

Strategien zur Lärmprognose für Arbeitsstätten mit Maschinen

Wolfgang Probst

DataKustik GmbH, 86926 Greifenberg, E-Mail: wolfgang.probst@datakustik.de

Einleitung

Die Prognose der zu erwartenden Beurteilungspegel in Arbeitsstätten ist ein wichtiges Element bei der Neuplanung oder der wesentlichen Änderung von Anlagen und technischen Einrichtungen. Dabei ist es erforderlich, die Emission von Maschinen und anderen lärmrelevanten Geräten sowohl hinsichtlich der Intensität wie auch der Richtungsverteilung hinreichend genau zu beschreiben und die Schallausbreitung auch mit den aufgrund der technischen Einrichtung häufig komplexen Randbedingungen zu berechnen.

Dies ist einer der wesentlichen Anwendungsbereiche des im Programmsystem CadnaR [1] angewendeten Verfahrens SERT (Stochastic-Energy-Ray-Tracing). Es erlaubt die Berechnung der von beliebigen Schallquellen verursachten Schallpegel, ermöglicht aber auch die Bestimmung der energiebezogenen Impulsantwort für jeden beliebigen Punkt eines Raumes und damit auch alle daraus ableitbaren Kenngrößen wie die Nachhallzeiten oder die Speech-Transmission-Indizes STI.

Damit ergeben sich viele neue Strategien zur Beurteilung und zur Optimierung von Arbeitsstätten. Der erste Schritt betrifft die Schallausbreitung bzw. die Vorausberechnung und Beurteilung der raumakustischen Kenngrößen, wie sie in der Richtlinie VDI 3760 [2] beschrieben sind. Durch Berechnung der in 122 Industriehallen gemessenen Schallausbreitungskurven und Vergleich von gemessenen mit berechneten Pegelwerten konnte das Verfahren validiert [3] und hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit beurteilt werden.

Der zweite Schritt betrifft die Einbeziehung von realen Maschinen und technischen Einrichtungen als Schallquellen und die Berechnung der von diesen verursachten Beurteilungspegel. Dabei hat es sich in vielen Fällen als vorteilhaft erwiesen, neben dem nach Maschinenrichtlinie festgelegten Emissionskennwert des Schallleistungspegels L_{WA} auch den ebenfalls nach dieser Richtlinie anzugebenden Emissions-Schalldruckpegel L_{pA} als wesentliche Ausgangsgröße einzubeziehen. In einem früheren Beitrag zur DAGA [4] ist das dabei angewendete Verfahren und insbesondere die hierfür notwendige Softwarestrategie und Datenorganisation beschrieben worden.

Mit dieser Anknüpfung an die genormten Kennwerte gewinnen auch die zahlreichen Richtlinien der Reihe ETS (Emission Technischer Schallquellen) wieder an Bedeutung - sie bilden praktisch eine normativ verankerte Datenbasis zur Durchführung von Lärmprognosen nach diesem Konzept. Es bietet sich an, die teilweise nicht mehr den aktuellen Stand der Technik repräsentierenden Datensammlungen unter Einbeziehung neuerer Erfahrungen mit dem geringstmöglichen Aufwand zu aktualisieren und

durch jeweils einen Abschnitt mit Hinweisen zur Modellierung zu ergänzen. Dieses Verfahren wird derzeit im Zuge einer Überarbeitung der Richtlinie VDI 3741/5/ in Zusammenarbeit mit Maschinenherstellern, Beratungsingenieuren und Berufsgenossenschaften erprobt. Im folgenden Beitrag wird insbesondere auf diese Modellierungstechniken näher eingegangen.

Der mit einer Immissionsprognose für die Arbeitsplätze ermittelte frequenzabhängige Schallpegel kann aufgrund der Anwendung des SERT-Verfahrens nunmehr die Ausgangsgröße für viele weitere die Sprachverständlichkeit betreffende Beurteilungen bilden. Dies betrifft zum Beispiel die erforderliche Platzierung von Lautsprechern für Durchsagen, deren Verstehen durchaus sicherheitsrelevant sein kann. In einem anderen Beitrag zu dieser DAGA [6] wird erläutert, wie das von sprechenden Personen in Büros, Restaurants und anderen derartigen Aufenthaltsräumen verursachte Hintergrundgeräusch berechnet und als Eingangsgröße zur Beurteilung der Sprachverständlichkeit und damit zur iterativen Optimierung der Planung verwendet werden kann.

Grundvoraussetzung aller dieser Techniken ist das hinreichend "genaue" berechnen der Schallausbreitung von einer Punktschallquelle gegebener Emission sowie der Konstruktion von Maschinenmodellen, die im Hinblick auf diese Berechnung der Schallausbreitung eine Anordnung von Punktschallquellen darstellen.

Die Genauigkeit bei der Berechnung der Schallausbreitung - Vergleich Rechnung - Messung

Zur Validierung des Berechnungsverfahrens konnte auf die durch Messung in 122 Industriehallen im Zuge der Arbeiten zur Richtlinie VDI 3760 gewonnenen Daten zurückgegriffen werden. Die beschreibenden Daten der Hallen mit den relevanten akustischen Parametern wurden in einem automatisierten Ablauf zur Generierung der 122 Modelle verwendet und es wurden die frequenzabhängigen Schalldruckpegel auf den bei der Messung verwendeten Pfaden berechnet. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen von gerechneten und gemessenen Schalldruckpegeln sind ein Maß für die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens. An dieser Stelle sollen nur die Ergebnisse der Untersuchung nach [3] zusammengefasst werden.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen beispielhaft die gemessenen und berechneten Ausbreitungskurven für dieselbe Halle - erst leer und ohne Auskleidung und dann im fertigen Endzustand.

Bei der automatischen Generierung der Modelle aus den Datensätzen und bei der Berechnung der Pegeldifferenzen

erfolgte keinerlei Nachjustierung. Die Pegel sind aus gemessenen und gerechneten Oktavpegeln auf das gleiche Bezugsspektrum (rosa Rauschen) bezogene A-Schalldruckpegel.

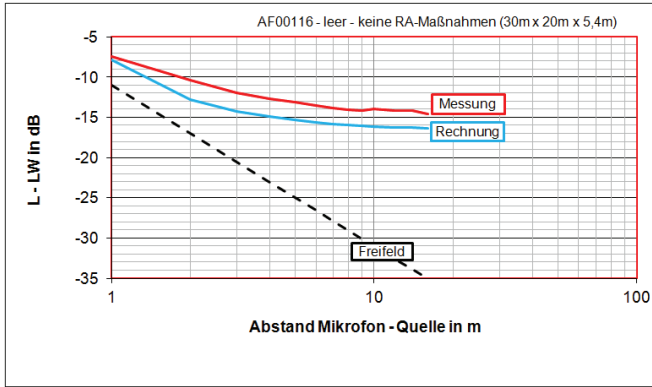


Abbildung 1: Gemessene und berechnete A-Schalldruckpegel auf einem von der Punktschallquelle (Dodekaeder-Lautsprecher) wegführenden Pfad für eine leere Halle ohne Ausstattung.

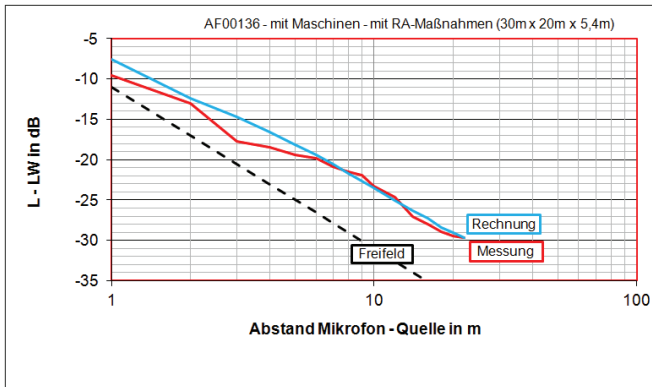


Abbildung 2: Gemessene und berechnete A-Schalldruckpegel auf einem von der Punktschallquelle (Dodekaeder-Lautsprecher) wegführenden Pfad derselben Halle mit Maschinenanlage und absorbierendem Deckensystem

Abbildung 3 zeigt die Streuung der Abweichungen (Mittelwert \pm Standardabweichung) für den Abstandsbereich 6m bis 16m - die Werte stimmen gut mit den ehemals mit dem Spiegelquellenverfahren nach VDI 3760 ermittelten Werten überein.

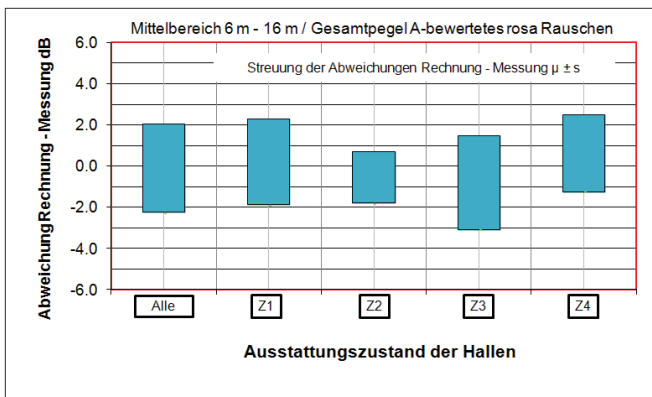


Abbildung 3: Streuung ($\alpha \pm s$) der Abweichungen Rechnung - Messung. Z1 - Z4 bezeichnen die Ausstattung (Z1 leer, Z2 mit absorbierenden Maßnahmen, Z3 mit Absorption und mit Maschinenanlage, Z4 ohne Absorption mit Maschinenanlage)

Letzten Endes sind die verbleibenden Unsicherheiten kaum mehr durch das Rechenverfahren beeinflussbar - aufgrund der Raumbeschreibung mit aus der Beobachtung geschätzten akustischen Parametern wie der Streukörperdichte kann das Ergebnis als sehr gut bezeichnet werden.

Modellierung und Kalibrierung von Maschinen

Der Aufwand zur Erstellung von Maschinenmodellen kann höchst unterschiedlich sein und wird sich an der jeweiligen Aufgabenstellung orientieren. Obwohl in vielen Fällen auch schon mit einer oder mit wenigen Punktschallquellen die akustischen Anforderungen erfüllt werden können, wird ein Maschinenhersteller oder branchennaher akustischer Berater zumindest die äußere Geometrie grob nachbilden wollen. Dies ermöglicht es dann auch, das Modell in unterschiedlichen Projekten wieder zu verwenden und auch maschinennahe Maßnahmen wie Teiltrennwände oder lokale Absorptionsverkleidungen berücksichtigen zu können.

Ein einfaches aber zielführendes Konzept besteht darin, die Maschine entsprechend Abbildung 4 durch den die schalltechnisch relevanten Teile möglichst eng umschließenden Quader zu ersetzen (der Bezugsquader nach ISO 3744). Seine Oberfläche wird mit Punkt-, Linien- oder Flächenquellen so belegt, dass die an der realen Maschine gemessene Emission hinsichtlich Gesamtpegel und Richtwirkung möglichst genau nachgebildet wird.

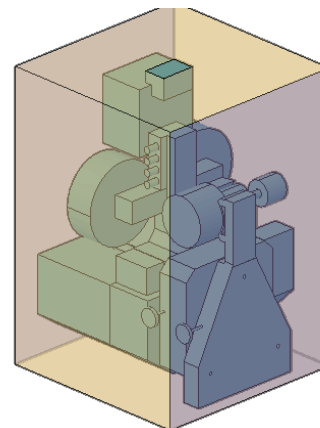


Abbildung 4: Das Computermodell der Maschine ist der die geräuschrelevanten Teile umhüllende Bezugsquader

Im folgenden soll der häufig vorkommende Fall beschrieben werden, dass aufgrund von Vormessungen die bereinigten Schalldruckpegel an benachbarten Punkten - z.B. auf einer Umfangslinie - bekannt seien. Ein reales Beispiel zeigt Abbildung 5.

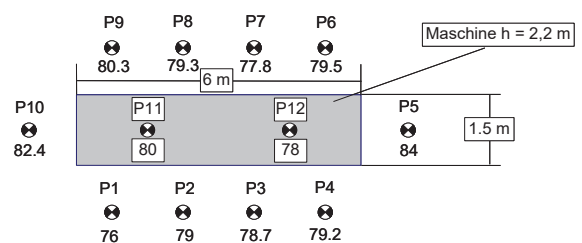


Abbildung 5: Maschine mit bereinigten Messwerten in 1m Abstand

Die Modellierung erfolgte in diesem Beispiel wie beschrieben durch den Bezugsquader. Um die über Messung ermittelten unterschiedlichen Pegel im Freifeld zu erzeugen, werden am Modell gemäß Abbildung 6 unterschiedliche Abstrahlflächen vorgesehen.

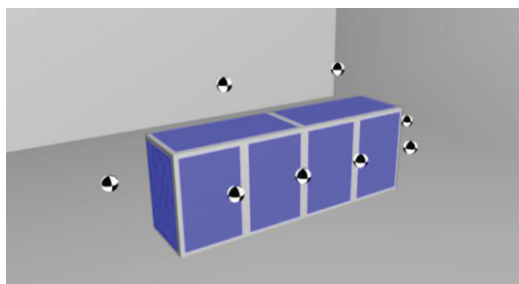


Abbildung 6: Maschinenmodell mit mehreren Abstrahlflächen und den Immissionspunkten, deren Pegel reproduziert werden sollen.

Softwaretechnisch muss sichergestellt werden, dass ohne Änderung des Gesamtmodells mit dem Raum und den anderen Maschinen und Einrichtungen eine Freifeldrechnung durchgeführt werden kann, bei der eben nur die direkte Abstrahlung und die Reflexion am Boden einbezogen ist.

In den meisten Fällen kann durch wenige Iterationsschritte die richtige Emission der Flächenquellen auf der Oberfläche ermittelt werden. Hierzu wird diesen Quellen ein Emissions-Testwert zugewiesen, die Freifeldberechnung durchgeführt und die Abweichung der erhaltenen von den erforderlichen Immissionswerten zur Korrektur der Emission verwendet.

Wenn jedem Messpunkt ein Abstrahlbereich zugeordnet ist, kann die Rückrechnung auf die erforderliche Emission auch durch Lösung des entsprechenden linearen Gleichungssystems erfolgen. Hierzu wird im ersten Schritt jeder Abstrahlfläche j ein beliebiger Testwert E_j - z.B. $L_{WA} = 80$ dB - zugewiesen und es werden an jedem Immissionpunkt i die Teilschallpegel $T_{i,j}$ durch Freifeldrechnung ermittelt.

Tabelle 1: Teilschallpegel aller Abstrahlflächen HF_W bis VF_W an allen Immissionspunkten P1 bis P12

Punkt	Teilfläche											
	HF_W	HF_O	VF_S1	VF_S2	VF_S3	VF_S4	VF_O	VF_N1	VF_N2	VF_N3	VF_N4	VF_W
P1	55.4		75	72.1	68	65.2						
P2		52.1	72	75.1	72	68.1						
P3			68.1	71.9	75	72						
P4		55.1	65.2	68	72	75						
P5							75.3					
P6		55.2						65.3	68	71.9	75	
P7	52.3	55.2						68	72	75	72	
P8	55.4							72	75.1	72	67.9	
P9	55.1							75	72	68.1	65.3	
P10												75.1
P11	75.8	68.2										
P12	68.3	75.8										

Aus diesen Werten entsprechend dem Beispiel Tabelle 1 ergibt sich die Koeffizientenmatrix

$$a_{i,j} = 10^{0,1(T_{i,j}-E_j)} \quad (1)$$

Mit dem die gewünschten Pegel an den Immissionspunkten i beschreibenden Ergebnisvektor

$$Y_i = 10^{0,1 \cdot L_{soll,i}} \quad (2)$$

und dem die gesuchten Emissionswerte $E_{soll,j}$ der Teilquellen beschreibenden Vektor

$$X_j = 10^{0,1 \cdot E_{soll,j}} \quad (3)$$

ergeben sich die gesuchten Lösungen X_j des Gleichungssystems

$$M \cdot X = Y \quad (4)$$

durch Multiplikation der zur Koeffizientenmatrix inversen Matrix mit diesem bekannten Ergebnisvektor

$$X = M^{-1} \cdot Y \quad (5)$$

und aus diesem mit (3) die gesuchten Emissionswerte der Teilquellen.

Dieses Verfahren der "Rückrechnung" von gewünschten Immissionswerten auf die erforderlichen Emissionswerte führt im Bereich der Pegelberechnung oft auf das Problem, dass sich rein rechnerisch aus (5) negative Werte für X_j ergeben, die quasi eine "schallabsaugende" Flächenquelle erforderlich machten. Dies tritt vor allem dann auf, wenn an benachbarten Punkten so unterschiedliche Pegel reproduziert werden sollen, dass dies mit ungerichtet abstrahlenden Quellbereichen nicht mehr realisiert werden kann. Diese großen Pegelunterschiede benachbarter Punkte können sich nur ergeben, wenn in Realität eben keine ungerichtete Abstrahlung erfolgt und sich durch Teilabschirmungen oder andere Einflüsse entsprechende Richtwirkungen ergeben.

Mit dem hier vorgeschlagenen Verfahren der akustisch orientierten "Kalibrierung" wird deshalb im ersten Schritt das genannte Gleichungssystem gelöst. Wenn sich für eine Teilquelle ein negativer Wert nach (3) ergibt, wird den dieser Teilquelle benachbarten Quellen eine schrittweise erhöhte Richtwirkung zugewiesen und das Verfahren wiederholt, bis sich ein $X_j \geq 0$ ergibt.

Im vorgenannten Beispiel war diese Anpassung mit Richtwirkungen nicht erforderlich. Vielmehr ergaben sich durch Lösung des Gleichungssystems (5) Emissionswerte, die durch geringe Anpassung in einem zweiten Iterationsschritt die gewünschte Verteilung der Freifeld-Immissionswerte ergeben.

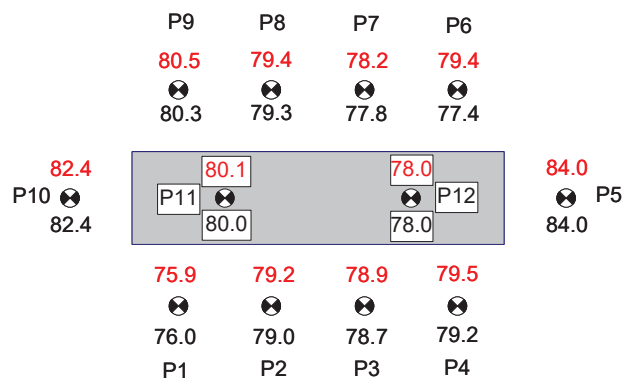


Abbildung 7: Sollwerte und über Freifeldberechnung sich ergebende Werte (rot), wobei die Emissionswerte durch Rückrechnung nach Gleichung (5) ermittelt worden sind

Die beschriebene Modellierung von Maschinen durch einen "Bezugsquader" ist effizient und schnell durchführbar und führt auch akustischer Hinsicht zur ausreichend genauen Simulation. Allerdings kann es im Sinne der "Wiedererkennung" im Dialog der beteiligten Parteien (Anlagenbetreiber, Anlagenplaner, Maschinenhersteller, Aufsichtsbehörden usw.) durchaus sinnvoll sein, Modelle mit einer wesentlich genaueren Nachbildung der realen Maschine zu entwickeln.

Abbildung 8 zeigt als Beispiel einer derartigen komplexeren Modellierung die Ansichten einer realen Reinigungsmaschine und Abbildung 9 die 3D-Ansicht des daraus entwickelten Computermodells. Letzteres enthält nur die für die Schallabstrahlung und -ausbreitung wesentlichen Elemente der Originalmaschine.

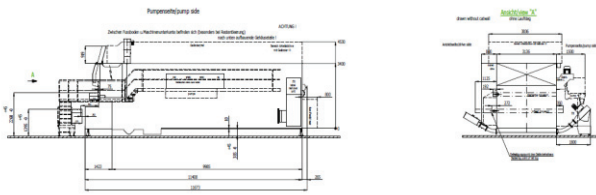


Abbildung 8: Plandarstellung der Originalmaschine in Seiten- und Vorderansicht

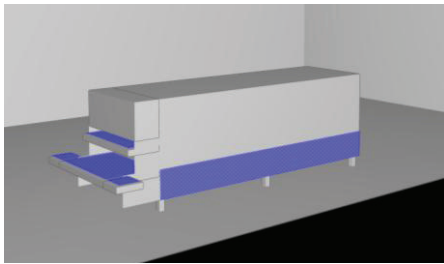


Abbildung 9: 3D-Ansicht des Computermodells mit den schalltechnisch relevanten Strukturelementen und Schallquellenbereichen (Abstrahlbereiche blau)

Diese am realen Aussehen orientierte Modellierung ist vor allem zweckmäßig, wenn die betreffenden Maschinenmodelle wiederholt mit derselben geometrischen Struktur verwendet werden sollen, um Immissionsprognosen für unterschiedliche Projekte und Umgebungsbedingungen durch zu führen.

Vorschlag für eine neue Struktur der ETS-Richtlinien

Mit den ETS-Richtlinien (Emission Technischer Schallquellen) ist ein Normenwerk erstellt worden, das dazu dienen sollte, die Emissionswerte der jeweiligen Maschinenart entsprechend dem geltenden Stand der Technik zu beurteilen und auch bei gegebenen Betriebsparametern die voraussichtlich zu erwartende Emission abschätzen zu können.

Allerdings ist das früher durch öffentlich finanzierte Projekte unterstützte Verfahren ziemlich zum Erliegen gekommen, weil die ständige Aktualisierung dieser Daten durch entsprechende Messungen zu aufwändig ist.

Durch die neuen Möglichkeiten der Simulation wächst aber derartigen Emissionsdaten-Sammlungen eine neue Bedeutung zu. Will man die zu erwartenden Beurteilungspegel für eine geplante Arbeitsstätte durch Immissionsprognose bestimmen, benötigt man in dieser Planungsphase die typischerweise zu erwartenden Emissionswerte.

Allerdings ist der Weg über die Messung einer Vielzahl von Maschinen nicht möglich und in vielen Fällen auch nicht nötig. Vielmehr sollten die schalltechnischen Experten der jeweiligen Branche die aus früher ermittelten Daten entwickelten Abhängigkeiten der Emission von den Betriebsparametern unter Einbeziehung vorhandener neuerer Messungen anpassen.

Weiter kann es durchaus sinnvoll sein, in eine derartige Richtlinie Hinweise und Vorschläge für die zweckmäßige Modellierung einer bestimmten Maschinenart aufzunehmen. Dies betrifft insbesondere die zu berücksichtigenden lärmrelevanten Baugruppen und die Verteilung der Gesamtemission auf diese Bereiche.

Dieses Vorgehen wird derzeit mit einer Arbeitsgruppe zur Überarbeitung der Richtlinie VDI 3741 " Emissionskennwerte technischer Schallquellen - Maschinen in Flaschen-Abfüllanlagen" untersucht und erprobt. Es ist abzusehen, dass mit der Anpassung der Emissionswerte an den derzeit geltenden technischen Stand und der Aufnahme von Modellierungshinweisen ein wichtiger Schritt zur zielgerichteten Lärmprognose für derartige Anlagen vollzogen werden kann.

Literatur

- [1] CadnaR.: <http://www.datakustik.de>
- [2] VDI 3760:1996 „Berechnung und Messung der Schallausbreitung in Arbeitsstätten“, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- [3] Probst, W.: Validierung eines energiebasierten Schallteilchenverfahrens bei der Berechnung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen, *Lärmbekämpf.* 11 (2016) Nr.2
- [4] Probst, W.: New techniques in computer aided noise abatement for workplaces near to machinery, DAGA 2015, Nürnberg
- [5] VDI 3741: 1981-01 Emissionskennwerte technischer Schallquellen - Maschinen in Flaschen-Abfüllanlagen, Beuth-Verlag, Berlin
- [6] Böhm, M., Probst, W.: Die Anwendung des STI-Konzepts bei der Planung von Bereichen, die der Kommunikation dienen, DAGA 2016, Aachen