Druckwechselvorgänge in druckgeregelten Flügelzellenpumpen

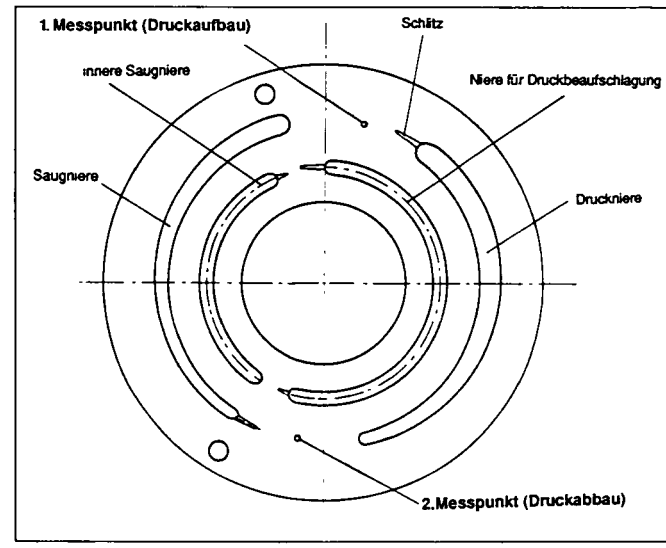
UWE HEISEL, WIESLAW FIEBIG,
NICHOLAS MATTEN

Auf das Geräuschverhalten von einpoligen, regelbaren Flügelzellenpumpen haben die Vorgänge beim Druckaufbau und Druckabbau in den Verdrängerkammern in den Umsteuerbereichen einen entscheidenden Einfluß. Ein gleichmäßiger Übergang von Ansaug- auf Betriebsdruck und umgekehrt ist eine wichtige Voraussetzung für die Minderung der Körperschall- und Geräuschemission. Während für andere Pumpenbauarten experimentelle Untersuchungen sowie Simulationsmodelle bereits Aussagen für die optimale Umsteuergeometrie liefern, sind für Flügelzellenpumpen bisher keine allgemeingültigen Kenntnisse über Umsteuervorgänge bekannt.

Im Rahmen eines von der deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Vorhabens ist es erstmals gelungen, die Position der Flügel im Rotor und damit das Abheben der Flügel vom Hubring zu messen. Die Kenntnis der Flügelbewegungen ist für die Simulaton und die Nachprüfung der Ergebnisse von wesentlicher Bedeutung. Der vorliegende Beitrag zeigt auf, welche Vorgänge in den Umsteuerbereichen in einer Pumpe stattfinden, wie diese miteinander zusammenhängen und durch digitale Simulation untersucht und vorherbestimmt werden können.

Dr.-Ing. W. Fiebig ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart, Leiter Prof. Dr.-Ing. U. Heisel. Dipl.-Ing. N. Matten war Mitarbeiter desselben Instituts und ist jetzt Geschäftsführer des Zentrums Fertigungstechnik Stuttgart.

1: Versuchsaufbau zur Messung des Druckaufbaus



Experimentelle Untersuchungen zum Druckwechselvorgang

Die Messungen des Druckaufbaus und des Druckabbaus in einer Kammer im Umsteuerbereich zwischen Saug- und Druckniere wurden mit stillstehenden Druckaufnehmern durchgeführt. Die piezoresistiven Druckaufnehmer (Kistler 4075A500 und 4075A200) wurden direkt in der Druckplatte in der Mitte des Kompressions- und Expansionsbereichs eingebaut, abgedichtet und im Deckel eingeschraubt **(Bild 1)**. Da die Druckaufnehmer einen größeren Durchmesser haben als die Flugeldicke (2 mm), erfolgt die Verbindung zwischen einer Kammer im Umsteuerbereich und der aktiven Meßfläche des Druckaufnehmers durch kurze Bohrungen mit einem Durchmesser von 1,5 mm, um eine seitliche Umströmung zu vermeiden. Der Meßaufbau mit stillstehenden Druckaufnehmern erlaubt die Messung des Druckaufbaus in jeder Kammer im Umsteuerbereich. Damit erfaßt man das Verhalten für jeden einzelnen Flügel und es ist ebenso möglich die Einflüsse, die vom Flügelabheben stammen, zu erkennen.

Die Druckpulsation am Ausgang der Pumpe wurde mittels eines piezokapazitiven Druckaufnehmers (Kistler 6005) gemessen. Der Meßpunkt wird dabei möglichst nahe an den Ausgang der Pumpe gelegt. Um Einflüsse durch das nachgeschaltete System weitgehend zu vermeiden, wurde mit einer kurzen Druckleitung gemessen [1]. Bei diesem Aufbau ist die Form der Druckpulsation ähnlich wie die der Volumenstrompulsation, da die Systemresonanzen über dem interessierenden Frequenzbereich liegen. Die Signale der Druckaufnehmer für die Druckaufbau-, Druckabbau und Druckpulsationsmessung wurden über Verstärker zu einem Oszilloskop geleitet und mit einem Plotter registriert. Der stationäre Forderdruck wurde mit Hilfe eines Manometers erfaßt. Bei den Messungen wurden Saugdruck und Temperatur konstant gehalten, während die Höhenverstellung, Drehzahl sowie der Forderdruck variiert wurden.

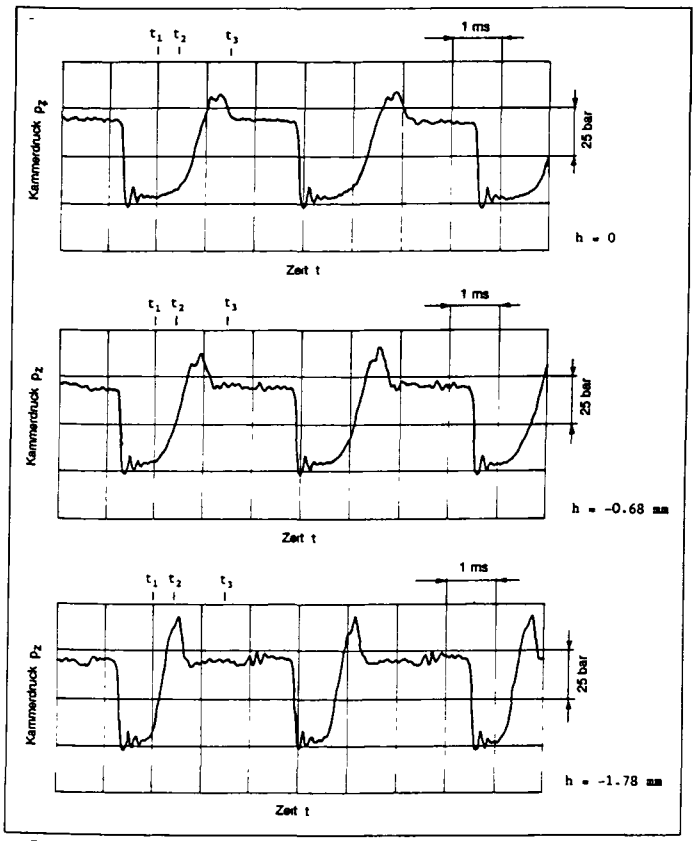
Der Druckverlauf in einer Kammer im Umsteuerbereich ist im wesentlichen von der Höhenverstellung (Vorkompression) und von den Betriebsparametern der Pumpe abhängig. In **Bild 2** sind die gemessenen Verläufe des Druckaufbaus für verschiedene Höhenverstellungen h dargestellt. Mit Zunahme der Höhenverstellung wachsen infolge der größeren Vorkompression der Drucküberschuß beim Druckaufbau p_{max}-p_b sowie der Druckgradient dp_z/dt an. Ebenso liegen Beginn und Ende des Druckaufbaus bzw. die Lage des Druckmaximums mit zunehmender Höhenverstellung immer früher. Am Anfang der Druckniere ist der Steuerschlitz angebracht, um den Druckaufbaubereich zu verlängern und die Drucküberschüsse zu minimieren. Aus Bild 2 ist ersichtlich, daß das Druckmaximum am Schlitzbeginn erreicht wird. Der Schlitz kann also in diesem Fall nur

eine Rolle als Entlastungsnut spielen. Der Einfluß des Betriebsdruckes und der Drehzahl auf den Verlauf des Druckaufbaus zeigt **Bild 3**.

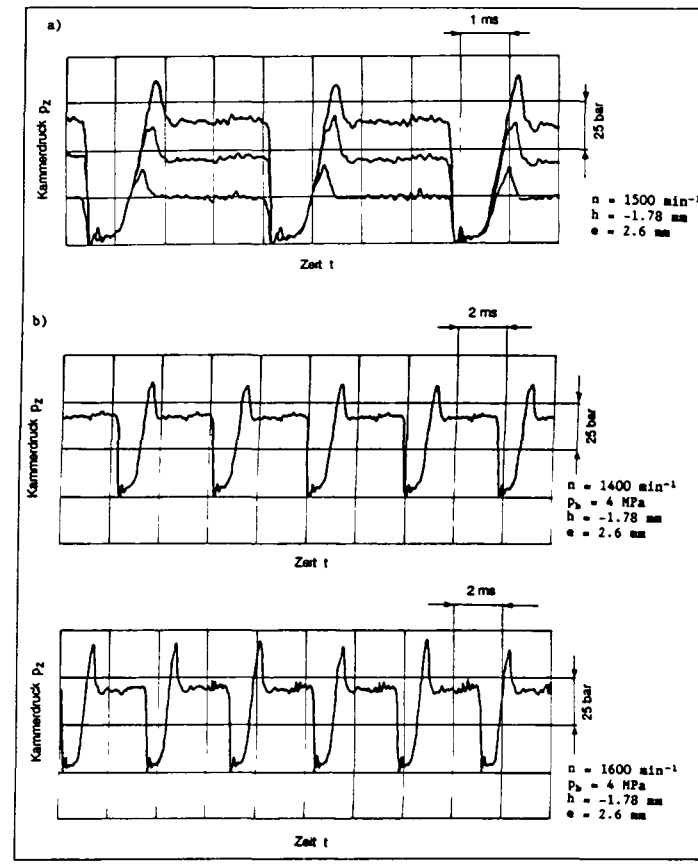
Aus Bild 3a folgt, daß mit Zunahme des Betriebsdruckes bei konstanter Drehzahl und Höhenverstellung das Druckmaximum geringfügig später erfolgt. Dies ist auf die geringere Dichtheit der Kammer im Umsteuerbereich bei höheren Betriebsdrükken zurückzuführen. Die Zunahme der Drehzahl (Bild 3b) verursacht eine bessere Dichtheit der Kammer im Umsteuerbereich, die auf zunehmende Fliehkraft am Flügel zurückzuführen ist. Die Drucküberschusse bei einer bestimmten Höhenverstellung und einem bestimmten Betriebsdruck werden mit zunehmender Drehzahl immer hoher. Sie hängen aber von der Höhenverstellung ab (vergl. Bild 2). Es ist ebenfalls festzustellen, daß die Unregelmäßigkeiten zwischen den Druckuberschussen für die einzelnen Kammern bei großeren Drehzahlen deutlicher zum Tragen kommen. Im **Bild 4** sind die gemessenen Verlaufe der Druckpulsation fur die Höhenverstellungen $h = 0$ und $h = -1{,}78$ mm dargestellt.

Aus diesen Messungen ergibt sich, daß sich die Amplitude der Druckpulsation mit der Zunahme der Höhenverstellung vergrößert. Ebenso hängt die Form der Druckpulsation von der Höhenverstellung ab. Die Unterschiede im Verlauf bei verschiedenen Höhenverstellungen sind auf die unterschiedliche Abdichtung zwischen Saug- und Druckseite zurückzuführen [2, 3].

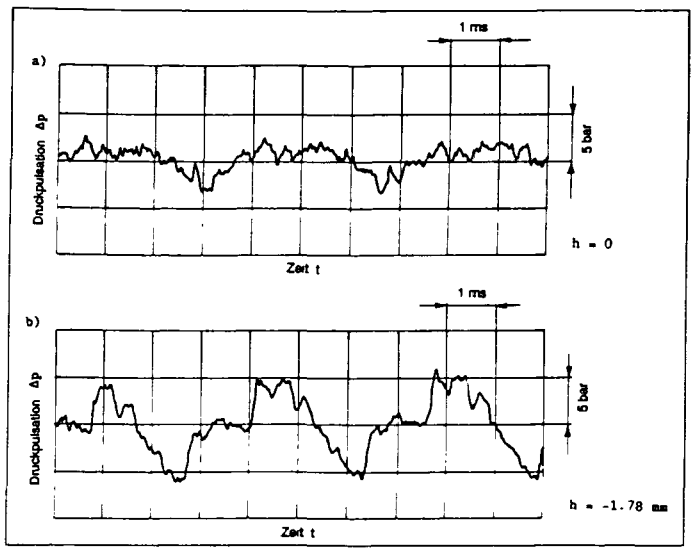
Aus den Messungen folgt weiter, daß wenn die Abdichtung bei allen Kammern vorhanden ist und Flügel sich stabil verhalten, man ziemlich periodische Verläufe von $p_z(t)$ und $\Delta p(t)$ erhält. Bei den Betriebszuständen jedoch, bei welchen es (voraussichtlich) zum Flügelabheben kommt, sind bei der Druckpulsation Anderungen der Amplitude zu registrieren **(Bild 5)**. Diese Anderungen erfolgen oftmals bei kleineren Drehzahlen und sind auf Oldurchflüsse



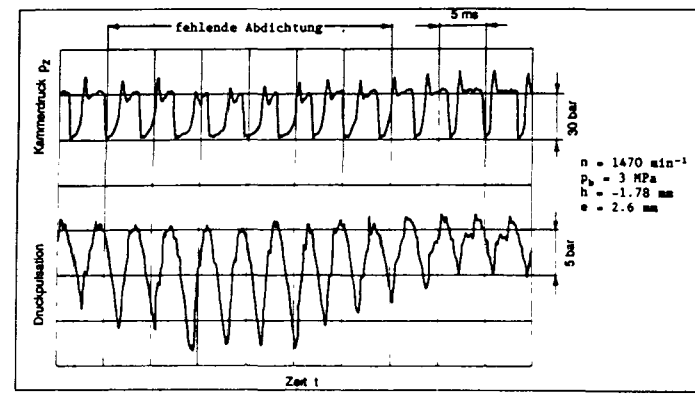
2: Änderung des Druckaufbauverlaufs in einer Kammer im Umsteuerbereich bei Variation der Höhenverstellung: $n = 1\,500\ \mathrm{min}^{-1}$, $p_b = 40$ bar, $e = 2{,}6$ mm, t_1-Kammer abgeschlossen, t_2-Schlitzbeginn, t_{33}-Schlitzende



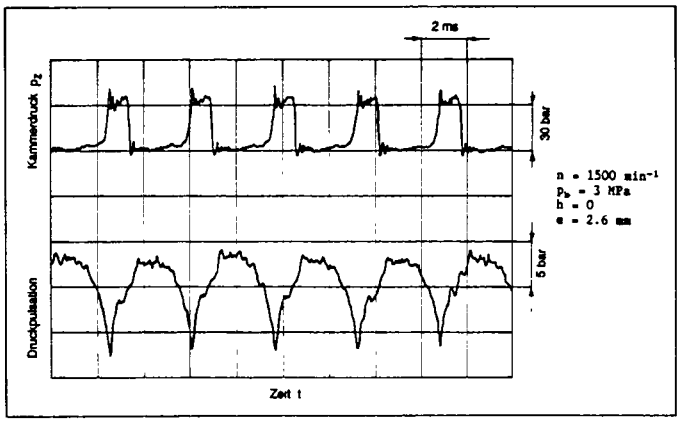
3: Änderung des Druckaufbauverlaufs in einer Kammer im Umsteuerbereich bei a) Variation des Förderdruckes, b) Variation der Drehzahl



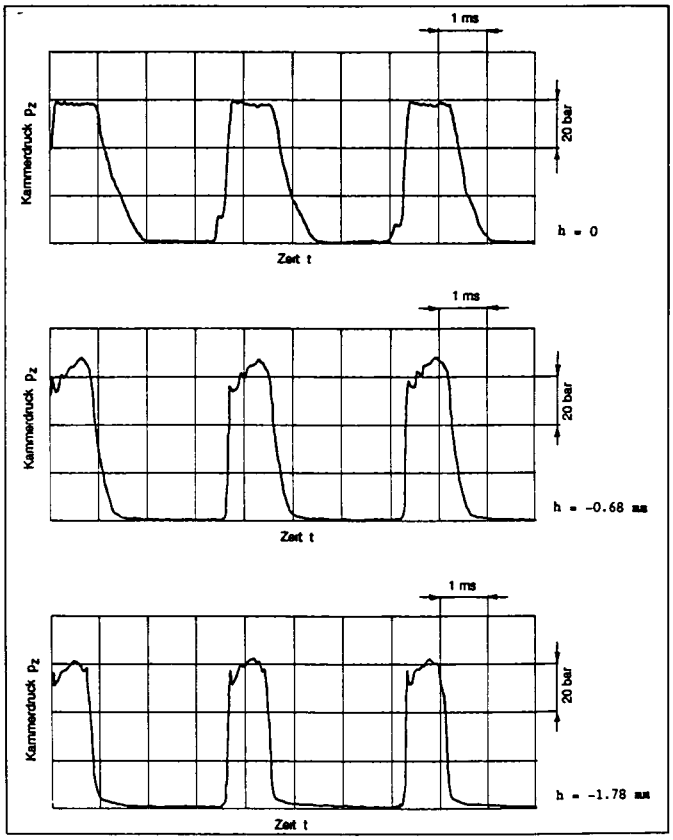
4: Druckpulsation am Ausgang der Pumpe für verschiedene Höhenverstellungen, $n = 1\,500\ \mathrm{min}^{-1}$, $p_b = 40$ bar, $e = 2{,}6$ mm



5: Druckaufbau und Druckpulsation in der Pumpe bei niedriger Drehzahl



▲ **6: Druckaufbau und Druckpulsation bei fehlender Abdichtung in jeder Kammer**



7: Druckabbauverläufe für verschiedene Höhenverstellungen: $n = 1500\ \mathrm{min}^{-1}$, $p = 6$ MPa, $e = 2{,}6$ mm

zwischen Druck- und Saugbereich zurückzuführen (hydraulischer Kurzschluß).

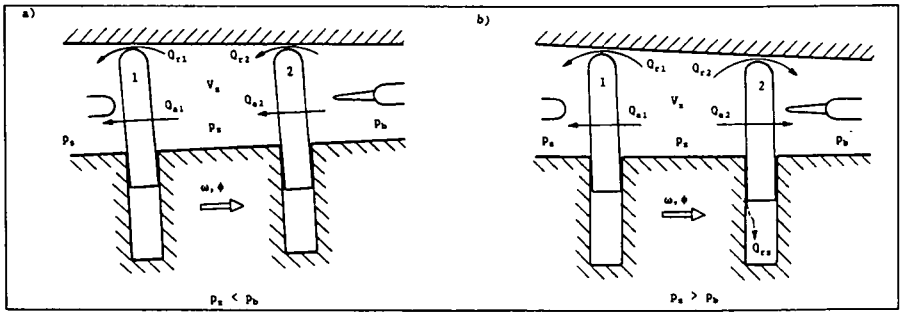
Bei fehlender Abdichtung der Kammern kann sich der Kammerdruck nicht genügend im Umsteuerbereich aufbauen und es folgt eine plötzliche Verbindung zwischen Kammer und der Druckniere **(Bild 6)** mit einem damit verbundenen Druckausgleich. Bei den in Bild 6 dargestellten Meßergebnissen ist eine fehlende Abdichtung fast regelmäßig für jede Kammer zu erkennen. Infolge der Öldurchflüsse zwischen Saug- und Druckbereich vergrößert sich die Amplitude der Druckpulsation wesentlich.

Bild 7 zeigt die gemessenen Druckabbauverläufe in den einzelnen Kammern für verschiedene Höhenverstellungen. Die Messungen zeigen, daß der Druckabbau in einer Kammer, ähnlich wie der Druckaufbau, von der Höhenverstellung und den Betriebsparametern der Pumpe abhängt. Mit der Zunahme der Höhenverstellung erfolgen Druckabbaubeginn sowie Druckabbauende in einer Kammer immer früher, und die Druckabbauphase wird immer kürzer. Die Druckaufnehmer zur Messung des Druckauf- und abbaus sind an Stellen eingebaut, die exakt der Steuergeometrie der Pumpe zugeordnet werden konnen. Mit dieser Methode ist es moglich, die Verschiebungen der Druckaufbau- und Druckabbaubereiche zu erkennen. Die Kenntnis der Druckaufbau- und der Druckabbauverläufe in einer Kammer in den Umsteuerbereichen erlaubt dann die Bestimmung des Druckverlaufs in einer Kammer während eines Umlaufs.

Simulationsmodell für den Druckaufbau in einer Kammer im Umsteuerbereich

Wie eingangs erwähnt, ist die rechnerische Vorherbestimmung des Druckaufbaus Voraussetzung für sinnvolle Optimierungsmaßnahmen. Bei der Simulation des Druckaufbaus in einer Kammer im Umsteuerbereich sind folgende Bereiche zu unterscheiden:

- Kammer ist abgeschlossen, d. h. es existiert keine Verbindung der Kammer zur Saug- und Druckniere.
- Kammer ist durch einen Schlitz mit der Druckniere verbunden (Bereich der Entlastungsnut).
- Kammer ist mit der Druckniere verbunden.



8: Simulationsmodell für die Druckaufbauberechnung

Um die komplexen physikalischen Vorgänge beim Druckaufbau in einer Kammer mit einer Simulationsrechnung nachbilden zu können, wird zunächst versucht, das Rechenmodell durch zulässige Annahmen zu vereinfachen. Es werden z. B. die Reibungs- und Massenkräfte der strömenden Flüssigkeit nicht berucksichtigt, weil sie auf die Vorgange beim Druckaufbau einen geringen Einfluß haben [4, 5].

Die Anderungen des Kontrollvolumen V_z im Modell nach **Bild 8** entstehen kinematisch durch Kompression des eingeschlossenen Druckmediums und durch die zu- und abfließenden Leckölströme an den vorne und hinten dichtenden Flügeln der Kammer. Differenzielle Anderungen des Druckes in einer Kammer infolge der Anderungen des Kontrollvolumens bei Annahme einer isothermen Verdichtung kann man errechnen aus:

$$\mathrm{d}p_z = -\frac{\mathrm{d}V_z}{K_{ol}V_z} \qquad (1)$$

Mit K_{ol} ... Kompressibilitatsfaktor des Öls.

Weil die Kammer im Umsteuerbereich nicht dicht abgeschlossen ist und Spalte und Steuerschlitze vorhanden sind, muß Gl. (1) entsprechend erweitert werden. Die möglichen Leckölströme, die in der Kammer zu- bzw. abfließen, können wie folgt gegliedert werden:

- Leckölströme, die seitlich über den axialen Spalt erfolgen Q_{ai} ($i = 1, 2$),
- Leckölströme, die über den Flügelkopf erfolgen Q_{ri},
- Leckölströme, die infolge der Schleppströmung und über die Spalte im Rotorschlitz sowie zwischen Rotor, Druckplatte und Deckel erfolgen.

Am Anfang des Umsteuerbereiches kommt es infolge der tangentialen Druckbelastung zu einem leichten Kippen des Flügels und der Spalt im Rotorschlitz wird abgeschlossen. Wenn aber der Druck in der Kammer großer wird als der Förderdruck, wird der Spalt im Rotorschlitz infolge Umkippens des vorne dichtenden Flügels kurzzeitig geöffnet und ermöglicht einen Leckölstrom. Die Leckage, die durch den Spalt zwischen Rotor, Druckplatte und Deckel erfolgen kann, der im Bereich

$s \approx 10\,\mu m$ liegt, wird zunächst in der Rechnung nicht mit einbezogen.

Die Leckölströme, die seitlich über die axialen Spalte erfolgen, kann man bei Annahme einer laminaren Strömung errechnen aus:

$$Q_{a1} = \frac{(R^*_1 - r) h_{spa1}^3}{12\eta\, d_{f1}} \quad (p_z - p_s) \qquad (2)$$

für den hinten dichtenden Flügel und

$$Q_{a2} = \frac{(R^*_2 - r)\, h_{spa2}^3}{12\eta\, d_{f1}} \quad |p_b - p_z| \operatorname{sign}(p_b - p_z) \qquad (3)$$

für den vorne dichtenden Flügel, wobei die Radien R^*_1 und R^*_2 aus der Bahnkurve des Hubrings zu erhalten sind:

$$R^*(\Phi) = \sqrt{e^2 + h^2} \cos(\Phi - \psi) + \sqrt{R^2 - (e^2 + h^2) \sin^2(\Phi - \psi)} \qquad (4)$$

mit $\psi = \arctan(h/e)$.

Für die Leckölströme, die über den radialen Spalt zwischen Flügelkopf und der Innenfläche des Hubringes erfolgen, gelten die Bedingungen:

$$Q_{r1} = \frac{b_{f1}\, h_{spr1}^3}{12\eta\, d_{f1x}} \quad (p_z - p_s) \qquad (5)$$

für den hinten dichtenden Flügel und

$$Q_{r2} = \frac{b_{f1}\, h_{spr2}^3}{12\eta\, d_{f1x}} \quad |p_b - p_z| \operatorname{sign}(p_b - p_z) \qquad (6)$$

für den vorne dichtenden Flügel.

Die Strömung durch den Steuerschlitz in der Druckniere wird bestimmt durch:

$$Q_s = A_s\, \alpha_s \sqrt{\frac{2(p_b - p_z)}{\varrho}} \operatorname{sign}(p_b - p_z) \qquad (7)$$

mit $A_s = f(\Phi)$, $\alpha_s = f(\Phi)$ und $\varrho = f(p)$.

Der Leckölstrom durch den Rotorschlitz am vorne dichtenden Flügel kann berechnet werden aus:

$$Q_{rs} = \frac{b_{f1}\, h_{rs}^3}{12\eta\, l_{rs}} \quad (p_z - p_b) \qquad (8)$$

mit $l_{rs} = l_{f1} - (R^*_2 - r)$

Die mittlere Schleppströmung über die Flügelseite läßt sich errechnen aus:

$$Q_{sch} = \frac{h_{spa1/2}\, \omega\, (R^*_1 + R^*_2)\, (R^*_1 - R^*_2)}{4} \qquad (9)$$

Für die Berechnung des Druckaufbaus ergibt sich dann:

$$\frac{dp_z}{dt} = \frac{1}{kV_z} \quad (Q_z - 2Q_{a1} - Q_{r1} + 2Q_{a2} + Q_{r2} + Q_s + Q_{rs} - Q_{sch}) \qquad (10)$$

Das Kammervolumen V_z ist durch die Geometrie der Pumpe bestimmt und kann nach [4] geschrieben werden zu:

$$\begin{aligned} V_z = {} & b_{f1}(e^2 + h^2) \left[\alpha + \frac{1}{2} \sin 2(\Phi + \alpha - \psi) - \frac{1}{2} \sin 2(\Phi - \psi) \right] + \\ & + \frac{1}{2} b_{f1} \left[R^2 - (e^2 + h^2) \right] \alpha + \\ & + \frac{1}{2} b_{f1}(e^2 + h^2) \left[\sin(\Phi + \alpha - \psi) \sqrt{\frac{R^2}{e^2 + h^2} - \sin^2(\Phi + \alpha - \psi)} - \right. \\ & \left. - \sin(\Phi - \psi) \sqrt{\frac{R^2}{e^2 + h^2} - \sin^2(\Phi - \psi)} \right] + \\ & + \frac{1}{2} b_{f1} R^2 \left[\arcsin \frac{\sqrt{e^2 + h^2} \sin(\Phi + \alpha - \psi)}{R} - \arcsin \frac{\sqrt{e^2 + h^2} \sin(\Phi - \psi)}{R} \right] - \frac{b_{f1} \pi r^2}{z}, \end{aligned} \qquad (11)$$

wobei $\alpha = 2\pi/z$, $\psi = \arctan(h/e)$, $\Phi = \omega t$.

Der geometrisch bedingte Volumenstrom Q_z ist dann zu errechnen aus:

$$Q_z = dV_z/dt. \qquad (12)$$

Der Geometrievolumenstrom Q_z ist bei einer geometrischen Verkleinerung des Volumens V_z über die Bahnkurve jeweils mit dem umgekehrten Vorzeichen zu berücksichtigen.

Für die Gl. (10) wurde mit Hilfe eines Rechenprogramms eine digitale Simulation durchgeführt. Im Programm sind die Prozeduren implementiert, die das geometrische Kammervolumen V_z sowie den Geometrievolumenstrom Q_z berechnen. Die Überstromflache A_s ist eine Querschnittsflache, die drehwinkelabhangig zwischen Kammer und Schlitz bzw. Druckniere freigegeben wird. Sie wird in einem Unterprogramm für verschiedene Winkelabschnitte durch geschlossene Ausdrucke angenahert.

Für die Dreieckskerben, die zur Glattung der Umsteuerung am Anfang der Druckniere gefertigt sind, (vergl. **Bild 9**), gilt im Bereich $\Phi_{s1} < \Phi < \Phi_{s2}$:

$$A_s(\Phi) = r_s^2 (\Phi - \Phi_{s1})^2 \sin\varepsilon \tan(\upsilon/2) \qquad (13)$$

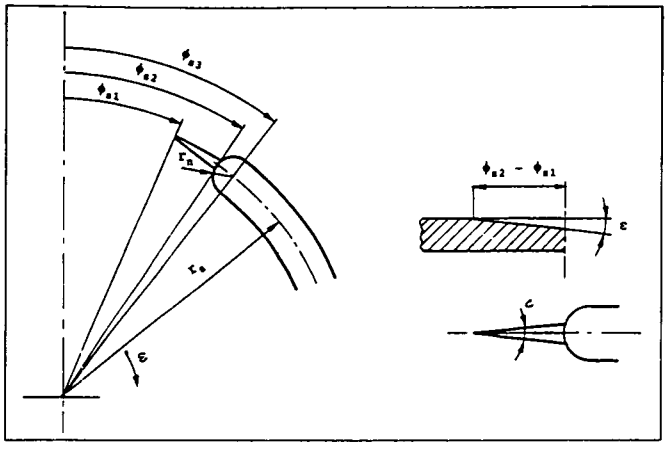
Die Winkel ε, υ, Φ_{s1}, Φ_{s2} und Φ_{s3} sind dem Steuerspiegel der Pumpe zu entnehmen. Fur den Winkelbereich $\Phi_{s2} < \Phi < \Phi_{s3}$ kann man die Uberstromflache errechnen aus:

$$A_s(\Phi) = r_s^2 (\Phi_{s2} - \Phi_{s1})^2 \sin\varepsilon \tan(\upsilon/2) + r_n^2 (\beta - \sin\beta)/2 \qquad (14)$$

wobei: $\beta = 2 \arccos \dfrac{r_n - r_s(\Phi - \Phi_{s2})}{r_n}$

Der Durchflußbeiwert der Steuerschlitze α_s wurde aufgrund experimenteller Untersuchungen [6] angenommen. Zwischen Durchflußbeiwert α_s und Überstromfläche A_s für die eingesetzten Dreieckschlitze wurde folgende Beziehung gefunden:

$$\alpha = 0{,}6276\, A_s^{-0\,1904} \qquad (15)$$



9: Schema zur Berechnung der Überströmfläche am Anfang der Druckniere

Verwendete Formelzeichen

A_s	m^2	Durchflußfläche für den Steuerschlitz
b_{f1}	m	Flügelbreite
d_{f1}	m	Flügeldicke
d_{f1x}	m	wirksame Flügeldicke
E_{ol}	N/m^2	Elastizitätsmodul des Öls
e	m	Exzentrizität des Hubringes
h	m	Höhenverstellung des Hubringes
h_{rs}	m	Spaltweite im Rotorschlitz
h_{spal}	m	Spaltweite für den Axialspalt
h_{spri}	m	Spaltweite für den Radialspalt
l_{fl}	m	Flügellänge
n	min^{-1}	Drehzahl
p_b	N/m^2	Betriebsdruck
p_s	N/m^2	Saugdruck
p_z	N/m^2	Kammerdruck
Δp	N/m^2	Druckpulsation
Q_{al}	m^3/s	Leckölströme durch die axialen Spalte
Q_{ri}	m^3/s	Leckölströme durch die radialen Spalte
Q_{rs}	m^3/s	Leckölströme durch den Rotorschlitz
Q_s	m^3/s	Strömung durch den Steuerschlitz
Q_{sch}	m^3/s	mittlere Schleppströmung über die Flügelseite
Q_z	m^3/s	geometrisch bedingter Volumenstrom
R	m	Hubringradius
r	m	Rotorradius
V_z	m^3	Kammervolumen
z	–	Flügelzahl
α	rad	Flügelteilung
α_s	–	Durchflußkoeffizient im Steuerschlitz
η	NS/m^2	dynamische Viskosität des Öls
K	m^2/N	Kompressibilitätsfaktor
K_{ol}	m^2/N	Kompressibilitätsfaktor des Öls
ρ	kg/m^3	Dichte
Φ	rad	Drehwinkel
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

Der Elastizitätsmodul E_{ol} sowie Dichte ϱ und dynamische Viskosität η der Flüssigkeit sind druckabhängig. Die Ausdrücke für diese druckabhängigen Großen wurden nach [5] angenommen.

Außer der Elastitzitat des Fluids ist ebenfalls die Elastizitat der Bauteile in einer Pumpe bei der Berechnung der Druckwechselvorgange in einer Kammer zu berücksichtigen. Bei der Berücksichtigung der elastischen Verformungen der Bauteile (Flügel, Hubring) kann man den gesamten Elastizitätsmodul errechnen aus:

$$E = \frac{E_{ol} E_b}{E_{ol} + E_b} \qquad (16)$$

wobei E_b der Elastizitätsmodul der Bauteile ist.

Wird z. B. für $p = 60$ bar nach [7] die Verdrängungsraumaufweitung auf $V_b = 22{,}7\ \mathrm{mm}^3$ berechnet, so resultiert nach Gl. (16) als folgender Gesamtelastizitätsmodul $E = 7 \cdot 10^8\ \mathrm{N/m^2}$ ($E_{ol} = 1{,}4 \cdot 10^9\ \mathrm{N/m^2}$), wobei zwischen Druck und Volumenausdehnung infolge der Verformungen der Bauteile eine Linearität angenommen wird.

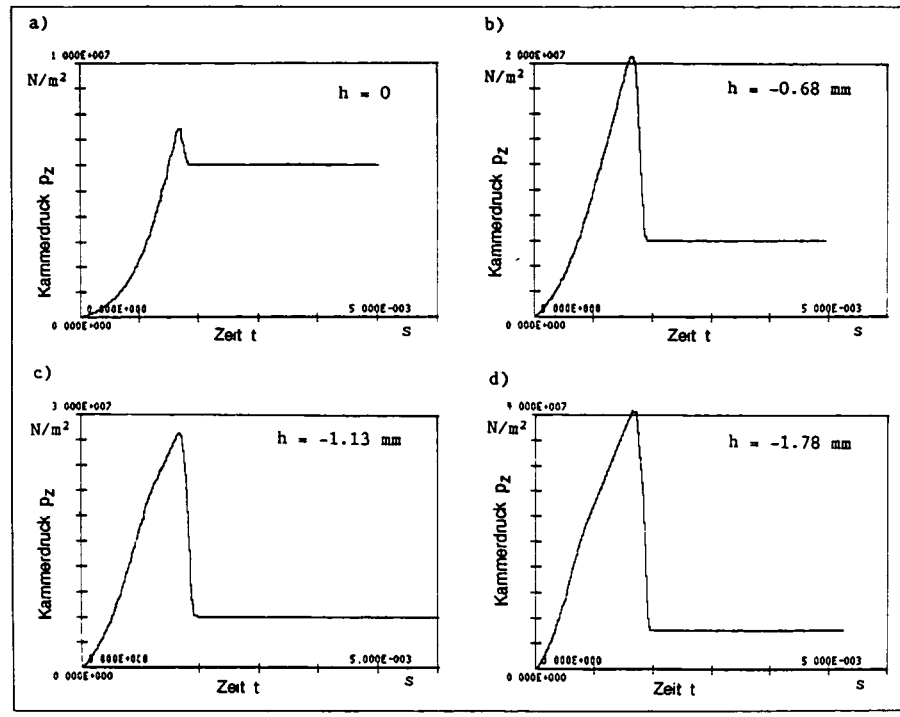
Berechnungsergebnisse

Als Untersuchungsobjekt wird eine handelsübliche regelbare einpolige Flugelzellenpumpe mit Einfachflügeln verwendet. Die Pumpe hat folgende Daten:

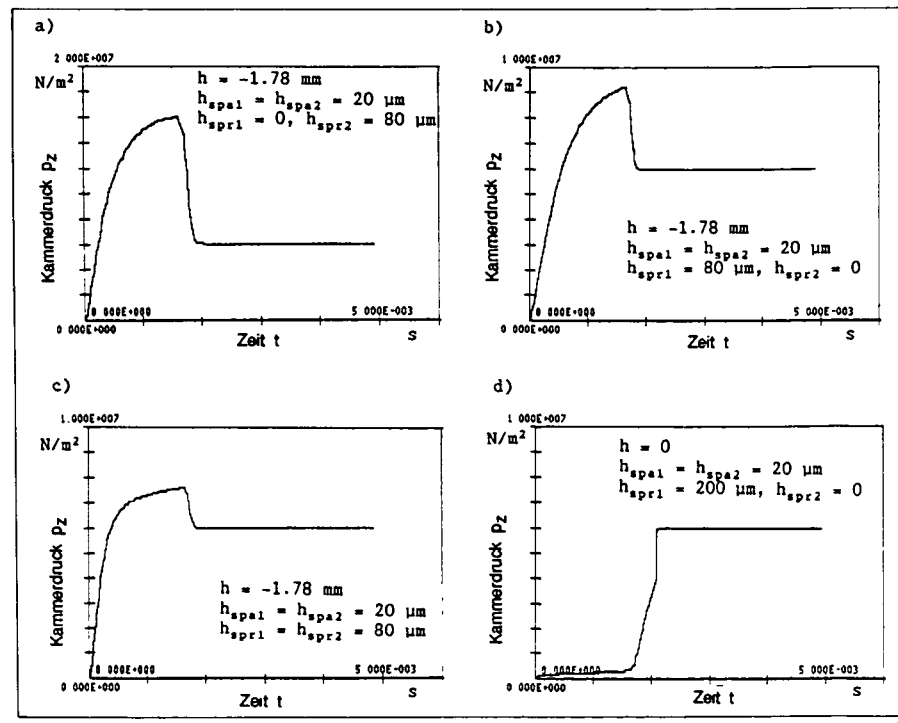
Flügelzahl	$z = 11$,
Hubvolumen	$V = 40\ \mathrm{cm}^3$,
Hubringradius	$R = 48$ mm,
Rotorradius	$r = 44{,}5$ mm,
Flügeldicke	$d_{fl} = 2$ mm,
Flügelbreite	$b_{fl} = 32$ mm,
Flügellänge	$l_{fl} = 11$ mm,
Nenndrehzahl	$n = 1500\ \mathrm{min}^{-1}$,
Nenndruck	$p = 80$ bar.

Für die Berechnung der Leckölströme, die über die Spalte in einer Pumpe erfolgen, ist die Kenntnis der Großen dieser Spalte erforderlich. Aufgrund von Messungen an der untersuchten Pumpe können die axialen Spaltweiten mit $h_{spa1} \simeq h_{spa2} \simeq 20\ \mu\mathrm{m}$ angenommen werden. Das größere Problem stellt der Leckölstrom dar, der durch den Spalt zwischen Flugelkopf und Innenflache des Hubringes erfolgt. Bisher sind über die Größe dieses Spalts in der Literatur keine Angaben bekannt. In [6] wurde angenommen, daß die Leckstrome in diesen Spalten im Umsteuerbereich infolge der Flügelbeaufschlagung zu vernachlässigen sind. Im Gegensatz dazu wird in [4] darauf hingewiesen, daß man ohne Berücksichtigung dieser Spalte keine realen Verhältnisse bei der Berechnung des Druckaufbaus bekommen kann. Dies gilt besonders für größere Höhenverstellungen, bei denen eine größere Vorkompression erfolgt. Mit Hilfe des dargestellten Rechenmodells ist es möglich, diese Probleme zunachst theoretisch zu untersuchen.

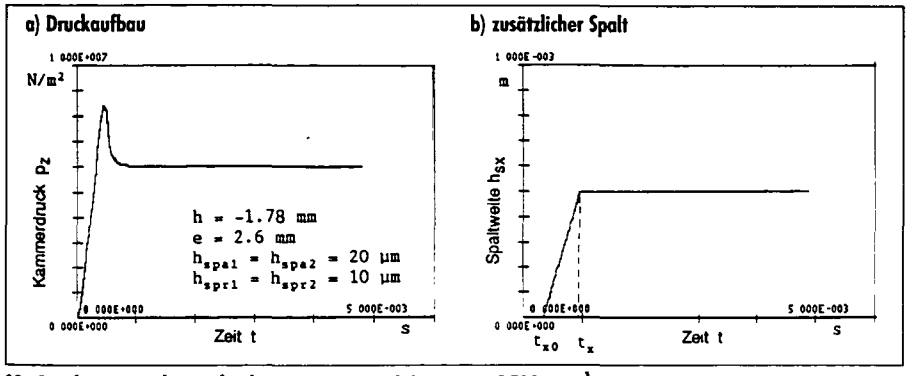
In **Bild 10** werden die errechneten Verlaufe des Druckaufbaus ohne Berücksichtigung der Leckolstrome in den Spalten der Pumpe dargestellt Aus den Berechnungen folgt, daß für die Hohenverstellungen gegen Null eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Verläufen des Druckaufbaus gefunden werden kann. Bei größeren Höhenverstellungen dagegen wird keine gute Übereinstimmung festgestellt. Die berechneten Kammerdrukke beim Druckaufbau sind vielfach größer als der Betriebsdruck und das Druckmaximum erfolgt viel spater als bei den gemessenen Verlaufen. Die Annahme eines konstanten Werts für die Radialspalte im Umsteuerbereich (vergl. **Bild 11**) bringt ebenfalls keine realen Verhältnisse beim Druckaufbau. Die Simulationsergebnisse beim Druckaufbau hängen von der Große der Radialspalte an den vorne und hinten dichtenden Flügeln ab, wobei die Auswirkung des Radialspalts am vorne dichtenden Flügel anders ist, als am hinten dichtenden Flügel (Bild 11a, b, c). Bei der Annahme, daß die Kammer durch den hineilenden Flügel nicht abgedichtet ist, was bei kleinerer Drehzahl moglich ist, kann sich der Druck in der Kammer nicht rechtzeitig aufbauen (Bild 11d). Diese Annahme wird



10: Simulationsverläufe des Druckaufbaus in einer Kammer ohne Berücksichtigung der Spalte: $n = 1500\ \mathrm{min}^{-1}$, $p_b = 6$ MPa, $e = 2{,}6$ mm



11: Simulationsverläufe des Druckaufbaus in einer Kammer unter Berücksichtigung der Spalte: $n = 1500\ \mathrm{min}^{-1}$, $p_b = 6$ MPa, $e = 2{,}6$ mm



12: Simulationsergebnisse für $h = 1{,}78$ mm, $e = 2{,}6$ mm, $n = 1500$ min^{-1}

durch die gemessenen Verläufe für kleinere Drehzahlen bestätigt. Es ist zu entnehmen, daß die Überstromfläche des Entlastungsschlitzes bei größeren Höhenverstellungen zu klein ist, um eine wirkungsvolle Entlastung für die Kammer zu gewährleisten. Wegen der größeren Leckage erfolgt das Druckmaximum viel später als bei den gemessenen Verläufen. Aus den Berechnungen folgt ferner, daß der Spalt im Rotorschlitz am vorne dichtenden Flügel zu klein ist, um die Drucküberschüsse in der Kammer zu begrenzen.

Das dargestellte Verhalten beim Druckaufbau für größere Höhenverstellungen kann durch das Flügelabheben der vorn dichtenden Flügel im Umsteuerbereich erklärt werden. Dieses Abheben wird infolge der ungleichen Druckkräfte verursacht, die radial auf die obere (Flügelkopf) und untere Flügelseite (Druckbeaufschlagung) wirken [8]. Wenn der Kammerdruck über den Förderdruck steigt, ist der Flügel überkompensiert, d. h. die Druckkräfte, die auf den Flügelkopf wirken, sind größer als die von unten wirkenden. Der Flügel erfährt eine nach innen zur Rotorachse wirkende Kraft und hebt vom Hubring ab. Erst nach diesem Abheben findet zwischen der Kammer und der Druckniere ein Druckausgleich statt.

Um diese Überlegungen nachzuprüfen, wird bei der Simulation des Modells angenommen, daß kurz nach dem Druckausgleich zwischen der Kammer und der Druckniere am vorne dichtenden Flügel ein zusätzlicher Spalt geöffnet wird, um diesen Druckausgleich weiter zu gewährleisten. Das Ergebnis aus dieser Berechnung ist in **Bild 12** dargestellt. Daraus folgt, daß diese Annahme bei größeren Höhenverstellungen die realen Verhältnisse beim Druckaufbau wiedergibt, d. h. es muß ein zusätzlicher Spalt infolge des Drucküberschusses in der Kammer entstehen. Diese Annahme wurde durch bereits durchgeführte Messungen der Flügelbewegungen bestätigt.

Zusammenfassung

Es wurden die Druckverläufe in der Kammer beim Druckauf- und abbau, in den Umsteuerbereichen, sowie die Druckpulsation am Ausgang einer Pumpe für verschiedene Einstell- und Betriebsparameter der Pumpe untersucht. Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß neben den Betriebsbedingungen, die Höhenverstellung einen entscheidenden Einfluß auf die Druckwechselbedingungen in der Pumpe hat. Um die bestehenden Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflußgrößen zu untersuchen, wurde ein Simulationsmodell für die Berechnung des Druckaufbaus in einer Kammer im Umsteuerbereich entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells wurde der Einfluß der Leckolströme in den Radial- und Axialspalten benachbarter Flügel, der Strömungen durch den Steuerschlitz sowie der Höhenverstellung auf die Druckaufbauverläufe in einer Kammer ermittelt. Der Vergleich zwischen den Berechnungen und den Meßergebnissen hat gezeigt, daß schon für relativ kleine Höhenverstellungen das Flügelverhalten einen wesentlichen Einfluß auf die Umsteuervorgänge hat.

Literaturhinweise

[1] Lang, C. M., Rothmund, J.: Impedanzen in hydrostatischen Systemen. O+P »Ölhydraulik und Pneumatik« 32 (1988), Nr. 12, S. 822–828

[2] Hensel, U., Fiebig, W., Matten, N.: Betrachtungen zum dynamischen Verhalten druckgeregelter Flügelzellenpumpen. O+P »Ölhydraulik und Pneumatik« 34 (1990), Nr. 6, S. 429–432

[3] Backé, W.: Grundlagen der Ölhydraulik. Umdruck zur Vorlesung an der RWTH Aachen, 6. Auflage, 1986

[4] Widmann, R.: Geräuschminderung bei druckgeregelten Flügelzellenpumpen. Diss., Universität Stuttgart, 1985

[5] Haarhaus, M.: Geräuschentstehung und Geräuschminderung bei Axialkolbenpumpen in Schrägscheibenbauweise. Diss., RWTH Aachen, 1985

[6] Widmann, R.: Hydraulische Kenngrößen kleiner Drosselquerschnitte. O+P »Ölhydraulik und Pneumatik« 20 (1985), Nr. 3, S. 208–217

[7] Romer, H. J.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Geräuschverhalten von Flügelzellenpumpen. Diss., TH Darmstadt, 1982

[8] Matten, N., Lang, C. M.: Flügelabheben bei einpoligen Flügelzellenpumpen. O+P »Ölhydraulik und Pneumatik« 33 (1989), Nr. 5, S. 427–434

Bildnachweis: Verfasser