

Geräuschbeurteilung von Lenkhilfpumpen anhand der Druckpulsation

Von U. Heisel, R. Krug und J. Rothmund¹⁾

Bei hydraulischen Systemen werden durch die zeitlich ungleichmäßige Förderung von hydrostatischen Verdrängerpumpen im Druckmedium Wechseldrücke erzeugt. Die daraus resultierenden Wechselkräfte machen sich sowohl im Hydrauliksystem selbst, als auch in den angrenzenden Elementen, als störende Geräusche bemerkbar. Der Bericht beschreibt eine Möglichkeit der Pulsationsbewertung, so daß laute Pumpen bereits direkt nach der Montage erkannt werden und zur Nacharbeit weitergeleitet werden können.

Einleitung

In den letzten Jahren wurden bei Kraftfahrzeugen die Schallemissionen des Verbrennungsmotors und der Nebenaggregate durch aufwendige Schalldämmmaßnahmen stark reduziert. Von den Druckpulsationen der Lenkhilfpumpe erzeugte Geräusche, welche vorher im Gesamtschallpegel untergegangen sind, gaben nun mehr und mehr Anlaß zu Reklamationen. Bemängelt wurde vor allem „Brummen beim Lenken“ und „Zischen/Pfeifen am Lenkradanschlag“. Während die Zisch- und Pfeifgeräusche auf Abströmvorgänge in den Ventilen zurückzuführen sind, können die Brumngeräusche, wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, auf die Druckpulsation zurückgeführt werden. Ziel dieser Untersuchungen war es, Kriterien zur Pulsationsbeurteilung zu finden, so daß diejenigen Pumpen, welche im Fahrzeug zu störenden Brumngeräuschen führen würden, bereits direkt nach der Produktion erkannt und nachgearbeitet werden können.

Entstehung der Druckpulsation

Bei den untersuchten zweipoligen Flügelzellenpumpen (Bild 1) werden zwischen Rotor und Hubring durch die Flügel zehn Kammern gebildet, die zweimal pro Umdrehung Öl aus den Tankbohrungen ansaugen (Saugnieren) und auf der Druckseite wieder ausschleiben (Drucknieren). Dadurch ergibt sich ein im wesentlichen bei der zehnfachen Drehfrequenz (1. Ordnung) pulsierender Volumenstrom. Diese Volumen- bzw. Förderstromschwankungen führen zu Wechseldrücken im Hydrauliksystem, welche die Pumpe und die nachgeschalteten Elemente zum Schwingen anregen [2]. Im hörbaren Bereich bezeichnet man diese Schwingungen als Flüssigkeits- bzw. Körperschall.

In früheren Arbeiten des Instituts für Werkzeugmaschinen [3] wurde festgestellt, daß zur Verminderung der Druckpulsation ein Angleichen des Druckes in der von den Flügeln eingeschlossenen Kammer an den Arbeitsdruck erforderlich ist. Dies versucht man durch verschiedene Maßnahmen, zum Beispiel durch Vorkompression des Ölolumens oder durch Anbringen von Steuerschlitzen an der Druckplatte zu erreichen.

Neben den systembedingten Pulsationsursachen gibt es auch fertigungsbedingte Pulsationsursachen wie

- Abweichungen der Hubkurve von der Idealform,
- Vorsatz zwischen Hubkurve und Positionierbohrungen im Ring,
- Spiel zwischen den Positionierbohrungen im Ring, Stift und Stiftbohrungen im Flansch,
- Vorsatz der Hubkurve unter Druck.

¹⁾ Prof. Dr.-Ing. U. Heisel, Dipl.-Ing. R. Krug, Dipl.-Ing. J. Rothmund, Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart.

Körperschallübertragung

Der von der Flügelzellenpumpe erzeugte Flüssigkeitsschall breitet sich in Form von ebenen Wellen im gesamten Hydrauliksystem ungehindert aus. Für die Flüssigkeitsschwingungen kann nach [4, 5] der ebene Wellenansatz zugrunde gelegt werden. Das Schwingungsverhalten von hydraulischen Rohrleitungselementen wird durch vier untereinander verschiedene Wellenformen geprägt:

- Longitudinalschwingungen in der Flüssigkeit,
- Longitudinalschwingungen des Rohrkörpers,
- Biegeschwingungen des Rohrkörpers und
- Torsionsschwingungen des Rohrkörpers.

Versuchs- und Meßaufbau

Im Versuchsaufbau wird der Ölkreislauf nahezu so nachgebildet, wie er auch im Fahrzeug ausgeführt ist. Er besteht aus Lenkhilfpumpe, serienmäßigem Druckschlauch und Lenkgetriebe. Der Hydraulikkreislauf des Versuchsaufbaus unterscheidet sich im wesentlichen in der Abschlußimpedanz des Lenkgetriebes vom Hydraulikkreislauf des Fahrzeugs. Der Versuchsaufbau wurde im Schallmeßraum des Instituts für Werkzeugmaschinen installiert, so daß die Schallabstrahlung unter normierten Bedingungen gemessen werden konnte. Die Auswertung der Pulsationsspektren konnte daher sofort in Korrelation mit dem Luftschallspektrum erfolgen. Der Meß- und Versuchsaufbau ist in Bild 3 dargestellt. Ein piezokeramischer Druckaufnehmer am Druckausgang der Lenkhilfpumpe nimmt die Druckpulsation auf. Mit Mikrofonen wird der Luftschall erfaßt.

Meßverfahren der Pumpenhersteller

Die Pumpenhersteller prüfen ihre Pumpen in der Serie in der Regel zu 100%. Dabei wird neben den Druck-, Durchflußmengen- und Wirkungsgradmessungen auch die Pulsation hinsichtlich der zu erwartenden Lautstärke durchgeführt. Diese Pulsationsmessungen werden jedoch nach unterschiedlichen Verfahren durchgeführt:

Das Frequenzspektrum der Druckpulsation wird durch Bewertungsfilter, welche den Frequenzgang der Übertragungsstrecke Pulsation - Luftschall nachbildend, in die Frequenzbereiche „Brummen“ und „Pfeifen“ getrennt. Ragen einzelne Peaks, verursacht durch die Pumpe, aus dem Spektrum „Fahrzeug mit Pumpe“ heraus, so wird die Pumpe deutlich hörbar sein. Liegen die Peaks in der Höhe des Spektrums „Fahrzeug mit Pumpe“ oder darunter, so wird die Pumpe praktisch nicht hörbar sein. Zusätzlich wird der Effektivwert und der Spitze-Spitze-Wert aus dem Zeitsignal ermittelt und bewertet.

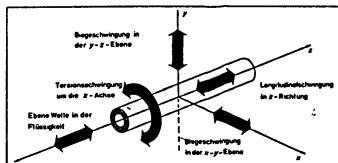


Bild 2: Wellenarten an einem Rohrleitungselement

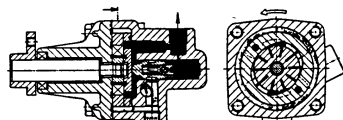


Bild 1: Als Lenkhilfpumpe ausgeführte Flügelzellenpumpe [1]

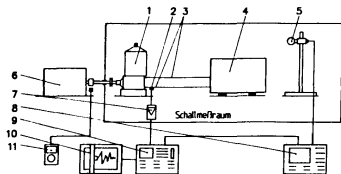


Bild 3 Versuchsaufbau zur Pulsationsmessung 1 Lenkheimpumpe, 2 Druckaufnehmer, 3 serienmäßiger Druckschlauch, 4 Lenkgetriebe, 5 Mikrofon, 6 Elektromotor, 7 Ladungsverstärker, 8 Verstärker, 9 FFT-Analysator, 10 Plotter, 11 Drehzahlmesser

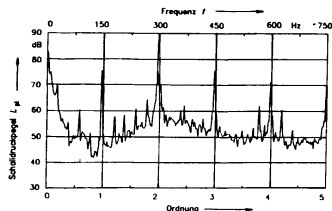


Bild 5 Luftschallspektrum, erzeugt von einer Pumpe mit starken Hauptordnungen

Pulsationsbewertung

Zur Bewertung der Pulsation wurde eine Vielzahl von Pumpen verschiedener Hersteller ausgewählt, die hinsichtlich ihrer Geräuschabstrahlung bereits subjektiv beurteilt waren. Pro Hersteller konnten dabei jeweils über mehrere als laut, als mittel und als leise eingestufte Pumpen verfügt werden.

Der Vergleich der lauten Pumpen ergab, daß es zwei völlig unterschiedliche Pulsationscharakteristiken gibt. Bei einigen lauten Pumpen treten die Hauptordnungen, wie aus Bild 4 ersichtlich, so deutlich hervor, daß sie allein für die störende Schallemission (Bild 5) verantwortlich sind. Das Geräusch, welches von einer Pumpe mit dieser Pulsationscharakteristik erzeugt wird, hat einen tonalen Charakter, d. h. die 1. Ordnung und die dazu Harmonischen der Druckpulsation erzeugen einen in der Frequenz übereinstimmenden Ton. Das Frequenzspektrum der Pulsation in Bild 6 ist typisch für die andere Pulsationscharakteristik. Die Hauptordnungen treten nicht oder nur unwesentlich aus dem Ordnungsspektrum hervor. Die Zwischenordnungen (sidebands), also diejenigen Peaks welche zwischen den einzelnen Hauptordnungen zu erkennen sind, erreichen die gleichen oder teilweise sogar höhere Pegelwerte als die Hauptordnungen. Aus Bild 7 wird ersichtlich, daß sich auch diese Pulsationscharakteristik im Geräusch niederschlägt. Das Geräusch äußert sich nicht in einem sonoren Ton, sondern vielmehr in einem rauh schlagenden und mahlenden Brummen.

Die hohen Luftschallpegel von teilweise über 80 dB entstehen bei einer linearen Schallmessung ohne Bewertung. Sie dürfen nicht mit den oft verwendeten Darstellungen mit einer Bewertung (z. B. A-Bewertung) verwechselt werden.

Als Vergleichsspektrum ist in Bild 8 ein Pulsationsspektrum einer leisen Pumpe dargestellt. Man kann deutlich erkennen, daß die Haupt- und Nebenordnungen deutlich kleinere Werte annehmen. Basierend auf diesen unterschiedlichen Pulsationscharakteristiken wurde ein Bewertungsverfahren zur Abschätzung der zu erwartenden Lautstärke vorgestellt.

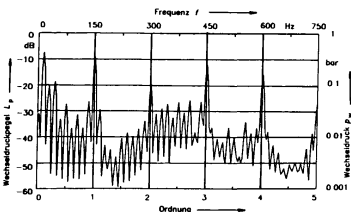


Bild 6 Das Pulsationsspektrum einer Pumpe mit ausgeprägten Sidebands, gemessen bei 50 bar, 900 min⁻¹

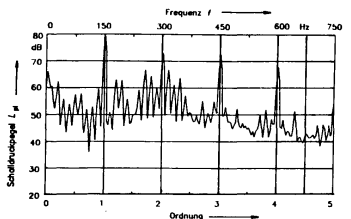


Bild 7: Luftschallspektrum mit starken Zwischenordnungen

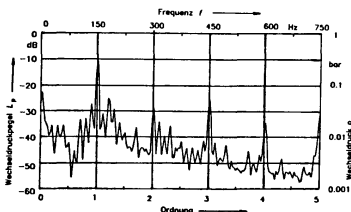


Bild 8: Frequenzspektrum der Pulsation einer leisen Pumpe.

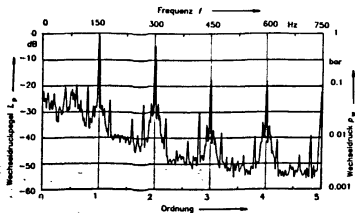


Bild 4: Das Pulsationsspektrum, gemessen bei 50 bar, 900 min⁻¹, zeigt deutlich die dominierenden Hauptordnungen

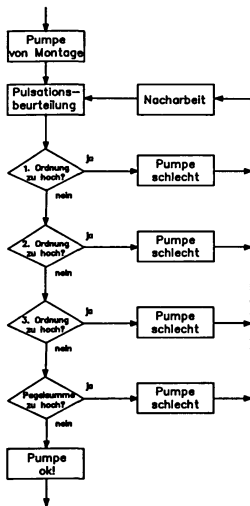


Bild 9: Flußdiagramm zum Ablauf einer Pulsationsbeurteilung

Vorschlag eines Prüfverfahrens

An ein Prüfverfahren, welches in der Serienprüfung zum Einsatz kommen soll, werden folgende Bedingungen gestellt:

- sicherer Nachweis von schlechten Pumpen,
- sehr kurze Meßzeit,
- einfache Bedienung,
- eindeutige Gut/Schlecht-Anzeige,
- nachträglicher Einbau in vorhandene Prüfstände,
- sichere und störungsfreie Funktion,
- automatisierbar,
- geringe Kosten,
- leichte Anpassungsfähigkeit an wechselnde Qualitätsanforderungen.

Wie die Messungen ergaben, wird die Pulsation einer Flügelzellenpumpe durch die Höhe der Hauptordnungen (1, 2, 3... Ordnung) und die Anzahl bzw. die Höhe der Zwischenordnungen charakterisiert. Es zeigte sich, daß keine der Hauptordnungen für sich alleine ein Maß für die zu erwartende Schallemission sein kann. Insgesamt ist jedoch die Tendenz zu höheren Pegelwerten der Hauptordnungen bei lauten Pumpen zu erkennen. Deshalb sollte jede Hauptordnung für sich betrachtet als Bewertungsgrundlage dienen, da hohe Hauptordnungen für laute Einzeltöne verantwortlich sind.

Für die Analyse des Spektrums hinsichtlich der Zwischenordnungen ist das Cepstrum-Verfahren geeignet. Die Cepstrumanalyse gibt Auskunft über die Peakhaltigkeit eines Spektrums. Es hat für die Serienprüfung jedoch den Nachteil, daß es durch die doppelte Fouriertransformation die Auswertzeit verlängert und keine Anpassungsmöglichkeiten bei differenziert veränderten Qualitätsansprüchen bietet.

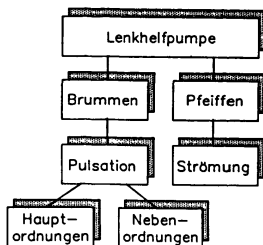


Bild 10: Ursachen der verschiedenen Geräuscharten bei einer Lenkhelfpumpe

Aus diesem Grund sollte auf einfachere analytische Auswertverfahren zurückgegriffen werden. Eine Analyse der Pulsation durch einfaches Abzählen der Seitenbandspitzen, welche einen festgesetzten Grenzwert übersteigen, würde zwar brauchbare Ergebnisse liefern, gibt jedoch keine Auskunft über die Höhe der Seitenbandspitzen. Die logarithmische Pegeladdition aller Ordnungen führt zum Gesamtsummenpegel, dieser ist jedoch zur Geräuschbeurteilung via Pulsation ungeeignet. Gute Ergebnisse liefert eine differenzierte logarithmische Pegeladdition, wie zum Beispiel die Addition aller Zwischenordnungen oder die Addition aller ungeraden Zwischenordnungen. Das logarithmische Additionsverfahren hat jedoch den Nachteil, daß durch den Additionsalgorithmus viele niedrigere Pegelspitzen gegenüber einer hohen Pegelspitze auf den Gesamtpegel kaum einen Einfluß haben. Das Verfahren eignet sich auch nur bedingt für die Serienprüfung, da für die Analyse entsprechend der minimal zu betrachtenden 5 Ordnungen bei einer zehnfüßigen Pumpe mindestens 50 Stützpunkte aufgenommen und selektiert werden müssen, wodurch die Prüfzeit verlängert wird. Als Maß für die Peakhaltigkeit soll daher die arithmetische Pegelsumme herangezogen werden. Bei diesen statistischen Auswertungsverfahren werden auch die niederen Seitenbandspitzen im Ergebnis berücksichtigt. Es hat sich als ausreichend erwiesen, eine arithmetische Pegeladdition über die ersten 20 Zwischenordnungen durchzuführen. Das Ergebnis darf jedoch nicht für sich alleine betrachtet werden, sondern muß auf die Vergleichswerte anderer baugleicher Pumpen bezogen werden.

Aufgrund dieser Überlegungen wird folgendes Prüfverfahren, bestehend aus 4 Prüfkriterien vorgeschlagen:

1. Bewertung der 1. Ordnung
2. Bewertung der 2. Ordnung
3. Bewertung der 3. Ordnung
4. Bewertung der arithmetischen Pegeladdition bis zur 20. Zwischenordnung.

Dieses Verfahren benötigt für die Auswertung nur 21 Stützpunkte und bietet die Möglichkeit, daß für jedes Kriterium ein eigener Grenzwert definiert werden kann, so daß Individuelle Ansprüche der Fahrzeughersteller und das Übertragungsverhalten der verschiedenen Fahrzeuge berücksichtigt werden kann. Die Pegeladdition kann bei Bedarf auch über andere Ordnungen durchgeführt werden.

Vertifizierung des Prüfverfahrens

Die Effizienz des Prüfverfahrens wurde an mehreren Pumpen überprüft. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf solche Pumpen gerichtet, welche sich im Grenzbereich gut/schlecht befanden. Dabei mußte das Pulsationspektrum gemäß dem Flußdiagramm nach Bild 9 beurteilt werden, wobei die Grenzwerte der einzelnen Abfragen aus empirischen Werten gewonnen werden mußten.

Djenigen Pumpen, welche dann alle 4 Bedingungen erfüllt haben, können dann mit hinreichender Zuverlässigkeit als gut bezeichnet werden.

Zusammenfassung

Das Pulsationsverhalten von Lenkhilfpumpen ist ursächlich für das Geräuschverhalten (Brummen) der Pumpen im Fahrzeug verantwortlich (Bild 10). Eine Bewertung der Pulsation erlaubt unmittelbar nach der Endmontage laute Pumpen zuverlässig zu erkennen. Die Bewertung der Pulsation basiert auf der Tatsache, daß sowohl hohe Pegel der Hauptordnungen als auch die Höhe und Anzahl der Zwischenordnungen für die Schallemission verantwortlich sein können. Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Prüfverfahren vorgeschlagen, welches neben der Höhe der Hauptordnungen auch Anzahl und Höhe der Zwischenordnungen berücksichtigt.

Schrifttum

- [1] N N ZF-Lenkungen mit Zubehör und Pumpenprogramm. Firmenschrift der Zahnradfabrik Friedrichshafen, Friedrichshafen 1967.
- [2] Gösele, R.: Zur Entstehung und Berechnung des Geräusches von hydrostatischen Pumpen. Bd. 15: Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart. Stuttgart: Gössemann, 1981 Universität Stuttgart, Duss., 1980
- [3] Gösele, R.: Volumenstromschwankungen hydrostatischer Pumpen. o + p Ölhydraulik und Pneumatik 23 (1979), Nr. 5, S. 371, 1979.
- [4] Wacker, K.: Schallembreitung. Heft 112-1. Forschungshefte des Forschungskuratoriums Maschinenbau e V (FKM), Frankfurt, 1964.
- [5] Lang, C M und P Pokorny: Körperschall- und Flüssigkeitsschallembreitung in verzweigten Rohrsystemen. o + p Ölhydraulik und Pneumatik 32 (1968), Nr. 1, S. 23 ff., 1968.