

Herstellung von Rotoren für Schraubenmaschinen

Dipl.-Ing. **H. P. Mente**, Ludwigsburg

Einleitung

1. Herstellverfahren
 - 1.1 Fräsen im Teilverfahren
 - 1.2 Fräsen im Wälzverfahren
 - 1.3 Wirbeln im Teilverfahren
 - 1.4 Schleifen im Teilverfahren
2. Herstellgenauigkeit und Meßeinrichtungen
3. Anwendung der Verfahren

Schlußbetrachtung

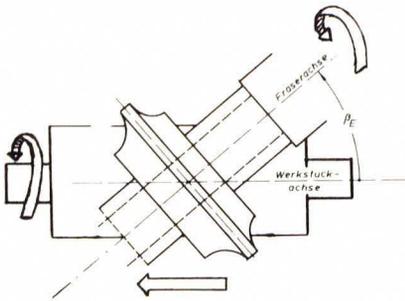
Herstellung von Rotoren für Schraubenmaschinen

Einleitung

Schon 1878 wurde in Deutschland ein Patent für einen Verdichter erteilt, der mit schraubenförmigen Rotoren arbeiten sollte. Doch bis zu einer Produktionsreife vergingen noch etliche Jahrzehnte. Es waren nämlich, wie in den meisten ähnlichen Abläufen, außer einer brauchbaren Konstruktion erst noch Herstellverfahren, Maschinen und Werkzeuge erforderlich, die eine wirtschaftliche Fertigung in der erforderlichen Genauigkeit ermöglichten.

1. Herstellverfahren
 - 1.1 Fräsen im Teilverfahren

Bei den Rotoren für Schraubenmaschinen war das erste brauchbare Herstellverfahren für die Erzeugung der Profile: das Fräsen im Teilver-



fahren mit Schlagzahn oder Scheiben- und Fingerfräsern. Hierbei werden scheiben- oder fingerförmige Werkzeuge benutzt, die bei Rotation um ihre Achse eine Schnittgeschwindigkeit ergeben und im Normalschnitt der Schraube mit profilierten Messern das Lückenprofil erzeugen. Eine Drehbewegung des Rotors mit gleichzeitiger axialer Verschiebung entweder des Rotors oder des Werkzeugs sorgt für die gewünschte

Vorschubgröße im richtigen Steigungswinkel der Schraube. Nach jedem Durchlauf einer Lücke erfolgt ein Eilrücklauf in die Ausgangsstellung und ein Weiterteilen zur nächsten zu fräsenden Lücke.

1.1.1 Maschinen

Eine Aufstellung gebräuchlicher Maschinen zum Fräsen im Teilverfahren mit Angabe der größten lieferbaren Kapazitäten zeigt Tabelle 1.

Fabrikat	Größter Rotor \varnothing mm	Größte Rotorlänge mm	Größter Fräser \varnothing mm	Antriebsleistung kW
Bohle	875	1 750	450	2 x 50
Holroyd	630	1 008	500	44
Liebherr	350	600	395	80
Pfauter	350	600	350	38

Tabelle 1. Rotorfräsmaschinen für das Teilverfahren.

Es handelt sich bei den Maschinen meist um Maschinen mit horizontaler Werkstückachse, bei denen der Fräskopfträger die radiale Zustellbewegung auf Frästiefe macht, während die Werkstückspindel mit horizontaler Achse sowohl die Dreh- wie auch die axiale Bewegung zur Erzeugung von Steigung und Vorschub ausführt. Für kleinere Rotoren etwa bis 200 mm Durchmesser sind auch Maschinen mit vertikaler Werkstückachse im Einsatz, die sowohl im Teilverfahren wie auch im Wälzverfahren arbeiten können.

Bild 1 zeigt eine Auswahl der oben erwähnten Maschinen.

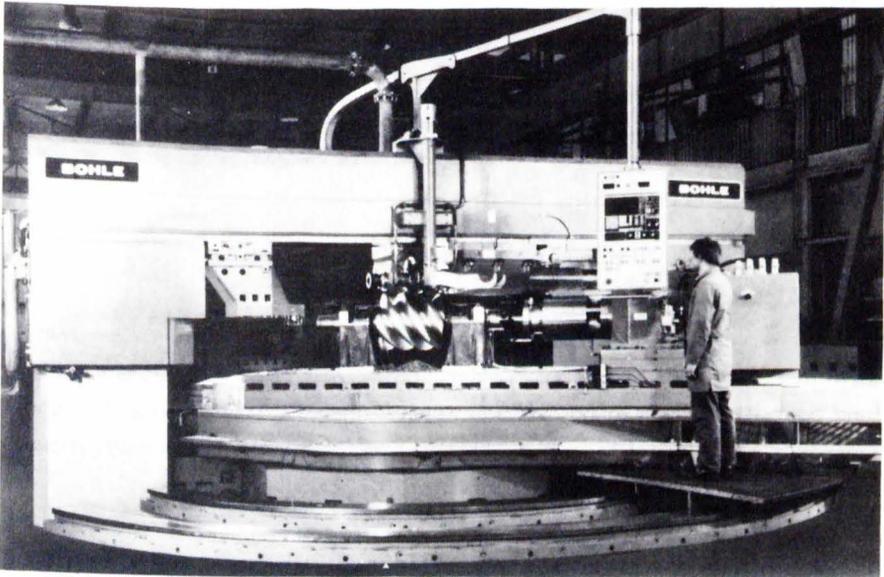


Bild 1a. Rotorfräsmaschine Bohle FU P 200 NC.
Größter Rotordurchmesser 875 mm.



Bild 1b. Rotorfräsmaschine PFAUTER.
Größter Rotordurchmesser 300 mm.

1.1.2 Werkzeuge, Fräsleistung

Die oben erwähnten Werkzeuge Schlagzahn und Fingerfräser werden nur noch in Ausnahmefällen benutzt, der Schlagzahn bei Prototyp-Herstellung oder Einzelfertigung, wo aus Kosten- oder Zeitgründen kein Scheibenfräser beschafft wird; der Fingerfräser dort, wo die zur Verfügung stehenden Maschinen für Scheibenfräser nicht kräftig genug sind.

Bild 2 zeigt die folgenden Scheibenfräser:

mit Schneidstoff HSS	1.1.2.1	hinterdreht
	1.2.2.2	hinterschliffen
	1.1.2.3	kreuzverzahnt, geklemmte Messer, Profil-Fasenschliff
mit Schneidstoff HM	1.1.2.4	hinterschliffen mit geklemmten, aufgelöteten Platten ohne Bild
	1.1.2.5	Profil-Fasenschliff mit ge- klemmten, aufgelöteten Platten
	1.1.2.6	Wendeplatten



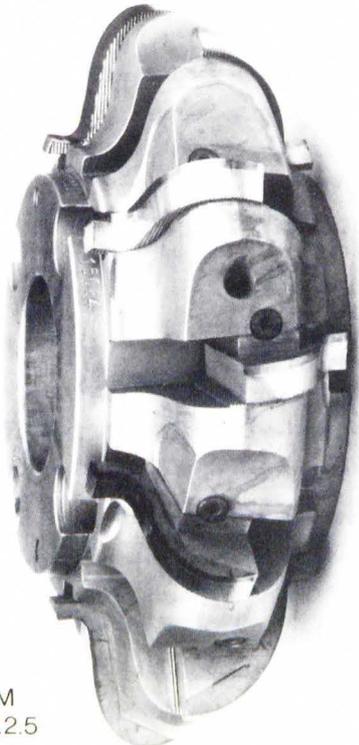
HSS
1.1.2.1



HSS
1.1.2.2



HSS
1.1.2.3



HM
1.1.2.5



HM
1.1.2.6

Vorfräser	Fertigfräser
1.1.2.1	1.1.2.2
1.1.2.3	1.1.2.4
1.1.2.5	1.1.2.5
1.1.2.6	

Tabelle 2. Anwendung der Scheibenfräser

Tabelle 2 zeigt welche Fräser sich besonders zum Vorfräsen und welche sich zum Fertigfräsen eignen.

Die erreichbare Fräsleistung beim Vor- und Fertigfräsen mit Scheibenfräsern wird am besten durch die Vorschubgeschwindigkeit S in $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ausgedrückt. Sie ergibt sich aus dem Produkt von Fräserdrehzahl n $[\text{min}^{-1}]$ mit dem Vorschub je Fräserumdrehung s_{FU} $[\text{mm/F.U.}]$

oder mit dem Vorschub je Fräuserschneide s_z $[\text{mm}]$ mal der Zahl z der Fräuserschneiden an gleicher Schnittstelle.

$$S = n \cdot s_{FU} \quad \text{oder} \quad S = n \cdot s_z \cdot z \quad [\text{mm/min}] \quad (1)$$

Die Fräserdrehzahl n hängt vom Fräserdurchmesser und der zulässigen Schnittgeschwindigkeit v ab.

$$n = \frac{v}{d_a \cdot \pi} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2)$$

Die Schnittgeschwindigkeit v $[\text{m/min}]$ ihrerseits ist abhängig von:

Zerspanbarkeit des Werkstückstoffes (gut, mittel)

Schneidstoff (HSS, HSS TiN, HM geschl., HM Wendepl.)

Bearbeitungsvorgang (Vorfräsen, Fertigfräsen)

Fräser-Schneidgeometrie (1.1.2 1-6)

Rotor-Lückenquerschnitt (Größe, Form)

Die Tabelle 3 zeigt unter Berücksichtigung der vorgenannten Einflüsse Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe in Zahnlückenrichtung für das Vorfräsen, die als sicher anwendbar gelten können. Wenn größere Stückzahlen zu fertigen sind, ist eine Optimierung mit dem Ziel optimaler Wirtschaftlichkeit zu empfehlen. Die Zerspanbarkeit "gut" gilt für Werkstoffe wie C15 - C35, AISI C1141, AISI B1113, Meehanite C,

ES 66; die Zerspanbarkeit "mittel" für C45, Meehanite D, G6G50.
Bei Verwendung von TiN-beschichteten Werkzeugen könnte mit ca. 20 %
höherer Schnittgeschwindigkeit gefahren werden.

Scheibenfräser		1.1.2.1 HSS hinterdreht		1.1.2.3 HSS Profil-Fasenschliff		1.1.2.5 HM Profil-Fasenschliff		1.1.2.6 HM Wendeplatten	
Rotor- durchmesser d_s mm	Zerspan- barkeit	Schnitt- geschwindigkeit V m/min	Vorschub S mm/min	Schnitt- geschwindigkeit V m/min	Vorschub S mm/min	Schnitt- geschwindigkeit V m/min	Vorschub S mm/min	Schnitt- geschwindigkeit V m/min	Vorschub S mm/min
50-100	gut	30	70						
	mittel	28	63						
100-127	gut	28	63			140	360		
	mittel	25	56			125	320		
127-160	gut	25	56	32	70	125	320		
	mittel	22	50	28	63	110	280		
160-200	gut	22	50	28	63	110	280		
	mittel	20	45	25	56	100	240		
200-250	gut	20	45	25	56	100	240	140	350
	mittel	18	40	22	50	90	200	120	300
250-350	gut			22	50	90	200	130	230
	mittel			20	45	80	160	100	200

Schnittgeschwindigkeit und Vorschub für das Vorfräsen mit Scheibenfräsern

Tabelle 3

Die Vorschübe in Zahnlückenrichtung S ergeben sich aus dem zulässigen Vorschub je Fräserzahn s_z mal der Anzahl der Fräaserschneiden an gleicher Schnittstelle mal der Fräserdrehzahl.

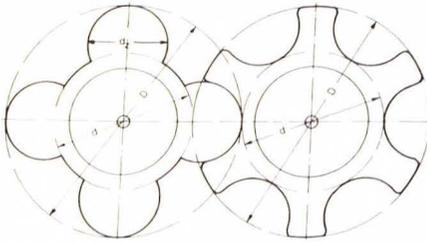
Für Fräser: 1.1.2.1 $s_z = 0,08$ mm/Zahn Zähnezahl $i = 20$

1.1.2.3 $s_z = 0,09-0,1$ " " $i = 16$

1.1.2.5 $s_z = 0,3-0,4$ " " $i = 12$

1.1.2.6 $s_z = 0,3-0,4$ " " $i = 20$

Bei der Wahl der Schnittwerte ist auch noch zu prüfen - insbesondere bei Hartmetall-Werkzeugen -, ob die erforderliche Antriebsleistung zur Verfügung steht. Hierzu kann man eine empirisch ermittelte Faustformel benutzen, wonach die Zerspanung von 15 cm^3 Stahl in der Minute 1 kW Fräsleistung erfordert. Das Spanvolumen je Minute ergibt sich aus dem Vorschub $\cdot \text{min}^{-1}$ $[\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}]$ mal dem Lückenquerschnitt im Normalschnitt in cm^2 . Den Lückenquerschnitt im Normalschnitt erhält man aus dem Lückenquerschnitt im Stirnschnitt (planimetriert oder gerechnet) mal \cos vom Schrägungswinkel β .



$D = 201 \text{ mm}$
 $d = 120 \text{ mm}$
 $d_z = 66 \text{ mm}$
 $B = 45^\circ$
 Werkstoff: C 35

Bild 3. Rotoren-Abmessungen.

Beispiel: Symmetrische Rotoren mit $D = 201 \text{ mm}$, $d = 120 \text{ mm}$, $d_z = 66 \text{ mm}$ sollen mit einem Fräser 1.1.2.5 gefräst werden. Der Vorschub in Lückenrichtung könnte bei guter Zerspanbarkeit laut Tabelle 3 280 mm/min betragen. Der Stirn-Lückenquerschnitt beim Female-Rotor beträgt

$$F_s \approx 0,6 \cdot \frac{\pi \cdot d_z^2}{4} \text{ [cm}^2\text{]} \quad (3)$$

Im Beispiel: $F_s \approx 20,52 \text{ cm}^2$. Der Lückenquerschnitt im Normalschnitt beträgt dann

$$F_n = F_s \cdot \cos B \quad (4)$$

$F_n = 20,52 \cdot \cos 45^\circ = 14,5 \text{ cm}^2$ und damit die benötigte Fräseleistung $N = \frac{14,5 \cdot 28}{15} = 27 \text{ kW}$.

1.1.3 Schärfverfahren und -einrichtungen

Bei den Werkzeugen 1.1.2.1-6 gibt es drei Verfahren, um nach Abstumpfung der Schneiden wieder zu scharfen, profilgerechten Schneiden zu kommen.

1.1.3.1 Schärfen an der Zahnbrust

Bei den hinterdrehten und hinterschlifften Fräsern 1.1.2.1 und 1.1.2.2 hat das Werkzeug seine Profilform für die gesamte Zahn-Nutzungslänge durch das Hinterdrehen bzw. Hinterschleifen erhalten. Das Schärfen geschieht daher nur an der Zahnbrust. Es kann somit auf einfachsten Werkzeug-Schärfmaschinen mit Teilung und Vorschub von Hand wie auf speziellen Fräser- oder Wälzfräser-Schärfmaschinen mit automatischem

Arbeitsablauf durchgeführt werden. Wenn auf Einrichtungen mit Handteilung geschärft werden soll, müssen die Fräser an ihren Zahnrücken vom Lieferanten teilungsgenau geschliffen sein, da die Zahnrücken als "Teilscheibe" beim Schärfen benutzt werden.

1.1.3.2 Profil-Fasenschliff

Bei den kreuzverzahnten Fräsern mit eingesetzten Messern wird das Schärfen durch einen Profil-Fasenschliff an der Freifläche vorgenommen. Hierzu braucht man Einrichtungen oder Maschinen, die nach einer sehr genauen Schablone dem Werkzeug bei jedem Scharfschliff erneut das gewünschte Profil geben.

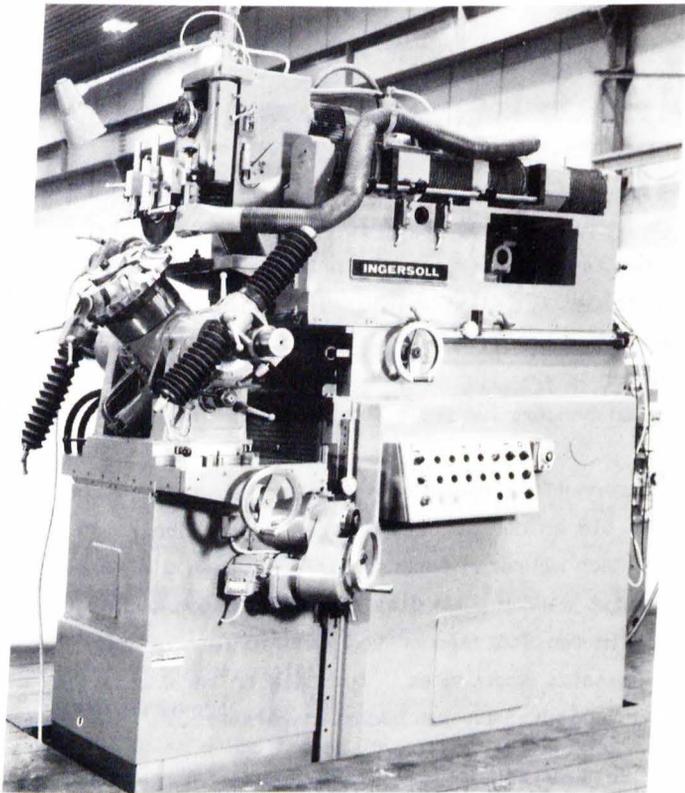


Bild 4. Fräuserschärfmaschine.

Zum Nachschärfen größerer Beträge, insbesondere beim Vorfräsen, können Maschinen, wie sie Bild 4 zeigt, Anwendung finden.

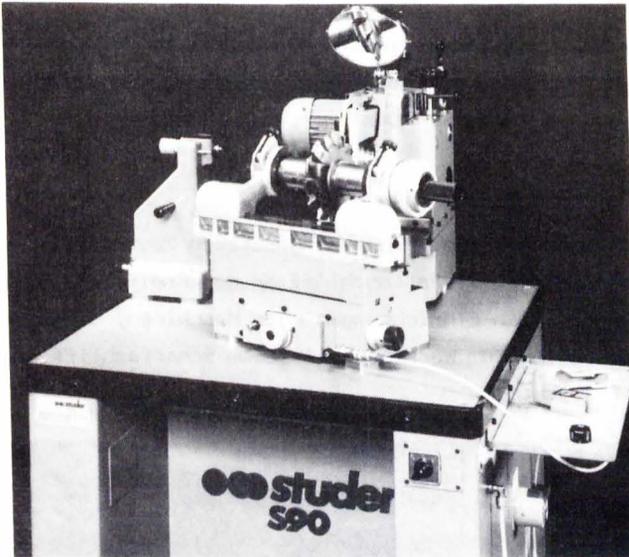


Bild 5. Fräuserschärfeinrichtung.

Für geringe Nachschliff-Beträge mit höchst möglicher Genauigkeit, insbesondere für Fertigfräser, sind Einrichtungen, wie sie Bild 5 zeigt, am besten geeignet. Bei beiden Einrichtungen werden die Fräserprofile nach Schablonen geschliffen.

Die Schablonen können für das Schärfen von Vor- und Fertigfräsern gleichermaßen benutzt werden.

Bei den Fräsern mit eingesetzten Messern haben diese auf ihren Rücken Rillen, die sie an den Stützzähnen des Fräserkörpers in ihrer Position fixieren. Nach mehreren Fasenschliffen müssen die Messer radial und axial versetzt werden. Um dies einfach und genau zu ermöglichen, sind die Rillen in den Stützzähnen von Zahn zu Zahn um ca. 0,2 mm in einer Steigung versetzt angeordnet. Zum axialen Versatz werden dann die Messer von einem Stützzahn zum nächsten versetzt.

1.1.3.3 Wenden von H.M.-Wendeplatten

Bei den Fräsern mit Wendeplatten gibt es kein Schärfen, sondern nur Wenden, Versatz und Austauschen von Wendeplatten. Je nach Bauart des Fräasers ist es auch möglich, Kassetten zu tauschen und so den Fräser wieder schneller zum Einsatz zu bringen.

1.2 Fräsen im Wälzverfahren



Bild 6. Wälzfräsen von Rotoren.

Das Wälzfräsen von Rotoren wurde erst wirtschaftlich möglich, als die Wälzfräser-Herstellung durch Rechnerprogramme zur Profilberechnung zeit- und kostenaufwendige, empirische Profilkorrekturen überflüssig machte. Dies begann ab 1972.

Beim Wälzfräsen werden - wie bei der Zahnradherstellung - das schneckenförmige Werkzeug mit dem Werkstück im Verhältnis $z_1 : z_0$ gleichförmig gedreht. Der Werkzeugträger führt eine parallel zur Werkstückachse verlaufende Vorschubbewegung aus. Aus dieser Axialbewegung und einer Zusatzdrehung des Werkstück-Tisches entsteht die Vorschubgröße in Zahnückenrichtung und der Schrägungswinkel.

1.2.1 Maschinen

Die Maschinen sind Spezial-Wälzfräsmaschinen, die für die besonderen Bedingungen beim Rotor-Wälzfräsen :

- kleine Werkstück-Zähnezahl
- großer Wälzfräser-Durchmesser
- großer Fräsquerschnitt
- langer Fräsweg
- hohe statische und themische Stabilität

konstruiert wurden.

Wälzfräsmaschinen gibt es für Rotoren von ca. 40 - 300 mm Rotorendurchmesser.

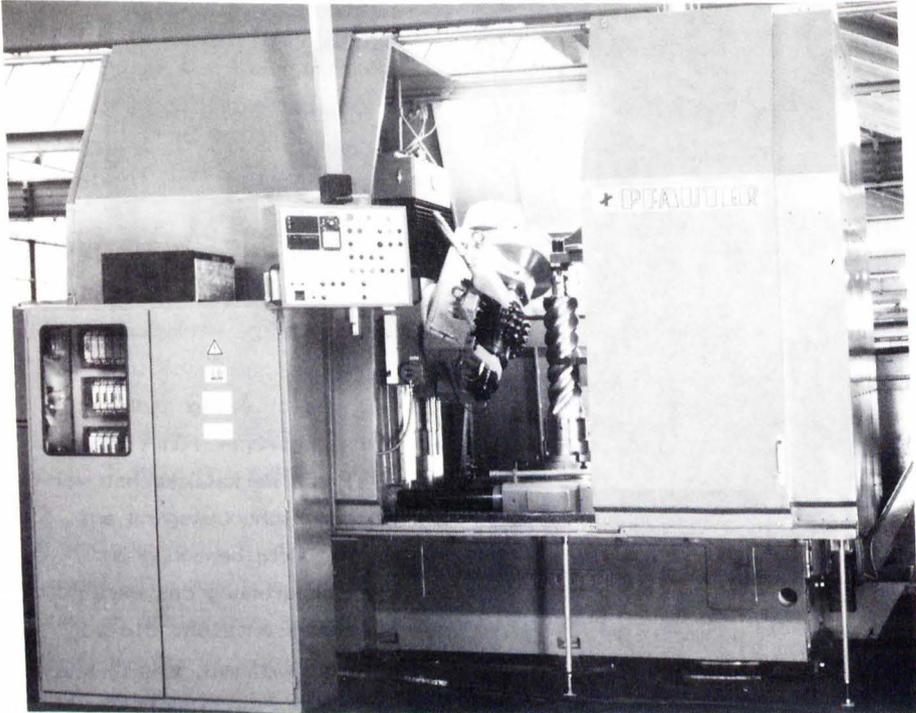


Bild 7. Rotoren-Wälzfräsmaschine.

1.2.2 Werkzeuge, Fräsleistung

Wälzfräser sind zylindrische Werkzeuge mit schraubenförmig angeordneten Zähnen sowie je nach Bauart achsparallelen oder schraubenförmigen Spannuten. Im Gegensatz zum Scheibenfräser wird beim Wälzfräser das Rotorenprofil durch eine Anzahl von Hüllschnitten längs der Eingriffslinie zwischen Fräser und Werkstück erzeugt. Die Zahl der Spannuten und damit die Zahl der Hüllschnitte ist bedingt durch die zulässige Abweichung des gefrästen Profils vom Soll-Profil. Fertigfräser brauchen mehr Spannuten als Vorfräser.

Die Wälzfräser-Abmessungen können aus Tabelle 4 entnommen werden. Bei den Wälzfräsern ist bei ihrer Länge eine Verschiebemöglichkeit von 1 Teilung eingerechnet.

Wälzfräser können in hinterdreher und hinterschliffener Ausführung in HSS und HM geliefert werden.

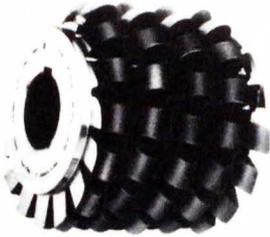
1: FETTE-Rotoren-Wälzfräser, Vorfräser , hinterdreht, mit 12 bzw. 14 achsparallelen Spannuten						
Rotor		Wälzfräser				
∅	L/D	Normalmodul	Profilhöhe	Baumaße mm		Spannuten
47/44,5	1,7	≈ 5,2	≈ 10,2	∅ 112 x 90 / 106 x ∅ 40		12
81,6		≈ 9,1	≈ 17,5	∅ 140 x 154 / 170 x ∅ 50		
102	1,65	≈ 11,4	≈ 22	∅ 170 x 184 / 200 x ∅ 60		
127,5		≈ 14,2	≈ 27,5	∅ 212 x 234 / 250 x ∅ 60		
163,2		≈ 18,2	≈ 35,5	∅ 265 x 299 / 315 x ∅ 80		
204		≈ 22,7	≈ 44	∅ 335 x 319 / 335 x ∅ 100		
				∅ 305 x 319 / 335 x ∅ 100		14

2: FETTE-Rotoren-Räumzahn-Wälzfräser, Vorfräser , hinterdreht, mit 20 Kopfschneiden						
Rotor		Wälzfräser				
∅	L/D	Normalmodul	Profilhöhe	Baumaße mm		
47/44,5	1,7	≈ 5,2	≈ 10,2	∅ 170 x 98 / 112 x ∅ 60		
81,6		≈ 9,1	≈ 17,5	∅ 200 x 154 / 170 x ∅ 80		
102	1,65	≈ 11,4	≈ 22	∅ 212 x 196 / 212 x ∅ 80		
127,5		≈ 14,2	≈ 27,5	∅ 236 x 234 / 250 x ∅ 80		
163,2		≈ 18,2	≈ 35,5	∅ 280 x 299 / 315 x ∅ 100		
204		≈ 22,7	≈ 44	∅ 335 x 319 / 335 x ∅ 100		
				∅ 305 x 319 / 335 x ∅ 100		

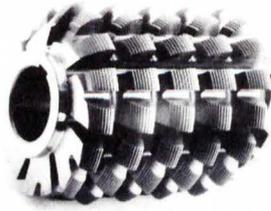
3: FETTE-Rotoren-Wälzfräser, Fertigfräser , hinterschliffen, mit 16 Spannuten						
Rotor		Wälzfräser				
∅	L/D	Normalmodul	Profilhöhe	Baumaße mm		
47/44,5	1,7	≈ 5,2	≈ 10,2	∅ 140 x 74 / 90 x ∅ 60		
81,6		≈ 9,1	≈ 17,5	∅ 190 x 124 / 140 x ∅ 80		
102	1,65	≈ 11,4	≈ 22	∅ 236 x 154 / 170 x ∅ 80		
127,5		≈ 14,2	≈ 27,5	∅ 265 x 196 / 212 x ∅ 100		
163,2		≈ 18,2	≈ 35,5	∅ 300 x 249 / 265 x ∅ 100		
204		≈ 22,7	≈ 44	∅ 335 x 299 / 315 x ∅ 100		
				∅ 305 x 299 / 315 x ∅ 100		

4: FETTE-Rotoren-Wälzfräser, Fertigfräser , hinterschliffen, mit 17 Messerschienen						
Rotor		Wälzfräser				
∅	L/D	Normalmodul	Profilhöhe	Baumaße mm		
163,2	1,65	≈ 18,2	≈ 35,5	∅ 280 x 250 / 300 x ∅ 100		
204		≈ 22,7	≈ 44	∅ 335 x 305 / 355 x ∅ 100		
255		≈ 28,3	≈ 55	∅ 400 x 369 / 425 x ∅ 100		

Tabelle 4. Wälzfräserabmessungen.



1.2.2.1



1.2.2.2



1.2.2.3



1.2.2.4

- 1.2.2.1 = HSS massiv hinterdreht
 1.2.2.2 = HSS Räumfräser hinterdreht
 1.2.2.3 = HSS massiv hinterschliffen
 1.2.2.4 = HSS Messerschienen hinterschliffen
 1.2.2.5 = HM hinterschliffen ohne Bild

Bild 8. Wälzfräser.

Bild 8 zeigt die folgenden Ausführungen von Wälzfräsern:

- mit Schneidstoff: HSS 1.2.2.1 hinterdreht massiv
 1.2.2.2 Räumfräser hinterdreht
 1.2.2.3 hinterschliffen massiv
 1.2.2.4 Messerschienen hinterschliffen

mit Schneidstoff: HM 1.2.2.5 hinterschliffen ohne Bild

Die Fräser 1.2.2.1 und 1.2.2.2 werden als Vorfräser, die Fräser 1.2.2.3, 1.2.2.4 und 1.2.2.5 als Fertigfräser eingesetzt.

Eine zum Fräsen mit Scheibenfräsern vergleichbare Größe für die Fräseleistung ist die Vorschubgeschwindigkeit in Zahnlückenrichtung

$$S = n \cdot s_B \quad [\text{mm min}^{-1}] \quad (5)$$

$$n = \text{Fräserdrehzahl} \quad [\text{min}^{-1}]$$

s_B = Vorschub pro Werkstückumdrehung in Zahnlückenrichtung

$$s_B = \frac{s_{ax}}{\cos \beta} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

Die Schnittgeschwindigkeit $v = d_a \cdot \pi \cdot n$ [m/min] (7)

hängt auch beim Wälzfräsen von den gleichen Faktoren ab wie beim Fräsen mit Scheibenfräser.

Schnittgeschwindigkeit und Vorschub für das Wälzfräsen		Vorfräsen				Fertigfräsen			
		Fräser 1.2.2.1		Fräser 1.2.2.2		Fräser 1.2.2.3 + 1.2.2.4 ○		Fräser 1.2.2.5	
Rotordurchmesser d_a mm	Zerspanbarkeit	Schnittgeschwindigkeit v m/min	Vorschub S_B mm/WU						
50-100	gut	50	1,0	50	1,4	60 ○	1,4	180	1,4
	mittel	45	1,0	45	1,4				
100-127	gut	45	1,0	45	1,4	55 ○	1,4	165	1,4
	mittel	40	1,0	40	1,4				
127-160	gut	40	1,2	40	1,5	50 ○	1,5	150	1,5
	mittel	35	1,2	35	1,5				
160-200	gut	35	1,2	35	1,5	45 ○	1,6	135	1,6
	mittel	30	1,2	30	1,5				
						40 +	1,7	120	1,7

S_B = Vorschub in Zahnrichtung - S_{ax} : $\cos \beta$

Tabelle 5

Tabelle 5. Schnittbedingungen für das Wälzfräsen.

Die Tabelle 5 gibt für das Vor- und Fertigfräsen im Wälzfräsverfahren Schnittwerte für die Fräser nach Tabelle 4 an.

1.2.3 Schärfverfahren und Einrichtungen

Die Wälzfräser, ob achsparallel- oder spiralgenutet, werden an ihrer Zahnbrust nachgeschärft. Hierzu können einfache Universal-Schärfmaschinen ebenso wie spezielle Wälzfräser-Schärfmaschinen verwendet werden.

1.3 Wirbeln im Teilverfahren

Das Wirbeln ist ein Verfahren, bei dem Hartmetallstähle in einem Ring angeordnet sind, der eingeschwenkt in den Steigungswinkel des Rotors mit zum Rotor exzentrischer Achse rotiert. Die Stähle schneiden dann kommaförmige Späne in den Zahnlücken des Rotors.

1.3.1 Maschinen

Das auf Bild 9 dargestellte Wirbelaggregat ist auf einer Ravensburg Basis-Maschine montiert. Die Abmessungen erlauben ein Wirbeln von Ro-

toren bis 450 mm Durchmesser, ca. 900 mm Länge. Das Wirbelaggregat hat eine Antriebsleistung von 56 kW.

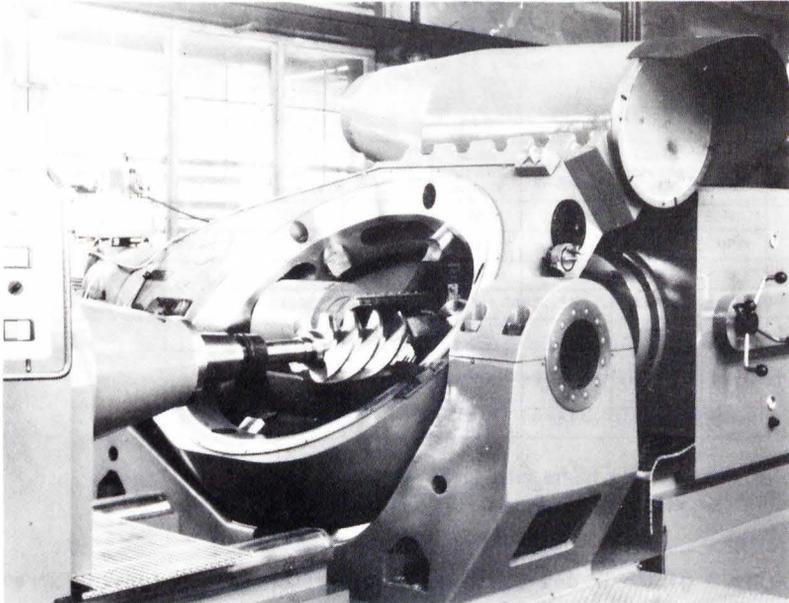


Bild 9. Rotoren-Wirbelaggregat.

1.3.2 Werkzeuge, Wirbelleistung

Als Werkzeuge dienen hier 6 HM-Stähle, die das Lückenprofil erzeugen. Sie müssen nach jedem Scharfschliff mittels eines 5-fach vergrößerten Profil-Strichbildes, das auf einem Bildschirm erscheint, genauestens im Werkzeug-Haltering befestigt werden. Die Stähle sind entweder Vollprofilstähle oder mit HM-Wendeplatten bestückte Stahlhalter.

Die Schnittleistung bei Vollprofil-Werkzeugen läßt sich aus der Schnittgeschwindigkeit $V = 200 \text{ m/min.}$ und dem gefahrenen Vorschub je Stahl von $0,25 - 0,3 \text{ mm}$ errechnen. Bei einem Spitzenkreis der Schneiden von 875 mm beträgt die Drehzahl des Werkzeug-Halteringes 74 min^{-1} , der Vorschub je Umdrehung des Werkzeug-Halteringes $6 \times 0,3 \text{ mm} = 1,8 \text{ mm}$ und somit der gefräste Vorschub je Minute $S = 133,2 \text{ mm min}^{-1}$.

1.3.3 Schärfverfahren und Einrichtungen

Die Vollprofilstähle werden mit Profil-Fasenschliff auf einer Einrichtung geschärft, wie sie oben bereits beschrieben wurde (siehe Bild 4).

1.4 Schleifen im Teilverfahren

Das seit längerer Zeit praktizierte Fertigschleifen von Rotoren mit Korund-Schleifscheiben wurde in den vergangenen Monaten durch das Fertigschleifen mittels Vollprofilscheiben - mit kubischem Bornitrid beschichtet - bereichert. Bei diesem von der Firma Kapp, Coburg entwickelten Verfahren werden gehärtete und profilgeschliffene Stahlscheiben - mit Bornitrid von definierter Korngröße beschichtet - im Tiefschleif-Verfahren auf Kapp-Maschinen zum Einsatz gebracht.

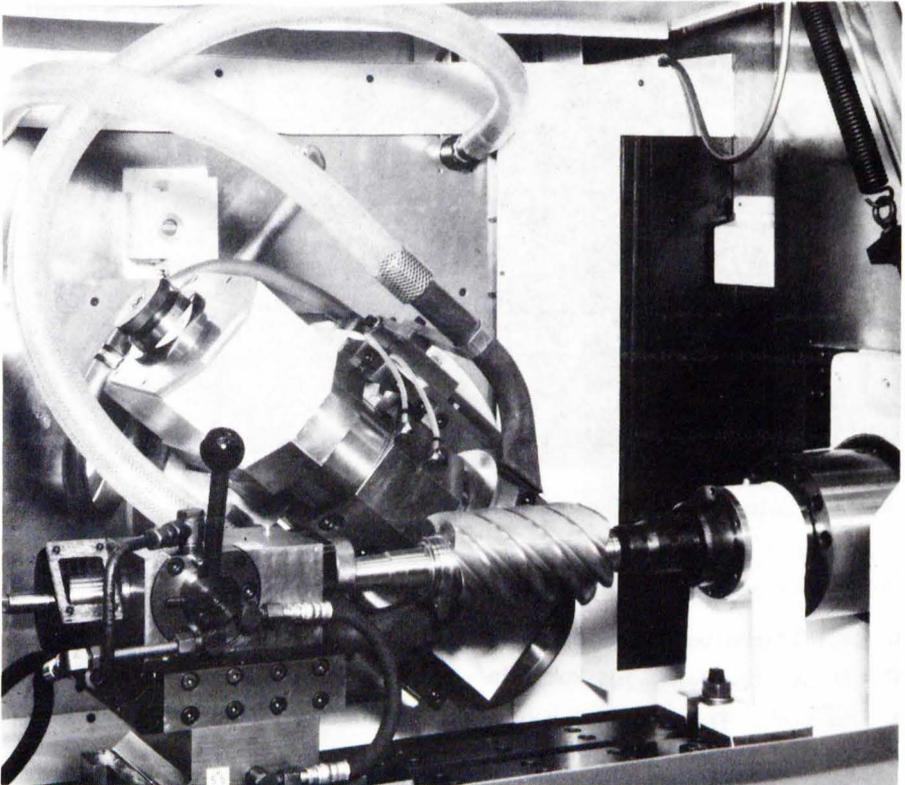


Bild 10. Rotoren-Schleifmaschine Kapp.
Arbeitsraum.

1.4.1 Maschinen

Die Kapp Rotornuten-Schleifmaschine RNS 481 CNC ist geeignet, um Rotoren bis zu Profilbreite von 80 mm im Normalschnitt und Rotorlänge bis ca. 300 mm zu schleifen. Die numerisch gesteuerte Maschine schleift in voll-automatischem Arbeitskreislauf Rotoren mit 1 bis 999 Nuten.

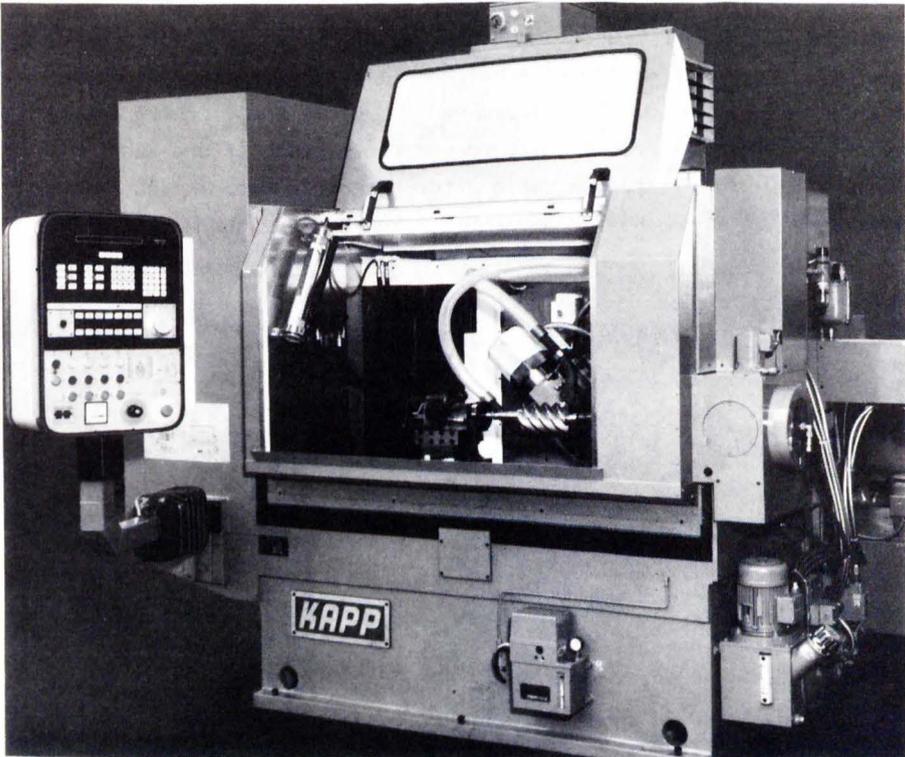


Bild 11. Rotoren-Schleifmaschine Kapp.

1.4.2 Werkzeuge und Schleifleistung

Die Schleifscheiben-Grundkörper sind gehärtet und profilgeschliffen. Der Ein-Schicht-Belag aus kubischem Bornitrid ist durch Nickel gebunden und steht in Korngrößen von 30-600 μm zur Verfügung. Ein Öffnen während des Schleifscheibeneinsatzes ist nicht erforderlich. Die Schleifleistung beträgt je nach Aufmaß 600-1000 mm min^{-1} .

1.4.3 Schärfverfahren und Einrichtungen

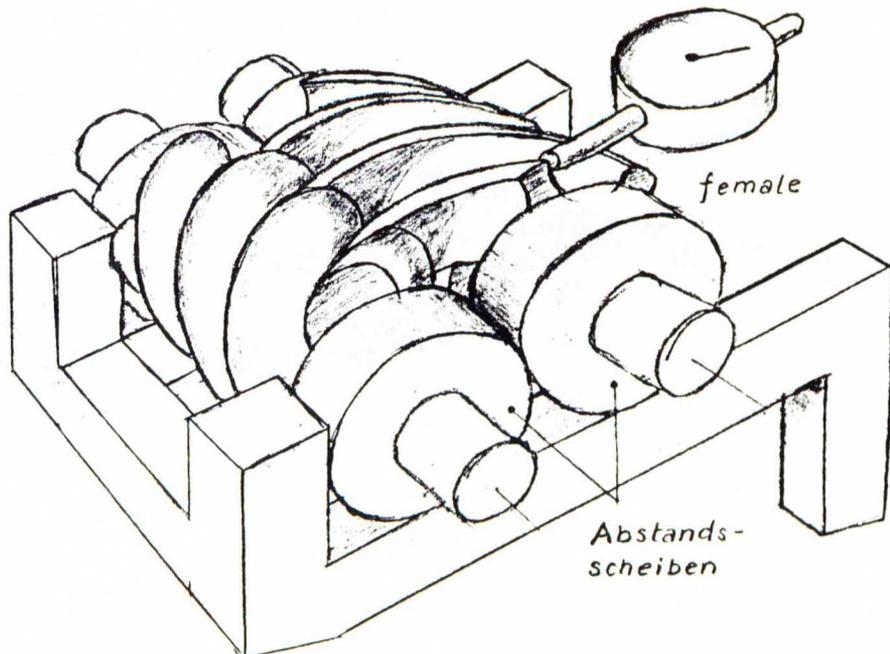
Ein Abrichten oder Öffnen der Schleifscheiben findet nicht statt. Nach Abnützung des Belages kann dieser im Herstellerwerk entfernt und durch einen neuen Belag ersetzt werden. Schärf- und Abricht-Einrichtungen entfallen daher.

2. Herstellgenauigkeit und Meßeinrichtungen

Bei den Rotoren im eingebauten Zustand ist der erreichbare Druck und der Wirkungsgrad umso höher je gleichmäßiger das gewünschte und erforderliche Spiel an den Dichtzonen über die ganze Länge und über alle Drehstellungen der Rotoren ist.

Es wird daher meistens als Endkontrolle nur das Spiel eines Rotorenpaares gemessen, bei kleinen bis mittleren Rotorengößen auf Soll-Achsabstand, bei großen Rotoren auch auf Ist-Achsabstand.

Zur Spielprüfung werden Spitzenböcke oder auf Achsabstand einstellbare Lagerungen zur Aufnahme der Rotoren benutzt. Eine besonders einfache und korrekte Einrichtung zur Spielmessung zeigt Skizze 2.



Skizze 2. Vorrichtung zur Spielmessung.

Hier werden auf die Lagersitze der Rotoren gehärtete und geschliffene Scheiben aufgeschoben, die so bemessen sind, daß sie beim Auflegen der Rotoren auf die geneigten Schienen der Prüfeinrichtung diese parallel auf dem gewünschten Achsabstand halten. Das Spiel läßt sich dann leicht am Umfang des Female-Rotors mittels Meßuhr feststellen, wenn der Male-Rotor festgehalten und der Female-Rotor hin- und hergedreht wird.

Meßmaschinen, die in der Lage sind, den Rundlauf, die Konizität, den Flankenlinienverlauf, die Teilung und das Profil der Rotorzähne zu vermessen, werden meistens zur Analyse unerwünschter Fertigungsabweichungen nach Art und Größe eingesetzt. Bild 12 zeigt eine derartige Maschine.

Der Meßablauf erfolgt programmgeführt, d.h. voll-automatisch über 4-Achsen-CNC-Bahnsteuerung nach Soll-Koordination oder Muster-Werkstück. Die Ergebnisse erhält man als tabellarisches Datenwerk oder als mehrfarbiges Plotterbild.

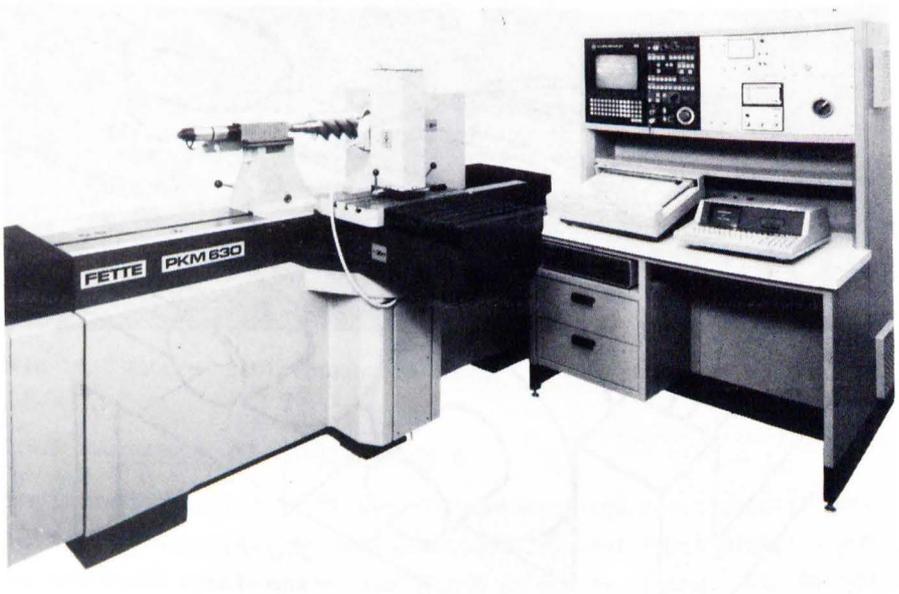


Bild 12. NC-3D Meßzentrum Fette.

Ein solches Plotterbild eines Female-Rotors 127 mm Durchmesser 200 mm lang zeigt Bild 13. Die Ergebnisse stammen nicht von einer Original-Messung, sie sind simuliert.

Art des Fehlers	Mögliche Fehlerursache	
	Teilverfahren	Wälzverfahren
Profil	Hersteller, Fasenschliff Rundlauffehler Taumelfehler	Hersteller, Scharfschliff Rundlauffehler Taumelfehler
Rundlauf	Spannvorrichtung Vorbearbeitung	Spannvorrichtung Vorbearbeitung
Konizität	Spannvorrichtung Fräsweg nicht parallel zur Rotorachse Wärmeverzug Masch.	Spannvorrichtung Fräsweg nicht parallel zur Rotorachse Wärmeverzug Masch.
Flankenrichtung Winkelabweichung f_{HB}	Spannvorrichtung Planfläche Rotor Wärmeverzug Masch. Einstellfehler Maschine	Spannvorrichtung Planfläche Rotor Wärmeverzug Masch. Einstellfehler Maschine
Flankenwelligkeit f_{Bf}	Fräserrundlauf (Wellentiefe = $f_r \cdot \sin \alpha$)	Vorschubgröße (Wellentiefe = $\frac{s_B^2}{4 d_f} \cdot \sin \alpha$)
Teilung	Werkstückverzug durch Teilverfahren	_____

Tabelle 6. Herstellfehler von Rotoren.

Tabelle 6 gibt eine Aufstellung der bei Rotorenschrauben möglichen Abweichungen und Fehlerarten und ihre möglichen Ursachen beim Fräsen im Teil- und Wälzfräs-Verfahren. Bei den Fehlerursachen fällt auf, daß der Vorbearbeitung und der Spannvorrichtung besonderes Augenmerk geschenkt werden muß. Die Aufnahme der Rotoren in der Spannvorrichtung sollte möglichst an den geschliffenen Kugellagersitzen erfolgen. Wenn in der Spannvorrichtung gegen eine Rotorplanfläche gespannt oder angelegt wird, ist zu bedenken, daß sich die Planlaufabweichung im Verhältnis Rotorlänge zu Planflächen-Durchmesser vergrößert auf die Flankenrichtung als Taumelfehler auswirkt.

Bei den Ursachen für die Fehler abhängig vom Fräsverfahren gibt es nur bemerkenswerte Unterschiede bei der Flankenwelligkeit und der Teilung. Welche möglichen Abweichungen beim Fräsen von Rotoren bis 200 mm Durchmesser im Teilverfahren und Wälzfräsverfahren auftreten können, ist aus Tabelle 7 zu entnehmen. Mit besonderen Anstrengungen können diese Werte auch noch unterschritten werden. Bei größeren Rotoren müssen, abhängig von den Abmessungen und den zur Verfügung stehenden Maschinen, auch höhere Abweichungen in Kauf genommen werden.

	Teilverfahren	Wälzverfahren
Profil	0,015 mm	0,015 mm
Rundlauf	0,005 mm	0,005 mm
Konizität	0,01 mm	0,01 mm
Flankenrichtung.	0,02 mm	0,02 mm
Teilung	0,02 mm	0,005 mm

Tabelle 7. Mögliche Abweichungen für Rotoren bis 200 mm Durchmesser beim Fräsen im Teilverfahren und Wälzverfahren.

3. Anwendung der Verfahren

Die vier beschriebenen Herstellverfahren für Schraubenverdichter-Rotoren lassen sich in ihrer Anwendung nicht exakt gegeneinander abgrenzen. Hierzu müsste jeder einzelne Anwendungsfall hinsichtlich Erfüllung der technologischen Anforderungen, Wirtschaftlichkeit, vorhandenem Maschinenpark und Arbeiterpotential sowie weiteren Randbedingungen genauestens untersucht werden. Eine grobe Klassifizierung der Verfahren könnte etwa wie folgt aussehen:

3.1 Anwendung des Teilverfahrens

Das Vor- und Fertigfräsen im Teilverfahren ist für Rotoren mit Durchmesser größer als 200 mm fast ausschließlich im Einsatz. Das Teilverfahren kann mit Scheibenfräser-Durchmessern auskommen (z. Zt. etwa max. 450 mm), die im Rahmen der Herstellbarkeit der Fräser auf den dazu benötigten Werkzeugmaschinen liegen. Bei Rotoren mit großen Durchmessern herrscht die Einzel- und Kleinserienfertigung vor. Niedrige Werkzeugkosten und durch den Profil-Fasenschliff einfache Profil-Anpassung begünstigen die Anwendung des Teilverfahrens. Bei im Teilverfahren gefrästen Rotoren wird meist noch Paarung vorgenommen. Für Rotoren mit kleinerem Durchmesser als 200 mm kommt das Teilverfahren noch - abhängig von den zu fertigenden Stückzahlen - zum Vorfräsen in Betracht.

3.2 Anwendung des Wälzfräsverfahrens

Das Wälzfräsen ist im Bereich von Rotoren bis ca. 200 mm Durchmesser für das Vor- und Fertigfräsen in Anwendung. Fertigwälzfräsen eignet sich besonders für Serienfertigung durch die Gleichmäßigkeit der gefrästen Rotoren mit engen Toleranzen. Volle Austauschbarkeit ist möglich. In bezug auf Teilungsgenauigkeit ist das Wälzfräsen unübertroffen. Durch Shiftmöglichkeit der Wälzfräser und damit höhere Standzeiten, sowie die Fertigungs-Gleichmäßigkeit kommt eine automatische Werkstückbeschickung beim Wälzfräsen am ehesten in Betracht. Die Grenzen der Anwendbarkeit des Wälzfräsens nach oben sind bisher durch die Wälzfräser-Abmessungen (bedingt durch die Herstellmöglichkeit und die Kosten) gezogen. Für Übergangsbereiche gibt es auch kombinierte Wälzfräs- und Formfräsmaschinen.

3.3 Anwendung des Wirbelns

Das Wirbeln ist für die Bearbeitung von Rotoren zwischen 200 und 400 mm in Anwendung. Wegen der sechs im Wirbelaggregat L 7 vorhandenen HM-Stähle liegt das Wirbeln in seiner Leistung höher als das Fräsen mit HSS-Scheibenfräsern, aber niedriger als das Fräsen mit HM-Fräsern. Ein Fertig-Wirbeln erfordert besondere Sorgfalt beim Fasen-Profilschliff und vor allem beim Befestigen der Stähle im Werkzeughaltering.

3.4 Anwendung des Schleifens mit CBN-beschichteten Scheiben

Die Einordnung des Fertigschleifens mittels CBN-beschichteten Schleifscheiben ist bisher noch nicht möglich, da das Verfahren noch zu neu ist, als daß schon endgültige Aussagen über seine Anwendung gemacht werden könnten.

Schlußbetrachtung

Beim Vergleich der Herstellverfahren für Schrauben-Rotoren wurden die Herstellmöglichkeiten: Hobeln, Wälzschälen, Rollen und Korund-Schleifen nicht behandelt, da sie sich bisher in der Anwendung nicht behaupten konnten. Auch bei den behandelten Verfahren ist festzustellen, daß sich nur das Fräsen im Teil- und im Wälzverfahren voll durchgesetzt haben. Das CBN-Schleifen ist noch in der Erprobungsphase. Durch Fortschritte auf dem Gebiet der NC-Abzieh-Einrichtungen für das Schleifen und Schärfen ist die Werkzeugherstellung einfacher und genauer geworden, auch das Korund-Schleifen könnte an Boden gewinnen. Die Steuerungstechnik der Maschinen erlaubt Korrekturen von unvermeidbaren Herstellungsabweichungen, die bisher durch Nacharbeit behoben wurden.

Allgemein ist der Einsatz von Hartmetall-Werkzeugen im Vormarsch. Mit dem Beginn der Massenherstellung von Schrauben-Rotoren für Auto-Klimaanlagen, Wärmepumpen und anderen Anlagen werden auch die Herstellverfahren wieder einen Entwicklungsschritt tun z.B. in Richtung Automatisierung.