

Einfluß der Steuergeometrie auf die Geräuschemission eines Rootsverdichters

Dipl.-Ing. **D. Potz**, Hannover

Zusammenfassung

Insbesondere in seiner Bauform mit dreiflügeligen verschraubten Kolben hat der Rootsverdichter offensichtliche konstruktive Ähnlichkeit mit dem Schraubenverdichter. Beide Verdichterbauarten gehören zur Gruppe der weggesteuerten Drehkolbenmaschinen, beiden ist nicht nur die störend hohe Geräuschemission eigen, auch die Geräuschenstehungsmechanismen sind ähnlich. Daher erscheint es sinnvoll an dieser Stelle die Vorgehensweise zur primären Geräuschminderung am Rootsverdichter durch Steuergeometrievariation aufzuzeigen.

Für den Rootsverdichter ist die Rückstromverdichtung charakteristisch, die für bestimmte Betriebspunkte auch beim Schraubenverdichter auftritt. Über den Steuerquerschnittsöffnungsverlauf wird auf den Kammerdruckverlauf während der Öffnungsphase Einfluß genommen. Durch diesen Steuervorgang wird eine förderseitige Wechseldruckschwingung angeregt, deren Wirkung auf Oberflächenschnelle und emittierte Schalleistung von Maschine und angeschlossenem Rohrsystem gezeigt wird.

1 Aufgabe des Forschungsvorhabens

Im Rahmen des von der deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereiches 121 "Geräusch- und Schwingungsvorgänge an Maschinen", Sprecher Prof. Dr.-Ing. H. K. Tönshoff, wurde am Institut für Kolbenmaschinen der Universität Hannover, Leitung Prof. Dr.-Ing. K. Groth ein Rootsverdichter untersucht.

Zielsetzung ist es zu klären, inwieweit die oft sehr aufwendigen sekundären Schallminderungsmaßnahmen (z.B. Schallschutzhaube) durch Primärmaßnahmen (konstruktive Änderung) ersetzt werden können.

Der Rootsverdichter gehört ebenso wie die ebenfalls am Institut bearbeiteten Axialkolbenmaschine und Zweitaktmotor zu den Maschinengattungen, die zu den "weggesteuerten Maschinen" zu rechnen sind. Ihr Funktionsprinzip und die damit gekoppelte ursächliche Geräuschentstehung sind durch ein schlagartiges Unterbrechen oder Freigeben der Steuerfenster charakterisiert. Dieser Wirkmechanismus wird am Institut für Kolbenmaschinen anhand mehrerer Anwendungsbeispiele untersucht. Es sind dies die Strömung in Ein- und Auslaßkanälen eines schlitzgesteuerten Zweitaktmotors, die Freisteuerung der Saug- und Drucköffnungen bei hydraulischen Kolbenmaschinen und die Rückstromverdichtung in den druckseitigen Rohrleitungen von Rootsverdichtern.

Zur Zeit laufen die Untersuchungen eines trockenlaufenden Schraubenverdichters mit Konstruktion und Aufbau einer Versuchsmaschine und Erfassung des Maschinen-Istzustandes. Im folgenden Zeitraum 35-36-37 sollen die am Rootsverdichter gewonnenen Erkenntnisse über den Zusammenhang von Steuergeometrie und Geräuschemission soweit möglich

auf den Schraubenverdichter übertragen werden. Obwohl beide Verdichtertypen weggesteuerte Drehkolbenmaschinen sind, besteht der grundsätzliche Unterschied zum Rootsverdichter darin, daß beim Schraubenverdichter konstruktionsbedingt innere Verdichtung vorliegt, die auch für den höheren Wirkungsgrad kausal ist.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Geräuschenstehungsmechanismen und die akustische Wirkkette ist jedoch so ähnlich, daß man sie vom Roots- auf den Schraubenverdichter übertragen kann.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, durch Absenkung des Gradienten des Querschnittverlaufes der saug- und druckseitigen Steuerschlitze zu einer Verminderung der maßgeblichen Druckgradienten und damit des Gesamtgeräusches zu gelangen.

Dazu müssen die entscheidenden Parameter der Steuergeometrie definiert und in Rechnung und Messung systematisch verändert werden. Die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die Saug- und Druckrohrpulsation und auf die von den einzelnen Anlagenbestandteilen emittierte Schalleistung sind zu ermitteln.

2 Geräuschenstehungsmechanismen

Am Anfang der Untersuchungen stand die Ermittlung des akustischen Istzustandes des Versuchsaufbaus. Durch Aufnahme des kompletten Kennfeldes wurde der Einfluß der Betriebsparameter Drehzahl und Druckdifferenz (Last) auf die akustischen Parameter ermittelt. Das von der Maschine erregte Geräusch setzt sich zusammen aus direktem Luftschall und Körperschall.

Direkter Luftschall in Form der pulsierenden saug- und druckseitigen Luftsäulen in den Rohrleitungen besteht im wesentlichen aus dem Sireneneffekt der rotierenden Kolben und aus der Rückstromverdichtung im Arbeitsraum. Der Sirenenton entsteht durch die periodische Freigabe und Sperrung des Luftstromes. Dies geschieht viermal pro Antriebswellenumdrehung. Die drehzahlabhängige Grundfrequenz ergibt sich zu

$$f_0 \text{ [s}^{-1}\text{]} = \frac{4 \cdot n \text{ [min}^{-1}\text{]}}{60} \quad (1)$$

Die Nenndrehzahl der hier untersuchten Maschine ist 3000/min, die Grundfrequenz liegt mit 200 Hz im stark ansteigenden Bereich der A-Bewertungskurve. Der durch den Sireneneffekt bedingte Luftschallpegel nimmt also mit der Drehzahl stark zu. Im Spektrum der Rohrschwingungen dominiert diese Grundschwingung im Leerlastbetrieb auf Saug- und Druckseite (im folgenden auch Förderseite genannt). Aus diesem Grund ist die Wechseldruckpulsation für den Leerlastpunkt auf der Saugseite auch auf dem gleichen Niveau wie auf der Förderseite. Für die Drehzahl 3000/min beträgt die Differenz zwischen Leerlast und Vollast auf der Saugseite nur 2 dB, während auf der Förderseite der Pegel um 17 dB steigt. Also liegt im besonders lärmabstrahlenden Vollastbetrieb der Förderrohrdruckpegel um 15 dB über dem des Saugrohres und soll, um die lautesten Teilschallquellen zuerst zu bearbeiten, im weiteren Gegenstand der Untersuchungen sein.

Zuvor sei zum Wechseldruckpegel des Saugrohres noch bemerkt, daß die 2 dB Steigerung durch Rückexpansion zwischen den beiden Drehkolben und Rückströmung durch die Spalte entsteht. Die Beeinflussung des Saugrohrdruckpegels

durch die im Vorhaben durchgeführten Steuergeometrievariationen ist verschwindend gering und wird deshalb nicht mehr aufgeführt.

Das Arbeitsverfahren der Rootsmaschine ist die Rückstromverdichtung, d.h. das Fördermedium wird nicht durch eine Kompression verdichtet, sondern nach dem Öffnen der Arbeitskammer strömt Gas aus dem Förderrohr in die Kammer hinein, bis diese auf den Arbeitsdruck gebracht ist. Dann erst beginnt der Ausschub. Pro Arbeitszyklus muß die förderseitige Gassäule also zweimal ihre Bewegungsrichtung ändern. Durch diesen schlagartigen Druckaufbau werden hohe Druckgradienten erzeugt. Die impulsartige Anregung erfolgt mit der o.a. Grundfrequenz, erzeugt zugehörige höherharmonische Frequenzanteile und regt außerdem vorhandene Systemeigenfrequenzen an. Die Druckgradienten des Rückströmvorganges nehmen mit größer werdender Druckdifferenz zu, d.h. der Wechseldruckpegel ist lastabhängig.

Die durch den Körperschall bedingte Komponente des Gesamtgeräusches setzt sich zusammen aus mechanischen und aus gasdynamisch angeregten Anteilen. Die durch Belastungsänderungen innerhalb der Maschinenstruktur hervorgerufene Körperschallabstrahlung ist untergeordnet. Da die Drehkolben im Zylinder reibungsfrei arbeiten, wird die Maschinenstruktur mechanisch nur durch die Wälzlager und die beiden Synchronisierungszahnräder angeregt. Hauptsächlich wird der Körperschall durch die gasdynamischen Vorgänge in der Verdichterkammer und den angeschlossenen Rohren erzeugt. Als frequenzabhängige Funktion der mittleren Übertragungsadmittanz des Maschinengehäuses wird die Maschinenoberfläche zu Schwingungen angeregt. Aus Teilschallquellenanalysen wurden Maschine und Druckrohr als dominante Oberflächenstrahler des Versuchsaufbaus ermittelt, diese sind im folgenden Gegenstand der Untersuchungen. Nimmt man die Maschinenstruktur als gegeben an

(d.h. keine Änderung an Wandstärken und Verrippungen), ist die Körperschallabstrahlung genauso wie die Druckpulsation lastabhängig.

3 Steuergeometrie

Aufgabe dieses Forschungsvorhabens ist es nun, die durch das Arbeitsverfahren "Rückstromverdichtung" bedingte Geräusentstehung zu untersuchen.

Durch die verschiedenen Einsatzgebiete des Rootsverdichters kommen die Teilschallquellen Ansaug- und Auslaßöffnung, Oberfläche von Maschine und angeschlossenem Rohnsystem unterschiedlich zum Tragen. Diese möglichen Geräuschquellen werden in der Praxis durch verschiedene Sekundärmaßnahmen gedämpft, hier wird der Schwerpunkt auf Primärmaßnahmen gelegt.

Angesetzt wird dazu am Punkt der Geräusentstehung, der für alle genannten Teilschallquellen der gleiche ist. Durch die Rückstromverdichtung in der Kammer entsteht vor, hinter und in der Maschine eine pulsierende Luftsäule, die sowohl die Maschinenstruktur zu Körperschallemissionen anregt, als auch durch Saug- und Drucköffnung abstrahlen kann.

In diesem Fall ist der Kammerdruckanstieg als impulsartige Anregung zu betrachten, der den Förderrohrwechseldruck bestimmt. Durch Senken des Druckgradienten wird eine zeitliche Dämpfung des Druckanstieges erreicht und die Anregung vermindert. Je geringer der Druckgradient, respektive der Effektivwert der ersten Ableitung, desto geringer die übertragene Energie. Hier liegt eine gute Analogie zum Verhalten des in /3/ untersuchten Zweitaktmotors vor.

Die angestrebte Senkung des Druckgradienten kann nur durch Verlängerung der Rückstromphase auf der Förderseite erfolgen. Für verschiedene Steuergeometrien wurde der Querschnittsöffnungsverlauf erstellt und ein Voreinlaßmodell definiert, an dem Voreinlaßbeginn, Voreinlaßbreite, Steghöhe und Stegbreite variiert werden konnten. Durch diese Parameter lassen sich alle gewünschten Querschnittsöffnungsverläufe beschreiben.

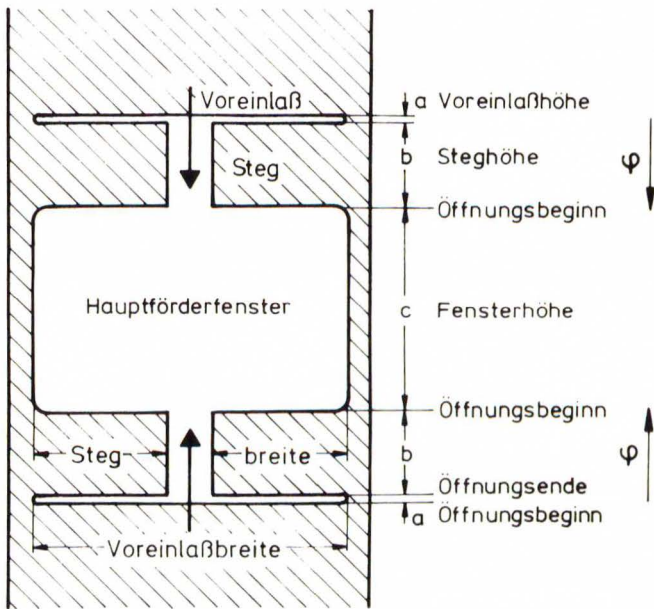


Bild 1. Geometrische Parameter für Voreinlaßvariante

4.1 Rechenprogramm

Um die Anzahl der experimentell zu untersuchenden Varianten zu begrenzen, wurde ein am Institut vorhandenes Rechenprogramm /2/ überarbeitet und erweitert, so daß Parameterstudien durchgeführt werden konnten. Nachdem der Querschnitt als Funktion des Drehwinkels eingegeben wurde,

konnte der Druckanstieg in der Kammer und die daraus resultierende Druckpulsation im Förderrohr berechnet und minimiert werden.

Die Ergebnisse aus diesen Programmläufen finden sich komplett im Jahresbericht 1982 des SFB 121 /1/. Wichtigste Erkenntnis war, daß die günstigsten Querschnittverläufe durch vergleichsweise einfache Voreinlaßschlitzformen erreicht werden konnten. Die Begrenzungslinien des Voreinlasses liegen wie die des Hauptförderfensters parallel zur Drehkolbendichtleiste. Voreinlaß und Hauptförderfenster sind durch einen Steg vollkommen getrennt. Jede Verbindung würde den Querschnittverlauf ungünstig beeinflussen. Die günstigsten Voreinlaßhöhen liegen in der Größenordnung von 2° Drehwinkel bei möglichst großer Voreinlaßbreite. Je größer die Steghöhe, desto geringer die Wechseldruckanregung.

4.2 Prüfstand

Für meßtechnische Untersuchungen steht ein Rootsverdichter GLa 12.4 der Aerezener Maschinenfabrik zur Verfügung. Die Kenndaten der Maschine sind ein Volumenstrom von $498 \text{ m}_n^3 \cdot \text{h}^{-1}$ bei einer Druckdifferenz von 0,8 bar, bei 2940/min und einer Antriebsleistung von 18,3 kW. Der stufenlos drehzahlregelbare Antrieb erfolgt über einen thyristorgesteuerten Gleichstrommotor. Es werden die Maschinen-Betriebswerte Volumenstrom, Drehmoment, Drehzahl, Temperaturen und statische Drücke direkt gemessen, die akustisch relevanten Größen dynamische Drücke, Oberflächenschnelle und Schallintensität werden mit einem digitalen FFT-Signalanalysator verarbeitet (Bilder 2 bis 5).

Zur Kennfeldaufnahme wurden jeweils Druckdifferenz und Drehzahl variiert, insgesamt wurden ca. 100 verschiedene Steuergeometrievarianten auf dem Prüfstand untersucht.

Aufgrund der Erkenntnisse aus dem Rechenprogramm konnte ein Versuchsträger konzipiert werden, der es ermöglicht, Voreinlässe der vorgegebenen als optimal erkannten Form experimentell zu untersuchen. Hierbei ist die Steghöhe in 10°-Drehwinkel-Schritten durch Montage von verschiedenen Wandsegmenten veränderbar. Die Voreinlaßhöhe wird durch Einfräsen sukzessive gesteigert (Bild 4).

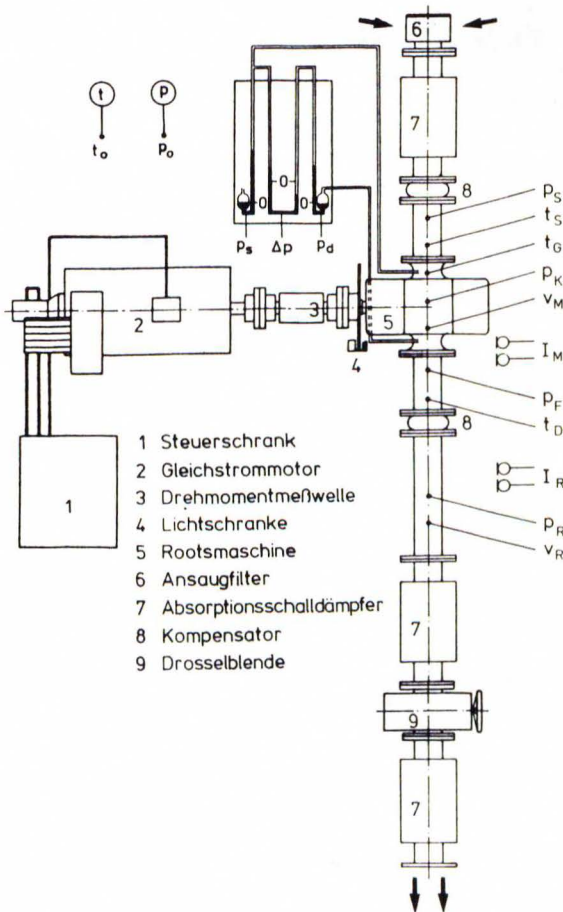


Bild 2. Schematische Darstellung des Rootsverdichterprüfstandes

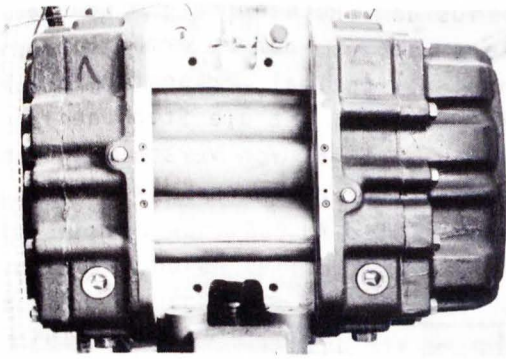


Bild 3. Versuchsmaschine

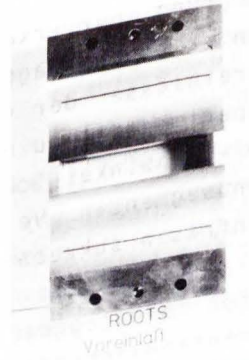


Bild 4. Voreinlaß-Platte

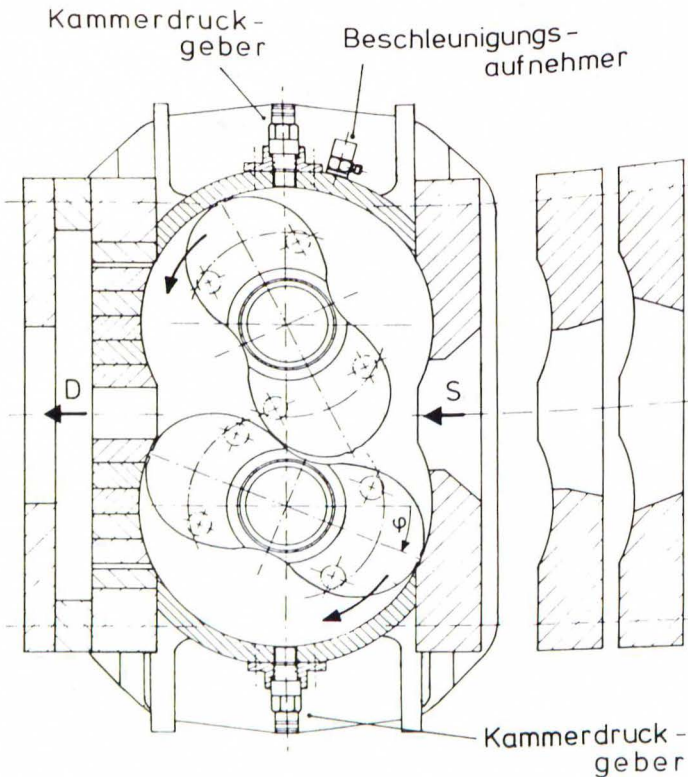
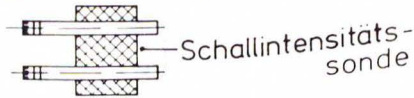


Bild 5. Versuchsmaschine für Voreinlaßvariation

5 Interpretation der Meßergebnisse

Wie bereits erwähnt, wurden ca. 100 Steuergeometrievarianten im Zeit- und Frequenzbereich experimentell untersucht. Aus Platzgründen mußte hier eine Auswahl getroffen werden. Nachdem die geometrischen Parameter Überdeckungswinkel, Fenstergrößenverhältnis, Voreinlaßbreite und Stegbreite (Bild 1) optimiert und festgelegt sind, soll im folgenden hauptsächlich der Einfluß von Voreinlaßhöhe gezeigt werden. Soweit keine anderen Angaben gemacht werden, beziehen sich die Diagramme auf den Maschinennennpunkt mit Drehzahl 3000/min, und Druckdifferenz 300 mbar.

Die Reihenfolge der Diagramme ergibt sich im wesentlichen aus der akustischen Wirkkette:

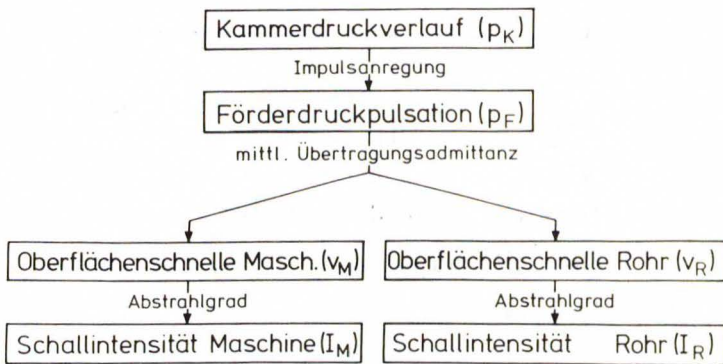


Bild 6. Akustische Wirkkette

5.1 Kammerdruckverlauf

Der in Bild 7 dargestellte Kammerdruckverlauf für drei signifikante Steuerkantenvarianten läßt für die Serien-

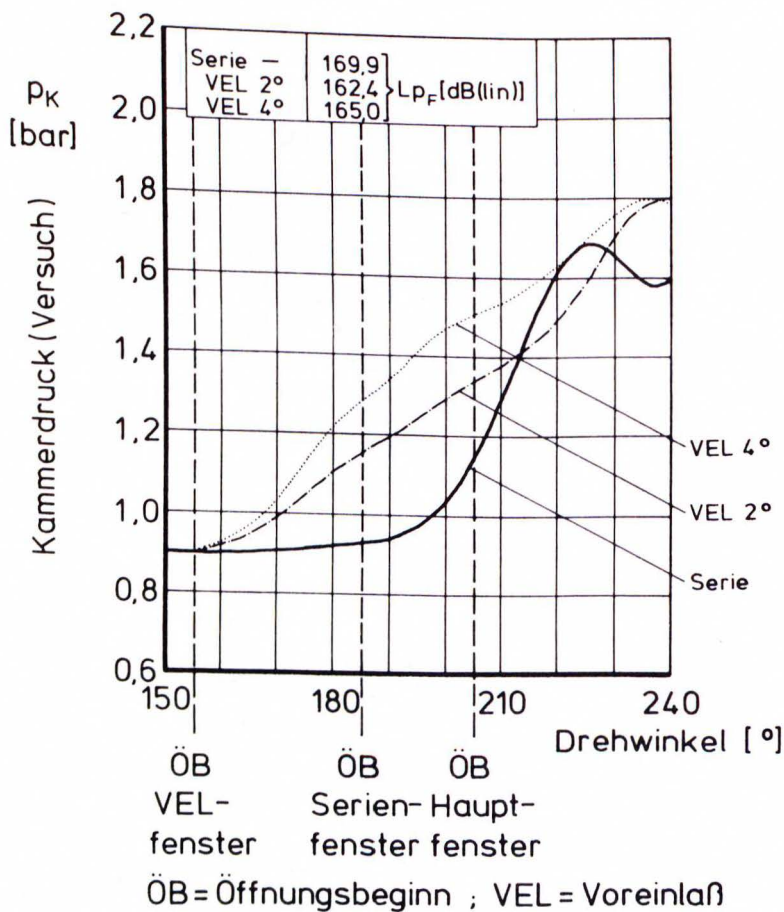


Bild 7. Kammerdruckverlauf

maschine den schnellen Druckanstieg erkennen. Die Kammer öffnet bei dem Drehwinkel 185,5°, der Förderdruck ist 30° respektive 1,5 msec später erreicht. Dargestellt sind zwei Voreinlaßvarianten mit der Steghöhe 50° und mit gegenüber der Serie um 27,5° vorverlegtem Querschnittöffnungsbeginn. Die gezeigten Druckverläufe ergeben sich für die Voreinlaßhöhen 2° und 4°. Deutlich erkennbar für die 2°-Variante ist der frühere Beginn des Druckanstieges und

die zeitliche Längung auf 80° respektive 4,4 msec. Die Variante mit dem 4° hohen Voreinlaß gibt gleich einen zu großen Querschnitt frei, so daß der Druckanstieg sich im Bereich 160° bis 180° dem Gradienten des Serienverlaufes annähert und somit ungünstiger wird.

Analog der Voreinlaßhöhe stellt sich die Steigung des Druckanstieges für die Steghöhe ein. Ist die geometrische Voreinlaßhöhe zu gering, strömt nicht genug Gas während der Voreinlaßphase in die Kammer, um hier schon einen Druckanstieg zu ermöglichen. Der Druckanstieg ist dann dem Serienverlauf noch zu sehr angenähert.

Bei zu großem Voreinlaß (VEL) ist das in die Kammer eingeströmte Volumen zu groß, der Druck steigt ähnlich stark an wie bei der Serienversion. Nur im Bereich der optimalen Voreinlaßhöhe gelingt es, den Druckanstieg zeitlich günstig zu dehnen.

Nach dem Öffnen (ÖB) des Hauptfensters ist eine Zunahme des Druckgradienten erkennbar, die mit größerer Voreinlaßhöhe verschwindet. Dieser Anstieg hat geringen Einfluß auf die Geräuschanregung weil die Füllung der Arbeitskammer zu diesem Zeitpunkt fast abgeschlossen ist und bei dieser Drehkolbenstellung Arbeitskammer und Förderröhre soweit verbunden sind, daß die Förderrohrschwingung Einfluß hat. Als geräuschgünstig sind die Varianten anzusehen, deren Kammerdruckverlauf monoton steigend ohne Wendepunkte ist.

5.2 Erste Ableitung des Kammerdruckverlaufes nach der Zeit

Wie weit das Ziel Minderung des Druckgradienten erreicht wird, ist im Verlauf der 1. Ableitung des Kammerdruckes

(Bild 8) gut erkennbar. Für den Serienverlauf ergibt sich Anstieg und Abfall des Gradienten innerhalb 40° Drehwinkel, das Nachschwingen des Verlaufes der Ableitung ist durch den schnellen Anstieg bedingt und trägt hier erheblich zum hohen Effektivwert bei.

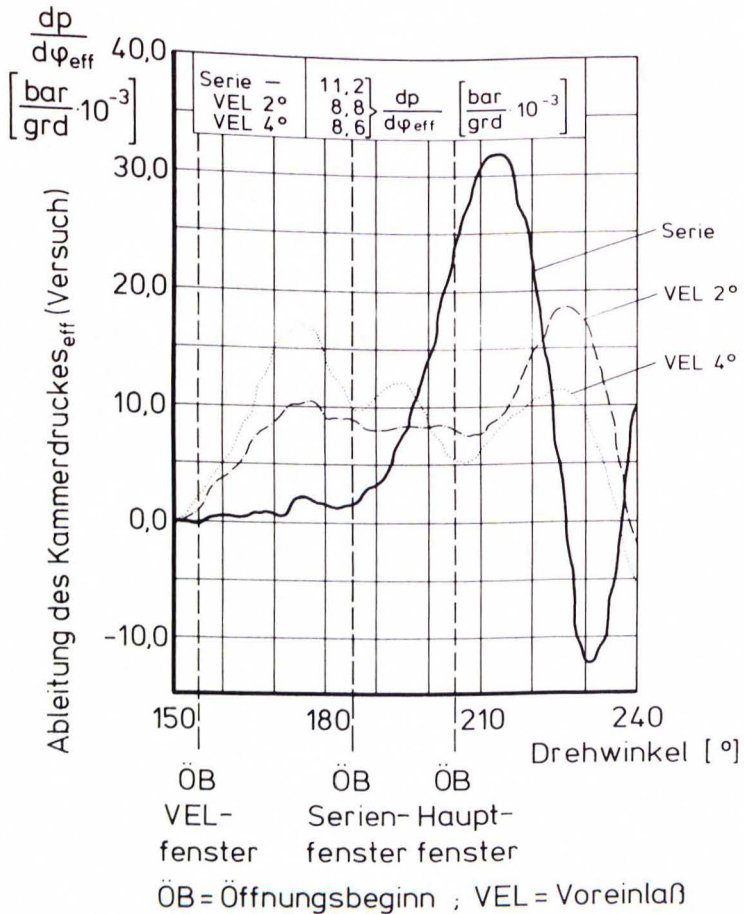


Bild 8. Erste Ableitung des Kammerdruckverlaufes nach der Zeit

Bei der VEL 2°-Variante stellt sich beim Drehwinkel "Öffnungsbeginn VEL" ein gleichmäßiger Druckanstieg ein,

der sich 50° später nur noch etwas erhöht. Der Abstand von Nulldurchgang bis Nulldurchgang, also die zeitliche Längung des Druckanstieges, ist hier mit 90° Drehwinkel mehr als doppelt so groß wie bei der serienmäßigen Steuergeometrie.

Die Amplitude der Negativauslenkung ist ebenfalls stark verringert, so daß auch der Effektivwert deutlich günstiger wird. Dieses Nachschwingen tritt bei einer Kolbenstellung auf, bei der der Verbindungsquerschnitt zwischen Kammer und Rohr groß ist. Dadurch ist eine starke schwingungsmäßige Ankopplung gegeben und dieses Nachschwingen korrespondiert mit der erregten Förderrohrdruckpulsation.

Wird die Voreinlaßhöhe auf 4° erhöht, ist die freigegebene Öffnung so groß, daß es nach "Öffnungsbeginn VEL" zu einer Überhöhung des Gradienten kommt, er nimmt dann kontinuierlich ab, um nach "Öffnungsbeginn Hauptfenster" nochmals kurz anzusteigen. Im Gegensatz zur für die Förderrohrdruckpulsation optimalen 2° -Variante liegt hier der größte Gradient bereits kurz nach "Öffnungsbeginn VEL". Da der Gradient im Bereich "Öffnungsbeginn Hauptfenster" geringer ist als bei der 2° -Variante, ist auch die Amplitude des Nachschwingens nochmals reduziert. Insgesamt ist der Effektivwert der 4° -Variante am niedrigsten, jedoch ist trotzdem die Förderrohrdruckpulsationsanregung hier nicht mehr am günstigsten (Anstieg gegenüber VEL 2° beträgt 2,6 dB). Dieses unterstreicht die schon bei der Diskussion des Kammerdruckverlaufes gemachte Feststellung, daß der Druckgradient im Bereich des Voreinlasses (160° - 220° Drehwinkel) größeren Einfluß auf die Geräuschanregung hat als im Bereich ÖB-Hauptfenster.

5.3 Wechseldruckpulsation im Förderrohr

Eng verknüpft mit dem Kammerdruck ist der Förderrohrdruck. Beim Kammerdruck ist der zeitliche Verlauf des Druckanstieges besonders instruktiv, bedingt durch die Position des Meßaufnehmers ist eine Schwingung auf dem Förderdruckniveau bereits zu erkennen (Bild 7). Im Förderrohr entstehen Druckwechselamplituden bis zu 400 mbar, der Schwingungspegel der Serienversion ist mit ca. 170 dB sehr hoch.

In Bild 9 ist der Förderrohrdruckpegel als Funktion der Voreinlaßhöhe und der Steghöhe dargestellt. In der Regel sinkt der Pegel mit zunehmender Steghöhe. Für sämtliche Steghöhen gibt es einen Bereich optimaler Voreinlaßhöhe zwischen 2° und $2,5^\circ$, in diesem Bereich ist der Einfluß der Steghöhe am stärksten. Die maximal erreichte Absenkung beträgt 3,5 dB für die Variante mit $2,5^\circ$ Voreinlaßhöhe und 50° Steghöhe. Für größere Voreinlaßhöhen steigt der Pegel langsam wieder an, größere Steghöhen waren aufgrund der Geometrie der Versuchsmaschine nicht realisierbar, hier ist eine durch den Liefergrad gesetzte Grenze zu vermuten.

Der Zusammenhang zwischen den Gradienten des Kammerdruckes und dem Wechseldruckpegel im Förderrohr bestätigt sich hier eindeutig. Im Jahresbericht 82 des SFB 121 /1/ ist das Zusammenwirken von Steuerquerschnitt, Kammerdruckverlauf, Ableitung des Kammerdruckverlaufes und Förderrohrpegel detailliert beschrieben. Die Ergebnisse jener mit dem Rechenprogramm /2/ durchgeführten theoretischen Untersuchungen bestätigen sich jetzt im Experiment.

Bild 10 zeigt die Einnüllenden der Schmalbandanalyse dreier signifikanter Varianten mit der Steghöhe 50° . Alle

relevanten Teile des Spektrums bestehen aus der Grundschwingung 200 Hz (Maschinendrehzahl 3000/min) und ihren Höherharmonischen. Für die Serienversion ergibt sich ein starker Amplitudenabfall um 50 dB bis 1,5 kHz, für alle darüber liegenden Frequenzanteile bleibt der Pegel unter 130 dB.

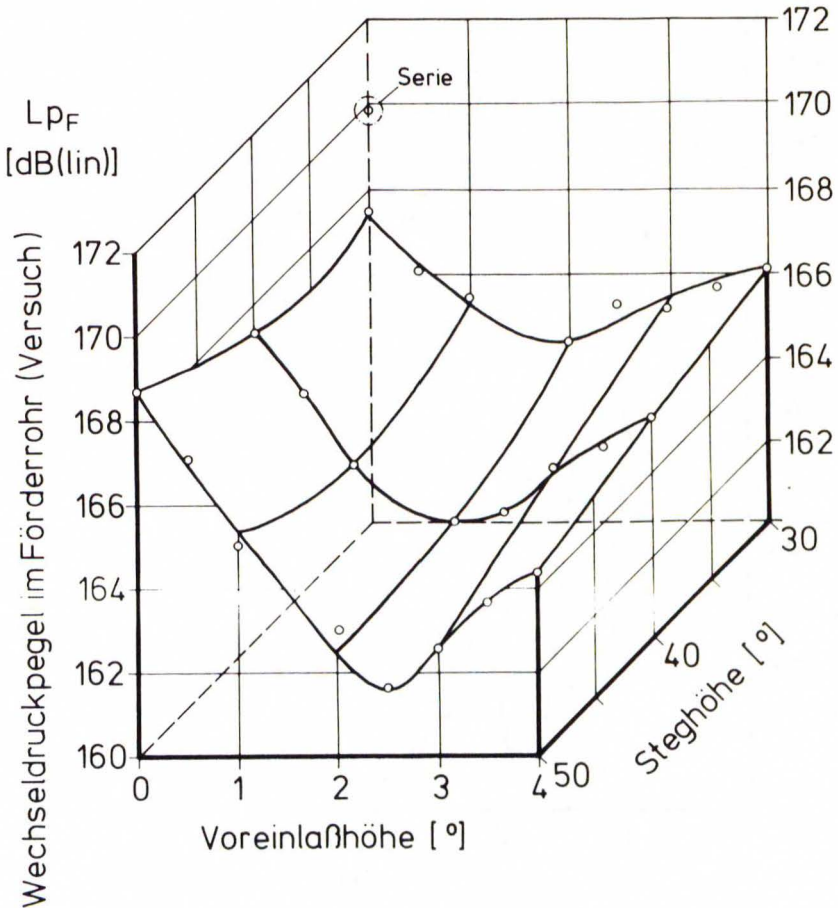


Bild 9. Wechseldruckpegel im Förderrohr (Voreinlaßkennfeld)

Während der dominante 200 Hz-Peak für die Serienversion bei 156,5 dB liegt, beträgt er für die 2°-Variante nur noch 156,8 dB und steigt für die 4°-Variante wieder auf 160,5 dB. Der Amplitudenabfall stellt sich für die beiden VEL-Varianten bis 1,1 kHz ähnlich stark dar wie für die Serienversion, so daß die VEL-Varianten in diesem Bereich

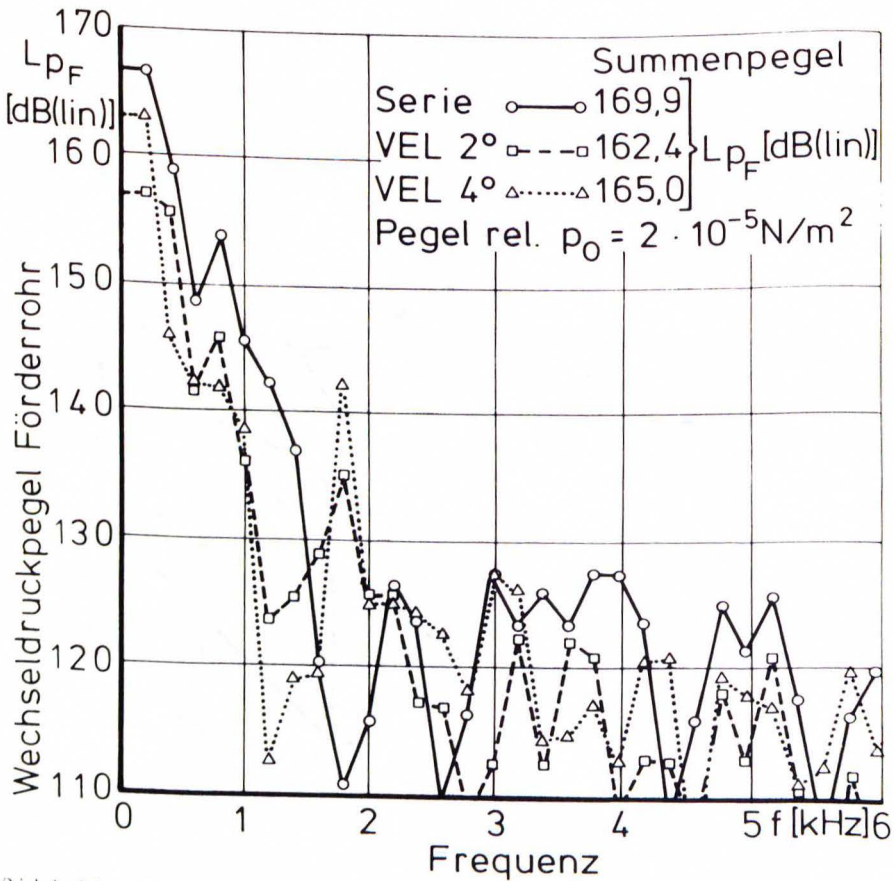


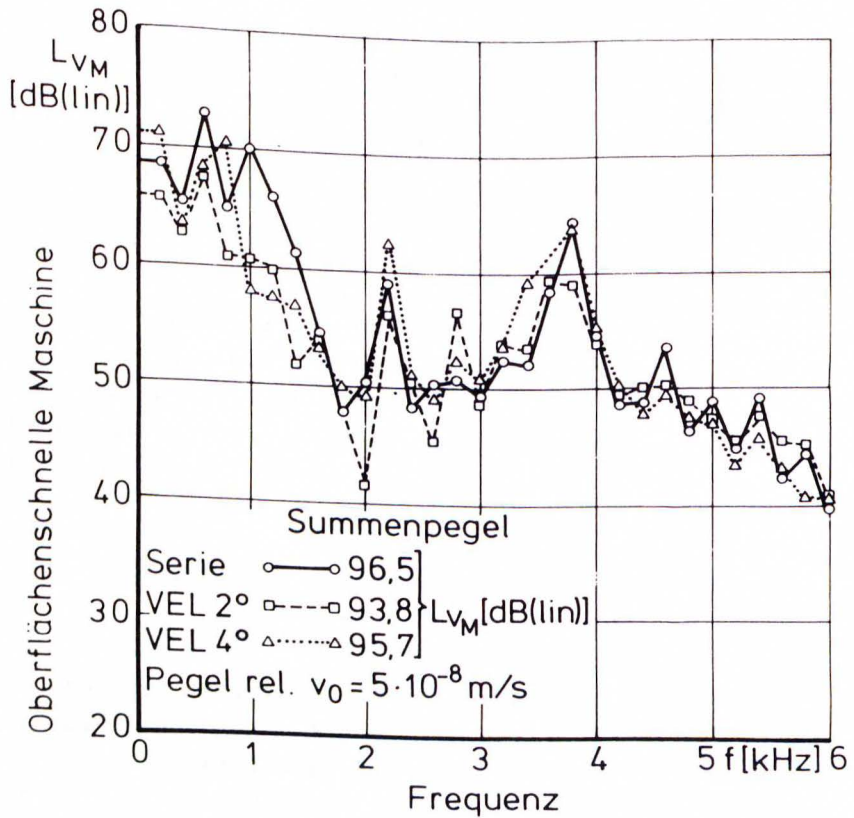
Bild 10. Wechseldruckpulsation im Förderrrohr

immer deutlich unter dem Serienpegel liegen. Die größte Absenkung von 21 dB für die 2°-Variante und 29 dB für die 4°-Variante ist bei 1,2 kHz erreicht. In dem für die Abstrahlung sehr wichtigen Bereich zwischen 1,2 kHz und

2,2 kHz weichen die beiden VEL-Varianten deutlich vom Serienverhalten ab. Beide steigen nochmals an bis zu einem ausgeprägten Peak bei 1,8 kHz, der für die 2°-Variante 134 dB und für die 4°-Variante 142 dB beträgt. Dieser Peak ist durch die Eigenfrequenz des Voreinlaßkanals bedingt. Da dieser Kanal als Rechteckquerschnitt an den Zylinderquerschnitt des Rohres angekoppelt ist, wird die wirksame Länge nicht eindeutig festgelegt, bzw. hat die Eigenfrequenz eine Bandbreite von mehr als 100 Hz und liegt somit stets im Bereich einer anregenden Harmonischen. Es wäre möglich, dieses Eigenfrequenzband durch geometrische Änderungen am Kanal zu verschieben, in diesem Falle erscheint das wenig sinnvoll, weil dieser Peak nie pegelbestimmend ist.

5.4 Oberflächenschnelle der Maschine

Um die Oberflächenschnelle der Maschine meßtechnisch möglichst exakt zu erfassen, wurde der Beschleunigungsaufnehmer nacheinander an 21 gleichmäßig über die Maschinenoberfläche verteilten Meßstellen angebracht. Das Signal wurde dann integriert, um die Schnelle zu erhalten und dann wurde im digitalen Signal-Analysator das Mittel aus allen Meßstellen gebildet. Die Darstellung erfolgt als Leistungsdichtespektrum (Autospektrum), das als quadrierte des Linearspektrums nur Betrags- und keine Phaseninformation enthält. Auf diese Weise werden durch unterschiedliche Phasenlage der Meßstellen hervorgerufene Auslöschungen vermieden. Bedingt durch die Definition des Autospektrums liegen die einzelnen Peaks des Spektrums ca. 20 dB niedriger als der zugehörige Summenpegel, der sich hier aus den gemittelten Werten des analogen Pegelmeßverstärkers ergibt. Im Gegensatz zum Wechseldruckpegel im Förderronr setzt sich das Spektrum nicht nur aus der Grundanregung und ihrer Hoherharmonischen zusammen.



Meßflächenmaß: - 1,2 dB

Bild 11. Oberflächenschnelle der Maschine

Die im Bild 11 dargestellten Einnüllenden der Linienspektren sind zunächst einmal dadurch gekennzeichnet, daß sie nur geringe Unterschiede zwischen der Serienversion und den hier untersuchten zwei Varianten erkennen lassen. Dieser Eindruck wird durch die Summenpegel bestätigt, deren maximale Differenz nur 1,5 dB beträgt.

Die höchsten Peaks werden für alle Varianten zwischen 200 Hz und 300 Hz erreicht. Prägnant ist noch der Bereich bei 2,3 kHz, das ist die Zahneingriffsfrequenz der beiden Synchronisationszahnräder. Hohe Pegel, die fast bis an den Maximalwert heranreichen, ergeben sich zwischen 4,4 kHz und 4,8 kHz; dies deutet auf eine Strukturresonanz des Maschinengehäuses hin. Am wichtigsten ist der Bereich von 300 Hz bis 1,6 kHz, weil ausschließlich hier signifikante Pegelabsenkungen der Voreinlaßvarianten gegenüber der Serienversion auftreten. Die Differenz beträgt bis zu 15 dB (bei 1 kHz), wobei die VEL 2°-Variante noch etwas niedriger liegt. In diesem Bereich korrespondiert die Oberflächenschnelle auch sehr deutlich mit dem Spektrum des Wechseldruckpegels (Bild 8). Es läßt sich also feststellen, daß, bedingt durch die Übertragungsadmittanz der Maschinenstruktur, der drastische Amplitudenabfall des Wechseldruckpegels von 200 Hz bis 800 Hz nicht mehr an der Oberflächenschnelle erkennbar ist. Die sehr hohen Pegel der Grundanregungsfrequenz und der 2., 3. und 4. Harmonischen sind also für die weitere akustische Übertragungskette nicht mehr relevant, weil diese Schwingungen von der Maschinenstruktur nicht aufgenommen werden. Der weitere Amplitudenabfall bis 2 kHz wird von der Oberflächenschnelle nachvollzogen, bis auf die relativen Maxima bei 2,3 kHz und 4,3 kHz, die durch die frequenzabhängige mittlere Übertragungsadmittanz des Gehäuses bedingt sind.

5.5 Schallintensität der Maschine

Die Messung der emittierten Schalleistung kann nicht nach der gängigen Schalldruck-Methode mit 1 m Mikrofonabstand nach DIN 45 553 erfolgen, weil die durch direkten Luftschall und die durch Körperschall bedingten Anteile des Gesamtgeräusches stets gemischt auftreten. Die gewünschte Feilschallquellenanalyse kann nur mit einer Schallmeß-

vorrichtung, durchgeführt werden, die über eine ausgeprägte Richtcharakteristik verfügt. Deshalb wird hier das Intensitätsmeßverfahren eingesetzt. Außerdem ist es nur so möglich, die erheblichen Raumrückwirkungen zu eliminieren.

Hierzu stehen das ebenfalls im Sonderforschungsbereich 121 am Institut für Meßtechnik im Maschinenbau (MiM) entwickelte analoge Echtzeitverfahren /4/ und das im eigenen Institut vorhandene digitale Verfahren mit FFT-Analysator und nachgeschaltetem Rechner /5/ zur Verfügung. Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches war es möglich beide Systeme zu kombinieren. Der Vorteil des analogen Echtzeitverfahrens, die schnelle Rückmeldung der Pegel- und Richtungsinformation, konnte bei der Bestimmung des akustischen Istzustandes ausgenutzt werden. Da die Stör- unterdrückung der Intensitätsmessung auf ca. 20 dB begrenzt ist, mußten Nachbarstrahler mit hoher Schalleistung (z.B. Rohrkompensator) ermittelt und gedämmt werden. Außerdem wurde eine realistische und zugleich meß- technisch günstige Aufteilung des Prüfstandes in Teil- schallquellen durchgeführt.

Für die Untersuchung der verschiedenen Steuergeometrie- varianten wurde das institutseigene digitale Verfahren benutzt, weil es die Möglichkeit bietet, die Intensität in Schmalbandspektren darzustellen. Beide Intensitätsmeß- verfahren arbeiten mit zwei Mikrofonen, deren Abstand die obere und, unter Berücksichtigung der elektrischen Phasen- differenz, die untere Grenzfrequenz festlegt. Für das institutseigene digitale Verfahren ergaben sich als untere Grenze 200 Hz, als obere 4,4 kHz. Vorhergehende band- selektive Messungen mit dem Analogmeßverfahren des MiM hatten ergeben, daß die Frequenzkomponenten außerhalb dieses Bereiches vernachlässigt werden können.

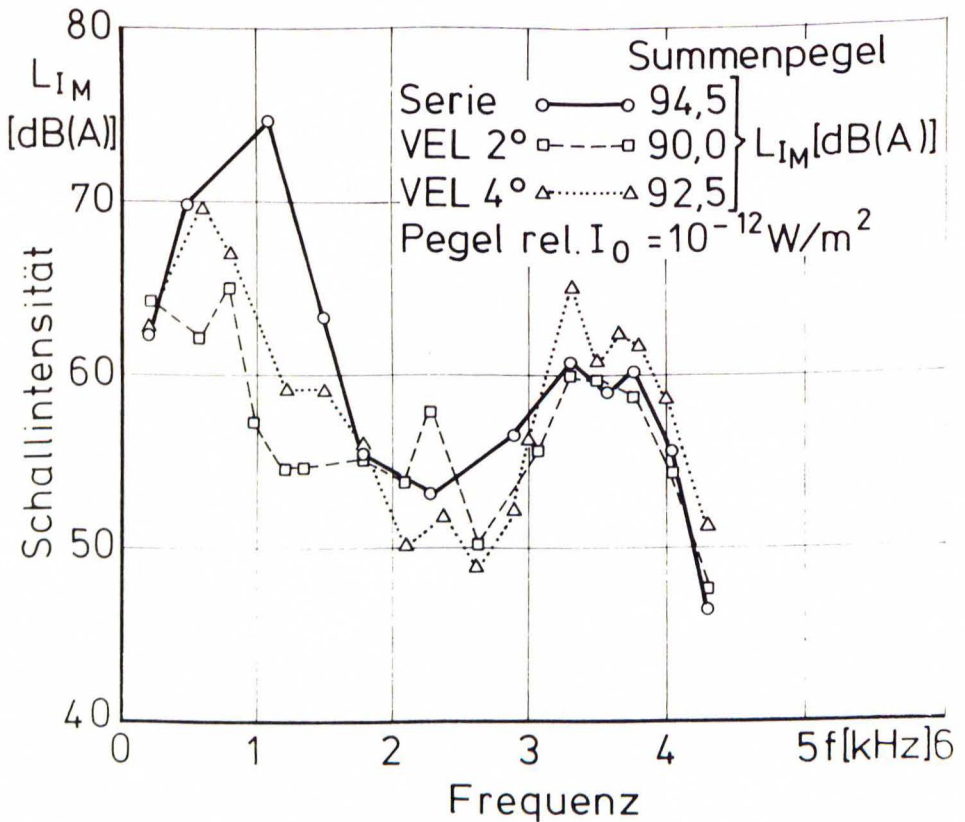
Die Einhüllenden des A-bewerteten Linearspektrums sind in Bild 12 dargestellt. Für die Serienversion als auch für die beiden hier betrachteten VEL-Varianten liegen die dominanten Peaks im Bereich von 500 Hz bis 1,2 kHz und im Bereich von 3 kHz bis 4 kHz. Die Serienversion strahlt am meisten bei 1,1 kHz ab, dann ist ein Amplitudenabfall von über 20 dB festzustellen. Zwischen 3 kHz und 4 kHz steigt der Pegel nochmals an, liegt aber dann immer noch um 14 dB unter dem Maximalwert. Die VEL 2°-Variante liegt im Bereich von 200 Hz bis 1,8 kHz mit 10 dB bis 20 dB deutlich unter den Serienwerten, im Bereich der Zahneingriffsfrequenz 2,3 kHz wird der Serienwert kurz überschritten und nähert sich dann für höhere Frequenzen diesem an. Das Spektrum dieser Variante weist über die ganze Bandbreite den ausgeglichensten Verlauf auf, d.h. die Pegel für niedrige, mittlere und höhere Frequenzen unterscheiden sich hier am wenigsten. Die Reduzierung des Summenpegels um 4,5 dB ist also nur durch das Verhalten zwischen 200 Hz und 1,8 kHz bedingt.

Die VEL 4°-Variante liegt von 200 Hz bis 1,8 kHz zwischen den Einhüllenden von Serienversion und 2°-Variante, ist danach am niedrigsten und übersteigt ab 3,1 kHz noch die Werte der Serienversion. Im Summenpegel wird hier noch eine Absenkung gegenüber der Serie um 2 dB erreicht.

Korrespondierend mit Wechseldruckpegel und Oberflächenschnelle liegt der Frequenzbereich der entscheidenden Pegelabsenkungen zwischen 800 Hz und 1,6 kHz. Bedingt durch den frequenzabhängigen Abstrahlgrad der Maschine sind die in der Oberflächenschnelle für Serie und alle Varianten schon auf hohem Niveau liegenden Frequenzen unter 600 Hz hier weniger relevant. Für die höheren Frequenzen ist die Wirkkette Oberflächenschnelle → Schallintensität sehr klar erkennbar. Der Verlauf der Intensität ist etwas verschliffen, der 2,3 kHz Peak der

Zanneingriffsfrequenz spielt kaum noch eine Rolle, genauso ist nur noch ein Teil der Peaks eine Harmonische der Grundanregung 200 Hz.

An dieser Stelle kann für die Maschine konstatiert werden, daß es gelungen ist, im besonders kritischen (weil lautesten) Maschinennennpunkt die Schallintensität und somit auch die abgestrahlte Schalleistung um 4,5 dB zu senken.



Meßflächenmaß: +1,4 dB

Bild 12. Schallintensität der Maschine

Nachsatz zum Förderrohr:

Generell liegen die Summenpegel der Intensität beim Förderrohr mehr als 12 dB unter denen der Maschine. Da jedoch in der Praxis oft das förderseitige Rohrnetz deutlich größer ist als am untersuchten Prüfstand, nimmt mit der abstrahlenden Fläche auch die abgestrahlte Schallleistung zu. Dann kann das Förderrohr durchaus zur dominanten Teilschallquelle werden und die genannte Intensitätspegelabsenkung macht sich im Gesamtgeräusch voll bemerkbar.

Im Gegensatz zur Maschine liegt im Summenpegel des Förderrohres die VEL 4°-Variante mit 5,1 dB Absenkung am günstigsten, weil im gesamten Frequenzbereich hoher Serienpegel eine Absenkung erfolgt. Dies läßt sich anhand der akustischen Wirkkette Wechseldruck \rightarrow Oberflächenschnelle \rightarrow Intensität verdeutlichen. Im Wechseldruckspektrum (Bild 10) liegt die VEL 4°-Variante in der hier pegelbestimmenden Grundanregung zwar höher als die VEL 2°-Variante, bereits in der 2., 3. und 4. Harmonischen ist sie am günstigsten.

Der frequenzabhängige Abstrahlgrad des Förderrohres bewirkt für die Intensität eine starke Dämpfung der Grundanregungsfrequenz 200 Hz, so daß die Absenkung im mittleren Frequenzbereich der Oberflächenschnelle im Summenpegel der Intensität beachtliche 6,1 dB erreicht.

Am Schluß sei noch angefügt, daß gerade für den akustisch optimalen Bereich von 50° Steghöhe und 2° bis 3° VEL-Höhe der Liefergrad des Rootsverdichters im ungünstigsten Fall gerade 1% unter den Serienwert absinkt.

6 Schrifttum

- /1/ Groth, K : Jahresbericht des SFB 121
Pötz, D : Geräusch- und Schwingungsvorgänge
in Maschinen. (1982)
S. 22-35.
- /2/ Graunke, K. : Untersuchungen über Gasschwingungen
in einem Drehkolbenverdichter und
dessen Druckleitung.
Diss. Universität Hannover (1981).
- /3/ Kania, N. : Primäre Geräuschminderung an einem
Zweitaktmotor mit Kurbelkammerspü-
lung.
Diss. Universität Hannover (1983).
- /4/ Kutter, H. : Schallintensitätsmessungen in der
Maschinenakustik.
messen + prüfen/automatik (1981),
S. 32-35.
- /5/ Chung, J.Y., : Practical Measurement of Acoustic
Pope, J. : Intensity -- The Two Microphone
Cross-Spectral Method.
Proceedings of 1978 International
Conference on Noise Control Engi-
neering San Francisco, USA (1978).