

# Beeinflussung der Schallenergie im Förderrohr eines Schraubenkompressors

Dr.-Ing. A. Nickel, Hannover

## Zusammenfassung

Bei Schraubenverdichtern stellt sich durch das periodische Öffnen und Schließen der Gaswechselorgane und durch z.T. sehr hohe Druckgradienten beim Auf- und Zusteuern dieser Öffnungen eine sehr starke Geräuschemission ein.

Besondere Bedeutung kommt dabei der Geräuschemission in das Förderrohr zu. Dabei lassen sich aber die im Förderrohr herrschenden akustischen Verhältnisse durch einfache Schalldruckmessungen nicht eindeutig klären. Zur Beurteilung von durchgeführten Geräuschminderungsmaßnahmen, wie z.B. von Auslaßmodifikationen oder von Schalldämpfern, ist aber eine aussagefähige Meßgröße notwendig.

In diesem Artikel wird daher die Eignung der **Schallintensität** zur Charakterisierung des Schallenergieeintrages in das Förderrohr aufgezeigt und danach mit Beispielen erläutert.

## Summary

Screw compressors suffer from very high noise emissions due to the periodic opening and closing of the gas exchange ports as well as, under certain circumstances, the steep gradients of the pressure equalization process.

The noise emission into the delivery pipe is of great significance. No definite characterization of the acoustic conditions in the pipe can be obtained by simple sound pressure measurements. However, to assess the suitability of accomplished noise reduction measures, e.g. the modification of the outlet port or of silencers, it is necessary to use a measurable quantity, which allows correct statements.

This article is intended to show the usefulness of the sound intensity to characterize the sound energy input in the delivery pipe and to illustrate it with examples.

## 1 Einleitung

Die Geräuschabstrahlung von Maschinen und Anlagen gewinnt immer größere Bedeutung. Während der grundsätzliche Effekt von Geräuschminderungsmaßnahmen, wie z.B. Schallschutzhäuben und Schalldämpfer, subjektiv durch das Gehör überprüft werden kann, verlangen gesetzliche Bestimmungen und nicht zuletzt auch der Markt nach objektiven Kriterien.

Ein hoher Anteil der von einem Schraubenverdichter abgestrahlten Schallenergie wird in Rohrleitungen abgeleitet, auf deren Gestaltung der Hersteller von Verdichtern i. allg. keinen Einfluß nehmen kann.

Diesem Anteil kommt eine große Bedeutung zu, da das angeschlossene Rohrsystem eine wesentlich größere Ausdehnung als das zumeist sehr kompakte Verdichteraggregat hat. Außerdem weist das Rohrsystem aufgrund seines Aufbaues höhere Schallabstrahlgrade auf, da einerseits die innere Werkstoffdämpfung durch hochfeste Materialien gering ist und andererseits relativ dünne Wandstärken vorhanden sind. Ferner kann es zu Resonanzen aufgrund von Übereinstimmun-

gen von Verdichtergeräusch- und Eigenfrequenzen des Rohrsystems kommen.

Die Wirksamkeit von Geräuschminderungsmaßnahmen kann durch die alleinige Betrachtung der Meßgröße Schalldruck nur unter der Voraussetzung beurteilt werden, daß stehende Wellen bzw. Blindleistungsanteile, die durch Reflexionen im Rohrsystem entstehen, entweder durch zusätzliche Maßnahmen bestimmt oder aber unterdrückt werden.

Durch das nachfolgend beschriebene 2-Mikrofon-Verfahren zur meßtechnischen Erfassung der Schallintensität wird eine Aufteilung in Wirk- und Blindanteile vorgenommen, so daß der Einfluß der Reflexionen genau bestimmt werden kann. Daher kann auf zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. ein reflexionsfreier Rohrabschluß, verzichtet werden und der Einbau der Sonde kann lageunabhängig erfolgen.

Ferner eignet sich dieses Verfahren dazu, die in Rohren vorliegenden akustischen Verhältnisse, wobei hier das Ankopplungsverhalten zwischen Schraubenverdichterauslaß und angeschlossenem Rohrsystem von besonderem Interesse ist, zu untersuchen.

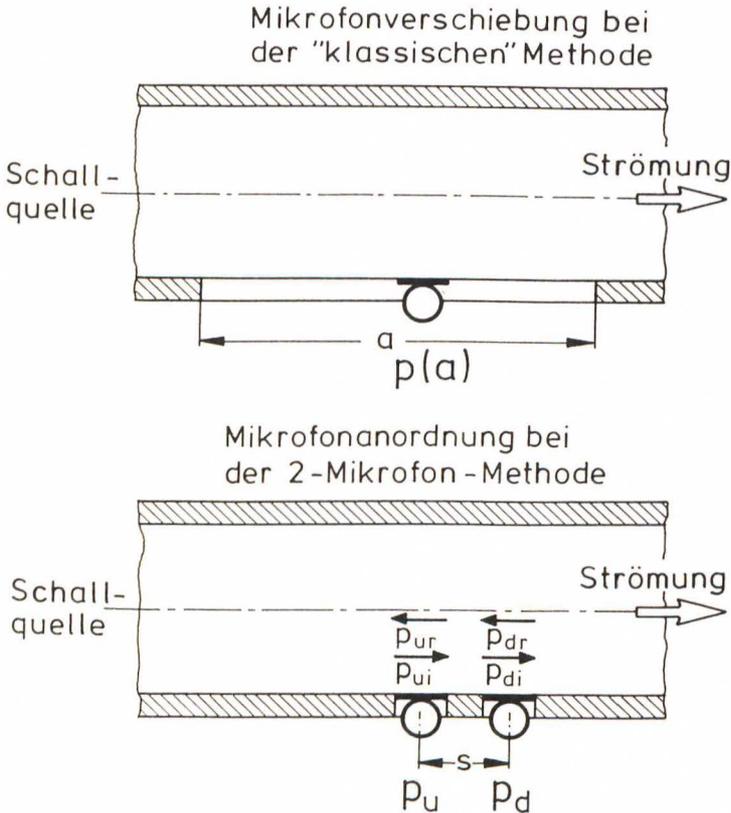
## 2 Beschreibung der 2-Mikrofon-Methode

In Rohrsystemen kommt es z.B. durch Querschnittssprünge in der Leitung zu Reflexionen der vorlaufenden Schallwellen. Durch die Überlagerung der vor- und rücklaufenden Anteile entstehen stehende Wellen, die Blindleistungskomponenten darstellen, da die in ihnen enthaltene Energie nicht mehr weiter transportiert wird. Diese stehenden Wellen bewirken eine von der Längsachse des Rohres abhängige Schalldruckpegelverteilung /5/.

Sollen nun die das Ergebnis über die tatsächlich im

Rohrsystem transportierte Schallenergie verfälschenden Blindanteile bestimmt werden, so kann als eine Möglichkeit, wie in Bild 1 oben dargestellt, der Schalldruckverlauf in Rohrlängsrichtung mit einem Druckaufnehmer abgefahren werden. Hierbei handelt es sich um die "klassische" Methode.

Diese Methode hat verschiedene Nachteile. So kann z.B. immer nur bei einer festen Frequenz gemessen werden, was einen hohen Zeitaufwand bedeutet. Weiterhin müssen die Mikrofonpositionen sehr genau ermittelt werden, um die Beiträge der vor- und rücklaufenden Wellenanteile bestim-



**Bild 1.** Bestimmung stehender Wellen in Rohren  
Determination of standing waves in pipes

men zu können, was mit steigender Frequenz oder kleineren Wellenlängen immer schwieriger wird. Umgekehrt verlangen tiefe Frequenzen sehr lange Verfahwege  $a$ , da über eine halbe Wellenlänge abgetastet werden muß. Ferner werden hohe Anforderungen an die Verfahrvorrichtung bei hohen Drücken oder Temperaturen im Rohr gestellt.

All diese Nachteile werden von der hier eingesetzten 2-Mikrofon-Methode, deren Meßaufbau im Bild 1 unten wiedergegeben ist, bei für den jeweiligen Einsatzfall angepaßter Auswahl der Meßaufnehmer und ihres Abstandes, vermieden. Ein Nachteil, den die neue Methode aufweist, ist der erhöhte Investitionsbedarf durch 2 komplette Meßketten und die nachzuschaltende Signalweiterverarbeitung in Form eines FFT-Analysators, da die Signalverarbeitung im Frequenzbereich erfolgt.

Schallfelder werden durch zwei zeitlich veränderliche Größen vollständig beschrieben, dem skalaren Schalldruck und der vektoriellen Schallschnelle. Das Produkt aus beiden Größen ist die ebenfalls vektorielle Schallintensität, die ein Maß für die im Medium enthaltene Schallenergie ist. Sind Druck und Schnelle in Phase, so kommt es zu einem Energietransport in Form von Wirkintensität. Weisen beide Größen einen Phasenunterschied von einer Viertel Wellenlänge auf, so entsteht eine stehende Welle. Es liegt somit reine Blindintensität vor. Dieser Fall kann bei einer Totalreflexion an einem starren Wandabschluß auftreten. Im allgemeinen wird es aber immer zu einer Kombination beider Extremfälle kommen.

Während der skalare Schalldruck meßtechnisch leicht zu erfassen ist, bereitet die direkte Messung der vektoriellen Schallschnelle Schwierigkeiten. Daher wird auf die Euler'sche Differentialgleichung zurückgegriffen /3/, die einen direkten Zusammenhang zwischen beiden Größen her-

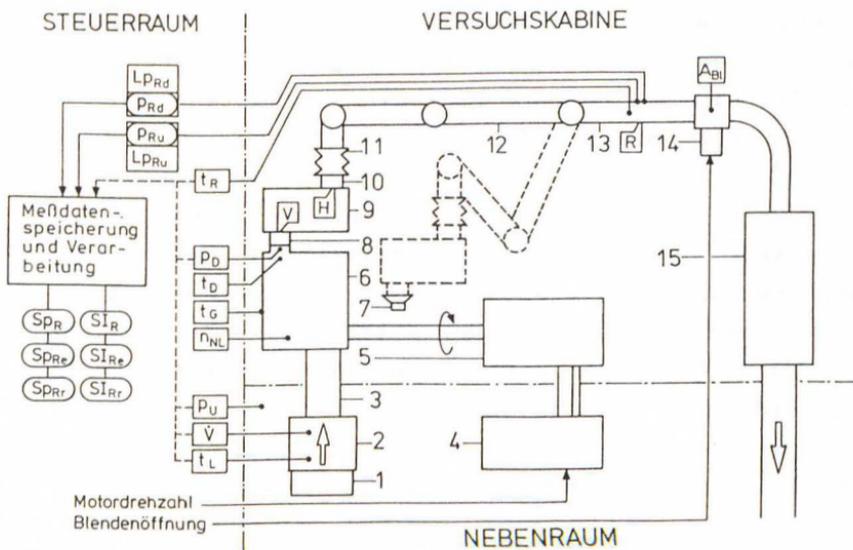
stellt. Notwendig zur Bestimmung der Schallschnelle ist dabei der vom Ort abhängige Druckgradient, der durch die Druckdifferenz zwischen den mit bekanntem Abstand  $s$  voneinander eingebauten Mikrofonen, bzw. Druckaufnehmern, angenähert wird.

Im Bild 1 unten ist zusätzlich angedeutet, wie sich die beiden gemessenen Drücke  $p_d$  (downstream) und  $p_u$  (upstream) aus jeweils einer vorlaufenden (Index  $i$ ) und einer rücklaufenden (Index  $r$ ) Komponente zusammensetzen.

### 3 Meßergebnisse

#### 3.1 Versuchsstand und Meßreihenübersicht

Die Untersuchungen zur Charakterisierung des akustischen Verhaltens von trockenlaufendem Schraubenverdichter und angeschlossenem Förderrohr wurden an dem im Bild 2



**Bild 2. Versuchsstand**

Test bench

abgebildeten Prüfstand durchgeführt. Die beiden piezoelektrischen Druckaufnehmer wurden mit ihrer Membrane bündig zur Rohrwand an verschiedenen Stellen des Förderrohres (13) eingebaut. Schalldruckempfindlichere Aufnehmer in Form von Mikrofonen konnten aufgrund der hohen statischen Drücke (bis zu 3,5 bar) und der hohen Temperaturen (bis zu 220°C) nicht eingesetzt werden.

Der Schraubenverdichter (6) wird über einen drehzahlregelbaren Elektromotor (5) angetrieben. Er saugt das Arbeitsmedium Luft aus einem Nebenraum über einen Filter (1) und einen Volumenstromzähler (2) an. Nach der Verdichtung gelangt die Luft über Adapter- und Rohrstücke (8, 10, 11, 12) in das Meßrohr der Förderleitung (13). Über eine Blende (14) und einen Abluftschalldämpfer (15) wird die entspannte Luft wieder an die Umgebung abgegeben. Der Maschinenschalldämpfer (9) wird nicht benutzt, um möglichst hohe Signalspannungen zur Verfügung zu haben. Weiterhin ist es möglich, statt des Verdichters einen Lautsprecher (7) als Anregungsquelle des Rohrsystems einzusetzen.

Es werden verschiedene stationäre Meßgrößen, wie Temperaturen etc., zu Überwachungszwecken aufgenommen. Andere Größen, wie Volumenstrom, Drehzahl etc., werden z.B. zur Berechnung des Wirkungs- oder des Liefergrades benötigt. Zur Berechnung der vor- und rücklaufenden Wellenanteile genügt die Aufnahme der beiden dynamischen Rohrdrücke und der Rohrinnentemperatur, um über die zugehörige Schallgeschwindigkeit eine Korrektur der zu einer bestimmten Wellenlänge gehörigen Frequenz vornehmen zu können.

In Bild 3 wird eine Übersicht über einige an diesem **Versuchsstand durchgeführte Meßreihen** gegeben, von denen 5 im weiteren vorgestellt werden sollen. Auf der linken Seite sind die drei möglichen Anregungsquellen für das

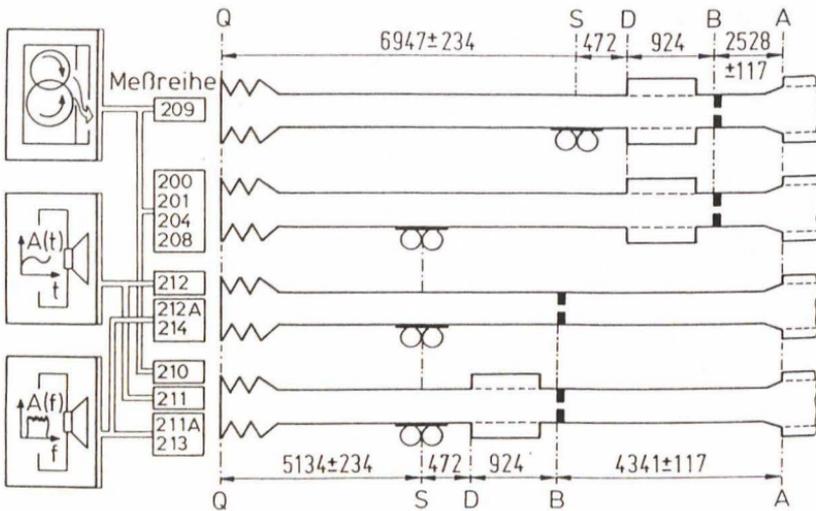


Bild 3. Meßreihen-Übersicht (Rohrabmessungen)

Survey of test conditions (pipe dimensions)

Förderrohr angedeutet. Es sind dies der Verdichter und ein mit einem Sinus- oder einem Rauschsignal betriebener Lautsprecher, wobei die Rauschanregung über einen Lautsprecher dann sinnvoll ist, wenn schnell ein Überblick über das Verhalten einer gewählten Förderrohrgeometrie oder eines zu untersuchenden Schalldämpfers im gesamten Frequenzbereich erhalten werden soll.

Bei der Ausgangsversion des Förderrohres, der Meßreihe 200, ist die Doppel-Druckaufnehmer-Sonde mit einem Abstand von etwas über 5 m von dem Anflanschquerschnitt Q zwischen Förderrohr und Schraubenverdichter entfernt eingebaut. Vor der Blende am Querschnitt B ist ein Schalldämpfer eingebaut, dessen Wirkquerschnitt (Anfang der Innenperforation) bei D beginnt.

Mit demselben Aufbau wird in der Meßreihe 201 eine Erhöhung des Gegendruckes durchgeführt. Bei der Meßreihe

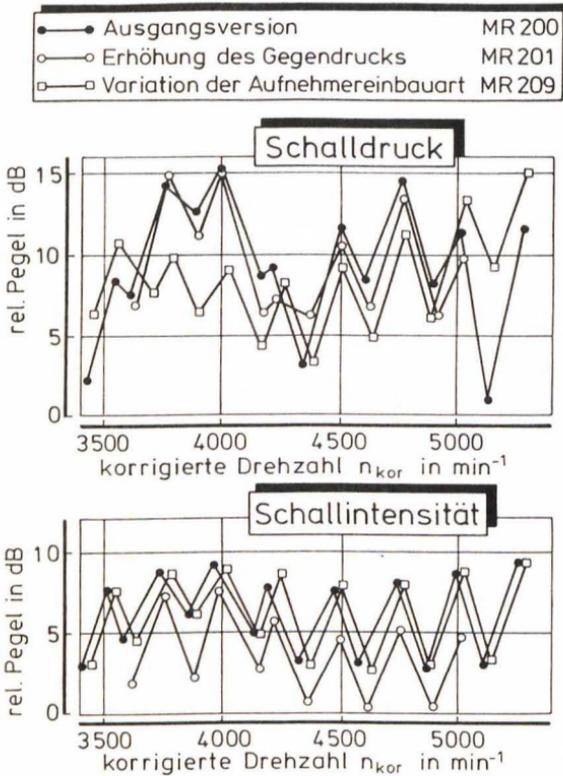
209 erfolgt der Einbau der Sonde fast 7 m vom Schraubenverdichter entfernt. Bei den beiden letzten vorzustellenden Meßreihen 211 und 212 sitzt die Sonde wieder am Einbauort der Meßreihe 200, aber die Blende und bei Meßreihe 211 zusätzlich der Schalldämpfer sind um fast 2 m nach vorne verlegt. Bei diesen Meßreihen wird das Förderrohrsystem mit einer sinusgespeisten Lautsprecheranregung betrieben.

### 3.2 Akustisches Verhalten des Systems Schraubenverdichter/Förderrohr

Ziel dieses Kapitels ist es, ein möglichst geschlossenes Bild über die akustischen Vorgänge im Förderrohr zu geben. Durch die in Kapitel 3.1 vorgestellten Versuchsreihen sollen Einzeleinflüsse aufgedeckt werden, um dann zusammengesetzt eine Beschreibung des Gesamtsystemes zu erhalten.

In den folgenden Bildern 4 und 5 sind jeweils die Pegel des Schalldrucks und der Schallintensität im Rohr über der korrigierten Drehzahl  $n_{k \circ r}$  aufgetragen. Dabei handelt es sich, wie bereits erwähnt, um eine Korrektur der Verdichterdrehzahl, bzw. der Anregungsfrequenz, auf eine feste Bezugstemperatur, bzw. -schallgeschwindigkeit ( $a_{k \circ r} = 400$  m/s). Es sind Relativpegel gewählt worden, da die Versuche, wie erwähnt, sowohl mit Lautsprecher- als auch mit Verdichteranregung unternommen wurden. Um beide Anregungsarten, mit denen unterschiedliche Pegel erreicht wurden, miteinander vergleichen zu können, ist bei Lautsprecherbetrieb ein Intensitätsbezugspegel von 110 dB und bei Verdichterbetrieb von 150 dB gewählt worden. Die Bezugswerte für den Schalldruckpegel liegen um 10 dB höher.

Ein Vergleich für die Meßreihe 200, die die Messung am



**Bild 4.** Schalldruck- und -intensitätspegel im Förderrohr  
Sound pressure and intensity levels in the  
delivery pipe

Ausgangsförderrohrsystem darstellt, zwischen den Verläufen für den Schalldruck- und den Schallintensitätspegel zeigt stark unterschiedliche Tendenzen auf. Beim Schalldruck schwankt der Pegel um bis zu 13 dB, während der Schallintensitätspegel eine Variationsbreite von lediglich maximal 6 dB aufweist. Dieses Verhalten ist auf einen zusätzlichen Einfluß zurückzuführen, der der regelmäßigen Schwankung mit einem Abstand von ca.  $250 \text{ min}^{-1}$ , die für beide Größen zu erkennen ist, dem Schalldruck überlagert ist. Die Schwankung der Schallintensität belegt einen drehzahl-

bzw. frequenzabhängigen Schallenergieeintrag in das Förderrohr.

Zur Durchführung der Meßreihe 201 wurde der Gegendruck im Förderrohr von  $p_2=2,5$  bar auf  $p_2=3,5$  bar durch eine geänderte Blendeneinstellung angehoben. Auf den Schalldruckpegel hat diese Maßnahme kaum Einfluß, da der prinzipielle Verlauf erhalten bleibt und absolute Pegeländerungen zumindest nicht eindeutig festgestellt werden können.

Bei der Intensität fällt dieser Vergleich anders aus, denn hier ist eine eindeutige Pegelabsenkung über dem gesamten Drehzahlbereich festzustellen. Diese Absenkung ist auf die verringerte Impulsanregung bei steigenden Gegendruck zurückzuführen, wie in /2/ und /4/ gezeigt wurde. Es ist bereits an dieser Stelle die bessere Eignung der Schallintensität zu Aussagen über das Geräuschemissionsverhalten des Schraubenverdichters in das Förderrohr zu erkennen.

Die dritte in Bild 4 dargestellte Meßreihe 209 weist im Unterschied zur Meßreihe 200 lediglich einen veränderten Einbauort der Druckaufnehmer auf. Es ist sehr deutlich zu erkennen, daß der veränderte Einbauort im Rohr die Schallintensität nicht beeinflußt. Lediglich eine geringe Verschiebung in Abzissenrichtung ist festzustellen, was auf unterschiedliche Bestimmung der Temperatur im Förderrohr bei beiden Meßreihen aufgrund des veränderten Einbauortes des Thermoelementes und damit einer falschen Drehzahlkorrektur zurückzuführen ist.

Beim Schalldruck hingegen wird ein komplett veränderter Verlauf gemessen. Lediglich die regelmäßige Schwankung mit einem Abstand der lokalen Extrema von  $250 \text{ min}^{-1}$  ist, wie bei der Intensität, weiterhin vorhanden. Der dem Schalldruckverlauf überlagerte Einfluß ist demnach vom Einbauort der Aufnehmer abhängig.

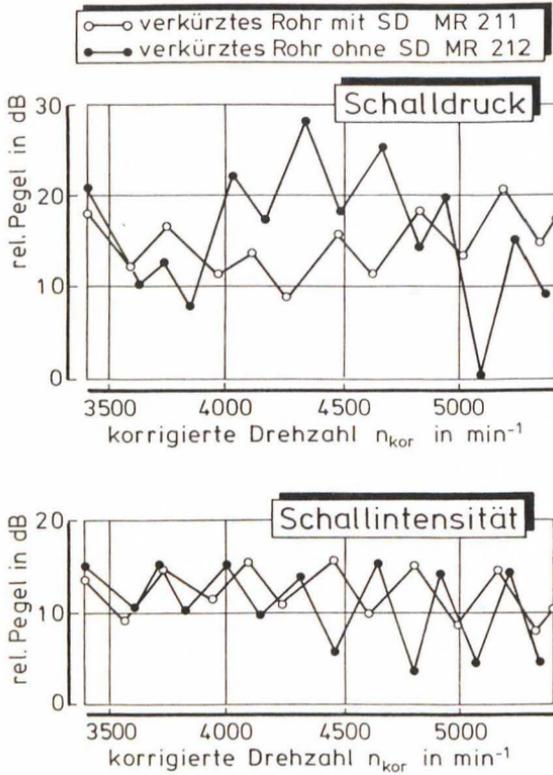


Bild 5. Schalldruck- und -intensitätspegel im Förderrohr  
Sound pressure and intensity levels in the  
delivery pipe

Der Abstand der lokalen Extrema läßt sich, wie in Bild 5 mit der Meßreihe 211 gezeigt wird, durch eine Verkürzung des Rohrsystems bis zur Blende beeinflussen. Dabei ist die Rohrabmessungen so gewählt (siehe auch Bild 3), daß der Abstand Schallquelle-Sonde identisch mit dem der Meßreihe 200 ist und der Abstand Sonde-Blende mit dem der Meßreihe 209. Der Schalldruckpegelverlauf ist, bis auf die Abstände der einzelnen Extrema, dem der Meßreihe 209 prinzipiell ähnlich.

Daher kann gefolgert werden, daß die der regelmäßigen Schwankung überlagerte Beeinflussung des Schalldruckpegels auf den Abstand der Sonde zum Rohrabschluß zurückzuführen ist, während die Schwankung des Schallenergieeintrages in das Förderrohr durch die Länge des Rohres zwischen Schallquelle und dem Abschluß beeinflusst wird.

Durch weiterführende Untersuchungen in /1/ konnten diese Folgerungen bestätigt werden und durch den Vergleich mit theoretisch erhaltenen Schalldruckkurven können folgende Aussagen getroffen werden: Der Schalldruckverlauf setzt sich aus zwei Komponenten unterschiedlichen physikalischen Ursprungs zusammen. Den größten Einfluß hat die über der Rohrlänge periodische Schalldruckverteilung der sich ausbildenden stehenden Wellen. Deshalb ist der gemessene Schalldruck im wesentlichen eine Funktion des Meßortes.

Den zweiten Einfluß übt die Schallquelle aus. Da diese in der Regel nicht unabhängig von der "akustischen Belastung" durch das Rohr ist, führt die mit der Rohrlänge oder der Frequenz sich ändernde Eingangsimpedanz des Rohres zu unterschiedlich starken Schalleinstrahlungen in das Rohr. Die Schallintensität gibt nur die "transportierten" Anteile, nicht aber die zwischen Schallquelle und Abschluß "pendelnden" Anteile der Schallenergie durch stehende Wellen wieder, daher liegt bei der Schallintensität auch keine Abhängigkeit vom Einbauort der Meßsonde vor.

Um die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verminderung der Schallenergieweiterleitung, wie z.B. Schalldämpfer oder Eingriffe in die Auslaßsteuervorgänge, beurteilen zu können, ist somit die Messung der Schallintensität der einfachen Schalldruckmessung vorzuziehen. Denn stehende Wellen treten, wie die Ergebnisse gezeigt haben, auch bei Einsatz eines Schalldämpfers im Rohrsystem auf.

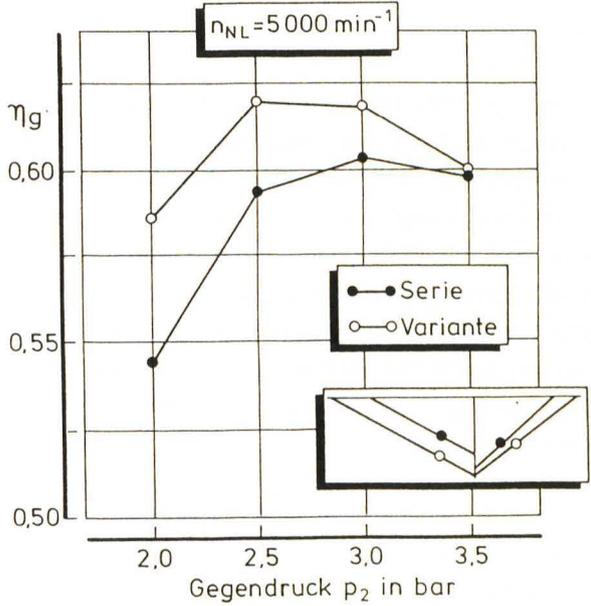
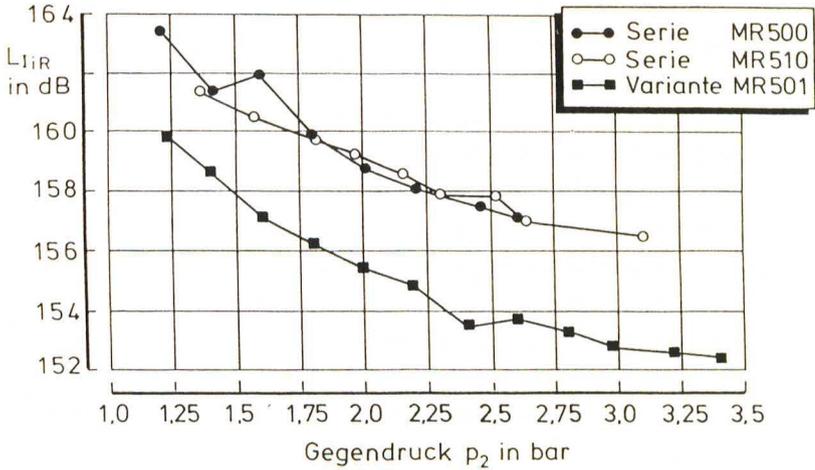
In Meßreihe 212 ist im Gegensatz zu Meßreihe 211 auf diesen Schalldämpfer verzichtet worden. Es ist ein stark abweichendes Verhalten zu verzeichnen. Es werden nicht nur die Abstände der lokalen Extrema größer, auch der prinzipielle Schalldruckverlauf ändert sich. Die Erklärung hierfür ist, daß bei Einbau eines Schalldämpfers, in dem Querschnittsprünge auftreten, nicht die Blende den Abschluß des Rohres bildet, sondern der erste Querschnittsprung im Schalldämpfer.

Natürlich gilt dies nur angenähert, denn es kommt in den seltensten Fällen zu einer Totalreflexion, so daß der durchgelassene Schallwellenanteil an der nächsten Unstetigkeitsstelle erneut teilreflektiert wird usw. Daher können sich durch gegenseitige Überlagerung z.T. sehr komplizierte Schalldruckverteilungen in einem Rohr einstellen.

### 3.3 Geräuschkinderung durch Auslaßmodifikation

Im folgenden Kapitel soll ein Anwendungsbeispiel für die Messung der Schallintensität gezeigt werden. Dabei handelt es sich um die Verringerung des Schallenergieeintrages in das Förderrohr durch eine Modifikation des Radialauslasses des untersuchten Schraubenverdichters, siehe /2/, /4/. Die Auslaßkanten wurden dabei, wie in Bild 6 unten in dem eingefügten Diagramm in Aufsicht zu erkennen ist, so verändert, daß es sowohl zu einer Vergrößerung des Auslaßfensters und damit zu einer Verringerung des eingebauten Druckverhältnisses als auch zu einer Schrägstellung einer Steuerkante kommt. Durch die Schrägstellung wird ein allmähliches Öffnen erreicht.

Durch diese Modifikation (MR 501) wird eine Verringerung des Schallintensitätspegels um ca. 4 dB gegenüber der



**Bild 6.** Beeinflussung der Schallintensität im Förderrohr und des Wirkungsgrades durch Auslaßmodifikation  
 Influence of outlet port modification on sound intensity in the delivery pipe and total efficiency

Serie (MR 500, MR 510) über dem gesamten untersuchten Gegendruckbereich, wie in Bild 6 oben gezeigt ist, bewirkt. Die korrigierte Drehzahl wurde bei den Messungen konstant gehalten, um identische Ankopplungsbedingungen zwischen Verdichter und Förderrohr sicherzustellen.

Diese Verringerung der Geräuschemission wird an dem hier untersuchten Versuchsverdichter zusätzlich interessant durch eine Anhebung des Gesamtwirkungsgrades, wie in Bild 6 unten dargestellt ist. Vor allem bei geringen Gegendrücken wird diese Anhebung durch eine verbesserte Anpassung des eingebauten Druckverhältnisses an den anliegenden Gegendruck erreicht.

#### **4 Zusammenfassung**

In diesem Beitrag konnte die gute Eignung der vorgestellten 2-Mikrofon-Methode zur Bestimmung der Schallintensität in Rohren aufgezeigt werden. Dadurch wird eine sichere und objektive Beurteilung von Schallenergieminderungen möglich. Durch die Elimination von Blindanteilen durch stehende Wellen kann der Einbau der Sonde sowohl lage- als auch rohrsystemunabhängig erfolgen. Diesen Vorteilen steht allerdings der Nachteil eines erhöhten Investitionsbedarfs für die zwei Meßketten und die aufwendige Meßsignalweiterverarbeitung entgegen.

## 5 Schrifttum

- /1/ Buhl, A. Charakterisierung des akustischen Verhaltens des Systems Schraubenverdichter - Förderrohr.  
Studienarbeit (unveröffentlicht), Inst. für Kolbenmaschinen,  
Universität Hannover, 1989.
- /2/ Groth, K. Auslaßgeräusche bei trockenlaufenden  
Nickel, A. Schraubenkompressoren.  
Pumpen-Vakuumpumpen-Kompressoren '90,  
S. 48-51.
- /3/ Meyer, K.-F. Bestimmung der akustischen Größen in  
einem Meßrohr bei senkrechtem  
Schalleinfall.  
Diplomarbeit (unveröffentlicht), Inst.  
für Kolbenmaschinen,  
Universität Hannover, 1989.
- /4/ Nickel, A. Entstehung von Geräuschen an trockenlaufenden  
Schraubenverdichtern und Möglichkeiten zu ihrer Minderung.  
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 7 Nr. 158.  
Düsseldorf: VDI-Verlag 1989.
- /5/ Nickel, A. Untersuchung von Materialien für Schallschutzkapseln.  
Meyer, K.-F. messen prüfen automatisieren, Heft 6,  
S. 278-281, 1989.