behindert.

Gleichwohl ist es auch hier im iterativen Wechsel von Forschung und technologischer Umsetzung gelungen, die

- physikalischen und signaltheoretischen Möglichkeiten klar einzugrenzen, die
- Voraussetzungen für zukünftig überwindbare technologische Grenzen (aktuell vorrangig bei Wandlern) bereitzustellen sowie ein
- erprobtes Instrumentarium für marktgängige Produkte und singuläre Ingenieurlösungen zu schaffen.

Ein anwendungstechnologischer Durchbruch mit der zur Marktübernahme notwendigen technischen Reife ist bisher jedoch nur in akustisch einfachen Anwendungsfeldern, insbesondere bei kleinen Volumina (Kopfhörer, Fahrzeuginnenraum) und kompakten Quellen (aktive Lagerung) gelungen.

Zusammenfassung und Ausblick

Indem sie ihre gesellschaftliche Aufgabe, zu einer akustisch lebenswerten Welt beizutragen, wahrgenommen hat, hat die Ingenieurakustik nicht nur zur Entwicklung besserer Lebensbedingungen sondern auch zur Entwicklung der Akustik zu einer heute unverzichtbaren Querschnittsdisziplin wesentlich beigetragen. Ihre daraus resultierende Einbindung erfordert neben der Fortschreibung ihrer fachlichen Qualifikation auch ihre Weiterentwicklung im interdisziplinären Interessenfeld von Forschung, Technologie und zahlreichen Anwendungsdisziplinen. Denn die weiter wachsende Technisierung und Mobilisierung kann auch in der Zukunft nur von einer leistungsfähigen, interdisziplinär gut eingebundenen Ingenieurakustik anspruchsvoll und umweltkompatibel gestaltet werden.

Danksagung

Der Verfasser dankt allen Kollegen bei Müller-BBM in München und an der TH Chalmers in Göteborg für ihre rat- und tatkräftige Unterstützung bei der Vorbereitung des Vortrags und der Erstellung des Manuskripts. Besonderer Dank gilt den Arbeitsgruppen, die sich in München mit geräuscharmen Fahrbahnbelägen (Thomas Beckenbauer, Manuel Männel und Beate Altreuther) und aktiven Systemen (Rolf Schirmacher, Roland Lippold und Stefan Kerber) und in Göteborg mit Reifenmodellen (Wolfgang Kropp und Carsten Hoever) beschäftigen, sowie Wolfgang Bauer, Marcus Blome. Gunter Engel, Maximilian Ertsey, Carl-Christian Hantschk, Winfried Lachenmayr, Stefan Lutzenberger, Eckard Mommertz und Henning Ukena.

Literatur

[1] Scheuren, J.: 100 Jahre Technische Lärmminderung in Deutschland. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 49(6), 2002, S.199–218.

[2] Scheuren, J.: Entwicklung und Bedeutung der Ingenieurakustik nach 1950. DAGA 2012, Darmstadt

[3] Helmholtz, H.v.: Die Lehre von den Tonempfindungen. Braunschweig, 1863; Neuausgabe Olms, 2000

[4] Lord Rayleigh: The Theory of Sound. 1877/78; Neuausgabe Dover Publ., 1945

[5] Beyer, R.T.: Sounds of our Times – Two Hundred Years of Acoustics. New York, Springer, 1999.

[6] Courant, R.: Hilbert, D.: Methoden der Mathematischen Physik, 1924; Neuausgabe Springer.

[7] Zeller, W.: Technische Lärmabwehr. Kröner, Stuttgart, 1950

[8] Schirmer, W.: et al.: Lärmbekämpfung. Verlag Tribüne Berlin, 1971

[9] Heckl, M., Müller, H.: Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer, Berlin, 1975 (2004)

[10] Schreiber, L., Müller-BBM: Persönliche Mitteilung

[11] International Tire Noise Conference. Proceedings, National Swedish Board for Technical Development, Stockholm. Schweden, August 1979

[12] Böhm, F.: Mechanik des Gürtelreifens. Ing.-Arch., 35, 1966, S.82, 1966

[13] Kropp, W., Larsson, K., Wullens, F., Andersson, P.: Tyre/road noise generation - modelling and understanding. Spring meeting of the Institute of Acoustics, Southampton, Uk, March 29/30, 2004

[14] Kropp, W. TH Chalmers: Persönliche Mitteilung

[15] Larsson, K, Kropp, W.: A high frequency 3-dimensional tyre model based on two coupled elastic layers. Journal of Sound and Vibration, vol. 253, no. 4, pp 889-908, 2002

[16] Sabiniarz, P., Kropp, W.: A waveguide finite element aided analysis of the wave field on a stationary tyre, not in contact with the ground, Journal of Sound and Vibration 329 (15), S.3041-3064

[17] Beckenbauer, T., Klein, P., Hamet, F., Kropp, W.: Tyre-road noise prediction: A comparison between the SPERoN and HyRoNE models-Part 1 and Part 2. Proc.Acoustics'08, Paris, 2008; Journal Acoustical Society of America 123 (5), S.3388

[18] Beckenbauer, T.: Reifen-Fahrbahn-Geräusche – Minderungspotentiale der Straßenoberfläche. Plenarvortrag DAGA 2003, Aachen, 2003

[19] Beckenbauer, T., Weißenberger, W., Kühne, R., Attenberger, A.: Langzeiterfahrungen mit zweischichtigem offenporigem Asphalt in innerörtlicher Situation. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Bd.3, Nr.6, S.252-260, 2008

[20] Beckenbauer, T., Alber, S., Männel, M.: Lärmmindernde Fahrbahnbeläge: Was war, was ist und was wird sein? Straße und Verkehr, Nr.7-8, 2010

[21] Specific targeted research and innovation project (EU): Integrated Tyre And Road Interaction (ITARI). Final report, Project no. FP6-PL-0506437, 2007. http://cordis.europa.eu/publication/rcn/11912_en.html

[22] DeuFraKo: Prediction and Propagation of Rolling Noise, Final Report. 3.3.2009. gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

[23] Altreuther, B., Piotrowski, S.: Low Noise Road Surfaces from Precast Slabs in UHPC. International Conference on Concrete Block Pavement, Dresden, 2015

[24] Steffen, S., Männel, M. et. al: Lärmarmes Betonsteinpflaster – Neue Ergebnisse aus Forschung und Praxis. Zeitschrift Straße und Autobahn, 66. Jahrg., Feb. 2015

[25] Wettschurek, R., Hauck, G.: Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr. Kap. 17 in Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. Aufl., Springer, Berlin, 2004

[26] Scheuren, J.: Current Aspects of Railway Noise Control. Keynote Lecture, Proceedings Euro-Noise 1998, München, S. 255-264

[27] Mommertz, E., Kuttruff, H.: Raumakustik. Kap. 11 in Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. Aufl., Springer, Berlin, 2004

[28] Elliott, S., Nelson, P.: Active Control of Sound. Academic Press, London, 1992

[29] Scheuren, J.: Aktive Beeinflussung von Schall und Schwingungen. Kap. 13 in Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. Aufl., Springer, Berlin, 2004

[30] Scheuren, J.: Noise Control for Cars and Trains from an Engineering Perspective. Keynote Lecture, Proceedings Inter-Noise 2000, Nizza, Frankreich, Vol. I: S.73-89

[31] Scheuren, J.: Active control of sound – scientific development, technological status and relevance for automotive applications. Sae Paper 2012-36-0644, Keynote, International Noise and Vibration Colloquium, Florianopolis, Brasilien, November 2012

[32] m|klang®: Produktserie Müller-BBM AST (Active Sound Technologies) GmbH

[33] Vivace®: Elektronisches Raumakustiksystem Müller-BBM AS (Acoustic Solutions) GmbH