

Rechnergestützte Entwicklung von Schraubenrotorprofilen (ROTEP I)

Dr.-Ing. R. Schüler, Dortmund

Zusammenfassung

Bisher sind nur wenige Schraubenmaschinentypen bekannt, die mit neuen, von langjährig erprobten Profilformen abweichenden Profilkonturen hergestellt werden.

Um die Möglichkeiten der Rotorentwicklung ohne Prototypfertigung zu verbessern, wurde das Programmsystem ROTEP I entwickelt. Der vorliegende Aufsatz gibt eine Übersicht über dieses Programm.

Damit wird es möglich, für eine frei wählbare, zeichnerisch vorliegende Profilkontur die folgenden Berechnungen vorzunehmen:

- Erzeugung der Gegenflanke des Profils, Berechnung von Formkennwerten,
- Berechnung der Zahnlückenvolumina mit charakteristischen Kenngrößen,
- Berechnung der Arbeitsraumspalte aus der Profilverformung,
- Berechnung der axialen und radialen Lagerbelastungen sowie der Drehmomente bei frei vorgegebenem Druckverlauf,
- Berechnung des drehwinkelabhängigen Querschnitts der druckseitigen Steuerkontur,
- Berechnung der Kontur eines Scheibenfräasers zum Fertigen eines Rotorprofils.

Durch die große Anzahl der in den Rechenprogrammen vorhandenen freien Parameter, wie z.B. Zähnezahl, Durchmesser, Umschlingungswinkel (Rotorsteigung), Profilform, Druckverlauf usw., ist eine Variation der Einflußgrößen auf vielfältige Weise möglich. Im weiteren werden einige exemplarische Ergebnisse, die bei der Anwendung dieses Programmpaketes erzielt wurden, vorgestellt.

Einleitung

Schraubenmaschinen haben im Vergleich zu anderen Maschinen zur Energiewandlung nach dem Verdrängerprinzip eine recht junge Entwicklungsgeschichte. Obwohl das Prinzip der Schraubenmaschine schon seit dem Ende des 19. Jahrhunderts bekannt ist, wurden erste funktionstüchtige Maschinen erst in den dreißiger Jahren dieses Jahrhunderts gebaut. Es sind vergleichsweise wenig Versuche bekannt, von den ursprünglichen Profilformen "symmetrisches Kreisbogenprofil" und "asymmetrisches Profil nach SRM" mit verschiedenen Abarten abzugehen und Neuentwicklungen von Schraubenrotorprofilen auszuführen. Ein wichtiger Grund für diese geringe Zahl von Neuentwicklungen sind die hohen Kosten für Werkzeuge zur Rotorherstellung und die Rotorfertigung selbst, weil es bisher nur möglich war, hauptsächlich auf experimentellem Wege die Qualität eines neuen Rotorprofils festzustellen.

Das hier vorgestellte Programmpaket ROTEP I soll ein Beitrag zur Erweiterung der Möglichkeiten sein, die Eigenschaften einer Profilkontur darzustellen und zu analysieren und somit bestimmte, aus der Geometrie resultierende Einflüsse erkennbar und damit abschätzbar zu machen. Die Erkenntnisse aus solchen Profilrechnungen sollen es ermöglichen, daß verschiedene Profilformen untereinander vergleichbar werden und mit Hilfe dieser Berechnungen Konstruktionshinweise für eine verbesserte Profilauslegung gegeben werden können.

Prinzip des Verfahrens

Aus dem weiten Einsatzfeld der Schraubenmaschinen, Bild 1, von der Kältemaschine bis zum Dampfmotor ergibt sich die Notwendigkeit, statt eines Rotorprofils für alle Einsatzfälle spezielle Profile nach besonderen Kriterien zu entwickeln. Dazu ist zu bemerken, daß immer nur Einzelkriterien als Entwicklungsrichtlinie dienen können, eine Gesamtoptimierung ist wegen der zum Teil gegenläufigen Wirkungen nicht möglich.

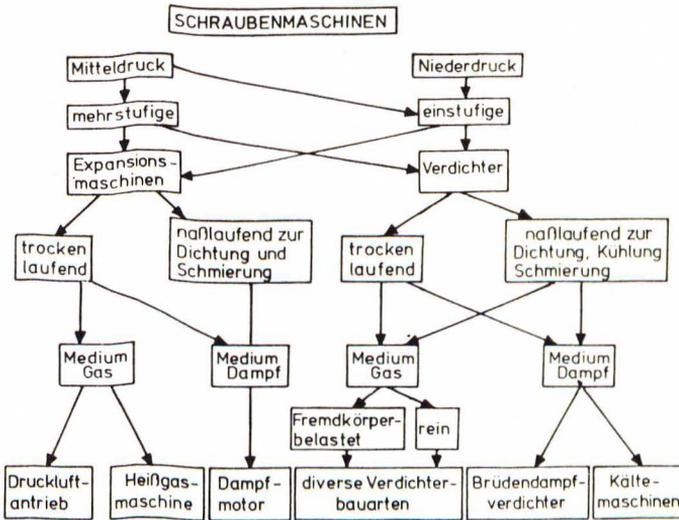


Bild 1: Einteilung der Schraubenmaschinen

Bisher entstanden Profilkonturen immer aus der Anreihung analytisch bestimmbarer Kurven, aus Kreisen, Evolventen und Epizykloiden, so daß allein dadurch von vornherein eine individuelle Anpassung an besondere Verhältnisse schwierig ist. Ein solches analytisch bestimmtes Profil ist das bereits genannte, weit verbreitete asymmetrische Profil nach schwedischer Lizenz, Bild 2. Es wurde hier als Beispielprofil und als Ausgangsprofil für die Variation benutzt.

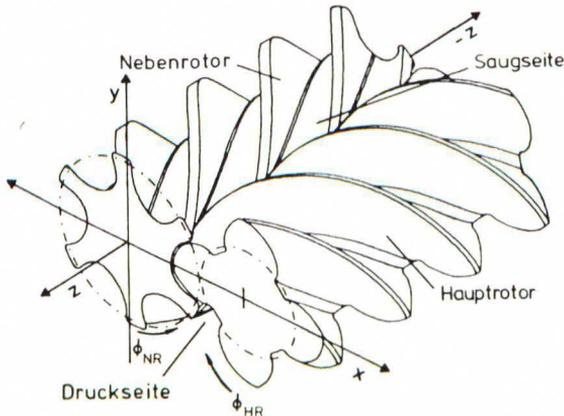


Bild 2:
Asymmetrisches Schraubenprofil

Für eine freizügige Profilentwicklung soll deshalb eine andere, die Möglichkeiten physikalischer Betrachtungen weniger einschränkende Profildarstellung gewählt werden. Bei der Berechnung wird daher eine diskrete, unabhängige Darstellung mit Einzelkonturpunkten benutzt, so daß jede mögliche Profilform leicht dargestellt und untersucht werden kann. Ein Schraubenrotor ist ein radialsymmetrischer Körper, so daß zur vollständigen Profilbeschreibung ein einzelner Zahn für jeden Rotor ausreichend ist, solange man dabei von einer Sollkontur ausgeht. Zur Behandlung von Istprofilen mit gemessenen Koordinaten ist das Rechenprogramm ebenfalls geeignet.

Die Konturkoordinaten der Zahnflanken sind in einem Polarkoordinatensystem definiert, Bild 3.

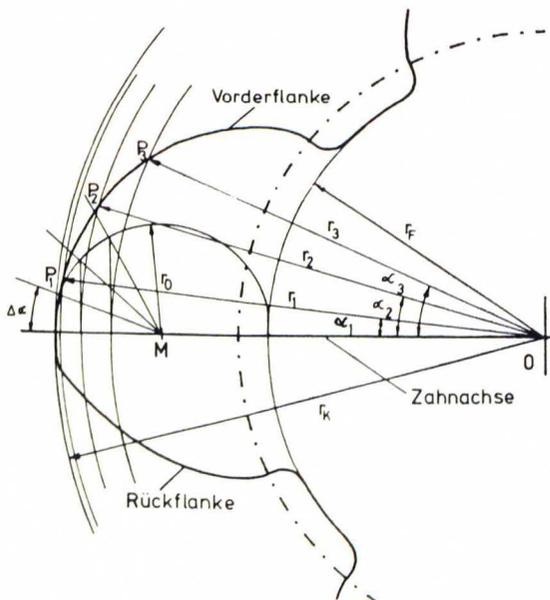


Bild 3:

Koordinatensystem zur Flankendarstellung

Schraubenrotoren haben im Bereich des Fußkreises am Hauptrotor und am Kopfkreis des Nebenrotors Konturabschnitte großer Krümmungen, die eine gewichtete, besonders enge Punktlage zur genauen Konturbeschreibung sinnvoll erscheinen lassen. Aus diesem Grunde wird für jedes Profil eine vom Durchmesser von Kopf- und Fußkreis abhängige Stütz-

stelleneinteilung eingeführt. Sie bildet die eine Größe des Wertepaares, das den Konturpunkt festlegt, der andere Wert wird durch den Winkel α bestimmt.

Einen Kompromiß aus Genauigkeit und vertretbarer Rechenzeit stellen 180 Konturpunkte pro Zahnflanke, also 360 Konturpunkte für einen ganzen Zahn dar. Die funktionsfähige Schraubenmaschine entsteht nur in Zusammenarbeit mit einem Gegenrotor, nur dann wird ein abgeschlossener Arbeitsraum gebildet. Liegt die Zahnkontur eines Rotors fest und werden dazu die Zähnezahlen beider Rotoren gewählt, so ergibt sich durch das Abwälzen der Rotoren die Kontur des Gegenrotors. Zur Berechnung dieser Gegenflanke wird eine gleichförmige Übersetzung vorausgesetzt und die Epizykloidenbahn jedes Punktes des Erzeugerrotors im Gegenrotor berechnet. Die Einhüllende aller dieser Bahnen bildet dann die neue, erzeugte Zahnkontur. Dieses Verfahren ähnelt der Erzeugung der Fußausrundungen bei einer Evolventenverzahnung.

Bei beliebig wählbaren Konturen besteht aber die Möglichkeit, daß eine Rotorpaarung, die nach dem beschriebenen Verfahren errechnet wurde und nach dem die Rotoren kollisionsfrei laufen, nicht in der Lage ist, mechanische Kräfte auf den jeweils anderen Rotor zu übertragen, weil unzulässig hohe Flächenpressungen auftreten können. Daraus erwachsen nur dann Probleme, wenn zur Kraftübertragung kein Synchronisationsgetriebe verwendet werden soll. Bei der Konturentwicklung muß darauf geachtet werden, daß stets ein geschlossener Arbeitsraum entsteht, d.h., in jedem Stirnschnitt muß mindestens ein Berührungspunkt zwischen den Rotoren vorhanden sein.

Druckseitige Steuerquerschnitte

Nach Beendigung der inneren Verdichtung wird das Arbeitsmedium in den Druckstutzen ausgeschoben. Der dazu notwendige Querschnitt (Bild 4) ist, wie bereits erläutert, gleichzeitig Steuerquerschnitt. Die Lage der Steuerkanten bestimmt das Verhältnis der Volumina bei der inneren Verdichtung. Die Vergrößerung des eingebauten Volumenverhältnisses v_1 be-

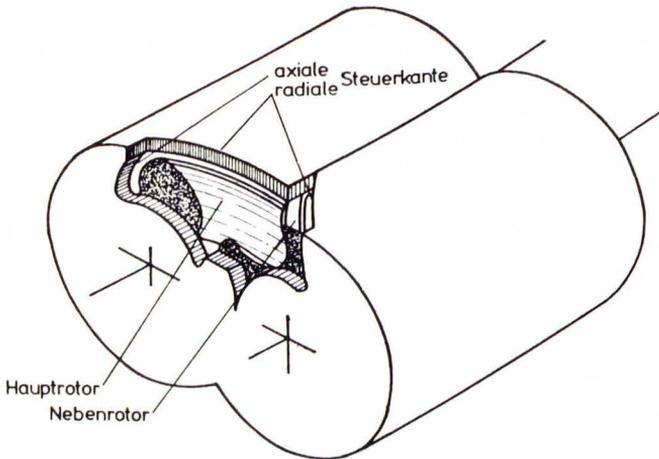


Bild 4: Druckseitige Steuerquerschnitte an der Schraubemaschine

wirkt eine Verkleinerung des freien Querschnittes. Das bedeutet, daß bei einer Maschine, die für höhere Drücke ausgelegt ist, die Irreversibilitäten in diesem Querschnitt ansteigen. Um diese Wirkung abschätzen zu können, muß zur Berechnung der Geschwindigkeit die entsprechende Fläche bekannt sein. Der freie Querschnitt setzt sich aus vier Teilquerschnitten zusammen. Es existiert jeweils für Haupt- und Nebenrotor getrennt ein axialer und radialer Anteil.

Bild 5 zeigt die unterschiedlichen Flächenverläufe der einzelnen Anteile und den Gesamtverlauf. Die Kurvenverläufe hängen sowohl von der Konturform als auch von der Zähnezahl und der Form des druckseitigen Steuerquerschnittes ab. Aufgabe einer Profilentwicklung, die dieses Verhalten verbessern soll, muß es sein, den **Anstieg der Kurve so steil wie möglich zu gestalten**, damit in möglichst kurzer Zeit große Querschnittszunahmen erreichbar sind. Weiterhin sollte der Querschnitt möglichst lange nahezu konstant gehalten werden. Der Verlauf der einzelnen Flächenanteile, deren Summe ja den Gesamtquerschnittsverlauf bestimmt, hängt im wesentlichen von der Konturform und der Zähnezahl der Roto-

ren ab, denn der freie Querschnitt wird je nach Lage der Steuerkante stets von mehreren Zähnen bedeckt.

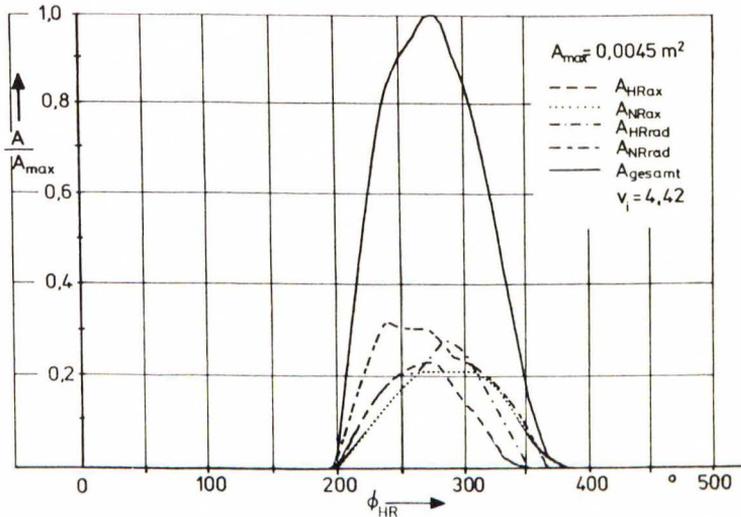


Bild 5: Verlauf der druckseitigen Steuerquerschnittsfläche als Funktion des Hauptrotordrehwinkels ϕ_{HR}

Arbeitsraumbegrenzende Spalte

Der Arbeitsraum einer Schraubenmaschine wird durch eine Reihe von Spalten begrenzt. Wegen der Rotorkinematik ist es nicht möglich, diese Spalte durch berührende Dichtelemente abzudichten, d.h., innere Leckmassenströme treten in Schraubenmaschinen immer auf. Im Bild 6 sind alle in der Schraubenmaschine vorkommenden Spalte aufgezeichnet.

Die wohl komplizierteste Form aller Arbeitsraumspalte hat der Profileingriffsspalt, Bild 7. Er bildet die Berührlinie zwischen den beiden Rotoren und verbindet die Saugseite und die Druckseite der Maschine direkt miteinander, während die übrigen Spalte vorwiegend Zahnlukenräume untereinander verbinden. Mit dem Rechenprogramm ROTEP I wird die Lage, der Verlauf sowie die Länge dieses Spaltes berechnet, sein räumlicher Verlauf erfordert dazu eine Reihe aufwendiger Fallunterscheidungen.

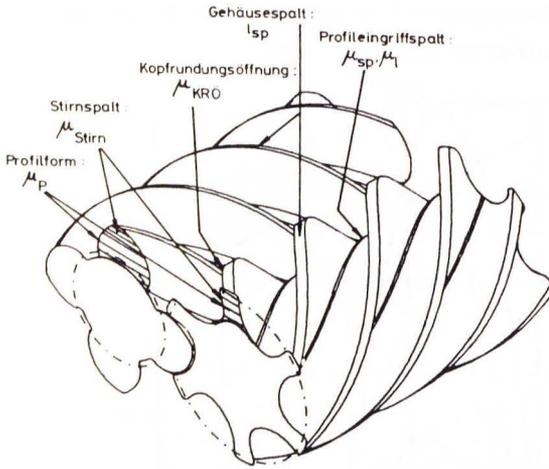


Bild 6:

Arbeitsraumbegrenzende
Spalte

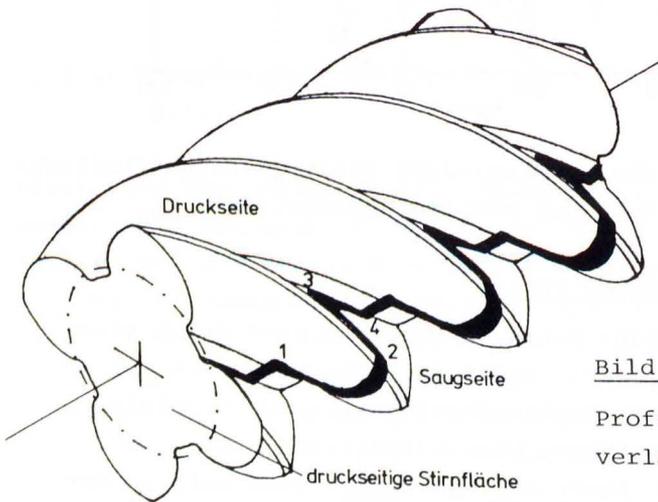


Bild 7:

Profileingriffsspalt-
verlauf

Der Profilsplatt beeinflusst das Betriebsverhalten der Maschine auf verschiedene Weise, einmal wirkt er auf den Leckmassenstrom von der Druck- zur Saugseite, zum andern bestimmt er mit die Größe des Antriebsmomentes und die Verteilung dieses Momentes auf Haupt- und Nebenrotor. Unterschiedliche Spaltformen, wie eine typische Düsenform (Typ 1) oder ein flacher gerader Spalt (Typ 4) bewirken unterschiedliche Leckmassenströme durch den Spalt bei einem anliegenden Druckverhältnis.

Dem Bild 8 liegen umfangreiche Messungen zugrunde.

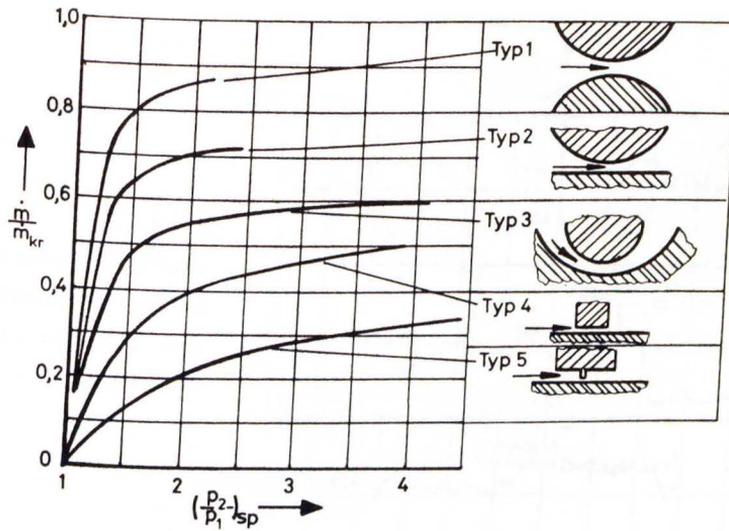


Bild 8: Spezifischer Spaltleckstrom als Funktion des Spaltdruckverhältnisses /1/

Der Profileingriffsspalt besteht weitgehend aus Elementen vom Typ 1 bis 3. Es ist zur Beurteilung wichtig, zu wissen, welchem Spalttyp Teile des Profileingriffsspalt zuzuordnen sind und über welche Bereiche sie sich erstrecken, um deren Einfluß auf den Leckmassenstrom abschätzen zu können. Dazu wird eine Spaltkennzahl definiert und errechnet. Ihre Funktion und Aussage sei an Bild 9 erläutert. Gleiche Kennzeichnung (o oder +) der Kurve bedeutet gleiche Krümmungsrichtung, so ist dort ein Spalt des Typs 3 vorhanden, unterschiedliche Kennzeichnung deutet auf einen Spalt des Typs 1. Der Wert der Kurve repräsentiert die Krümmung, der Zahlenwert geht gegen 1, wenn der Spalt an dieser Stelle gerade berandet ist. Es liegt ein Spalt vom Typ 2 dann vor, wenn eine der beiden Kurven nahe dem Wert 1 verläuft, ein kleiner Wert zeigt also eine starke Krümmung an. Auf die Berechnung der Spaltkennzahl soll hier nicht weiter eingegangen werden /2/.

Eine Profilentwicklung muß hier dafür sorgen, daß über eine möglichst große Erstreckung Spaltelemente vom Typ 3 vorhanden sind, während Spaltteile vom Typ 1 so wenig wie möglich auftreten sollten.

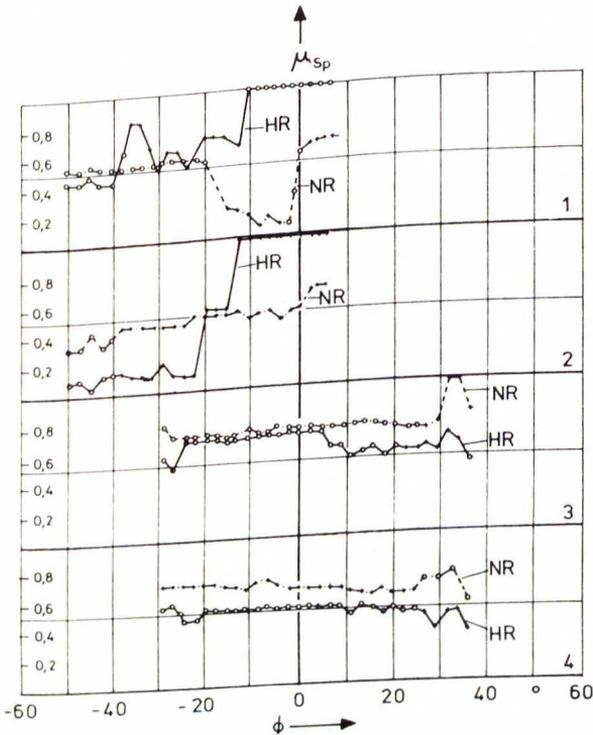


Bild 9:

Profilsplattkenn-
zahl als Funktion
des Verschrau-
bungswinkels

Betrachtet man die Projektion des Profileingriffsspalt auf eine Stirnfläche, Bild 10, so erkennt man, daß sie nicht an die Projektion des Gehäusespalt heranreicht, es verbleiben Lücken. Durch sie werden Verbindungen zwischen den Zahn-
lücken hergestellt. Auf der Saugseite herrscht in den Zahn-
lücken nahezu gleicher Druck, so daß hier diese Öffnung vernachlässigt werden kann. Bei größeren Druckdifferenzen zwischen den Zahn-
lücken auf der Druckseite, wie im Bild 10 dargestellt, wachsen die Leckverluste jedoch an. Zwischen dem Ende des Profileingriffsspalt und dem Gehäusespalt entsteht ein räumlicher Querschnitt, der von drei Elementen begrenzt wird

- der Verschneidungskante der Gehäusebohrungen,
- einem Teil der Hauptrotorflanke und
- einem Teil der Nebenrotorflanke.

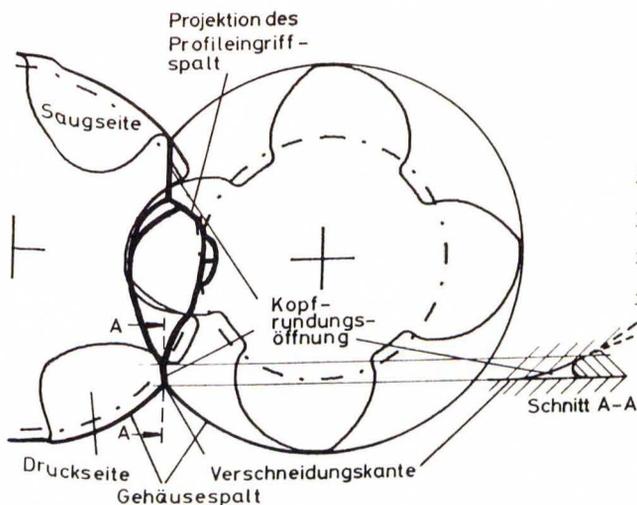


Bild 10:

Lage der Kopfrundungsöffnung im Stirnschnitt

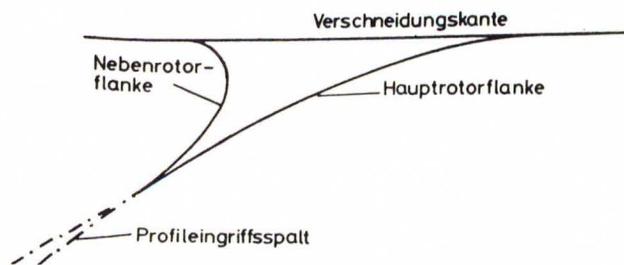


Bild 11:

Kopfrundungsöffnung

Im Bild 11 ist die Ansicht A-A aus Bild 10 dargestellt.

Weil die Kopfausrundung des Nebenrotors mitbestimmend für die Bildung dieses Querschnittes ist, sollte er nicht Blasloch, sondern Kopfrundungsöffnung genannt werden. Diese Öffnung hat unter Umständen nicht die Dichteigenschaften eines Spaltes. Deshalb ist es nötig, Form und Fläche für eine Beurteilung zu berechnen. Die Richtung des Leckstromes durch diese Öffnung ist nicht bekannt und muß experimentell bestimmt werden. Im Rechenverfahren ist deshalb eine Verdrehung und Verschiebung der Schnittebene vorgesehen, so daß der wirksame Querschnitt senkrecht zur Strömungsrichtung bestimmt werden kann. Durch eine geeignete Wahl der Flankenkontur kann die Fläche der Kopfrundungsöffnung beeinflußt werden, so daß sie entweder völlig verschwindet oder aber zu einem langen, flachen Spalt verändert wird.

Kräfte und Momente

Der Verlauf des Profileingriffsspalt es beeinflusst das von einem Verdichter aufgenommene Drehmoment und die Verteilung des Drehmomentes auf Haupt- und Nebenrotor. Zur Berechnung wird die Rotorlänge in 200 Einzelscheiben zerlegt. An jeder Scheibe bewirkt der in der Zahnücke vorhandene Druck eine Normalkraft auf den betrachteten Konturabschnitt eines Rotors. Je nach Lage der Berührungspunkte werden die Konturabschnitte von unterschiedlichen Drücken beaufschlagt. Die Umfangskomponente der Druckkräfte bewirkt dann ein Drehmoment; eine Summation der Einzelmomente aller Konturstücke einer Rotorscheibe liefert das Teilmoment dieser Scheibe. Im Bild 12 sind die Teilmomente aller Scheiben über der Rotorlänge aufgetragen.

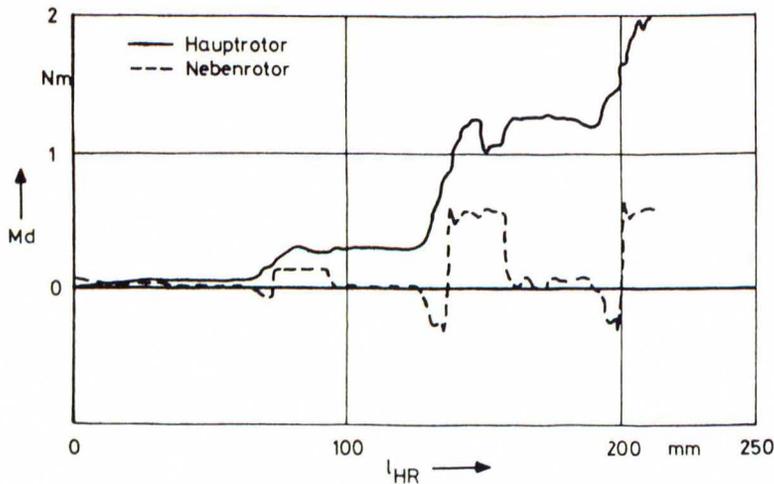


Bild 12: Drehmomentverlauf über der Rotorlänge

Man erkennt, daß die Einzelmomente des Nebenrotors kleiner als die des Hauptrotors sind. Der stufenförmige Verlauf, sowie die Vorzeichen, resultieren aus den Drücken in den einzelnen Zahnücken und dem Verlauf des Profils spalt es. Die Summation aller Teilmomente liefert dann das Gesamtmoment eines Rotors. Dabei zeigt sich, daß bei dem betrachteten

Profil das Nebenrotormoment nur ca. 10-15% des Hauptrotor-
 momentes beträgt. Dieses Moment muß entweder über die Zahn-
 flanken oder das Synchronisationsgetriebe übertragen werden.
 Durch gezielte Konturentwicklung und damit Beeinflussung des
 Profilspaltes ist es möglich, das Nebenrotormoment zu Null
 werden zu lassen. Für einen ruhigen Maschinenlauf sollte je-
 doch ein Restmoment vorhanden sein.

Die Berechnung der Normalkräfte liefert auch die Radialkräf-
 te für jede Scheibe, Bild 13 zeigt den Verlauf ihrer Kompo-
 nenten in x- und y-Richtung. So können Lagerbelastungen
 einer Schraubenmaschine leicht berechnet werden. Gleich-
 zeitig ergibt sich auch die Kraftverteilung für die Berech-
 nung der Rotorbiegung.

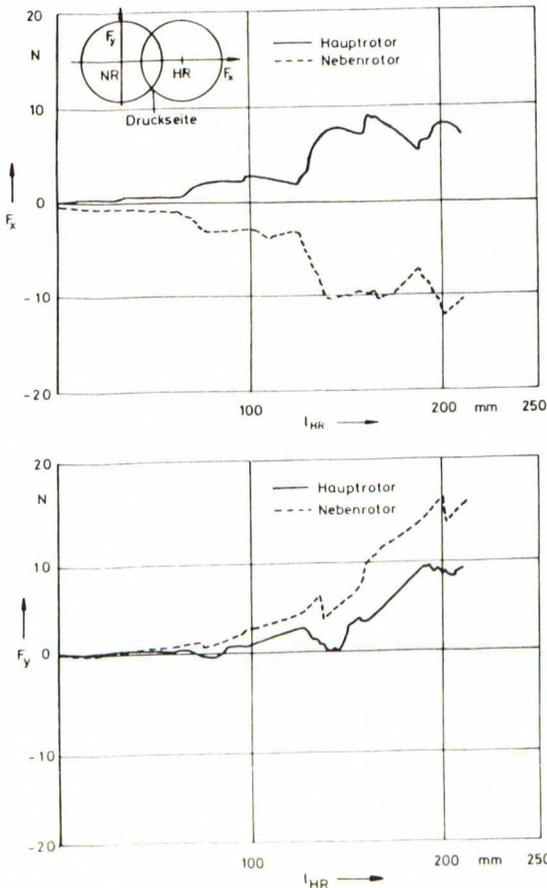


Bild 13:
 Verlauf der Ra-
 dialkraft über der
 Rotorlänge

Neben den Radialkräften als Lagerbelastung ist die axiale Lagerlast ein wichtiges Auslegungskriterium. Sie setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

Zum einen bewirkt das Drehmoment infolge der Schrägverzahnung der Rotoren einen Axial Schub, der sich aus dem Drehmoment und dem Steigungswinkel berechnen läßt, zum andern wirken auf die Rotorstirnfläche Druckkräfte.

Die Verteilung der Druckkräfte hängt von der Rotorgeometrie an der Stirnfläche ab, Bild 14. Steht einem Element der Rotorfläche in einer Zahnücke ein Teil der Stirnfläche gegenüber, so wirkt darauf der Druck, der in der Lücke herrscht; steht aber der Gehäusestirnfläche ein Teil der Zahnstirnfläche gegenüber, so wirkt ein Zwischendruck, der linear verteilt angenommen werden soll. Steht der Stirnfläche oder der Rotorfläche allerdings ein Teil der Drucköffnung gegenüber, so lastet auf der Fläche der Enddruck im Stutzen. Man berechnet also für jedes Flächenelement des Rotors (ob Stirn- oder Zahnfläche) den zugehörigen Druck und erhält die Axialkraft aus der Summe aller Einzelkräfte.

Gleitgeschwindigkeiten

Vor allem bei den Schraubenmaschinen mit Öleinspritzkühlung, die ja kein Synchronisationsgetriebe besitzen, ist es wichtig zu wissen, mit welchen Geschwindigkeiten sich die Flan-

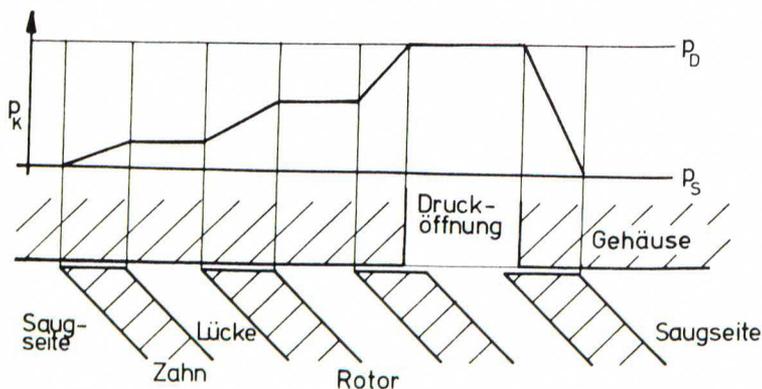


Bild 14: Abwicklung des druckseitigen Stirnspaltes

ken aneinander vorbeibewegen, weil hier einerseits größere hydraulische Verluste auftreten, andererseits durch die Momentenübertragung ein erhöhter Reibungsverlust auftreten kann. Die Gleitgeschwindigkeit ist die Differenz der Tangentialkomponenten der Bahngeschwindigkeiten zweier sich berührender Profilpunkte. Sie läßt sich für jeden Profilpunkt, der gerade einem Rotorprofilpunkt der Gegenrotorflanke gegenübersteht, aus der Umfangsgeschwindigkeit berechnen. Das Bild 15 zeigt die Geschwindigkeiten längs des Profilspaltes, mit der die Flanken bei Berührung aufeinander gleiten, bezogen auf die Umfangsgeschwindigkeit des Hauptrotors. Ein Winkel ϕ entspricht einem Schnitt A-A des Bildes 16, hier liegt die Linie A-A bei ca. -15° . Das Teilbild 1 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf längs der Linie 1a 1b 2, also an der Vorderflanke, Teilbild 2 zeigt die Rückflanke, Linie 3-4. Die Teilbilder 3 und 4 geben die Gleitverhältnisse an den doppelten Spaltelementen, den Linien 1a - 2 und 2-3 wieder.

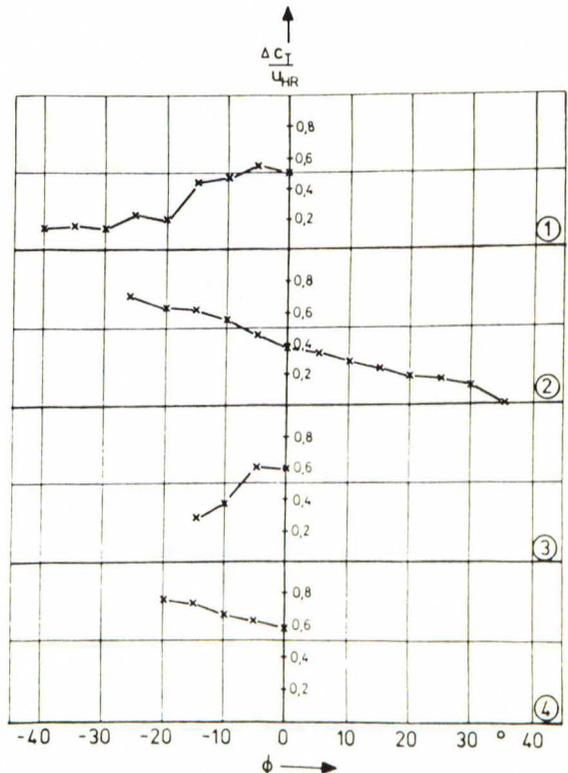


Bild 15:

Gleitgeschwindigkeit als Funktion des Verschraubungswinkels

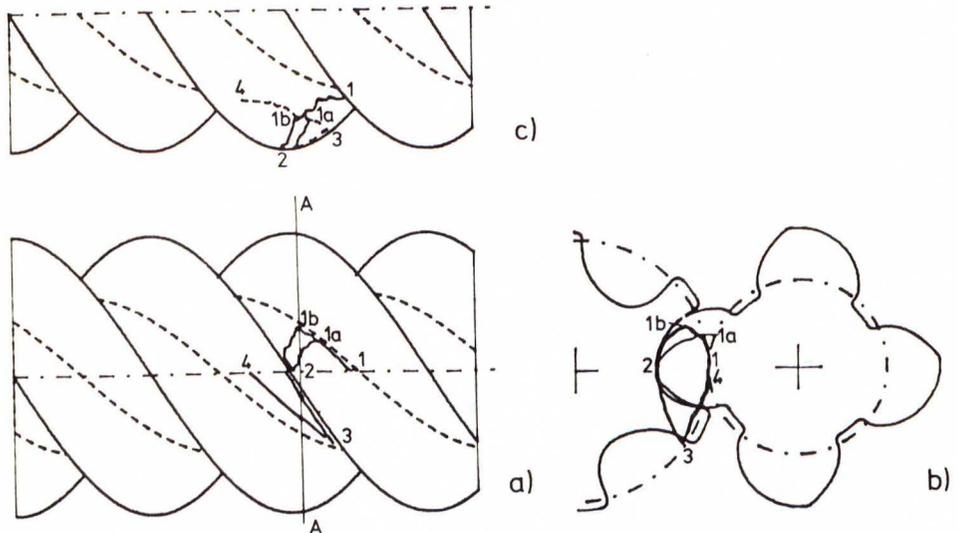


Bild 16: Profileingriffsspalt

a) Seitenansicht b) Stirnansicht c) Draufsicht

1 Vorderflanke Linie 1 1a 1b 2 3 Vorderflanke Linie 1a 2
 2 Rückflanke Linie 3 4 4 Rückflanke Linie 2 3

Im Teilbild 2 ist der Wälzpunkt zu erkennen, hier wird die Gleitgeschwindigkeit zu Null. Diese Gleitgeschwindigkeit kann durch geeignete Profilform in ihrem Verlauf beeinflußt werden, so daß es möglich ist, die Gleitgeschwindigkeiten herabzusetzen und so die Verluste zu senken.

Grundsätzlich ist zu allen Änderungen an der Flankenkontur zu sagen, daß dadurch oft nur wenige Einflüsse positiv verändert werden können. Dabei ist es dann möglich, daß andere Einflußparameter sich negativ verändern. In jedem Fall ist also eine vollständige Betrachtung aller Parameter zur endgültigen Beurteilung notwendig.

Das Programmsystem ROTEP I

Auf der Grundlage der vorgestellten Berechnungsmethoden wurde ein Programmsystem erstellt. Es enthält neben den vorgestellten Elementen noch weitere Module zur Geometriebeschreibung und -berechnung.

PROFIL

- Digitalisieren einer Profilkontur
- Korrektur einer Profilkontur mit interaktiver Grafik
- Zeichnen des Profils
- Erzeugen der Gegenrotorflanke
- Digitalisieren der Kontur der druckseitigen Steuerkante
- Konturkorrektur der Steuerkante
- Variation der Profildaten wie
 - Rotorlänge
 - Umschlingungswinkel
 - Zähnezahlen
 - Rotordurchmesser, Fußkreisdurchmesser, Kopfkreisdurchmesser

in der Praxis
sind die Daten
meistens
nicht
genau
genug

VOLUMEN

- Berechnung von Volumen Kennzahlen
- Berechnung der Lage des maximalen Kammervolumens (saugseitige Steuerkante)
- Volumenkurve (Verlauf des Kammervolumens als Funktion des Drehwinkels)

in der Praxis
sind die Daten
meistens
nicht
genau
genug

KROE

- Berechnung der Berandung der Kopfrundungsöffnung
- Flächenberechnung

SPALT

- Berechnung der Lage des Profileingriffsspalt
- Zeichnen der drei Ansichten oder dreidimensionalen Darstellung
- Berechnung der Spaltlänge
- Höhenliniendarstellung

KRAFT

- Drehmomentberechnung bei vorgegebenem Druckverlauf
- Berechnung der Verteilung auf Haupt- und Nebenrotor
- Axialkraftberechnung
- Radialkraftberechnung

AUSLASS

- Flächenberechnung der druckseitigen Steuerquerschnitte
- variables Volumenverhältnis
- Berechnung der Einzelflächen

KENNZIF

- Formkennzahlen für Flankenkonturen
- Stirnspaltkennzahlen

SPZIF

- Berechnung der Spaltkennzahlen zur Beschreibung des Spalttyps

GLEIT

- Berechnung der Gleitgeschwindigkeiten zwischen den Flanken im Berührungspunkt

FRÄS

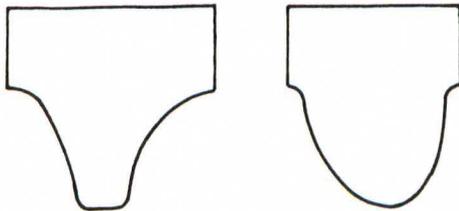
- Berechnung einer Formfräserkontur für das Profil
- variabler Achsabstand Fräser-Profil
- variabler Anstellwinkel des Fräasers

Werkzeugkontur

Hat man mit Hilfe der anderen Teilprogramme durch iteratives Vorgehen das Profil entwickelt, das sowohl den Zielvorstellungen des Anwenders am besten entspricht, als auch funktionsfähig und herstellbar ist, kann mit einem Rechenprogramm die Kontur eines Scheibenfräasers berechnet werden.

An der Universität Dortmund befindet sich seit kurzem eine Profilfräsmaschine für Schraubenrotoren, mit der die Rotoren im Teilverfahren hergestellt werden können. Um den Werkzeugaufwand so gering wie möglich zu halten, wird für eine Prototypfertigung allerdings statt des vielschneidigen Scheibenfräasers ein Einzahnwerkzeug verwendet. Bild 17 zeigt die Kontur der verwendeten Fräsmesser, die für ein asymmetrisches Rotorprofil mit einem Außendurchmesser von 125 mm errechnet wurden. Zur Berechnung läßt man die Schnitt Ebene, also das Werkzeug, um die Fräserachse rotieren und berechnet die Durchstoßpunkte der Schraubenlinien durch diese Ebene. Die Einhüllende aller Durchstoßpunkte bildet dann die Werkzeugkontur.

Um die optimale Profilkontur auch bei schwierigen Zahnflankenkonturen errechnen zu können, sind im Rechenprogramm der Achsabstand Profilachse/Fräserachse und der Anstellwinkel des Fräasers variabel. Um Fertigungsfehler beim Erstellen dieser Werkzeugkontur weitgehend auszuschalten, kann



Hauptrotor

Nebenrotor

Bild 17:

Fräswerkzeug für ein asymmetrisches Rotorprofil

Abstand Rotorachse-

Fräserachse $A=300$ mm

Anstellwinkel des

Fräasers $\gamma=45,24^\circ$

die Kontur von einer Profilschleifmaschine, Bild 18, direkt auf das Werkzeug übertragen werden. Dazu wird eine Schleifmaschine benutzt, die im On-line-Betrieb vom Rechner gesteuert werden kann. Die Verstelleinheiten des Kreuztisches und der Drehtisch führen das eingespannte Werkstück, das spätere Messer, an der ortsfesten Schleifscheibe vorbei. Die kleinste dabei erreichte Schrittweite beträgt 1μ in der translatorischen Bewegung, der kleinste Drehwinkel $1/100^\circ$. Die Übereinstimmung des gefertigten Profils mit der geplanten Kontur hängt allerdings von einigen weiteren Einflüssen ab, beispielsweise von der Maschinengenauigkeit der Fräsmaschine, von der Werkzeugjustierung und nicht zuletzt von der Problematik der Verwendung eines Werkzeuges mit nur einer Schneide. Die Notwendigkeit, das Profil im Teilverfahren, also Schraubengang für Schraubengang, fertigen zu müssen,

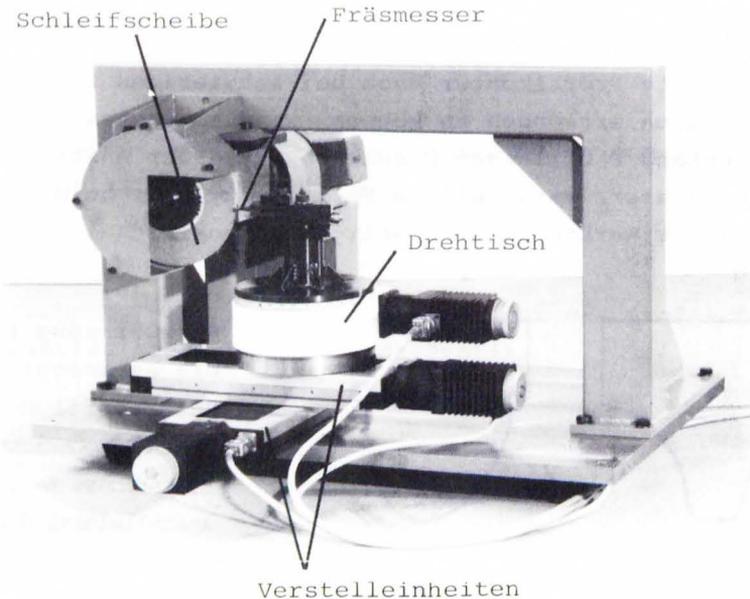


Bild 18: Schleifvorrichtung für Profilfräswerkzeuge

bringt ebenfalls Fertigungsungenauigkeiten mit sich. Der für ein Wälzfräsen notwendige Werkzeugaufwand übersteigt jedoch den für eine Prototypfertigung vertretbaren Kostenrahmen.

Ergebnisse (exemplarische Beispiele)

Ein kennzeichnendes Merkmal einer Profilverpaarung ist die Zähnezahzahl der Rotoren. Die vorrangige Größe ist die Zähnezahzahl des Hauptrotors, die des Nebenrotors ergibt sich aus dem Verhältnis der Wälzkreise. Durch die Zähnezahzahl werden wichtige Daten der Rotorpaarung beeinflußt:

- die Profilform,
- der verarbeitete Volumenstrom und
- die mechanische Festigkeit der Rotoren.

Aus dem unveränderten Nebenrotor wurden für die Zähnezahzahlen 3 bis 6 die neuen Hauptrotorkonturen errechnet. Das Ergebnis ist in Bild 19 dargestellt. Ausgangspunkt war das bekannte asymmetrische Profil mit vier Hauptrotor- und sechs Nebenrotorzähnen. In Bild 20 erkennt man den Einfluß der Zähnezahzahl auf die radialen Lagerkräfte und die Axialkraft an Haupt- und Nebenrotor. Auf der Saugseite hängen die radialen Lagerbelastungen kaum von der Zähnezahzahl ab, an der Druckseite dagegen ist der Einfluß deutlich größer. Zwar nimmt bei wachsender Zähnezahzahl die Druckdifferenz zwischen den

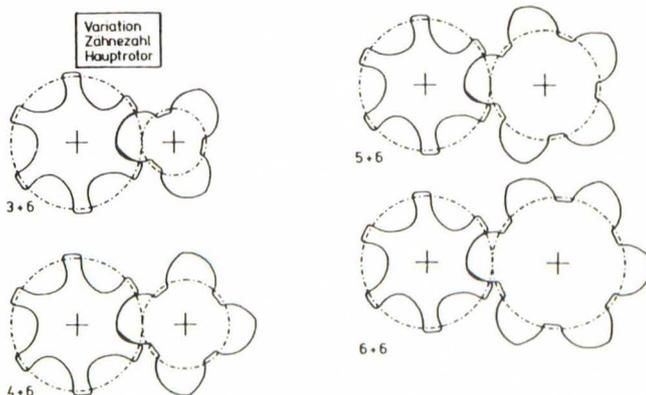


Bild 19: Profilform bei Variation der Zähnezahzahl am Hauptrotor

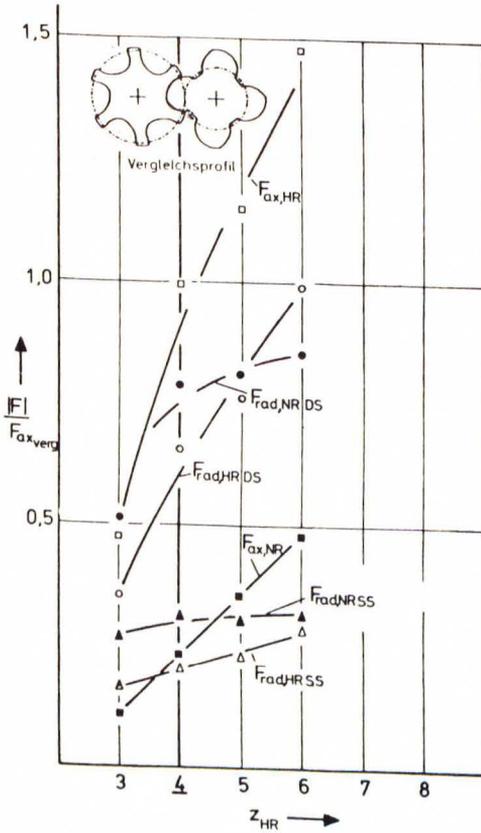


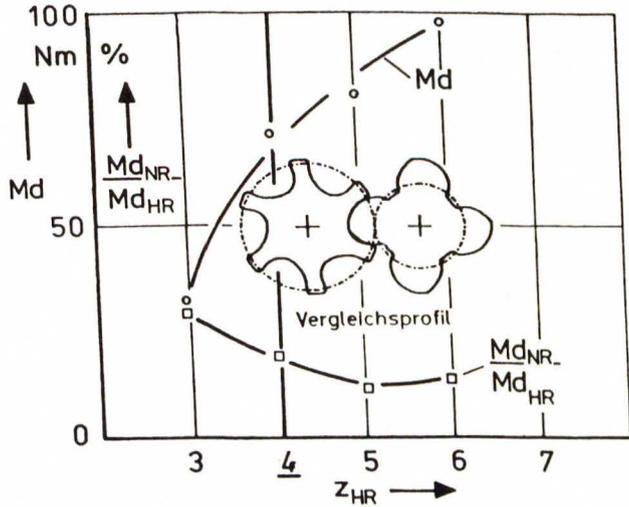
Bild 20:

Kräfte am Rotor-
paar als Funktion
der Hauptrotor-
zähnezahl

Zahlücken ab, gleichzeitig steigt aber auch die Zahl der druckbelasteten Zahlückenräume an, so daß sich die Druckverteilung an der Stirnfläche ändert und die resultierenden Kräfte ansteigen. Noch stärker wird die Axialkraft Haupt- und Nebenrotor beeinflusst.

Ebenso wie die Kräfte, hängt auch das Drehmoment, Bild 21, deutlich von der Zähnezahl des Hauptrotors ab. Es wird unter anderem auch vom Verdrängungsvolumen der Maschine beeinflusst, denn bei steigender Zähnezahl werden mehr Kammern pro Umdrehung wirksam. Gleichzeitig verlagert sich durch die Konturänderungen der Profileingriffsspalt, so daß sich dadurch die Verteilung des Drehmomentes auf Haupt- und Nebenrotor verändert.

Bild 21:
Drehmoment als
Funktion der
Hauptrotordreh-
zähnezahl



Führt man eine ähnliche Zähnezahlvariation am Nebenrotor durch, so ergeben sich die Konturen in Bild 22.

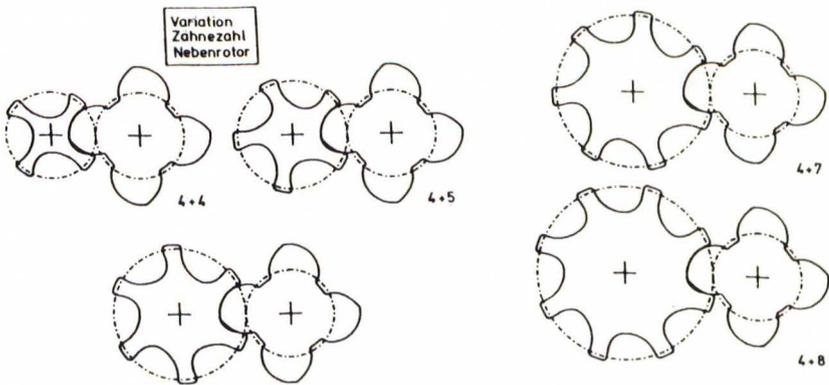


Bild 22: Profilformen bei Variation der Zähnezahl am Nebenrotor

Hier wurden die Konturen aus dem festgehaltenen Hauptrotor berechnet. Die Resultate zeigen eine deutlich geringere Abhängigkeit der Kräfte und Momente von der Zähnezahl, daß dort die reine Steuercharakteristik des Nebenrotors erkennbar wird. Variiert man an einem Schraubenmotor die Steigung

der Schraubenlinie und hält die Länge fest, so ändert sich der sogenannte Umschlingungswinkel, das ist der Winkel, um den der saugseitige Endquerschnitt der Schraube gegen die druckseitige Stirnfläche verschraubt ist. Eine solche Variation bewirkt eine Änderung des Verlaufs der Volumenkurve, Bild 23.

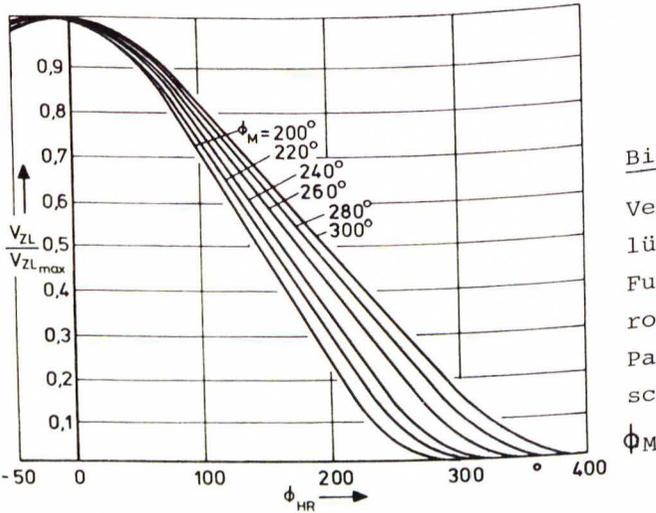


Bild 23:

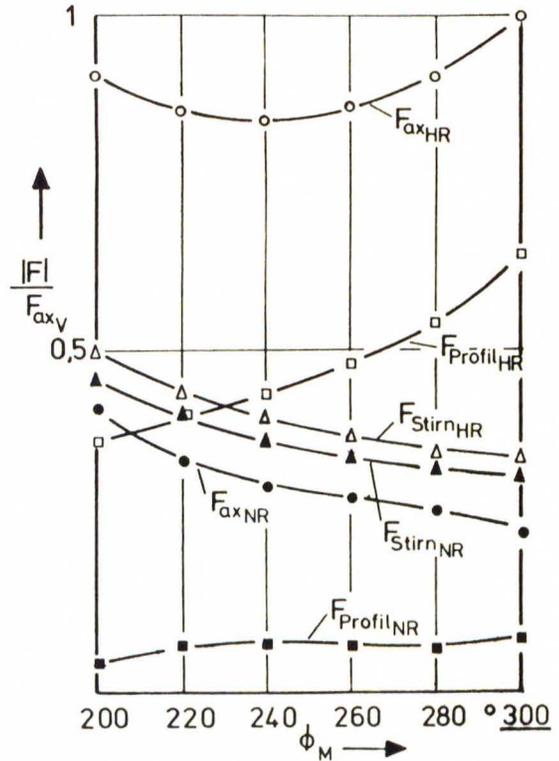
Verlauf der Zahn-
lückenvolumina als
Funktion des Haupt-
rotordrehwinkels
Parameter: Um-
schlingungswinkel

 ϕ_M

Man erkennt, daß bei kleineren Umschlingungswinkeln die Verdichtung früher endet und damit bei gleicher Rotordrehzahl eine Verkürzung des Arbeitsspieles erreicht werden kann. Damit steht der Leckmasse in der Maschine weniger Zeit zur Durchströmung der Spalte zur Verfügung, sie wird dadurch relativ dichter. Gleichzeitig steigt der Druckgradient in der Zahnücke über dem Drehwinkel, so daß sich die Druckverteilung auf der Stirnfläche, die die Axialkraft bewirkt, zu größeren Werten hin ändert. Für den Hauptrotor wächst auch mit kleineren Umschlingungswinkeln der Druckgradient in den Zahnücken, der Mittelwert der Druckverteilung wächst an, dieser Axialkraftanteil wird so vergrößert (hier mit F-Stirn bezeichnet), Bild 24. Gleichzeitig sinkt aber auch mit kleineren Umschlingungswinkeln der Axialschub, weil der Steigungswinkel der Rotoren zunimmt, wenn sich die Rotor-

Bild 24:

Axialkräfte als
Funktion des Um-
schlingungs-
winkels



länge nicht ändert. Aus der Überlagerung der beiden Kräfte ergibt sich dann die Gesamtkurve mit einem ausgeprägten Minimum. Beim Nebenrotor wird der Axialkraftanteil der Stirnflächendruckverteilung in der gleichen Weise beeinflusst, wegen des viel kleineren Axialschubes des Nebenrotors, der auch wegen der umgekehrten Rotorsteigung entgegengesetzt wirkt, ergibt sich hier ein fallender Verlauf der Gesamtaxialkraft.

Literatur

- /1/ Sakun, I.A. Schraubenverdichter, Verlag Masinstroenie, Leningrad 1970
- /2/ Schüler, R. Entwicklung von Schraubenmaschinen-Rotoren Ein Beitrag zur Optimierung von Schraubenmaschinen
Dissertation Universität Dortmund 1984