

# Rechnergestützte Liefergradoptimierung von Schraubenverdichterläufern

Prof. Dr.-Ing. **W. Fister** und Dipl.-Ing. **P. Buthmann**, Bochum

## 1. Einleitung

Ständig steigende Energiekosten, sowie der Wunsch den Bauaufwand zu verkleinern, haben dazu geführt, daß in den letzten Jahren eine Reihe von neuen Profilformen entwickelt worden sind, die bessere Wirkungsgrade und größere Zellvolumina haben.

Zur Erzeugung der Kallsollgeometrie der Profile werden abschnittsweise analytische Funktionen benutzt, mit denen in zuvor festzulegendem Abstand diskrete Punkte mit ihren x- und y-Koordinaten, Steigungen und Normalen berechnet werden.

Dabei werden die funktionsrelevanten Spiele zwischen den Läufern bereits bei der Aufstellung der analytischen Funktionen berücksichtigt.

Das Ziel, den Liefergrad und polytropen Wirkungsgrad von Schraubenverdichtern zu verbessern, soll durch geänderte Profilformen erreicht werden.

## 2. Kinematisches Zusammenspiel von Läuferpaar und Gehäuse

Mittels der berechneten Sollgeometrie ist es möglich, das kinematische Zusammenspiel von Läuferpaar und Gehäuse während der schrittweisen Drehung der Läufer als Funktion des Drehwinkels  $\varphi_{HL}$  bzw.  $\varphi_{NL}$  und der axialen z-Koordinate zu untersuchen (Bild 1).

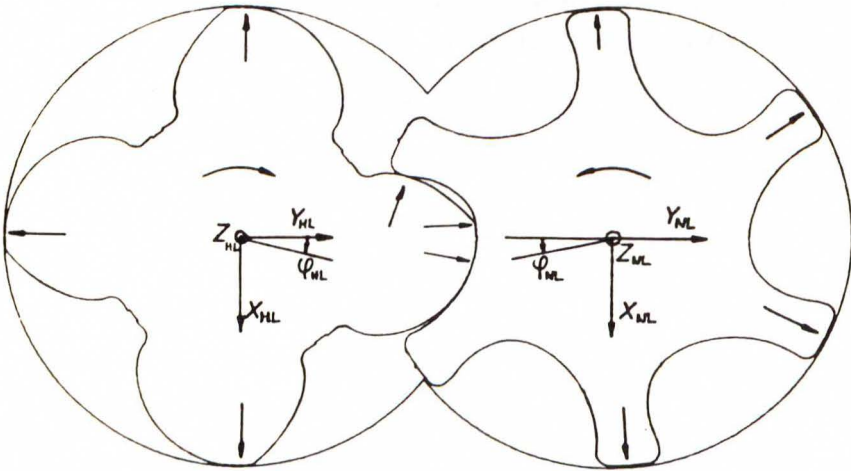


Bild 1. Spiele und Drehwinkel des asymmetrischen SRM-Profiles

Wird ein achsnormaler Schnitt durch den Kämbereich des Verdichters gelegt, so sind enge Stellen zwischen den Bauteilen zu erkennen, wie im Bild 1 am Beispiel des asymmetrischen SRM Profils gezeigt. Die minimale Distanz zwischen den betrachteten Elementen wird als Spiel bezeichnet. Verbindet man die Fußpunkte der Spiele auf den jeweiligen benachbarten beiden Bauteilen, so ergeben sich zwei Dichtlinien, die eine als Spalt bezeichnete Fläche aufspannen. Die Spalte werden je nach ihrer Begrenzung in Gehäusespalte, Profileingriffspalte, Blaslöcher und Stirnspalte unterteilt.

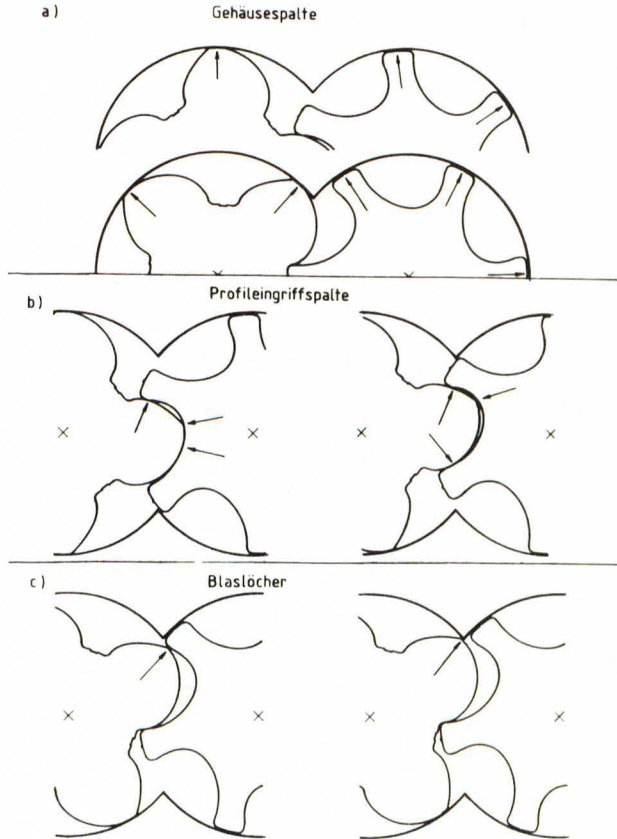


Bild 2. Gehäusespalte, Profileingriffspalte und Blaslöcher des asymmetrischen SRM-Profiles

Der Gehäusespalt bildet sich zwischen den Rotoren und dem Gehäuse (Bild 2a).

Der Profileingriffspalt entsteht zwischen den Rotoren (Bild 2b).

Das Blasloch wird im Bereich der Gehäusestegkante entweder vom Haupt- und Nebenläufer oder vom Hauptläufer und Gehäuse erzeugt (Bild 2c).

Der Stirnspalt ergibt sich als Abstand der Rotoren zur saug- bzw. druckseitigen Gehäuseplatte.

Der räumliche Verlauf der Dichtlinien für ein asymmetrisches SRM-Profil ist in einer Seitenansicht auf den Hauptläufer und einer Ansicht auf die Druckoberseite in Bild 3 dargestellt.

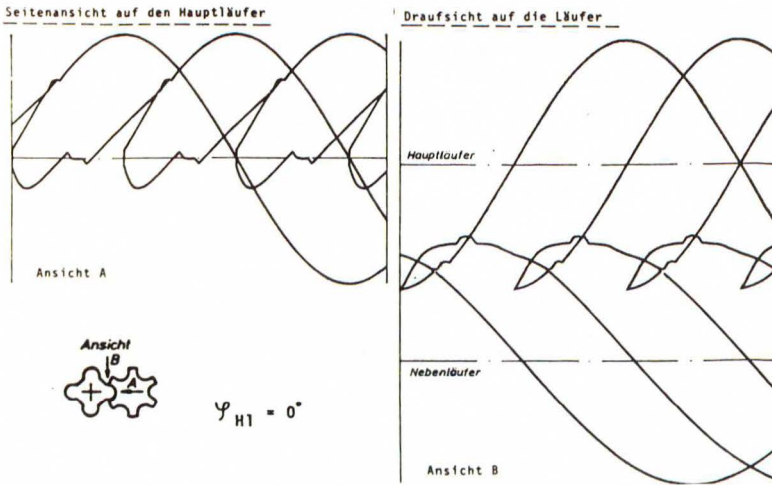


Bild 3. Dichtlinien des asymmetrischen SRM-Profiles

Die zuvor betrachteten Spiele grenzen zusammen mit den Gehäuse- und Läuferkonturen in den Stirnschnitten als Lücken benannte Flächen ein, die je nach Winkelstellung ihre Größe und Lage ändern, wie Bild 4 anhand des asymmetrischen SRM-Profiles zeigt.

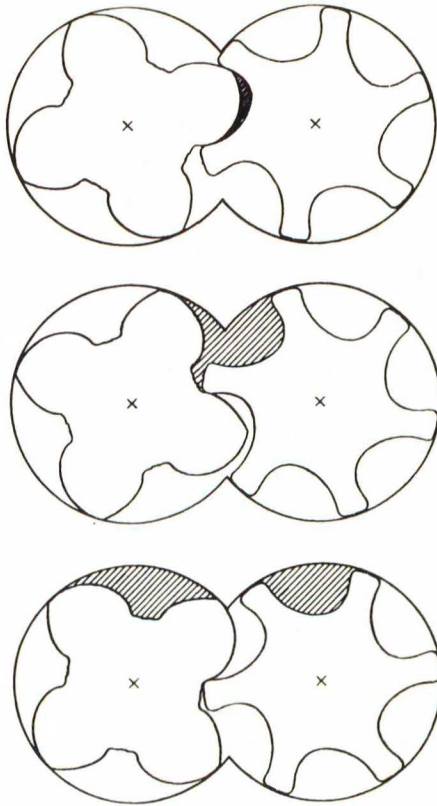


Bild 4. Lückenflächen des asymmetrischen SRM-Profiles

Die einzelnen Lücken bauen in axialer Richtung Zellen auf. Das Volumen einer Zelle hängt dabei von der Winkelstellung der Läufer ab, welche die Lückengröße in den axialen Schnitten und somit das Zellvolumen festlegt.

Die Zellen entstehen auf der Druckoberseite des Läuferpaares, nachdem die axiale Öffnung der Zahnluken durch die saugseitige Stirnfläche verschlossen ist, und das

Volumen somit von Maschinenbauteilen begrenzt ist. Die Zelle verschwindet, wenn die entsprechenden Bauteile eine Öffnung zum Druckraum herstellen.

Das Volumen bei der Zellentstehung wird als maximales Zellvolumen  $V_{\max}$  bezeichnet, das mit der Zähnezahl und der Drehzahl des Hauptläufers den theoretischen Volumenstrom  $\dot{V}_{th}$  des Verdichters ergibt ( $\dot{V}_{th} = V_{\max} \cdot Z_{HL} \cdot N_{HL}$ ).

### 3. Thermodynamik in der Schraubenmaschine

Um die thermodynamischen Funktionsabläufe zu erfassen, wird die Zustandsänderung des Fluids in der verdichtenden Zelle in einzelnen Winkelschrittweiten verfolgt, die über die Hauptläuferdrehzahl Zeitintervallen entsprechen.

Unter Annahme kurzzeitig stationärer Zustände läßt sich für jedes Zeitintervall eine Massen- und Energiebilanz für die betrachtete Zelle aufstellen. Die Massenbilanz erfaßt die über die Dichtspalte fließenden Leckmengen, sowie die durch die Einlaß- bzw. Auslaßöffnung fließende Fördermenge. Damit wird der nicht konstante Masseninhalt der Zelle während des Verdichtungsvorgangs berücksichtigt.

Entsprechend den vier Spaltarten der Läuferkinematik werden auch vier Leckstromarten für die verdichtende Zelle berücksichtigt (Bild 5):

- Der druckseitige Stirnspalt entläßt die Leckmenge  $\dot{m}_{LS}$  fast ausschließlich in den Ansaugeraum des Verdichters.
- Über den Profileingriffsspalt fließen die Leckmengen  $\dot{m}_{LP}$  in den Ansaugeraum.
- Die Gehäusespalte lassen den Rückfluß  $\dot{m}_{LG}$  von Zelle zu Zelle bis in den Ansaugeraum zu.
- Das Blasloch stellt eine direkte Verbindung zweier benachbarter Zellen her und ist so für die Leckmenge  $\dot{m}_{LB}$  verantwortlich.

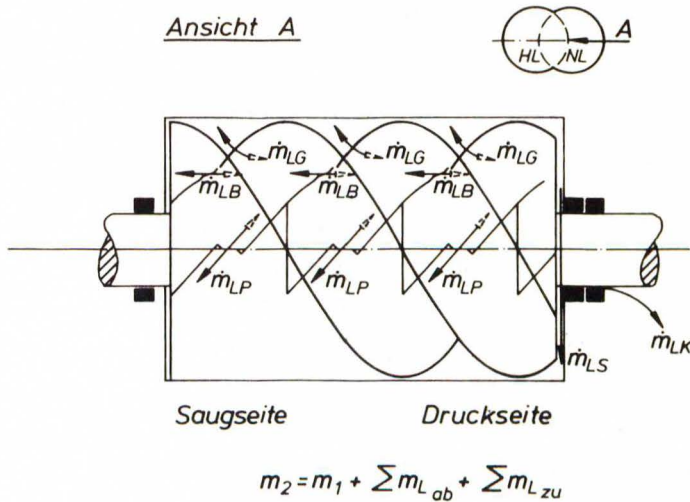


Bild 5. Leckströme

Die Vermischung dieser Leckströme mit dem jeweiligen Zellinhalt führt u.a. dort zu einer Temperaturerhöhung und verschlechtert damit die Qualität der Verdichtung.

Bei der Drehung der Läufer wird das Zellvolumen verändert. Die dabei am Zellinhalt verrichtete Arbeit berücksichtigt die Volumenänderungsarbeit und die durch die Leckmengen zu- bzw. abgeführten Energien. Die Energieänderung durch die Fluidreibung und den Wärmeaustausch mit den Zellwänden wird in der vorliegenden Programmversion zur Zeit noch nicht berücksichtigt.

Mit dem beschriebenen Programm können somit für die unverformte Kaltsollgeometrie das kinematische Zusammenspiel der Läufer und des Gehäuses, sowie die thermodynamischen Funktionsabläufe berechnet werden.

4. Kriterien zur Profilloptimierung

Um mehr über den Spalteinfluß zu erfahren, und damit Hinweise auf eine Verbesserung der Profilformen zu erhalten, sind mit dem Programm die Gehäusespalte, das Blasloch und der Profileingriffspalt begrenzt variiert worden, wobei jedoch wegen der geometrischen Verknüpfung der drei Spalte in Kauf zu nehmen ist, daß neben dem untersuchten Spalt auch die beiden übrigen geringfügige Änderungen erfahren.

Am Beispiel des symmetrischen SRM-Profiles ist nach separater Änderung der Spaltfläche um  $\pm 10\%$  die jeweilige Kennlinienabweichung bei einer konstanten Vergleichsdrehzahl, jedoch unterschiedlichen Druckverhältnissen errechnet worden.

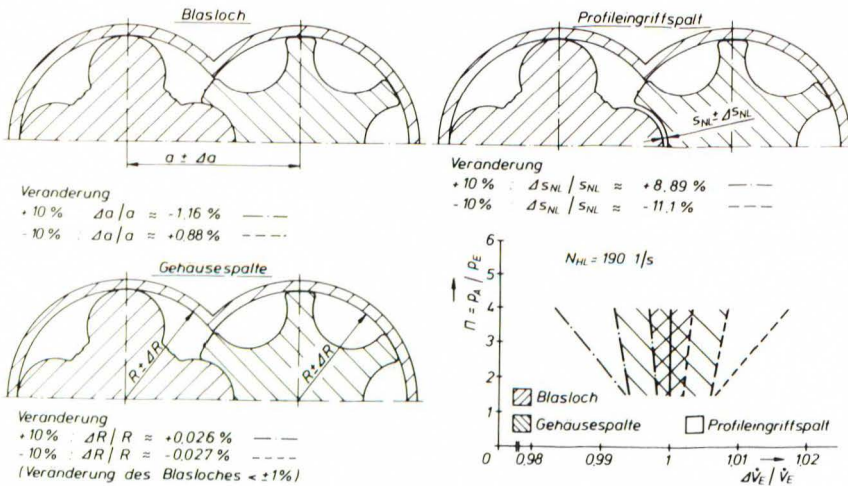


Bild 6. Relative Volumenstromabweichungen bei Spaltänderungen (symmetrisches Profil)

Nach Bild 6 ist zunächst das Blasloch durch eine Veränderung des Achsabstandes  $a + \Delta a$  für das Läuferprofil und den Gehäuseaufbau variiert worden. Die damit verbundene gleichzeitige Änderung der anderen Spalte ist sehr gering.

Danach sind durch veränderte Radien  $R + \Delta R$  der Gehäusebohrungen die Gehäusespalte beeinflusst worden. Dabei hat sich das Blasloch um weniger als 1% verändert.



Schließlich ist der Profileingriffspalt  $s + \Delta s$  im wesentlichen durch Konturkorrekturen des Nebenläufers variiert worden.

Die auf den Volumenstrom  $\dot{V}_E$  bezogene Abweichung  $\Delta \dot{V}_E$  infolge der Spaltveränderungen weist bei den untersuchten Druckverhältnissen auf den überragenden Einfluß des Profileingriffspaltes hin.

Das Ziel, den Liefergrad und polytropen Wirkungsgrad von Schraubenverdichtern zu verbessern, soll daher durch geänderte Profilformen erreicht werden, die den Profileingriffspalt verkürzen und das Blasloch verkleinern. Hinweise auf Änderungen der Profilgeometrie ergeben sich dabei aus dem Dichtlinienverlauf des asymmetrischen SRM-Profiles, der in Bild 7 in drei unterschiedlichen Ansichten dargestellt ist.

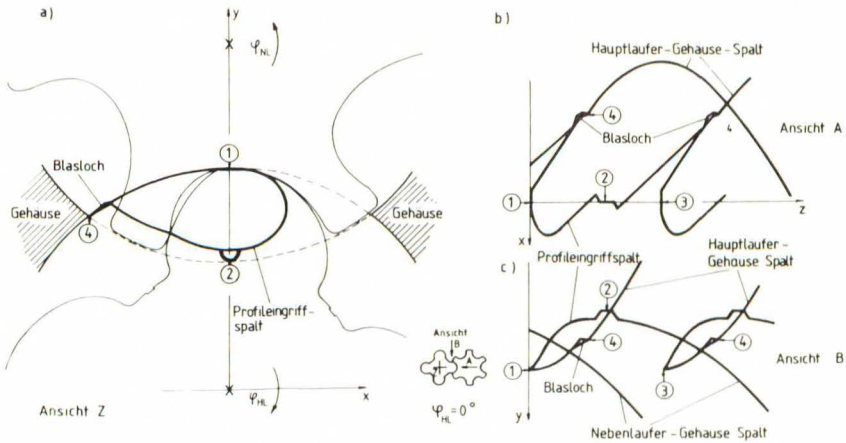


Bild 7. Dichtlinienverlauf des asymmetrischen SRM-Profiles in drei Ansichten (x-y; x-z; y-z)

Durch die Läuferaußendurchmesser und den Achsabstand sind die Punkte 1, 2 und 4 in Bild 7a, darüberhinaus durch den Umschlingungswinkel, die Läuferlänge und Zähnezahl des Hauptläufers die Punkte 1 und 3 in den Bildern 7b und 7c festgelegt. Die Dichtlinien beliebiger Profilformen verlaufen bei den genannten, gleichen Geometrieparametern stets durch diese Punkte.

Eine Verkürzung des Dichtlinienverlaufs im Bereich  $x > 0$ , „Bild 7a, wird durch stetige Annäherung an die Verbindungsgerade der Läufermitten erreicht. Der theoretische Grenzverlauf ist dabei eine Gerade als Verbindung der Punkte 1 und 2.

Durch Vergrößerung des Krümmungsradius der Nebenläuferkontur im Bereich 1, Bild 8a, nähert sich die Dichtlinie, die von diesem Profilabschnitt gebildet wird, der z-Achse (Bild 8b) und wird damit verkürzt. Bei einem stetigen Verlauf der Profilkontur und mit der Bedingung, daß die Nebenläuferzahnstärke  $\sigma$  nicht zu Null wird, sind der Vergrößerung des Krümmungsradius jedoch Grenzen gesetzt.

Die Änderung des Nebenläuferkopfkreises beeinflusst den Dichtlinienverlauf im Bereich 2. Eine Verkleinerung der Nebenläuferzahnstärke  $\sigma$  und Abrundung des Nebenläuferkopf- bzw. Hauptläuferfußkreises führt dazu, daß sich die Dichtlinie im gesamten Bereich 2 der z-Achse (Bild 8b) nähert und damit kürzer wird.

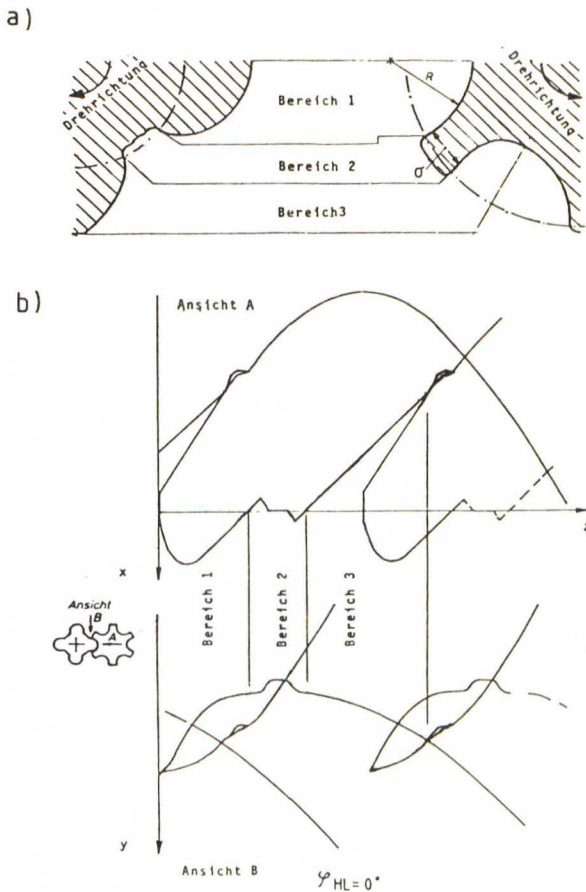


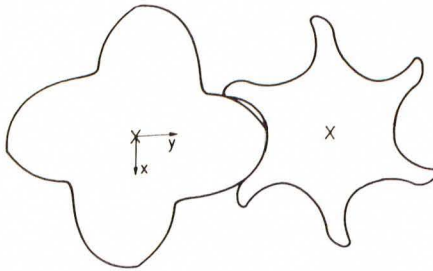
Bild 8. Zusammenhang zwischen Profilkontur und Dichtlinienverlauf

Die Haupt- und Nebenläuferprofilformen im Bereich 3, Bild 8a, beeinflussen sowohl den Profileingriffspalt, als auch das Blasloch. Während der von der Haupt- und Nebenläufer-epizykloiden im Bereich 3 gebildete Dichtlinienverlauf des asymmetrischen SRM-Profiles beibehalten wird, können die Parameter dieser Epizykloiden und die sich daran anschließende Profilkontur so gewählt werden, daß der Kontakt zwischen dem Haupt- und Nebenläufer möglichst lange erhalten bleibt und so das Blasloch in seiner axialen Erstreckung verkürzt wird.

Mit diesen Kriterien ergibt sich die in Bild 9a dargestellte Haupt- und Nebenläuferprofilform.

Profil SLF446

a)



b)

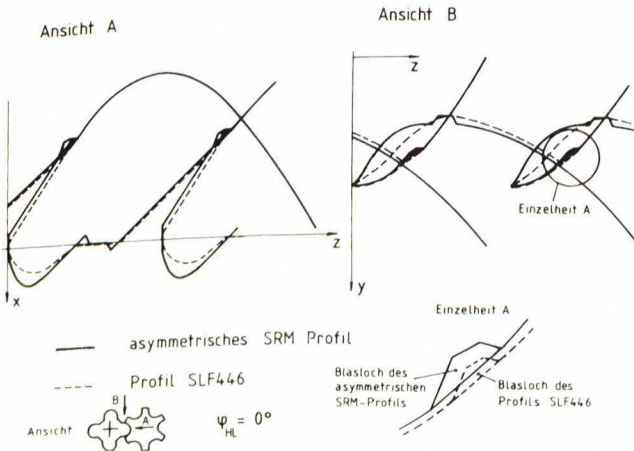


Bild 9. Profil SLF446; Dichtlinien des Profils SLF446 und des asymmetrischen SRM-Profil

Einen Vergleich der Dichtlinienverläufe des asymmetrischen SRM-Profil und des neuentwickelten Profils mit der Bezeichnung SLF446 zeigt Bild 9b. Für das neuentwickelte Profil wird dabei eine Verkürzung der Dichtlinien im Bereich des Profileingriffs und eine Verkleinerung der Blaslochfläche erreicht.

Auf Grund der geänderten Geometrie im Bereich des Kopfkreises werden die Außendurchmesser der Läufer entgegen dem asymmetrischen Profil nicht konstant gehalten. Bei ansonsten ungeänderten Geometrie- und Betriebsdaten ergibt sich für das neuentwickelte Profil zunächst eine Verbesserung des Liefergrades und polytropen Wirkungsgrades von ca. 1,6% (Bild 10).

	Asymmetrisches SRM Profil	Profil SLF446	Dimension
$\dot{V}_{th}$	0.152	0.152	$m^3/s$
$\Pi$	3.0	3.0	-
$N_{HL}$	190.0	190.0	$s^{-1}$
$D_{HL}$	100.0	102.0	mm
$D_{NL}$	100.0	90.0	mm
$Z_{HL}$	4	4	-
$Z_{NL}$	6	6	-
$L$	165.0	168.3	mm
$\varphi_U$	300.0	300.0	$^\circ$
$\lambda$	0.858	0.875	-
$\eta_{pol}$	0.856	0.872	-

Bild 10. Vergleich von geometrischen Parametern und Kennzahlen des Profils SLF446 und des asymmetrischen SRM-Profiles

### 5. Funktionssimulation mit variierten Geometrieparametern

Das mit den geännten Kriterien optimierte Läuferprofil liegt in Form von analytischen Gleichungen vor, deren Parameter jedoch noch variiert werden können. Hält man die Zähnezahlen, den Umschlingungswinkel und die bezogene Läuferlänge konstant, so ergeben sich bei Änderung des Durchmesserverhältnisses und des Achsabstandes unter der Voraussetzung, daß auch der theoretische Volumenstrom, das Druckverhältnis und die Hauptläuferdrehzahl konstant bleiben, bereits Verschlechterungen von bis zu 20% im polytropen Wirkungsgrad, bzw. Liefergrad der Maschine. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß das Durchmesserverhältnis nicht beliebig geändert werden kann, da einerseits die analytischen Funktionen der Profilkonturen nur in bestimmten Grenzen definiert sind, andererseits der geforderte Volumenstrom nicht für jedes Durchmesserverhältnis realisiert werden kann. Den Bereich für das neuentwickelte Profil mit 4 Hauptläufer- und 6 Nebenläuferzähnen, innerhalb dessen ein theoretischer Volumenstrom von  $0,152 \text{ m}^3/\text{s}$  realisiert wird, zeigt Bild 11, in dem die Abszisse dem Durchmesserverhältnis und die Ordinate der Kennzahl  $C_L$  entspricht, die den auf das Fördervolumen bezogenen Bauaufwand darstellt.

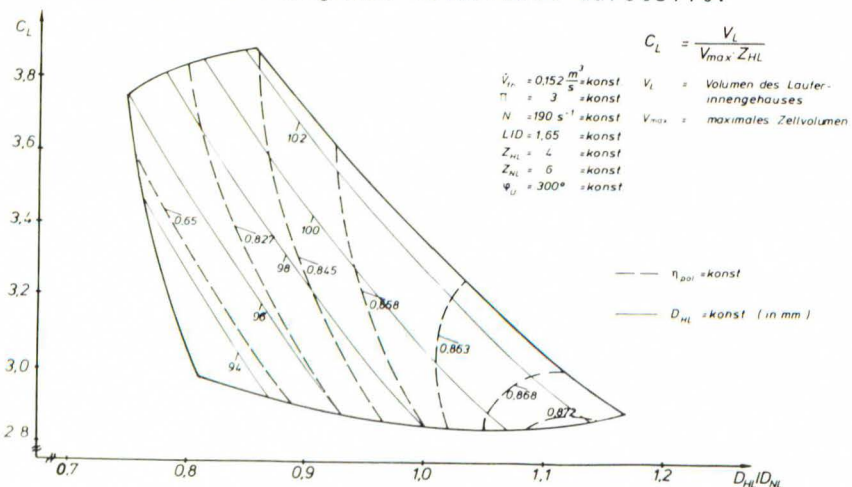


Bild 11. Kennfeld des Profils SLF446 ( $\varphi_U = 300^\circ$ )

Die parabelförmigen, gestrichelten Kurven sind Linien konstanten, polytropen Wirkungsgrades, die dünn gezeichneten Kurven sind Linien konstanten Hauptläuferaußendurchmessers. Das Läuferpaar mit dem besten polytropen Wirkungsgrad, der bei 87,2% liegt, hat dabei gleichzeitig die kleinste Kennzahl  $C_L$ .

Wird für die betrachteten Läuferpaare das Zähnezahlverhältnis weiterhin konstant gehalten, der Umschlingungswinkel der Läufer jedoch verkleinert, vergrößert sich der Bereich, innerhalb dessen ein theoretischer Volumenstrom von  $0,152 \text{ m}^3/\text{s}$  realisiert werden kann. In Bild 12 sind für ein Zähnzahlverhältnis von  $Z_{HL}/Z_{NL} = 4/6$  die polytropen Wirkungsgrade und die Linien konstanten Hauptläuferaußendurchmessers als Funktion von  $D_{HL}/D_{NL}$  und  $C_L$  für einen Hauptläuferumschlingungswinkel von  $\varphi_U = 225^\circ$  aufgetragen. Ein Vergleich der polytropen Wirkungsgrade bei den Hauptläuferumschlingungswinkeln  $300^\circ$  und  $225^\circ$  zeigt eine Wirkungsgradverbesserung von ca. 1,5% bei dem kleineren Umschlingungswinkel.

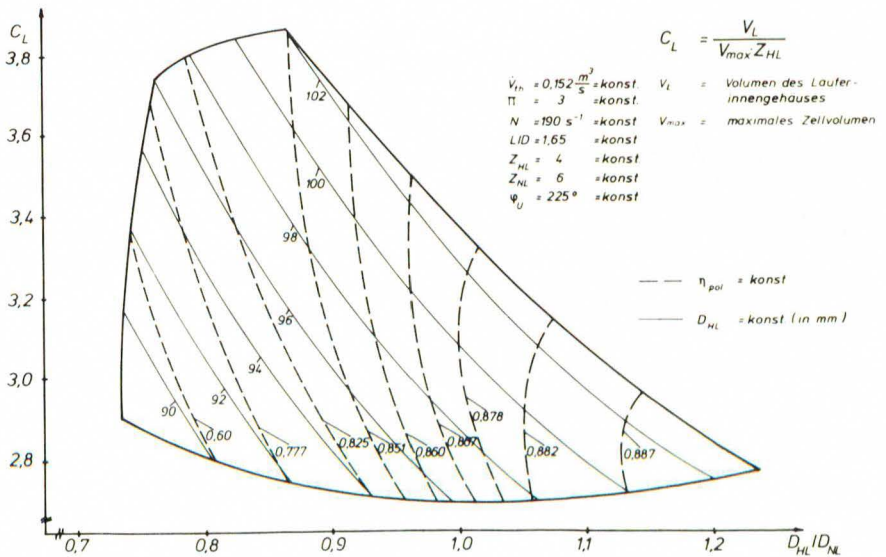


Bild 12. Kennfeld des Profils SLF446 ( $\varphi_U = 225^\circ$ )

Bei einer weiteren Reduzierung des Umschlingungswinkels ist jedoch ein Abfall der polytropen Wirkungsgrade zu verzeichnen, weil die Leckspaltflächen insgesamt wieder zunehmen.

Da sich aus der bisher durchgeführten theoretischen Betrachtung der Optimalwert des Hauptläuferumschlingungswinkels bei  $\varphi_U = 225^\circ$  ergeben hat, sollen auch die nachfolgenden Parametervariationen mit diesem Umschlingungswinkel durchgeführt werden.

Um den Einfluß der Zähnezahlen auf den Bauaufwand und den Liefergrad zu untersuchen, werden für Läuferpaare mit 4 Hauptläuferzähnen und 5,6 bzw. 7 Nebenläuferzähnen die Bereiche bestimmt, innerhalb derer ein theoretischer Volumenstrom von  $0,152 \text{ m}^3/\text{s}$  realisiert werden kann.

Bild 13 ist zu entnehmen, daß sich mit steigender Nebenläuferzähnezahl die Kennzahl  $C_L$ , und damit das Volumen des Läufergehäuses vergrößert.

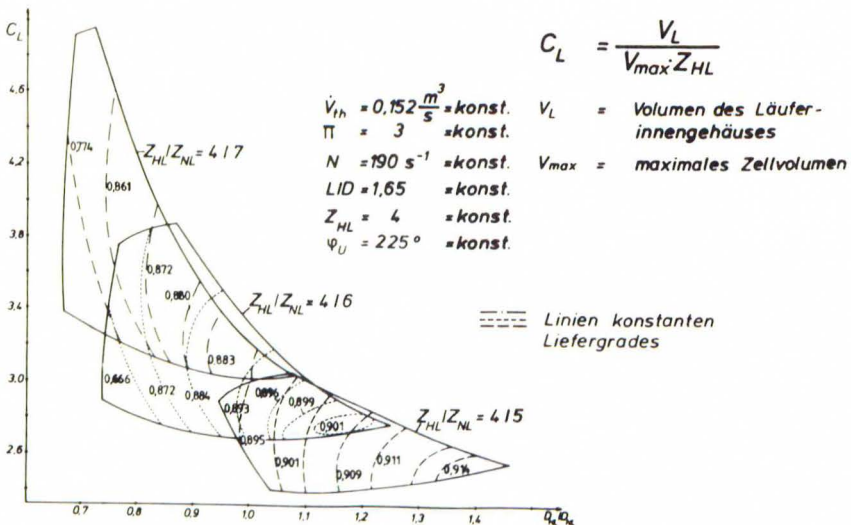


Bild 13. Kennfelder des Profils SLF446 bei unterschiedlichen Zähnezahlen



Entsprechend der Tendenz, die bereits bei der Untersuchung des Zähnezahlnverhältnisses  $Z_{HL}/Z_{NL} = 4/6$  festgestellt worden ist, steigt mit zunehmendem Durchmesser Verhältnis  $D_{HL}/D_{NL}$  bei allen drei Zähnezahlnverhältnissen der polytrope Wirkungsgrad bzw. Liefergrad an. Unter den genannten Bedingungen ergeben sich die besten Wirkungsgrade bei den Läufern mit dem kleinsten Volumen des Läufergehäuses. Das gleiche gilt auch für die Zähnezahlnvariationen mit 3 und 5 Hauptläuferzähnen.

Die zwei besten Läuferpaare, die sich aus der beschriebenen Untersuchung ergeben, sind mit ihren geometrischen Größen in Bild 14 dargestellt.

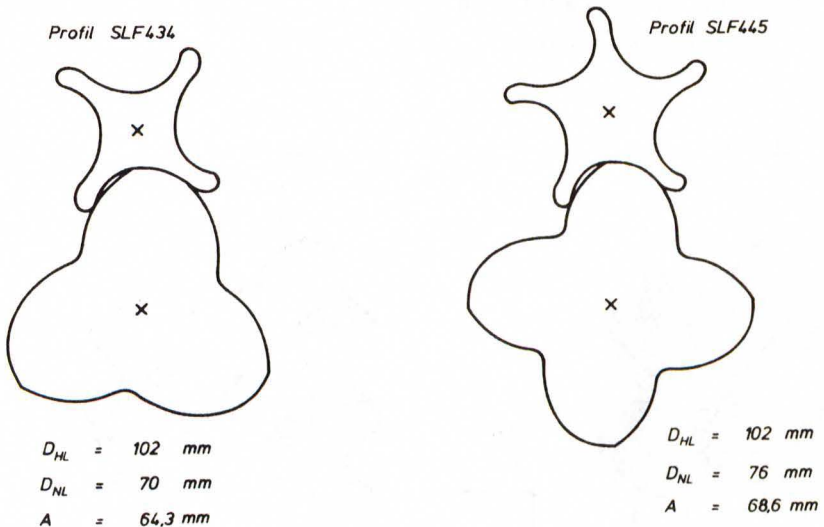


Bild 14. Stirnschnitte der Profile SLF434 und SLF445

Dabei erreicht das Läuferpaar SLF434 bei einem theoretischen Volumenstrom von  $0,152 \text{ m}^3/\text{s}$  einen polytropen Wirkungsgrad von  $90,66\%$  und einen Liefergrad von  $91,57\%$  bei einem Volumen des Läufergehäuses von  $1885 \text{ cm}^3$ , das Läuferpaar SLF445 bei gleichem Volumenstrom einen polytropen Wirkungsgrad von  $90,15\%$  und einen Liefergrad von  $91,41\%$  bei einem Volumen des Läufergehäuses von  $2010 \text{ cm}^3$ .

## 6. Spielüberprüfung im Betriebszustand

Nachdem für die vorgegebenen analytischen Profilkfunktionen die geometrischen Parameter variiert worden sind, soll abschließend untersucht werden, ob diese Profile bzw. Läufer den Belastungen im Betrieb standhalten. Diese Untersuchung gliedert sich in zwei Abschnitte. Zuerst werden die Verformungen der Läufer und des Gehäuses aus der Druck-, Temperatur- und ggf. Fliehkraftbelastung mit der "Finiten Element-Methode" berechnet. Im Anschluß daran werden die Spiele untersucht.

Bild 15 zeigt die beiden Läuferpaare, die bei der Variation der geometrischen Parameter die besten Liefergrade aufweisen, in der Elementstruktur.

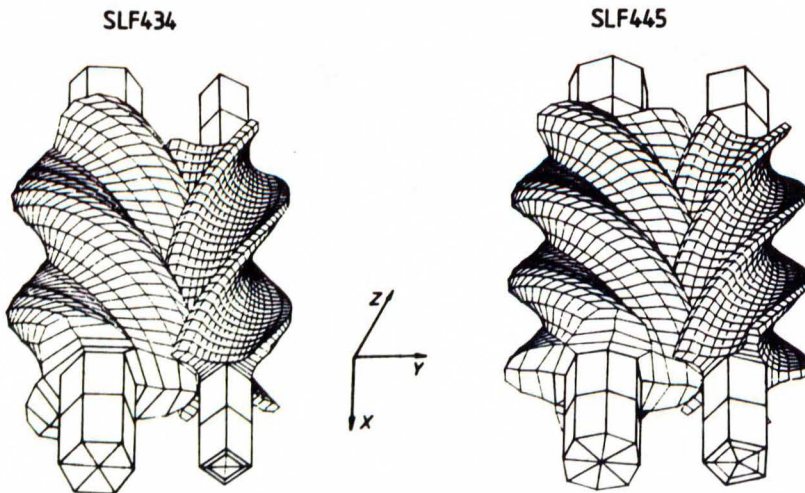


Bild 15. Finite Element-Struktur der Läuferpaare SLF434 und SLF445

Für das Profil SLF434 ist die Nebenläuferdurchbiegung infolge des kleineren Grundkreises relativ groß, so daß sich bei der Hauptläuferwinkelstellung  $\varphi_{HL} = 0^\circ$  eine Spielverkleinerung zwischen dem Nebenläuferzahn 3 und dem Gehäuse von  $63 \mu\text{m}$  bei der Kaltgeometrie auf ca.  $15 \mu\text{m}$  bei der verformten Geometrie ergibt (Bild 16).

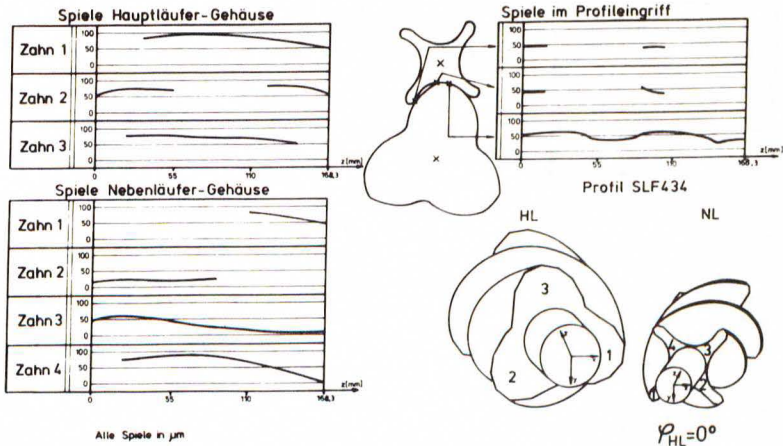


Bild 16. Spiele im Betriebszustand (Profil SLF434), Fördermedium: Luft;  
 $p_E = 1 \text{ bar}$ ;  $p_A = 3 \text{ bar}$ ;  $T_E = 293 \text{ K}$ ;  $N = 190 \text{ s}^{-1}$ ;  
 $\dot{V}_{th} = 0,152 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $T_{01} = 343 \text{ K}$ ;  $\alpha_{Luft} = 50-100 \text{ J/m}^2\text{sK}$   
 $\alpha_{01} = 200 \text{ J/m}^2\text{sK}$ ;  $\lambda_{c35} = 50 \text{ J/msK}$

Das minimale Spiel im Profileingriff beträgt für dieses Läuferpaar bei den gewählten Bedingungen  $23 \mu\text{m}$ .

Die Spiele zwischen dem Hauptläufer und dem Gehäuse sind auch im verformten Zustand für dieses Läuferpaar ausreichend groß.

Die extreme Spielverkleinerung zwischen dem Nebenläufer und dem Gehäuse auf der Druckunterseite kann durch eine Vergrößerung der Nebenläuferspiele beseitigt werden. Diese Spielvergrößerung führt dazu, daß der Liefergrad und polytrophe Wirkungsgrad unter den des Profils mit 4 Hauptläufer- und 5 Nebenläuferzähnen abfällt.

Für dieses zweite Läuferpaar SLF445 sind die Spiele auf Grund der größeren Profilgrundkreise sowohl zwischen dem Nebenläufer und dem Gehäuse als auch zwischen dem Hauptläufer und dem Gehäuse ausreichend groß (Bild 17).

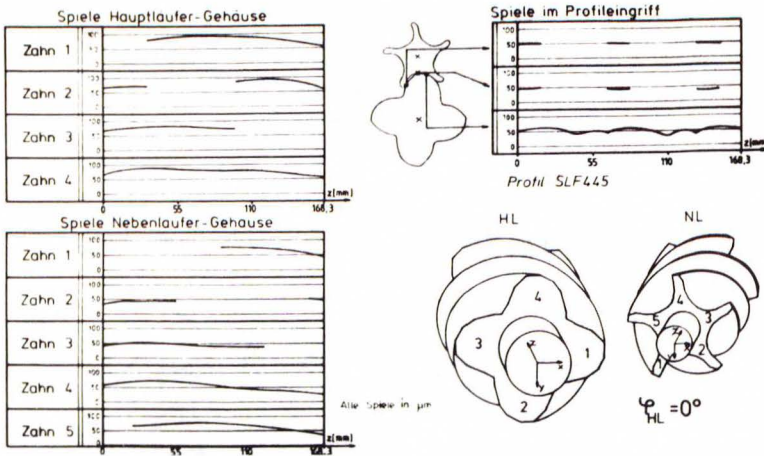


Bild 17. Spiele im Betriebszustand (Profil SLF445); Fördermedium: Luft;

$$p_E = 1 \text{ bar}; p_A = 3 \text{ bar}; T_E = 293 \text{ K}; N = 190 \text{ s}^{-1}; \\ \dot{V}_{th} = 0,152 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (sonstige Bedingungen gemäß Bild 16).}$$

Die minimalen Spiele zwischen dem Hauptläufer und dem Gehäuse betragen dabei ca.  $55 \mu\text{m}$ , die minimalen Spiele zwischen dem Nebenläufer und dem Gehäuse ca.  $30 \mu\text{m}$ .

Die Spiele im Profileingriff verhalten sich ähnlich wie die des beschriebenen Läuferpaares SLF434. Die minimalen Spiele erreichen hier ca.  $33 \mu\text{m}$ . Die guten Liefergrade und die ausreichende Steifigkeit der Läufer und des Gehäuses, die auch für eine Anzahl anderer Winkelstellungen überprüft worden ist, und für die sich keine nennenswerten Änderungen ergeben haben, lassen daher dieses Läuferpaar SLF445 als das geeignetste aus der großen Zahl der möglichen Variationen erscheinen.

Im Vergleich zum asymmetrischen SRM-Profil ergeben sich für das neuentwickelte Läuferpaar SLF445 die Liefergrade, polytropen Wirkungsgrade und wichtigsten geometrischen Größen entsprechend Bild 18.

	Asymmetrisches Profil	Profil SLF445	Dimension
$\dot{V}_{th}$	0.152	0.152	$m^3/s$
$\Pi$	3.0	3.0	-
$n_{HL}$	190.0	190.0	$s^{-1}$
$D_{HL}$	100.0	102.0	mm
$D_{NL}$	100.0	76.0	mm
$Z_{HL}$	4	4	-
$Z_{NL}$	6	5	-
$L$	165.0	168.3	mm
$\varphi_U$	300.0	225.0	°
$V_L$	2448.5	2010.8	$cm^3$
$c_L$	3.06	2.51	-
$\lambda$	0.858	0.914	-
$\eta_{pol}$	0.856	0.902	-

Bild 18. Vergleich von geometrischen Parametern und Kennzahlen des Profils SLF445 und des asymmetrischen SRM-Profiles

Mit diesem neuentwickelten Läuferpaar wird dabei eine Liefergradverbesserung von 5,6% und eine Verbesserung des polytropen Wirkungsgrades von 4,6% bei gleichem theoretischen Volumenstrom, Druckverhältnis und gleicher Hauptläuferdrehzahl erreicht, wobei das Volumen des Läufergehäuses um  $438 \text{ cm}^3$  kleiner wird.

## 7. Zusammenfassung

Durch eine Reihe von Forderungen an die Dichtlinienverläufe sind neue Profilformen für Schraubenverdichter entwickelt worden. Die Bestimmung der optimalen geometrischen Parameter bezüglich guter Liefergrade und polytroper Wirkungsgrade sowie eines möglichst kleinen Bauaufwandes, kann jedoch in Grenzbereiche hinsichtlich der Zahnstärken und Durchbiegungen führen.

Um bereits bei der Festlegung der Geometrie das Verhalten bezüglich der thermisch und mechanisch bedingten Verformungen möglichst exakt erfassen zu können, sind Rechenverfahren entwickelt worden, mit denen die betriebsbedingten Verformungen der Läufer bereits bei der Auslegung ermittelt werden können. Bei einer ausschließlich auf der Kaltsollgeometrie beruhenden Auswahl ist die Funktionstüchtigkeit der Bauteile im Betriebszustand nicht sichergestellt. Die Vorausberechnung der betriebsbedingten Verformungen, wie sie mit dem beschriebenen Rechenverfahren, dem die "Finite Element-Methode" zugrunde liegt, möglich ist, kann daher besonders bei der Entwicklung neuer Profilformen bereits bei der Konzeption der Maschine Fehlentscheidungen vermeiden und damit Kosten sparen.

Um sich vor Überraschungen und Folgekosten abzusichern, ist es notwendig, die betriebsbedingten Verformungen der Bauteile sowie die Spiele im Betriebszustand bei der Konzeption der Maschine zu überprüfen.

## 8. Schrifttum

- /1/ Fister, W.: Fluidenergíemaschinen.  
Berlin: Springer Verlag (1983).
- /2/ Fister, W.: Forschungsarbeiten am Schraubenverdichter.  
Vortrag am Leningrad Polytechnic Institut (1984).
- /3/ Jarchow, F.: Maschinenelemente III.  
Skriptum zur Vorlesung Getriebetechnik. Ruhr-Universität  
Bochum.
- /4/ Korte, K.-J.: Simulation der kinematischen und thermo-  
dynamischen Abläufe in der rotierenden Schraubenmaschine.  
Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (1980).
- /5/ Rinder, L. Schraubenverdichter.  
Wien: Springer Verlag (1979).