

U. Stephenson

## Computersimulation der Schallausbreitung in Werkhallen beliebiger Geometrie und inhomogener Ausstattung

### Einleitung

Für weit ausgedehnte, flache, mit Maschinen und anderen schallstreuenden Anlagen aller Art ausgerüstete Fabrikhallen existieren zwar zahlreiche, empirische, analytische oder numerische Rechenmodelle. Ihr Gültigkeitsbereich ist aber unklar; vor allem ist das Anwendungsfeld der einfacheren Modelle meist auf geometrisch einfachere Fälle begrenzt, weswegen es sich - gerade auch angesichts der weiten Verbreitung von Kleincomputern - lohnt, die Leistungsfähigkeit der numerischen Modelle näher zu untersuchen. Dies ist im Fraunhofer-Institut für Bauphysik, aufbauend auf früheren Programm-Entwicklungen [1 bis 3], geschehen.

### Schallteilchen-Streu-Verfahren

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelte im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz (BAU) das zur Anwendung auf Konzertsäle bereits bestehende und erprobte Schallteilchen-Verfahren weiter [4]. Für Fabrikhallen wurde es um einen besonderen Teil [5] zur Berechnung der Schallstreuung ergänzt, der als Neuerung auch die Vorgabe inhomogener Streuflächendichten erlaubt, wie sie in Fabrikhallen mit ihren unterschiedlichen Anordnungen von Maschinen, Regalen, Rohrsystemen oft vorherrschen [6].

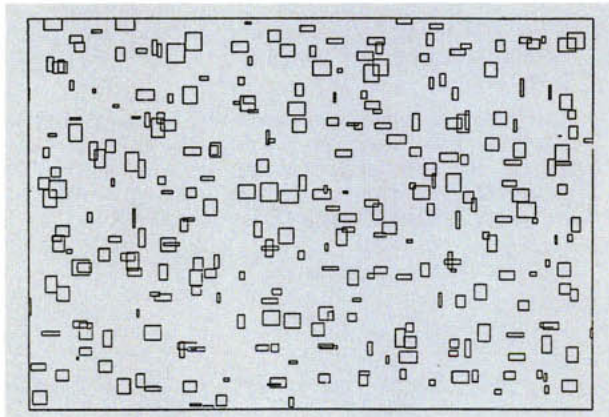


Bild 1: Mit Rechnerhilfe geschätzte Zufallsverteilung quaderförmiger Streukörper der Streuflächendichte  $q = 0,03 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Bild 1 zeigt dazu eine fiktive, vom Rechner per Zufall erzeugte, den realen Verhältnissen einer Fabrikhalle ähnliche Anordnung, bestehend aus quaderförmigen Streukörpern. In einem „Trial and Error“-Verfahren, bei dem auf größtmögliche Ähnlichkeit mit dem visuellen Gesamteindruck von der Halle geachtet wurde, konnte so die Streuflächendichte für die Fabrikhalle bestimmt werden. Eine explizite Erfassung und Summation aller Geräteoberflächen in einer Fabrikhalle erwies sich als illusorisch; im übrigen ist sie für die folgende statistische Simulation auch nicht erforderlich.

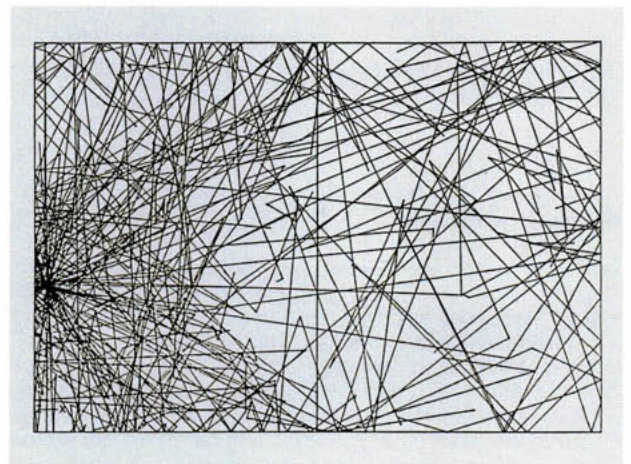


Bild 2: Pfade von gestreuten Schallteilchen; bei links hoher, rechts geringer Streuflächendichte ( $q = 0,03$  bzw.  $0,01$ )

Bild 2 zeigt die Pfade teils gestreuter, teils reflektierter Teilchen, so wie sie bei der Simulation im Rechner entstehen. Die Teilchen werden dabei nach einer per Zufall bestimmten freien Flugstrecke angehalten und, ebenfalls durch Aufruf von Zufallszahlen, mit gleicher Wahrscheinlichkeit pro Raumwinkel (mit kugelförmiger Streucharakteristik) in eine neue Flugrichtung umgelenkt. Reflexionen an Außenwänden und Streuungen an Flächen, die mit Streukörpern wie Maschinen und Anlagen belegt sind, werden dabei in einer vom Zufall bestimmten Reihenfolge, jedoch mit der statistisch richtigen Häufigkeit erzeugt. Eine inhomogene Streukörperflächendichte wird da-



durch simuliert, daß der Gesamtraum in Teilräume konstanter Streuflächendichte aufteilbar ist, und zwar durch Errichtung transparenter Zwischenwände, an denen die Schallteilchen einen „Zwischenhalt“ einlegen (Bild 2, Mitte); hierbei werden die Streuparameter für den Raum „dahinter“ umgeschaltet. Die Schallteilchen werden unterwegs auf allen Streckenabschnitten zwischen Streuungen und Reflexionen bei Durchquerung kubischer „Detektoren“ registriert, in denen ihre Energie aufsummiert wird [2]. Daraus werden schließlich die lokalen Schallenergiedichten berechnet; die Pegelverteilungen können in der bekannten Weise anschaulich als „Lärmkarte“ der Halle dargestellt werden.

Die Rechenzeiten konnten in den letzten Jahren durch zahlreiche Verbesserungen [4] drastisch reduziert werden; selbst für Personalcomputer liegt nunmehr die Rechenzeit zur Simulation typischer Konstellationen bei unter einer halben Stunde, und das bei statistisch bedingten Genauigkeiten von besser als 1 dB.

### Messungen in Fabrikhallen

Die Grundrißformen der untersuchten Hallen waren nur zum Teil rechteckig. Ein Raum war eher L-förmig. Ein anderer war mittig durch eine Art „Brücke“ unterteilt (siehe Bild 3). Die ausgesuchten Fabrikhallen besaßen Längen zwischen 110 m und 360 m, Breiten von 76 m bis 120 m und Höhen von 8 m bis 10 m.

Die Schallausbreitungsmessungen wurden in drei Fabrikhallen ausgeführt, wobei folgende Randbedingungen und Daten zugrundegelegt wurden:

- leer, keine Halleneinrichtung
- vollgestellt mit Anlagen beziehungsweise Maschinen
- bis zu 12 Schallpfade (von 4 verschiedenen Quellen ausgehend)
- circa 1500 Meßpunkte insgesamt
- 6 Oktavbänder von 125 bis 4000 Hz.

Durch Subtraktion der Immissionspegel von den vorher im Hallraum und im reflexionsarmen Raum gemessenen Schalleistungspegeln wurden die Ausbreitungspegelminderungen berechnet. Bei der Bestimmung der nötigen akustischen Eingabedaten zeigte sich, daß der Nachhall in solchen Hallen anderen Gesetzen gehorcht als üblicherweise angenommen, so daß aus Nachhallmessungen die Absorptionsgrade nicht bestimmt werden konnten.

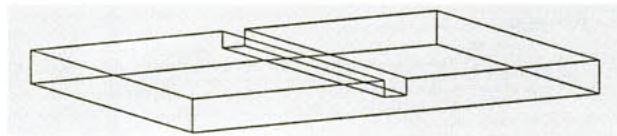
### Auswertung der Messungen und Vergleich mit den Rechenergebnissen

Die vereinfachende Annahme einer richtungsunabhängigen Pegelabnahme von 4 dB pro Abstandsverdoppelung erwies sich im Mittel zwar als richtig, aber als zu stark vereinfacht, weil sie abstandsabhängig zwischen 3 und 13 dB schwankte. Der letzte Wert tritt bei hohen Entfernungen auf und hängt von der Streuflächendichte in den Hallen ab. Einzelne Arbeitsplatzpegel können aufgrund ihrer besonderen Lage von den nach der 4-dB-Prognoseformel berechneten um bis zu 20 dB abweichen. Die Sabine'sche Theorie des diffusen Schallfeldes erweist sich damit für flache Industriehallen als falsch. Untersuchungen zahlreicher weiterer Abhängigkeiten [6] erlaubten, für eine VDI-Richtlinie mit vereinfachtem Rechenverfahren einen stückweise linearisierten Pegelverlauf als Funktion des logarithmierten Abstands zu empfehlen. Die nach dem Schallteilchen-

verfahren berechneten Pegel weichen von den gemessenen im Mittel um nur 0,6 dB ab (Standardabweichungen 2,2 dB). Bei Entfernungen unter 40 m ist die Abweichung noch geringer. Die Genauigkeit des Schallteilchenverfahrens erweist sich damit, verglichen mit anderen untersuchten Rechenverfahren, als sehr gut. Fallweise treten einzelne höhere Abweichungen auf, die aber ohnehin durch keines der statistischen Streu Modelle richtig erfaßt werden.

Problematisch bleiben die Eingabeparameter, insbesondere die Streuflächendichten. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen auch, daß die Wahl der Eingabeparameter die Ergebnisse stärker bestimmt als die Wahl des Rechenverfahrens selbst (sofern dies die Streueffekte erfasst). Empfehlenswert erscheint die Schaffung von industrietypischen Eingabedaten, z.B. in einer praxisnahen Katalogform.

Die Stärke des Schallteilchenverfahrens kommt dann voll zur Geltung, wenn es sich um nicht-quaderförmige Räume beziehungsweise solche mit ungleichförmiger Aufstellichte von Maschinen und Anlagen handelt. Dies ist in der Praxis meist der Fall, wie z. B. bei Räumen mit angekoppelten Seitenräumen, Raumunterteilungen, bei einzelnen dominierenden Schallschirmen oder Maschinen, leeren Stellflächen usw. Ein weiteres Beispiel dafür ist die in Bild 3 gezeigte und mit dem neuen Verfahren simulierte Anordnung. Solche Fälle werden nämlich - sofern die Schallpegel auch in größerer Entfernung von dominierenden Lärmquellen berechnet werden sollen - von anderen Rechenverfahren zur Schallausbreitung in Werkhallen bislang nicht erfaßt.



**Bild 3:** Eine durch Überwachungsräume („Brücke“) in der Mitte halbfächig geteilte Fabrikhalle, perspektivisch gezeichnet vom Computer

### Literatur

- [1] Röhm, W.: Ein quasi-deterministisches Verfahren zur Berechnung der Pegelverteilung in Fabrikhallen. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, BS 107/84 (1984).
- [2] Stephenson, U.: Lärmimmissionsprognose mittels Schallfeldcomputersimulation. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, BS 198/88 (1988).
- [3] Stephenson, U.: Berechnung der Schallausbreitung von Kraftwerksanlagen mit Hilfe der Schallteilchenmethode. VGB-Kongreß „Kraftwerke 1990“, 21. Sept. 1990, Hrsg. VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.
- [4] Stephenson, U.: Verbesserungen bei der computergestützten Schallfeldsimulation für Konzertsaal und Lärmimmissionsprognose. IBP-Mitteilung 185, 16 (1989).
- [5] Ondet, A.M., Barbry, J.L.: Modelling of Sound Propagation in Fitted workshops Using Ray Tracing. JASA 85 (1984), S. 787-796.
- [6] Stephenson, U.: Leistungsfähigkeit und Genauigkeit eines um Streueffekte ergänzten Schallteilchen-Simulationsverfahrens zur Schallpegelprognose in Werkhallen. VDI-Bericht 860 Fachtagung „Schallausbreitung in Werkhallen“, Köln 1990, VDI-Verlag, Düsseldorf (1990).



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK  
 Leiter: o.Prof. Dr. Dr. h.c. Karl Gertis  
 7000 Stuttgart 80, Nobelstraße 12, Tel.(0711)970-00  
 8150 Holzkirchen (OBB), Postf. 1180, Tel. (08024)643-0

Herstellung und Druck:  
 SDSC, Informationszentrum RAUM und BAU  
 der Fraunhofer-Gesellschaft, Stuttgart  
 Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung des  
 Fraunhofer-Instituts für Bauphysik