

## Schallflußmodellierung – ein Konzept zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Entwicklung lärmarmen Maschinen

Beisheim, N.; Gummersbach F.; Käferstein, B.

*Zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Entwicklung lärmarmen Produkte entsteht im Rahmen eines DFG-Projekts ein Konstruktions-Informationssystem zur Bereitstellung von maschinenakustischem Wissen. Hierzu muß eine Verknüpfung maschinenbaulicher Komponenten mit maschinenakustischen Eigenschaften erfolgen. Das wird mittels eines Schallflußmodellierers realisiert, der den Zugriff auf systematisch aufbereitetes Methoden- und Faktenwissen der Maschinenakustik ermöglicht und Auswertetechniken zum Auffinden von akustisch kritischen Bereichen bei Maschinen bietet.*

*An information system for low noise design is the aim of a DFG research project. This system consists a component based noise path modeller and a knowledge base for machine acoustic information, structured according to ISO 11688-1. The modeller represents a link between the Engineering view and the acoustic view of mechanical components. It has utilities for a weak-point analysis of the noise path.*

### 1 Einleitung

Im Rahmen der Produktentwicklung erhält die Anforderung „lärmarm“ eine zunehmende Bedeutung. Diese Tatsache wird durch strengere Gesetze und Richtlinien zusätzlich forciert. Der Konstrukteur muß schon in den frühen Entwicklungsphasen auf die Schallentstehung achten, um teure Sekundärmaßnahmen, wie z.B. die Kapselung einzelner Lärmquellen zu vermeiden. Letztendlich wird der von den Maschinen abgestrahlte Schall durch den Konstrukteur festgelegt. Dies erfolgt bei

- Auswahl der Wirkprinzipien
- Festlegung des Bau- und Systemzusammenhangs
- Dimensionierung und Auslegung von Bauteilen.

Die Hauptaufgabe des Systems besteht in der Bereitstellung von spezifischem Wissen der Maschinenakustik, begleitend zu den jeweiligen Entwicklungsstadien des Produkts. Der Konstrukteur hat jedoch im allgemeinen nur geringe Kenntnisse der Maschinenakustik. Deswegen muß das akustische

Wissen so aufbereitet sein, daß jeder die Zusammenhänge bei der Schallentstehung versteht und die in der Wissensbasis aufgeführten Informationen nutzen kann. Die Struktur des Systems muß so aufgebaut sein, daß für unterschiedliche Problemfälle eine allgemeingültige Lösung gefunden werden kann. Den Kern des Systems bildet, neben dem Schallflußmodellierer, eine Wissensbasis, in der das maschinenakustische Wissen strukturiert nach dem physikalischen Geschehen entsprechend der ISO 11688-1 /1/ abgelegt wird. Auf diese Wissensbasis kann auf zwei Arten zugegriffen werden:

- der Konstrukteur sucht prinzipielle Maßnahmen zu den maschinenakustischen Beeinflussungsmöglichkeiten entsprechend der physikalischen Vorgänge (Quelle, Übertragung und Abstrahlung)
- der Konstrukteur sucht konkrete Lärminderungsmaßnahmen für bestimmte Baugruppen und Maschinenkomponenten.

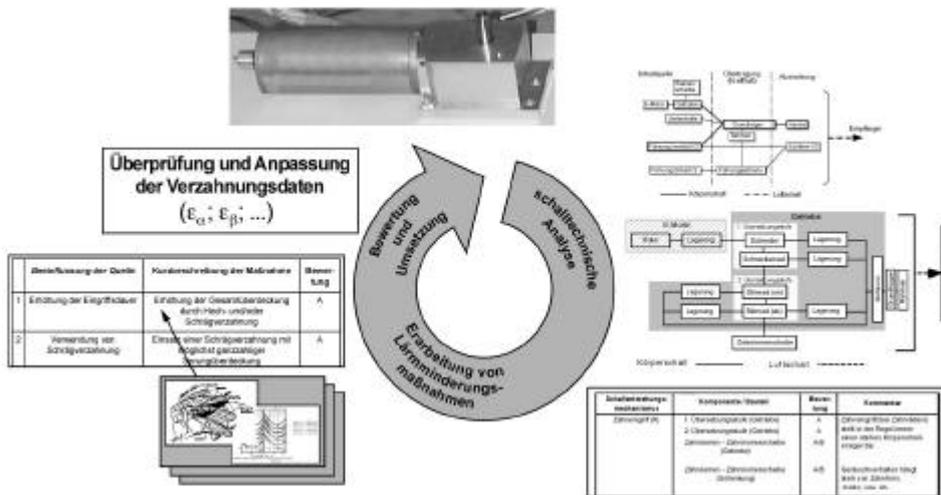
Der Schallflußmodellierer bietet eine Hilfe zur Abbildung der Maschinenstruktur. Mit ihm lassen sich die Schallentstehungs-, Schallübertragungs- und Abstrahlwege nachbilden. Durch die Zerlegung der Maschine in einzelne Baugruppen, bei Bedarf bis hin zu den Einzelteilen möglich (Black-Box-System), kann der Konstrukteur sehr gezielt auf Maßnahmen für einzelne Bauteile aus der Datenbank zugreifen.

### 2 Maschinenakustische Wissensbasis

Die Betrachtung des allgemeinen Problemlösungsprozesses unter rein schalltechnischen Gesichtspunkten kann in drei Hauptarbeitsschritte unterteilt werden, **Bild 1**:

- schalltechnische Analyse
- Erarbeitung von Lärminderungsmaßnahmen
- Bewertung, Auswahl und Umsetzung der Maßnahmen.

Für jeden dieser Arbeitsschritte sind bestimmte Informationen erforderlich, die die Durchführung ermöglichen. So muß zu Beginn eine schalltechni-



**Bild 1:** Allgemeiner Problemlösungsprozess unter schalltechnischen Gesichtspunkten /2/

sche Analyse des Konstruktionsobjekts erfolgen, bei der mit Hilfe der Schallflußmodellierung alle relevanten Bauteile in abstrakter Form erfaßt und maschinenakustischen Eigenschaften (Quelle, Übertrager oder Abstrahler) zugeordnet werden. Hierzu sind detaillierte Informationsbasen über Schallquellen, Übertragungsmechanismen und Abstrahlungsmöglichkeiten notwendig, die dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden müssen, um einen entsprechenden Erfolg der Analyse unter qualitativen Gesichtspunkten zu ermöglichen. Für eine grobe Analyse reichen zu Beginn grundsätzliche Hinweise.

Aus einer akustischen Analyse des Konstruktionsprozesses wird deutlich, welche Informationen der Konstrukteur zur Berücksichtigung akustischer Aspekte benötigt.

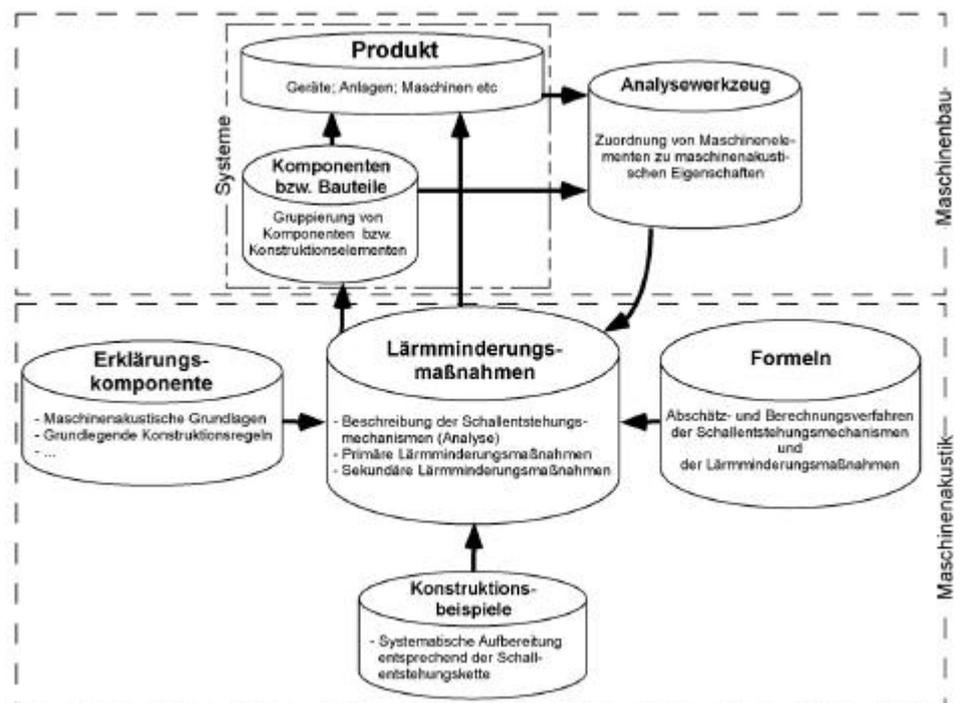
Hierbei sind im wesentlichen zwei grundlegende Hilfsmittel zu sehen, die eine gezielte Unterstützung des Konstrukteurs erlauben. Zum einen handelt es sich dabei um eine maschinenakustische Wissensbasis, in der das notwendige Faktenwissen des Sachsystems "Maschinenakustik" unter konstruktiven Gesichtspunkten abgelegt

ist. Zum anderen wird eine Schnittstelle zwischen dem Konstrukteur und dieser Wissensbasis benötigt, die einen zielgerichteten Informationszugriff auf das abgelegte Faktenwissen ermöglicht. Von wesentlicher Bedeutung ist die Schnittstelle zur Verbindung der komponentenorientierten Konstrukteursicht und die der grundsätzlichen Beeinflussungsmöglichkeiten des physikalischen Geschehens. Diesem

Zweck dient u.a. auch die Schallflußmodellierung, bei der der Konstrukteur durch die Festlegung auf Konstruktionsbauteile einen Zugriff auf relevantes maschinenakustisches Wissen erhält.

**2.1 Systematischer Informationszugriff**

Aus der Analyse des Konstruktionsprozesses unter maschinenakustischen Gesichtspunkten geht hervor, daß abgesehen von der Aufgabenformulierungsphase und des Prototypings maschinenakustisches Wissen benötigt wird, das den Konstrukteur während des Konkretisierungsprozesses unterstützt: von grundlegenden maschinenakusti-



**Bild 2:** Zusammenhang der Informationsbasen und deren -fluß /2/

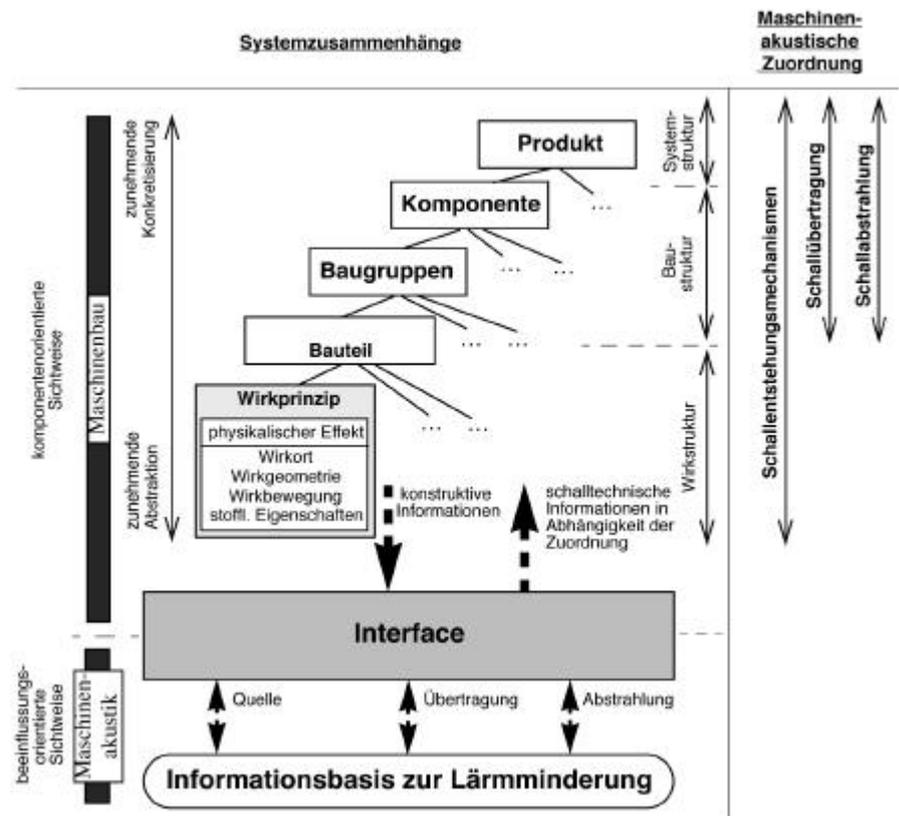
schen Hinweisen bei der Analyse und Auswahl der Wirkprinzipien über konkrete Lärminderungsmaßnahmen bis hin zu Abschätz- und Berechnungsverfahren der Schallentstehungsmechanismen und Lärminderungsmaßnahmen.

Ein Schwerpunkt dabei ist die Verbindung der Maschinakustik mit der Vorgehensweise des Konstrukteurs, um somit gezielt von konstruktiven Gegebenheiten auf schalltechnisch relevante Informationen schließen zu können. Als Ansatzpunkt kann hier die Verknüpfung von Systemelementen mit möglichen Schallentstehungsmechanismen gelten. So kann z.B. dem Konstruktionselement "Welle" und jedem anderen rotierenden Bauteil der Schallentstehungsmechanismus Unwucht (direkt bzw. optional Massenkkräfte) zugeordnet werden. Eine weitere Unterstützung ist hier durch eine "Erklärungskomponente" mit maschinenakustischen Grundlagen sowie bei der Ermittlung der Lärminderungsmaßnahmen mit deren Konstruktionsbeispielen zu sehen.

Zur grundlegenden Einteilung der benötigten Informationen während einer schalltechnischen Untersuchung kann **Bild 2** dienen, das den Zusammenhang der einzelnen Informationsbasen darstellt.

## 2.2 Kopplung von maschinenakustischen und maschinenbaulichen Merkmalen

Die Kopplungsmöglichkeiten zwischen maschinenakustischen und maschinenbaulichen Merkmalen hängt von den Zusammenhängen in technischen Systemen ab. In **Bild 3** wird der Zusammenhang zwischen den verschiedenen maschinenbaulichen Systemen und der maschinenakustischen Zuordnung verdeutlicht. Die Möglichkeiten der schalltechnischen Zuordnung von Merkmalen ist dabei auch vom Abstraktionsgrad abhängig. So können aus der Wirkstruktur im wesentlichen schalltechnische Angaben zu den Schallquellen ermittelt werden, da durch die Wirkprinzipien der Wirkort festgelegt wird, an dem der physikalische Effekt, die



**Bild 3:** Systemzusammenhänge und schalltechnische Zuordnung

Wirkgeometrie und die Wirkbewegung mit den prinzipiellen stofflichen Eigenschaften zusammenwirken. Erst durch die Festlegung der Baustruktur einer Komponente bzw. Baugruppe kann eine erste gesamte schalltechnische Analyse erfolgen, aus der der innere Schallfluß und die Schallabstrahlungsmöglichkeiten bezogen auf Komponenten bzw. Baugruppen ermittelt werden können. Aus der Systemstruktur kann nun Aufschluß über Schallfluß und Schallabstrahlung des gesamten Produkts gezogen werden.

Eine Brücke zwischen der maschinenbaulichen und der maschinenakustischen Welt wird mittels eines Interfaces geschlagen. Erst dadurch wird die Zuordnung bestimmter schalltechnischer Informationen zu den verschiedenen Systemelementen möglich. Die Zuordnung maschinenakustischer Eigenschaften zu maschinenbaulichen ermöglicht den Zugriff auf weitere Informationen zur Lärminderung.

Betrachtet man nun die Art der zugeordneten Informationen zu den verschiedenen Systemelementen (vom Produkt bis zum einzelnen Maschinenelement), so fällt auf, daß detaillierte Informationen zur Beeinflussung der Schallentstehung am Wirkprinzip und dem Maschinenelement bzw. Bauteil sowie die Beeinflussung der Schallübertra-

gung und -abstrahlung bei der Verbindung einzelner Bauteile zu Baugruppen erfolgen kann. Komponenten und Produkte stellen dabei nur eine strukturierte Gruppierung dar.

Mittels des Schallflußmodellierers wird diese Verknüpfung verschiedener Zugriffsweisen ermöglicht, wobei die damit oft hervorgerufene Detaillierung eine Fixierung in ihrer Anwendbarkeit hervorruft. So kann auch ein Konstrukteur mit wenig maschinenakustischen Erfahrungen das System verwenden. In diesem Fall muß die Möglichkeit geboten werden, das Konstruktionsobjekt durch die ihm bekannten Komponenten abzubilden. Verbindet er nun die Komponenten, werden automatisch alle möglichen Körperschallübertragungswege festgelegt. Eine Schallabstrahlung von der Oberfläche eines Bauteils erfolgt von jedem körperschallangeregten Bauteil. Dies führt letztendlich zu einem Modell, bei dem "nur" noch die Relevanz bezüglich der Schallquellen, Übertragung- und Abstrahlungsmöglichkeiten angegeben werden muß.

### 3 Schallflußmodellierer

#### 3.1 Idee und Konzept

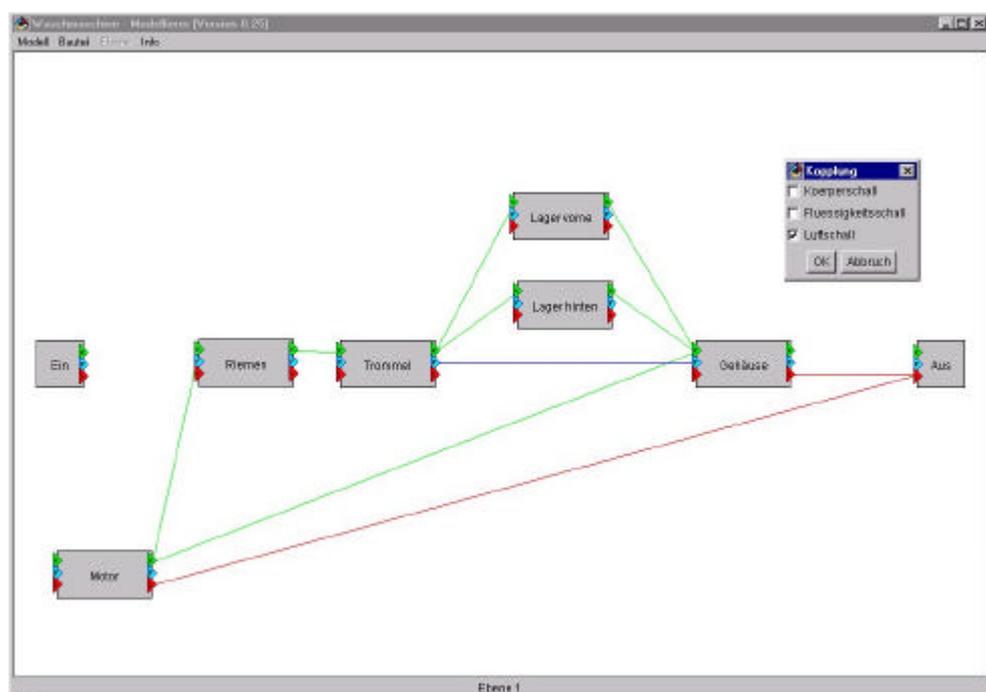
Der Zweck der Schallflußmodellierung liegt neben der graphischen Repräsentation des Konstruktionsobjektes (des Maschinenbauteils) auch in dem darauf folgenden Arbeitsschritt des Verweises auf qualitative und quantitative Informationen, mit denen der nächste Grundschritt im Problemlösungsprozess, die Lösungsfindung, unterstützt werden kann. Der Verweis führt somit auf Lösungsmöglichkeiten bezüglich Schallquellen, Übertragungswege und der Abstrahlung.

Der Konstrukteur kann im Modellierer den Schallfluß von Entwürfen grob nachbilden als auch den von Prototypen und existierenden Produkten detailliert abbilden, um eine Schallflußanalyse durchzuführen. Dazu wählt er aus der vordefinierten Ma-

schinenelemente- bzw. Baugruppensammlung die zu seinem Entwurf oder Prototypen gehörenden Objekte aus. Je nach Bedarf wird man sich durch die Ebenen der Wissensbasis mit den maschinenakustischen Regeln bzw. Hinweise und Mechanismen führen lassen können, um sich über geeignete Lärminderungsmaßnahmen für einzelne Baugruppen oder Komponenten zu informieren. Bei akustischem Hintergrundwissen des Konstrukteurs ist auch die direkte Auswahl geeigneter Maßnahmen möglich. Außerdem kann sich der Konstrukteur allgemein über Aspekte der Maschinenakustik bis hin zu Maßnahmen zur Lärminderung informieren.

Im Modellierer selbst werden die einzelnen Komponenten einer Maschine durch Linien zu einer Gesamtstruktur verbunden. Diese Struktur bildet den Schallfluß der Maschine ab. Die Linienfarbe und der Buchstabe an den Aus- und Eingängen der Komponenten zeigt die Zuordnung zu Körper-, Flüssigkeits- oder Luftschallübertragung bzw. -schallabstrahlung an.

Durch die Verbindung der Modellelemente entsprechend der Maschinenstruktur (z.B. Schweiß- und Schraubverbindungen) wird die Körperschalleitung automatisch mit angegeben. Die Anordnung der Felder in der Benutzeroberfläche kann der Anwender frei gestalten und so die Struktur der betrachteten Komponente abbilden. Die Eingänge einer Komponente befinden sich auf der linken Seite, die Ausgänge auf der rechten. Um zwei Komponenten zu koppeln, wählt der Bediener zwei Felder nacheinander an und trägt die Art der Verbindung in das



**Bild 4:** Abbildung einer Waschmaschine im Modellierer, Ebene 0

in **Bild 4** dargestellte Kopplungsmenü ein. Der Modellierer zeichnet nun die Verbindungslinien von der ersten zur zweiten Komponente.

Durch Abspeichern und neues Aufrufen können Baugruppen erzeugt werden, die als Substruktur oder bei der Modellierung anderer Maschinen wiederverwendet werden können (rekursive Objektdefinition), z.B. Lager, Getriebe, Motoren. Diese Baugruppen werden nach dem Aufruf in das Schallflußmodell übernommen. Eventuell zugehörige und modellierte Einzelkomponenten der Baugruppe befinden sich dann in untergeordneten Ebenen des Modellierers, die wiederum bei Bedarf erweitert und verändert werden können. Die Baugruppe selbst kann auf einer beliebigen Ebene in das Modell eingebunden werden. Als Beispiel für eine solche Baugruppe ist in Bild 4 eine Waschmaschine abgebildet.

Die Felder „Ein“ und „Aus“ sind die Verknüpfungspunkte zur Umgebung. Da bei dem Beispiel die Ebene 0 abgebildet ist, entspricht das einem äußerem Schallfeld, das nicht beeinflussbar ist (Umgebungsärm). Der Ausgang ist dann der Empfänger, also der Mensch mit seinem Gehör (Luftschall). Bei anderen betrachteten Komponenten besteht die Möglichkeit zum Kontakt mit einer Flüssigkeit (Flüssigkeitsschall z.B. bei Ultraschallgeräten) oder Berührung zu einem schwingenden Festkörper (z.B. Fahrersitz) als Körperschall.

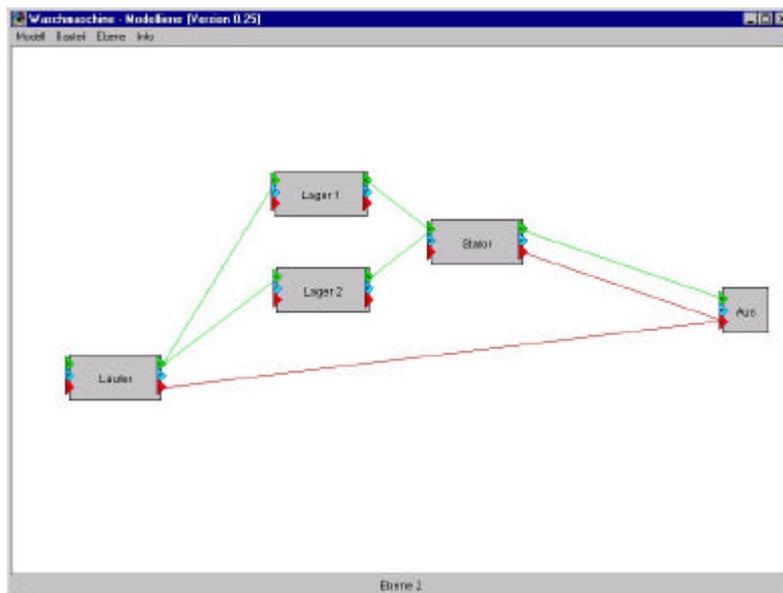
In **Bild 5** ist der Motor der Waschmaschine weiter in Einzelteile aufgespalten, die eine neue Ebene im Modell bilden. Da im übergeordneten Schaltbild kein Schall in den Motor fließt, ist auch hier nichts am Eingang angeschlossen. Der aus dem Motor

austretende Schall wird in die übergeordnete Ebene durch die „Aus“-Schnittstelle übertragen.

Auf diese Weise ist ein flexibler Modellierer entstanden, mit dem es dem Konstrukteur möglich ist, je nach gewünschtem Detaillierungsgrad ein streng hierarchisches Modell seiner zu untersuchenden Komponenten zu erzeugen. Wenn er eine Maschine aus zugelieferten Teilen konstruiert, hat er keinen Einfluß auf das Akustikverhalten der Teile. Er kann dann nur die Übertragung des Schalls über die Verbindungsstellen untersuchen und mindern. In diesem Fall ist eine Detaillierung bis auf einzelne Bauteile unnötig.

Der Lieferant dieser Teile sollte jedoch eine Optimierung des Lärmverhaltens seiner Komponente bis in Details vornehmen.

Der Modellierer dient im Gesamtsystem als Bindeglied bzw. Schnittstelle zwischen der maschinenbaulichen und der maschinenakustischen Sichtweise. Zuerst bildet der Konstrukteur seine Maschinenbaukomponenten ab. Durch eine Verknüpfung mit den maschinenakustischen Beeinflussungsmöglichkeiten (Quelle, Übertragung und Abstrahlung) wird der Bezug auf die Wissensbasis hergestellt. Zum Beispiel kann eine Welle durch Unwucht zu einer Körperschallquelle werden, eine Achse jedoch nicht. So kann der Anwender des Modellierers auch gezielt auf die zugehörigen Beispiele zur Lärminderung der betrachteten Komponente zugreifen oder er sucht sich entsprechende Lärminderungsmaßnahmen anhand der Entstehungsmechanismen heraus: z.B. „Unwucht vermeiden durch dynamische Balancierung“ oder „Zweite, gleichgroße Unwucht mit 180° Phasendifferenz“.



**Bild 5:** Abbildung der Baugruppe Motor im Modellierer, Ebene 1

### 3.2 Aufbau und Struktur

Der Schallflußmodellierer ist in einem Black-Box-System aufgebaut. Das bedeutet, daß ein Knoten (Baustein, Komponente) wieder aus mehreren Unterbausteinen zusammengesetzt sein kann, z.B. wurde der Motor in Läufer, Lager und Stator detailliert. Dadurch wird gewährleistet, daß eine weitere Untergliederung der Komponenten möglich ist und ein durchgängiges Datenkonzept vorliegt. Die höchste Ebene, von der ausgegangen wird, habe den Ebenenzähler  $E=0$ . Je tiefer man in den streng hierarchisch gegliederten Graphen de-

taillierte Ebenen anlegt, desto größer wird der Ebenenzähler E.

Auf jeder Ebene können mehrere Komponenten K liegen. Zwischen den Komponenten der gleichen Ebene  $E_i$  sind Verknüpfungen (gerichtete Kanten in Form von geradlinigen Verbindungslinien) durch eine Adjazenzmatrix jeweils für Körperschall (Kennbuchstabe k), Flüssigkeitsschall (f) und Luftschall (l) festgelegt. Diese sind nicht nur mit Logikwerten besetzt (verbunden oder nicht verbunden) sondern auch mit Zahlenwerten.  $f=0$  bedeutet kein Schallfluß für Flüssigkeitsschall, ein positiver Wert gibt die „normierte“ Größe der Schallmenge an, und „N/A“ bedeutet, daß gar keine Verbindung besteht. Verknüpfungen können nur zwischen den Komponenten innerhalb einer Ebene erstellt werden. Die Position einer Komponente wird im Strukturbaum in folgender Reihenfolge eindeutig bestimmt: E0K3-E1K2-E2K3 = Komponente 3 in Ebene 0 hat eine Unterebene E1. Dort wählt man die 2. Komponente, die weiter untergliedert ist. In dieser Ebene 2 wählt man die 3. Komponente aus.

Die Adjazenzmatrix existiert für jede Ebene, der Graph ist schlicht (schlingenfrei) und hat keine Kreise. Das bedeutet praktisch, daß keine Schallrückkopplung stattfindet, sondern nur in eine Richtung (vom Eingang zum Ausgang) Schall fließt. Der Eingangsknoten „Ein“ bekommt die Werte, die von der übergeordneten Ebene in diese Komponente fließen. Der „Aus“-Knoten ist die Schnittstelle der Unterebene  $E_i$  zur übergeordneten Ebene  $E_{i-1}$ , an die das Ergebnis weitergegeben wird. Die Größe der Matrix ist je nach Anzahl N der Komponenten pro Unterebene variabel und berechnet sich zu  $(N+2; N+2; 3)$ . Die „+2“ stehen für die auf jeder Ebene vorhandenen „Ein“- und „Aus“-Knoten, die man natürlich auch direkt verbinden könnte. Die „3“ ist jeweils die Quantität der Schallflüsse (k, f, l).

### 3.3 Kernel und Rechensystematik

Jeder Knoten des Graphen, also jeder Baustein im Bild (=jede Komponente der Maschine) hat einen Eingang e und einen Ausgang a jeweils für Körper-, Flüssigkeits- und Luftschall (Index k, f und l). Die drei Komponenten werden zu einem Eingangsvektor  $\mathbf{e} = (e_k, e_f, e_l)^T$  und Ausgangsvektor  $\mathbf{a} = (a_k, a_f, a_l)^T$  zusammengefaßt. Viele Maschinenteile übertragen nicht nur eine Schallart, sondern wandeln eine Schallart in eine andere um. Für diese Fälle ist für jede Komponente eine Übertragungsmatrix  $\mathbf{Ü}$  entsprechend dem Verhalten der

Komponente zu besetzen.

$$\mathbf{Ü} = \begin{pmatrix} \ddot{u}_{kk} & \ddot{u}_{fk} & \ddot{u}_{lk} \\ \ddot{u}_{kf} & \ddot{u}_{ff} & \ddot{u}_{lf} \\ \ddot{u}_{kl} & \ddot{u}_{fl} & \ddot{u}_{ll} \end{pmatrix}^T \quad \text{Gl. 1}$$

Neben diesen passiven Eigenschaften (reine Übertragung) kann die Komponente auch Quelleneigenschaften für eine einzelne oder die drei obengenannten Schallarten haben. Diese werden durch einen Quellenvektor  $\mathbf{q} = (q_k, q_f, q_l)^T$  beschrieben. Der Ausgangsvektor ist dann mit dem Eingangsvektor wie folgt linear verknüpft:

$$\begin{pmatrix} a_k \\ a_f \\ a_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{u}_{kk} & \ddot{u}_{fk} & \ddot{u}_{lk} \\ \ddot{u}_{kf} & \ddot{u}_{ff} & \ddot{u}_{lf} \\ \ddot{u}_{kl} & \ddot{u}_{fl} & \ddot{u}_{ll} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_k \\ e_f \\ e_l \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_k \\ q_f \\ q_l \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2}$$

Oder in Matrixschreibweise:

$$\mathbf{a} = \mathbf{Ü} \mathbf{e} + \mathbf{q} \quad \text{Gl. 3}$$

Ausmultipliziert erhält man z.B. für den Körperschallausgang  $a_k$  die Linearkombination:

$$a_k = \ddot{u}_{kk} e_k + \ddot{u}_{fk} e_f + \ddot{u}_{lk} e_l + q_k \quad \text{Gl. 4}$$

Das bedeutet, daß sich der Körperschall des Maschinenbauteils aus den Körper-, Flüssigkeits- und Luftschallkomponenten jeweils mit den Gewichtungsfaktoren  $\ddot{u}_{kk}$  (Körperschall nach Körperschall),  $\ddot{u}_{fk}$  (Flüssigkeitsschall nach Körperschall) und  $\ddot{u}_{lk}$  (Luftschall nach Körperschall) zusammensetzt. Der erste Index steht also für die Quellenkomponente (k, l, f) und der zweite Index für die Zielkomponente (hier immer k). Am Ende wird noch der Körperschallquellenanteil  $q_k$  addiert.

Die Besetzung der Matrix wird aus der Datenbank anhand von Regeln und Abfragen vorgenommen und vom Benutzer entsprechend seinem Anwendungsfall eingetragen. Dabei bedeutet 0 „kein“ bis 5 „sehr gut“ bzw. „sehr viel“. In den folgenden Beispielen wird dieses Vorgehen erläutert:

- Gleitlager:

Da das Gleitlager als reiner Körperschallübertrager (von der Welle zu Außenring) fungiert, ist nur  $\ddot{u}_{kk}$  besetzt. Gleitlager haben eine hohe Dämpfung, deshalb wird hier  $\ddot{u}_{kk} = 1 \dots 2$  angenommen. Es entstehen keine Geräusche, so daß  $q_k = 0$  ist.

$$\mathbf{Ü} = \begin{pmatrix} 1 \dots 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{q} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Wälzlager:

Die Übertragungsmatrix bleibt in ihrer Form beste-

hen, es wird aber  $\dot{u}_{kk} = 2...3$  angesetzt. Da Lager eine Körperschallquelle darstellen (Relevanz je nach Bauart, Größe und Belastung) setzt man  $q_k = 1...2$ .

$$\ddot{\mathbf{U}} = \begin{pmatrix} 2..3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{q} = \begin{pmatrix} 1..2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

• Hydraulikpumpe:

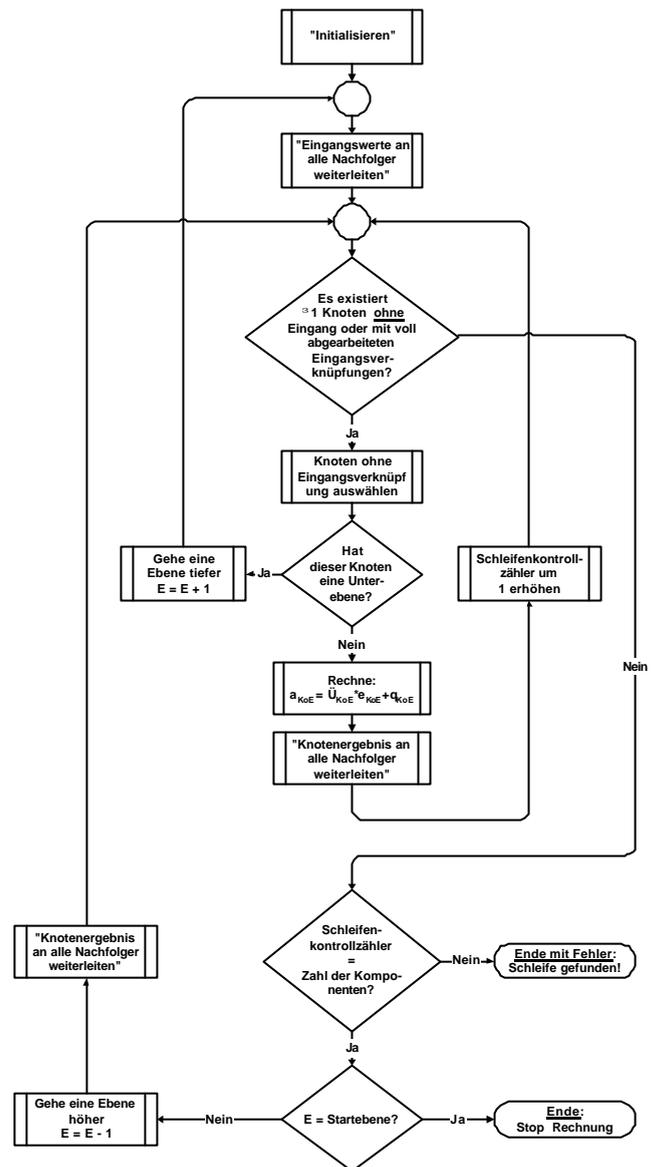
Die Pumpe überträgt die Schwingungen ihres Antriebs z.B. auf das Gestell, erzeugt durch die bewegten mechanischen Teile selbst Körperschall, der wiederum das Fördermedium zu Flüssigkeitsschall anregen kann und über das Gehäuse auch als Luftschall abgegeben wird. Je nach Bauart wird außerdem nicht unerheblich Flüssigkeitsschall erzeugt.

$$\ddot{\mathbf{U}} = \begin{pmatrix} \ddot{u}_{kk} \approx 4 & \ddot{u}_{fk} \approx 2 & 0 \\ \ddot{u}_{kf} \approx 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ mit } \mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_k \approx 4 \\ q_f \approx 5 \\ q_l \approx 4 \end{pmatrix}$$

Die Belegung der Matrizen und der Vektoren ist also je nach betrachteter Komponente sehr unterschiedlich.

3.4 Berechnung und Auswertung

Die Gesamtübertragungswege werden auf Kommando berechnet und zu Beginn alle Eingangs- und Ausgangsgrößen auf 0 gesetzt. Die Rechnung kann an jeder beliebigen Stelle in der Ebenenstruktur beginnen und erfaßt dann alle folgenden Unterebenen. Für eine vollständige Auswertung wird auf Ebene 0 begonnen, so daß sich der rekursive Algorithmus schrittweise durch den Komponentenbaum arbeiten kann. Versehentlich eingebaute Schleifen werden dabei ebenso erkannt wie Unterebenen ohne Inhalt. **Bild 6** zeigt das Flußdiagramm des Hauptprogramms. Da an jedem Eingang einer Komponente mehrere Ausgänge von Vorgängern angeschlossen sein können, wird jeweils das Rechenergebnis des Vorgängers nach **Gl.3** auf den Eingang addiert. Hat der Vorgänger eine oder mehrere Unterebenen, dann werden diese zuerst berechnet. Da die Verbindungen nicht auf eine Schallart beschränkt sind, wird eine neue Adjazenzmatrix durch „Oder“ Verknüpfung der drei Untermatrizen für Körper- Luft- und Flüssigkeitsschall erstellt. So ist immer gewährleistet, daß nur Knoten mit vollständig bekannten Eingangsvektoren berechnet werden. Sollte eine Schleife in einer Ebene sein, dann findet der Rechner keine weiteren Knoten zur Verarbeitung. Wenn die Zahl der



**Bild 6:** Rekursiver Rechenablauf zur Bewertung des Schallflusses

abgearbeiteten Knoten kleiner als die Zahl der Knoten auf der aktuellen Ebene ist, dann hat der Benutzer versehentlich eine Schleife im Graphen erzeugt, die als Fehler gemeldet wird.

Da jede Komponente aus Unterbaugruppen zusammengesetzt sein kann, ist es wichtig, die Gesamtübertragungsmatrix für diese Komponente und ihre Quelleneigenschaften zu ermitteln. Dazu sind die folgenden Rechenschritte notwendig:

Um die Quelleneigenschaften einer Substruktur zu ermitteln, setzt man den Eingangsvektor dieser Struktur auf Null. Da kein Eingangsschall vorhanden ist, bleibt nach dem vollständigen Durchrechnen nur der gesamte innere Quellenanteil jeweils für die drei Schallarten übrig.

Die Summenübertragungsmatrix einer Baugruppe erhält man in drei Schritten ähnlich einer Matrizeninvertierung. Man beginnt, indem man den Ein-

gangsvektor auf den Einheitsvektor  $\mathbf{e} = (e_k = 1, e_f = 0, e_l = 0)^T$  mit reinem Körperschall setzt. Nach dem Durchrechnen erhält man einen Ausgangsvektor, der die Anteile aus der Übertragung des Einheitsvektors und die Quelleneigenschaften enthält. Letztere werden subtrahiert, und man bekommt die Übertragungskomponenten  $\ddot{u}_{kk}$  (KS nach KS),  $\ddot{u}_{kf}$  (KS nach FS) und  $\ddot{u}_{kl}$  (KS nach LS). Die Übertragungsmatrix ist also somit in der ersten Spalte besetzt. Analog permutiert man die Eingangsvktoren durch und erhält dann auch die Übertragungskomponenten für FS und LS, so daß die Matrix voll definiert ist. Prinzipiell kann man auch die Quellenvektoren aller Unterkomponenten auf Null setzen und braucht dann nicht mehr den Quellenanteil zu subtrahieren.

Für den Anwender sind Informationen über kritische Pfade im Schallflußplan nach der Rechnung extrahierbar. Wenn man sie in einer Liste nach der Größe sortiert, hat man sofort die Ansatzpunkte für eine Schallminderung. Beispielhaft aufgelistet:

- „Wo ist die stärkste Quelle?“ kann beantwortet werden, wenn man alle Quellenvektoren aller Komponenten und Unterbaugruppen durchsucht
- „Wie hoch ist der Anteil einer Quelle zum Gesamtgeräusch?“ wird ermittelt, indem eine Rechnung nur mit dieser Quelle und eine Rechnung mit allen Quellen verglichen werden
- „Wo ist ein kritischer Übertragungsweg?“ zeigt an, wo ein großer Wert in der Übertragungsmatrix steht. Ein kritischer Weg ist aber auch dort, wo ein großer Eingangswert und ein großer Übertragungsfaktor zusammentreffen, also eine große Quelle und ein guter Übertrager sich in einem Pfad befinden. Diese Kombinationen können aufgefunden und in einem Ranking aufbereitet werden. Die Dicke der farbigen codierten Verbindungslinien im Modell kann proportional dem Schallfluß gestaltet werden, so daß man auch visuell leicht die Schwachstellen erkennt.
- „Wer ist ein starker Abstrahler?“ zeigt alle Komponenten mit einem hohen Luftschallanteil am Gesamtgeräusch an, die alle mit entsprechenden KS/FS- zu LS-Werten belegte Matrizen haben.

#### 4 Zusammenfassung

Die eigentliche Schwierigkeit bei der Konstruktion lärmarmer Maschinen besteht in der Kopplung der verschiedenen „Welten“. So besteht die Welt der Konstrukteure im wesentlichen aus Kräften, Momenten, Spannungen, Kinematik, Dynamik sowie dem Kraft- und Energiefluß usw., wohingegen die der Maschinenakustik im wesentlichen aus Energieflüssen mit Schallquellen, Übertragungswegen und Abstrahlflächen besteht. Diese Betrachtungsweise entspricht nur einer groben Einteilung. Die Kopplung der maschinenbaulichen mit der maschinenakustischen Welt muß daher durch das Zusammenspiel verschiedener Hilfsmittel und Methoden unterstützt werden. Wichtig hierbei ist

- die Berücksichtigung involvierter Sichtweisen
- die Berücksichtigung entsprechend aufbereiteter Wissensbasen
- die Verwendung problemspezifischer Kopplungsmodule
- die Anwendung von Rechen- und Auswertetechniken

Mit dem im DFG-Projekt entwickelten Konstruktions-Informationssystem ist ein solches System zur Verknüpfung der Bereiche Maschinenakustik und Maschinenkomponenten entstanden. Durch dieses System sind umfangreiche Analysen von geplanten als auch bereits realisierten Maschinen und Anlagen im Hinblick auf ihr akustisches Verhalten möglich.

#### 5 Literatur

- /1/ ISO 11688: Acoustics - Recommended practice for the design of low-noise machinery and equipment. Part 1: Planning, International Standardisation Organisation; Genf; März 1995
- /2/ Gummersbach, F.: Lärmabwehr, Etwas Historisches und Aktuelles-; Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. hc. Dr.-Ing. Peter Dietz; Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal; 1999
- /3/ Pahl, G.; Beitz W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1997
- /4/ Rembold, U. (Hrsg.): Einführung in die Informatik für Naturwissenschaftler und Ingenieure. 2. bearb. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 1991