

# Closed Loop beim Profilschleifen von Verdichterroten

Dipl.-Ing. S. Dirrichs, Hückeswagen

## 1. Einleitung

Die immer größeren Genauigkeiten an die Verdichterroten, vor allem in Bezug auf die Profilmgenauigkeit, stellen an die Fertigung immer höhere Anforderungen. Aus diesem Grund hat sich in den letzten Jahren das Profilschleifen der Rotoren durchgesetzt. Eingesetzt werden dabei neben galvanisch beschichteten CBN-Schleifscheiben vor allem keramisch abrichtbare Schleifscheiben, die den Vorteil einer hohen Flexibilität bezogen auf Profilmodifikationen angepasst an die jeweilige Auslegung des Verdichters. Für die Auslegung und Simulation der Eigenschaften des Verdichters stehen mittlerweile leistungsfähige Programme zur Verfügung. Der nächste Schritt ist es nun, ausgehend von der Auslegung, möglichst schnell und zielsicher in hoher Genauigkeit die Rotoren zu fertigen. Nur so ist es möglich, die vorhergesagten Eigenschaften des Verdichters auch in der Praxis zu erreichen.

## 2. Stand der Technik

Da es erfahrungsgemäß beim Schleifen des ersten Werkstückes zu Profilabweichungen aufgrund von geometrischen Maschinenungenauigkeiten kommt, muss der erste Rotor vermessen werden. Ausgehend von dem Ergebnis der Profilmessung wird dann das Profil korrigiert. Im weiteren wird auf die Vorgehensweise beim Profilschleifen der Rotoren mit abrichtbaren keramischen Schleifscheiben eingegangen.

### 2.1 Profilbeschreibung

Das Profil des Rotors wird durch Koordinatenpunkte beschrieben (Bild 1).

Die Vorgabe der Koordinaten kann dabei wahlweise im Achs – oder Stirnschnitt erfolgen. Jeder Profilmittelpunkt ist durch die X – und Y – Koordinate und den Normalenwinkel senkrecht auf die Oberfläche definiert. Der Koordinatenursprung liegt in Y – Richtung in der Werkstückachse und in X – Richtung in der Lückenmitte. Aus diesen Punktkoordinaten erfolgt im nächsten Schritt die Berechnung des Schleifscheibenprofils unter Berücksichtigung des Einschwenkwinkels und des aktuellen Schleifscheibendurchmessers. Dabei wird zu jedem Profilmittelpunkt ein Punkt an der Schleifscheibe berechnet. Gleichzeitig erfolgt eine Überprüfung der Berechnung, um unzulässige Bereiche an der Schleifscheibe zu erkennen und entsprechende Meldungen anzuzeigen.

No.	x	y	$\alpha$
1	-20.4948	52.0000	90.0000
2	-20.2801	52.0000	90.0000
3	-20.0651	52.0000	90.0000
4	-19.8502	52.0000	90.0000
5	-19.6354	52.0000	90.0000
6	-19.4205	52.0000	90.0000
7	-19.2056	52.0000	90.0000
8	-18.9908	52.0000	90.0000
9	-18.7760	52.0000	90.0000
10	-18.5610	52.0000	90.0000
11	-18.2909	51.9879	84.8716
12	-17.6513	51.8603	72.5966
13	-17.0824	51.6175	61.2608
14	-16.5966	51.2903	50.8632
15	-16.1944	50.9034	41.2096
16	-15.8734	50.4702	32.0456
17	-15.6298	50.0038	23.1067
18	-15.4632	49.5095	14.1339
19	-15.3813	49.0467	5.8711

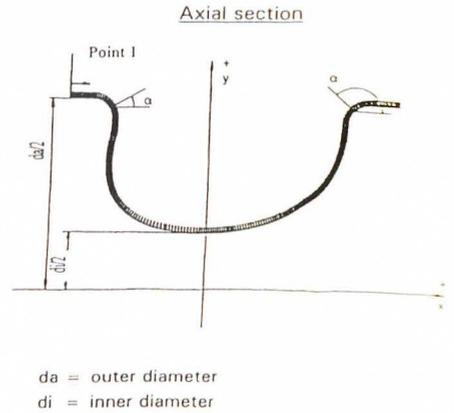


Bild 01: Profilbeschreibung

## 2.2 Abrichten der Schleifscheibe

Das Abrichten der Schleifscheibe erfolgt bahngesteuert mit zwei am Umfang mit Diamanten belegten Abrichtrollen (Bild 2).

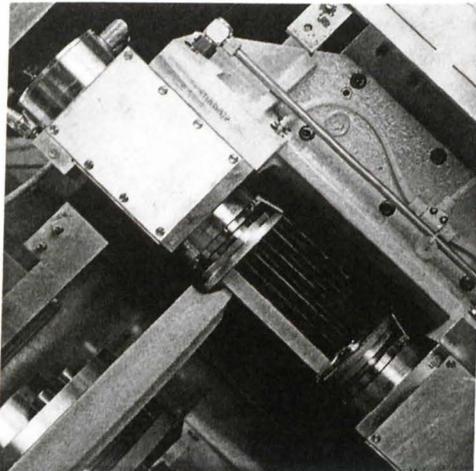


Bild 02: Abrichten der Schleifscheibe

Die Geometrie der Abrichtrollen wird über die Parameter Durchmesser, Breite und Radius bestimmt (Bild 3).

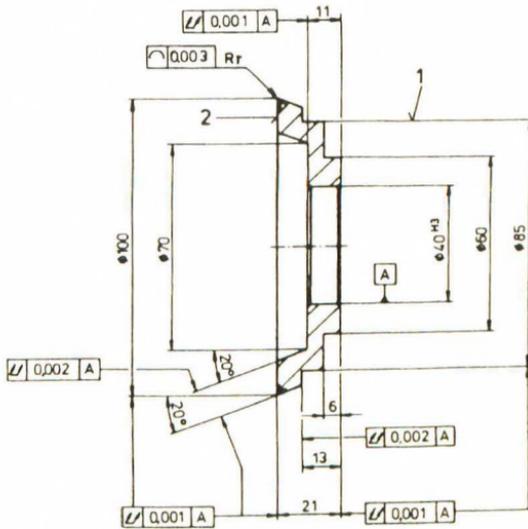


Bild 03: Geometrie der Abrichtrolle

Abgerichtet wird die linke Seite der Schleifscheibe mit der linken Rolle bis zum höchsten Punkt des Profils. Anschließend wird die rechte Seite der Scheibe mit der rechten Rolle abgerichtet.

## 2.3 Profilmessung

Nach dem Schleifen des ersten Rotors erfolgt die Kontrolle des Profils auf einem Messgerät (Bild 4). Zugeordnet zu den vorgegebenen Profilpunkten wird die Abweichung zu jedem dieser Punkte bestimmt.

Die Ausgabe des Ergebnisses erfolgt anschließend in Form eines Diagramms (Bild 5) und einer Punktliste (Bild 6).

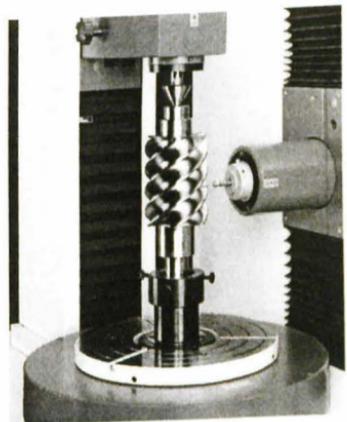


Bild 04: Messung eines Verdichterrisors

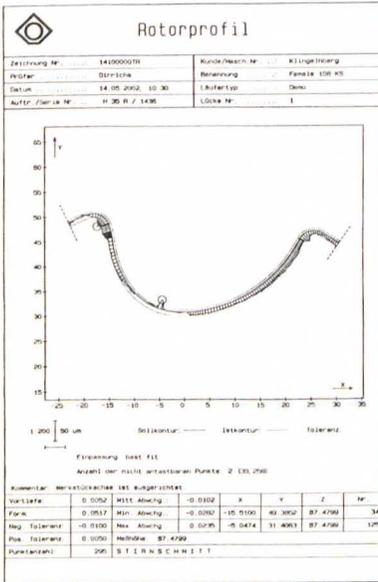


Bild 05: Ergebnis der Profilmessung – Diagramm

Klingelberg ROTORMESSUNG 14 May 2002 10:10:23

Zeichnungsnummer: 1410000018  
 Kunde/Bezeichnung: Klingelberg  
 Profil: Dürrsche  
 Benennung: Female 108 K5  
 Auftrags-/Serienummer: H 35 R / 1436  
 Laufertyp: Demo  
 Lücke Nr.: 1

Vortiefe: 0.002 mm  
 Methoden: 87.4799 mm  
 Punktzahl: 295  
 Formabweichung: 0.0017 mm  
 Eingassung: best fit  
 Min. Abwch.: -0.0282 -15.5100 49.3852 87.4799 mm 34  
 Max. Abwch.: -0.0235 -5.0474 31.4063 87.4799 mm 125

Kommentar: Merkmalrückache ist ausgerichtet.

Nr.	X	Y	Nx	My	K	Tol.	Abw.
	mm	mm					mm
1	-21.0424	48.8429	-0.427	0.904	*		-0.0091
2	22.9706	48.8768	0.425	0.905	*		-0.0077
3	22.7646	48.9730	-0.423	0.907	*		-0.0027
4	22.5583	49.0684	-0.418	0.909	*		-0.0017
5	22.3515	49.1629	-0.414	0.910	*		-0.0032
6	22.1444	49.2565	-0.410	0.912	*		-0.0025
7	21.9369	49.3493	-0.406	0.914	*		-0.0033
8	21.7290	49.4413	-0.402	0.915	*		-0.0020
9	21.5208	49.5323	-0.398	0.917	*		-0.0051
10	21.3121	49.6223	-0.395	0.919	*		-0.0097
11	21.1030	49.7116	-0.391	0.920	*		-0.0098
12	20.8936	49.7993	-0.387	0.922	*		-0.0011
13	20.6839	49.8874	-0.383	0.924	*		-0.0008
14	20.4738	49.9740	-0.379	0.925	*		-0.0016
15	20.2633	50.0598	-0.375	0.927	*		-0.0028
16	20.0524	50.1446	-0.371	0.929	*		-0.0018
17	19.8411	50.2286	-0.367	0.930	*		-0.0010
18	19.6296	50.3116	-0.363	0.932	*		-0.0010
19	19.4176	50.3938	-0.360	0.933	*		-0.0016
20	19.2054	50.4751	-0.356	0.935	*		-0.0046
21	18.9937	50.5646	-0.350	0.963	*		-0.0036
22	18.7823	50.6384	-0.343	0.987	*		-0.0076
23	18.5653	50.6779	-0.337	0.998	*		-0.0094
24	18.3564	50.6795	-0.346	0.999	*		-0.0107
25	18.1496	50.6488	-0.346	0.989	*		-0.0195
26	17.9478	50.5894	-0.341	0.973	*		-0.0079
27	17.7422	50.5040	-0.331	0.944	*		-0.0117
28	16.7537	50.3961	-0.415	0.910	*		-0.0175
29	16.5028	50.2688	-0.494	0.870	*		-0.0128
30	16.2643	50.1215	-0.567	0.824	*		-0.0209

Bild 06: Ergebnis der Profilmessung – Punktliste

## 2.4 Manuelle Korrekturen

Ausgehend von diesen Informationen erfolgte bisher die Profilkorrektur durch Abschätzen der Fehlerbereiche und -größe durch Vergleich der Punktliste mit dem Diagramm. Die so ermittelten Bereiche wurden anschließend durch manuelle Überlagerung von Korrekturen bearbeitet. Diese Vorgehensweise erforderte ein hohes Maß an Erfahrung in der Beurteilung des Ergebnisses und die entsprechende Umsetzung in eine Korrektur.

## 3. Programm ROTCOR zur automatischen Profilkorrektur

Um die oben genannten Probleme und Fehlerquellen auszuschließen, wurde das Programm ROTCOR entwickelt, mit dessen Hilfe die notwendigen Schritte für eine Profilkorrektur automatisiert werden.

### 3.1 Datenaustausch zwischen Schleifmaschine und Messgerät

Der Datenaustausch zwischen der Schleifmaschine und dem Messgerät ist in Bild 7 dargestellt. Die Datenbank der Werkstücke befindet sich auf dem PC der Schleifmaschine oder einem separaten Server. Aus den aktuellen Werkstückdaten werden mit Hilfe des Programms ROTCOR die entsprechenden Messdaten erstellt und an der Messmaschine mit den erforderlichen zusätzlichen Daten wie z.B. den Messwegen und Messaufgaben vervollständigt. Nach der Messung werden die Ergebnisse der Profilmessung abgespeichert und können dann zur Korrekturberechnung weiter verwendet werden. Die berechneten Korrekturen werden dann zurück an die Datenbank der Schleifmaschine übertragen und stehen somit für den nächsten Schleifvorgang zur Verfügung. Der Datenaustausch erfolgt über eine Netzwerkverbindung.

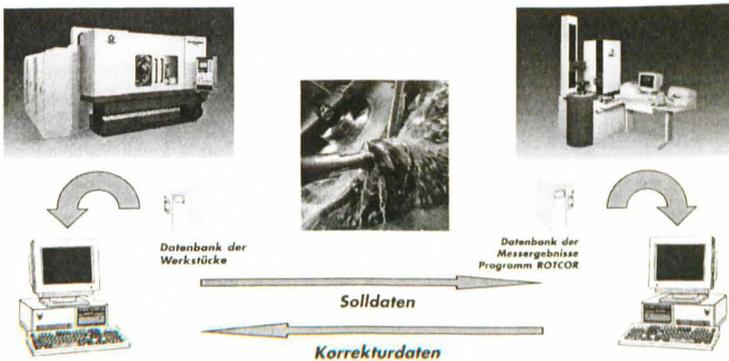


Bild 07: Datenaustausch zwischen Schleifmaschine und Messgerät

### 3.2 Profilmessung und Korrektur eines Rotors mit Aufmaß

Im Normalfall ist eine Messung und Beurteilung des Ergebnisses der Profilmessung nur dann möglich, wenn der Rotor auf den exakten Fußkreisdurchmesser fertiggeschliffen ist. Falls dabei die Profilabweichung außerhalb der Toleranz liegt, ist ein Nachschleifen mit den Korrekturdrehen nicht mehr möglich. Um zu verhindern, dass Ausschuss produziert wird, besteht die Möglichkeit einer Profilkorrektur mit ROTCOR bevor der Rotor fertiggestellt ist. Werkstücke, die noch nicht auf Solltiefe fertiggeschliffen sind und gegen das normale Sollprofil (auch Null-Profil genannt) ausgewertet werden, zeigen in ihren Abweichungen primär das Materialaufmaß (Bild 8). Zur qualitativen Beurteilung und zur Korrektur eignet sich eine solche Auswertung nicht.

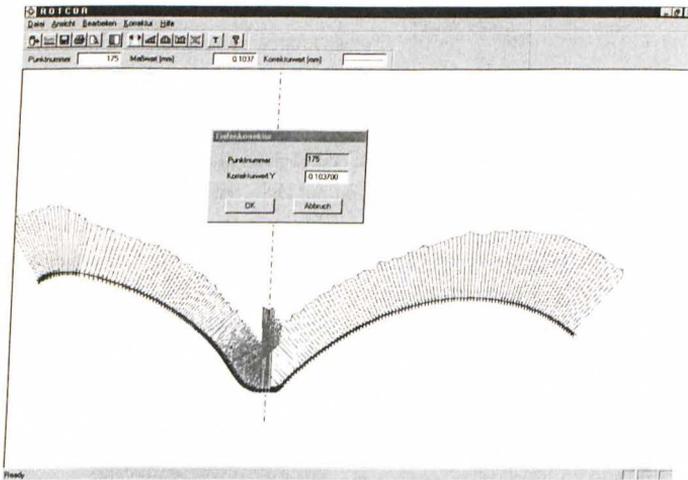


Bild 08: Profilmessung eines Rotors mit Aufmaß

Um trotzdem Korrekturen berechnen zu können, wird ein neues Sollprofil (auch Vortiefe-Profil genannt) erzeugt, um eine gleiche Auswertung zu erhalten, die derjenigen bei Solltiefe entspricht. Bei der Berechnung dieses Profils aus den Solldaten des Schleifscheibenprofils wird der Achsabstand zwischen Werkstückachse und Schleifscheibenachse um den „Vortiefe“ Wert verändert. Bild 9 zeigt die Auswertung der Messung aus Bild 8 gegen das neu berechnete Vortiefe-Sollprofil. Aus dieser Auswertung ist jetzt eine Korrekturberechnung möglich.

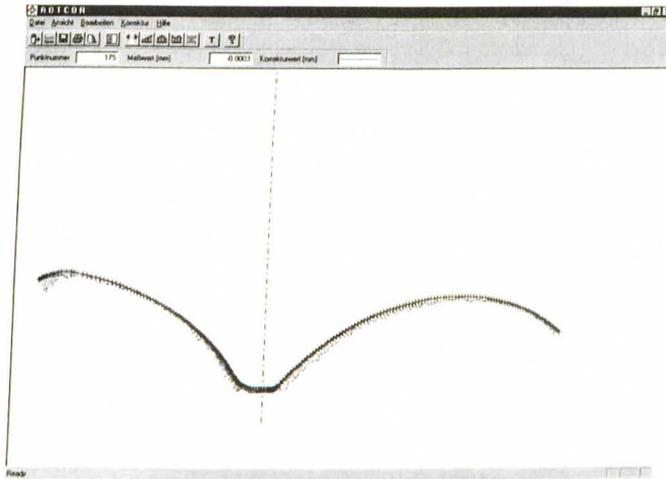


Bild 09: Auswertung der Messung gegen das Vortiefe-Profil

### 3.3 Korrektur der Geometrie der Abrichtrollen

Ein Faktor für Abweichungen im Profil kann ein Verschleiß der zum Abrichten der Schleifscheibe verwendeten Diamant-Abrichtrollen sein. Ein typischer hieraus resultierender Profilfehler ist in Bild 10 dargestellt. Zu erkennen ist zum einen ein Fehler in der Lückenweite des Rotors und zum anderen ein Versatz im Bereich des Rollenwechsels an dem höchsten Punkt der Schleifscheibe zwischen rechter und linker Abrichtrolle. Diese Abweichungen sind zwar auch durch direkte Profilkorrekturen durch Überlagerung der Abweichungen auf die Koordinaten des Grundprofils zu korrigieren, jedoch wird zum einen dabei das Originalprofil weit verlassen und zum anderen kann es durch Unstetigkeiten in dem korrigierten Profil zu Problemen bei der Berechnung des neuen Schleifscheibenprofils kommen. Aus diesen Gründen besteht die Möglichkeit in ROTCOR durch einfache Variation der Abrichtrollen Geometrieparameter Rollendurchmesser und Rollenbreite eine Minimierung der Abweichungen zu berechnen, ohne dass das Sollprofil verlassen wird. Das Ergebnis einer solchen Abrichtrollen Korrektur ist in Bild 11 dargestellt. Zu erkennen ist, dass alleine durch diese Korrektur der Rotor bereits in der Toleranz ist.



### Automatische Profilkorrekturen

Nach der oben beschriebenen Korrektur der Abrichtrollen kann in einem zweiten Schritt eine Profilkorrektur berechnet werden. Dazu werden für jeden Profilkpunkt die gemessenen Abweichungen mit umgekehrten Vorzeichen aufaddiert. Anschließend wird diese Kurve über eine Funktion geglättet, um die oben beschriebenen Probleme durch Sprünge und Unstetigkeiten bei der Berechnung der Schleifscheibenpunkte aus den korrigierten Profilkordinaten zu verhindern. Das Ergebnis einer solchen Korrekturberechnung ist in Bild 12 dargestellt. Selbstverständlich ist eine anschließende manuelle Veränderung der berechneten Korrektur mit graphischer Unterstützung bei Problemen der Schleifscheibenberechnung oder zum Ausblenden von Messwert Ausreißern möglich.

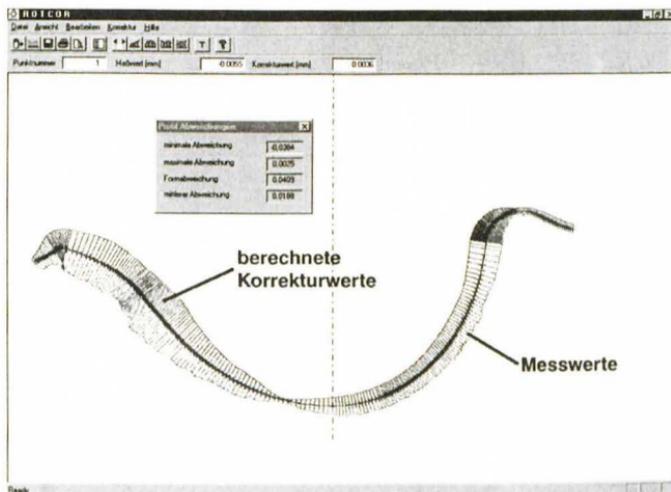


Bild 12: Ergebnis einer Korrekturberechnung

### 3.4 Kontrolle des Schleifscheibenprofils

Bevor das so korrigierte Werkstückprofil abgespeichert und somit der Schleifmaschine zum Nachschleifen des Rotors zur Verfügung gestellt wird, kann eine Kontrolle des Schleifscheibenprofils erfolgen. In Bild 13 ist das Ergebnis einer solchen Schleifscheibenberechnung zu sehen. Neben dem Profil der Schleifscheibe wird auch das Ergebnis der Transformation der Werkstückkoordinaten in die Schleifscheibenkoordinaten durch Ausgabe der problematischen Bereiche sichtbar gemacht. Neben den bereits beschriebenen Problemen durch Unstetigkeiten im Profil wird auch z.B. Unterschnitt an der Schleifscheibe kontrolliert und die entsprechenden Bereiche ausgegeben. Abhängig von dem Ergebnis kann eine Manipulation der Profilkorrektur notwendig sein.

Bild 14 zeigt das Ergebnis der oben beschriebenen Profilkorrektur. In Bild 12 ist noch eine gesamte Profilabweichung von ca. 40  $\mu\text{m}$  zu erkennen, die durch die Korrektur auf einen Wert von 16  $\mu\text{m}$  reduziert werden konnte.

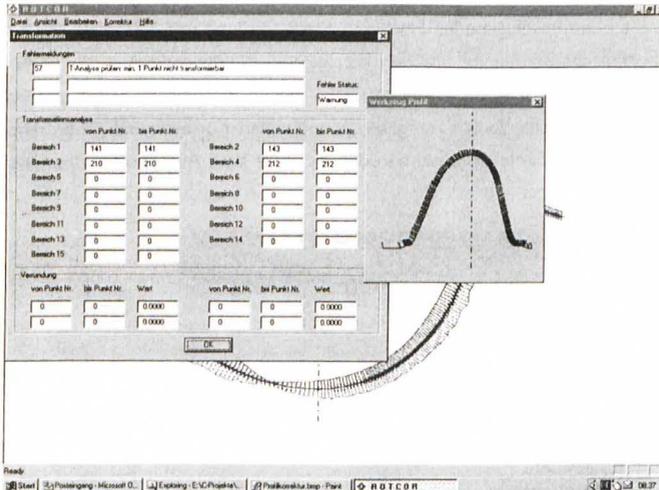


Bild 13: Ergebnis der Schleifscheibenberechnung

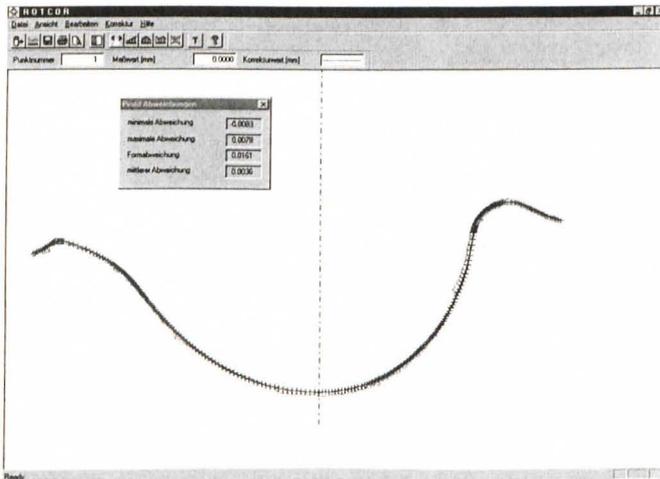


Bild 14: Ergebnis der Profilkorrektur

#### **4. Zusammenfassung**

In dem Vortrag wurde die bisherige Vorgehensweise bei der Profilkorrektur von Verdichterrotoren für das Profilschleifen dargestellt, die bisher umständlich und sehr stark von der Erfahrung des Bedieners abhängig war. Dadurch war die Treffsicherheit nicht immer sehr hoch und es konnten sehr leicht Fehler vorkommen. Durch die Entwicklung des Programms ROTCOR sind diese Probleme dadurch minimiert, dass das gesamte Know How für die verschiedenen Strategien der Profilkorrektur in das Programm eingeflossen sind und dadurch eine Automatisierung möglich ist, wie sie bereits in vielen Bereichen der Fertigung Stand der Technik ist. Durch diesen Closed Loop beim Profilschleifen von Verdichterrotoren ist somit ein weiterer Schritt in Richtung auf eine wirtschaftliche und den hohen Genauigkeitsanforderungen gerechte Fertigung gelungen.