

## Neue Anwendungen

## Theorie der geometrischen Optimierung von Rotoren

## Spaltströmungen

Prof. Dr.-Ing. Knut Kauder

---

### Inhalt

Luftversorgungssystem für Fahrzeugbrennstoffzellen .....	2
Schraubenlader im Vergleich der Aufladegeräte für kleinvolumige Ottomotoren...	3
Automatisierte Optimierung der Geometrie von Schraubenrotoren, Teil 1 .....	4
Untersuchungen zur Verbesserung des Füllvorgangs von Schraubenmotoren - Teil 1 .....	6
Beitrag zur Theorie eines abwälzenden Werkzeuges für Rotorverzahnungen von Schraubenmaschinen .....	8
Die GASSCREW - Experimentelle Ergebnisse zur Verifikation des Simulationssystems - Teil 1 .....	10
Lagerung von Schraubenkompressorrotoren mit nur einem einseitigen Kegelrollenlager auf der Druckseite .....	11
Der Spaltformwiderstand von Strömungen im Vakuum.....	14
Anhang .....	15

You will find the English title and abstract below the respective German section.

ISSN 0945-1870

# Luftversorgungssystem für Fahrzeugbrennstoffzellen

- Autor(en): Prof. Dr.-Ing. K. Kauder, Dipl.-Ing. J. Temming  
erschienen: 2001  
in: Schraubenmaschinen Nr.9, Forschungsberichte des Fachgebiets Fluidenergiemaschinen, ISSN 0945-1870, S. 5-14, Universität Dortmund 2001
- Zusammenfassung: Bei der Entwicklung alternativer Fahrzeugantriebe hat die Brennstoffzelle in den letzten Jahren eine vorherrschende Stellung eingenommen. Die Polymer-Elektrolyt-Membran Brennstoffzelle, PEMFC, die für automotiv Anwendungen bevorzugt verwendet wird, benötigt für einen optimalen Wirkungsgrad eine Druckluftversorgung. Als Compressor kommt derzeit insbesondere der Schraubenlader bzw. -compressor in verschiedenen Prototypenfahrzeugen zum Einsatz. Der Beitrag behandelt zunächst die unterschiedlichen Brennstoffzellentypen, den Systemaufbau und die Anforderungen an die mobile Anwendung der Brennstoffzelle. Für diesen speziellen Anwendungsfall werden Vorteile und Entwicklungsmöglichkeiten der Schraubenmaschine dargelegt. Davon ausgehend finden sich Konzepte zum Aufbau eines Compressor-Expander-Moduls (CEM) auf Basis der Schraubenmaschinen.
- Title: **Air management system for automotive fuel cells**  
Abstract: Fuel cells have attained a predominant position in the development of alternative automotive drives during the last few years. The Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC), preferred for auto-motive applications, requires compressed air for maximum efficiency. In most prototypes this is provided by twin-screw compressors. The article introduces the different types of fuel cells, and the system and requirements of mobile applications of fuel cells. The advantages and developmentpotential of screw compressors are described. Furthermore concepts of a compressor-expander module based on screw machines are presented and discussed.

# Schraubenlader im Vergleich der Aufladegeräte für kleinvolumige Ottomotoren

- Autor(en): Prof. Dr.-Ing. K. Kauder, Dipl.-Ing. M. Romba  
erschienen: 2001  
in: Schraubenmaschinen Nr.9, Forschungsberichte des Fachgebiets Fluidenergiemaschinen, ISSN 0945-1870, S. 15-26, Universität Dortmund, 2001
- Zusammenfassung: In neuerer Zeit hat die Aufladung von Ottomotoren wieder ein verstärktes Interesse gefunden, das sich auch in einer Anzahl serienmäßig gefertigter aufgeladener Motortypen widerspiegelt. Der vorliegende Beitrag beschreibt, nach einer Darstellung der Anforderungen an ein modernes Aufladegerät, den Stand der Technik bei serienmäßigen oder seriennahen Ladern für Verbrennungsmotoren. Daran anschließend erfolgt eine Bewertung der Systeme, durch die anhand einer Auswahlmatrix eine Vorauswahl geeigneter Lader für einen gegebenen Anwendungsfall erfolgen kann. Ausgehend von dem ermittelten Profil werden abschließend Zielrichtungen und Potentiale für die weitere Entwicklung von Schraubenladern beschrieben.
- Title: **Comparative study of twin-screw superchargers for small capacity Otto-cycle engines**
- Abstract: In the last few years the supercharging of Otto-cycle-engines has regained popularity, as demonstrated by a number of series-production engines. After listing the aims to be met by a modern supercharger the paper describes the technical status of mass-produced or close to production superchargers. This is followed by a comparative evaluation of the systems, enabling the reader to select possible solutions for a projected supercharger-engine-system by means of a comparison chart. The paper is concluded by a list of possible directions for further development and additional potential for twin-screw superchargers.

# Automatisierte Optimierung der Geometrie von Schraubenrotoren, Teil 1

- Autor(en): Prof. Dr.-Ing. K. Kauder, Prof. Dr. rer. nat. B. Reusch, Dipl.-Inform. S. Berlik, Dipl.-Ing. M. Helpertz
- erschienen: 2001
- in: Schraubenmaschinen Nr. 9, S. 27-46, ISSN 0945-1870, Universität Dortmund, 2001
- Zusammenfassung: Beispielhaft werden einzelne Kriterien zweidimensionaler Stirnschnitte von Schraubenrotoren mit Computerprogrammen optimiert, dargestellt durch die Kombination von Beziérsegmenten. Zunächst erzeugt ein Flankengenerator einen Zufalls-stirnschnitt, dessen Eigenschaften durch Manipulationsalgorithmen sukzessive verbessert werden. Bei einem Vergleich verschiedener Verfahren zur Gegenrotorberechnung hat sich das Verzahnungsgesetz als beste Alternative durchgesetzt, wenn die Profile eine geschlossene Eingriffslinie besitzen. Über die Einhaltung des Verzahnungsgesetzes hinaus muss die Krümmung der Flanke an jeder Stelle mit der relativen Bahnkurve des Gegenpunktes verträglich sein. Die Gegenüberstellung unterschiedlicher Optimierverfahren zeigt unter den gegebenen Randbedingungen eine Eignung einer erweiterten Form der kriechenden Zufallssuche nach Brooks [16] für diese Aufgabe. Testläufe bei vorgegebener Zähnezahl und festem Achsabstand führen zu unterschiedlich ausgeprägter Verbesserung der Schöpffläche (46,3 %), des bezogenen polaren Flächenträgheitsmomentes (13,8 %) und der Höhe der Kopfrundungsöffnung (45,2 %) bezogen auf eine zufällige Startform.
- Title: **Automated geometry-optimisation of rotors of twin-screw compressors, Part 1**
- Abstract: In order to demonstrate the approach, certain criteria for two-dimensional front sections of twin-screw rotors are optimised by means of a computer program. These are built up by the combination of beziér segments. Initially a flank generator produces a random front section, whose characteristics are improved gradually by manipulation algorithms. A comparison of different procedures for the calculation of the conjugate rotor has shown that the equations of the basic meshing conditions provide the best alternative, as long as the profiles have a continuous contact line. As well as meeting basic meshing criteria, the curvature

of the flanks of one rotor has to be compatible with that of its opposite number at every point. Under the present conditions, the discussion of different optimising procedures has revealed that an advanced form of Brooks' creeping random search [16] is suitable for this purpose. Test runs with a given number of lobes and a fixed axle-base led to variable improvements in the scoop area (46.3 %), the related polar moment of inertia (13.8 %) and the height of the blow hole (45.2 %) compared with the random start profile.

# Untersuchungen zur Verbesserung des Füllvorgangs von Schraubenmotoren - Teil 1

- Autor(en): Prof. Dr.-Ing. K. Kauder, Dipl.-Ing. C. Fost  
erschienen: 2001  
in: Schraubenmaschinen Nr.9, Forschungsberichte des Fachgebiets Fluidenergiemaschinen, ISSN 0945-1870, S. 47-62, Universität Dortmund, 2001
- Zusammenfassung: Frühere Untersuchungen zur Kammerfüllung des Schraubenmotors haben gezeigt, dass die Spaltmassenströme bereits während der Füllung der Arbeitskammer zu einer erheblichen Reduzierung der arbeitsfähigen Masse in der Kammer führen. Diese durch die Spalte abfließende Masse kann nur einen geringen oder keinen Beitrag zur Energiewandlung leisten. Daher erscheint es notwendig, die Rotorgeometrie im Hinblick auf eine mögliche Spaltoptimierung im Bereich der Kammerfüllung zu untersuchen. Eine Möglichkeit der Optimierung ist dabei eine Minimierung der wirksamen integralen Spaltbreite, die sich aus der Summe der einzelnen Spaltanteile zusammensetzt. In diesem Beitrag wird am Beispiel des asymmetrischen SRM-Profiles der Einfluss der Geometrie Größen HR-Umschlingungswinkel, Längen/Durchmesser-Verhältnis, Zähnezahls sowie inneres Volumenverhältnis auf die wirksame Spaltbreite im Bereich des Füllvorgangs untersucht. Dazu sind zunächst Kennzahlen zum Vergleich der unterschiedlichen Geometrien bei verschiedenen Betriebszuständen zu entwickeln. Anschließend lassen sich daraus Wirkungen verschiedener Geometrie Größen angeben. In einem nächsten Schritt ist dann der Einfluss der so gefundenen spaltbreitenoptimierten Geometrie Größen auf einen Eintrittsquerschnitt und damit die zu erwartende Drosselung am Eintritt zu untersuchen.
- Title: **Investigations about the improvement of the filling process of a screw-type engine - Part 1**
- Abstract: Former investigations of the filling process of a screw-type engine have shown a significant mass reduction in the working area because of gas leakage already during the filling process. These gas flows at this early time in the cycle are for the most part lost for energy conversion in the engine. Therefore it seems to be necessary to investigate the influence of a variation of the rotor geometry at the clearance interfaces during the filling process. One option

for optimisation is to minimize the operative gap width, which is generated by summarizing the widths of the different gaps. Here the influence of the variation of the male rotor wrap angle, the length/diameter ratio, the number of lobes and the inner volume ratio is investigated by the example of the asymmetrical SRM-Profil. For this purpose several key values for comparison of the geometric variations at different operating conditions must first be determined. In the following, consequences for the rotor geometry are determined by comparison of the calculated values. In a next step the influence of these rotor geometries with optimised clearances in the inlet area, in particular pressure loss, has to be investigated.

# Beitrag zur Theorie eines abwälzenden Werkzeuges für Rotorverzahnungen von Schraubenmaschinen

Autor(en): Doz. Dr. Dipl.-Ing. Jaromír Švígler  
erschienen: 2001  
in: Schraubenmaschinen Nr. 9, S. 63-72, ISSN 0945-1870,  
Universität Dortmund, 2001

**Zusammenfassung:** Die fortschreitende Entwicklung von Schraubenmaschinen führt zu Forschungsinhalten, welche noch vor kurzer Zeit als nicht bedeutend galten. Alle Vorgänge, welche wir vom Standpunkt der Statik, Kinematik, Dynamik, Flüssigkeitsströmung, Entstehung, Übertragung und Ableitung von Wärme, sowie weitere Vorgänge, welche mit diesen Grundereignissen zusammenhängen, der Prüfung unterziehen, spielen sich im Bereich der Energiewandlung der Schraubenmaschine, eventuell an ihrem Eintritt oder Austritt ab. Der Arbeitsraum, seine Entstehung, seine Gestalt und die in ihm ablaufenden Geschehnisse werden immer ein Problem darstellen, dem man ein kontinuierliches Interesse widmen sollte. Alle Veränderungen und Ansprüche, hervorgerufen durch Analysen von verschiedenen Standpunkten, sind durch Formgestaltung zu realisieren, eventuell durch Neugestaltung der bestehenden Maschine, also auch des Arbeitsraumes. Den dominanten Einfluss auf die Form des Arbeitsraumes und auf die in ihm ablaufenden Prozesse hat die Rotorverzahnung, die von Abwälzwerkzeugen erzeugt wird. Jeder gewünschten Abänderung der Rotorverzahnung, ihrer Form und ihres Profils muss eine solche Neugestaltung des Werkzeuges vorangehen, welche die gewünschte Abänderung am Profil oder an der Form der Rotorenzähne garantiert. Die Ergebnisse aller Analysen und Auswertungen wären gegenstandslos, soweit man nicht ihre konkrete Realisierung an der Schraubenmaschine durchführen könnte. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Gestaltung der Rotorverzahnung, er enthält eine allgemeine und ganz präzise Theorie der Entstehung und Herstellung eines Werkzeuges für diese Verzahnung. Dieses Werkzeug ist ein Abwälzfräser, eventuell ein Schleifwerkzeug. Die Theorie ist auf kinematischen Prinzipien gegründet, die im Gegensatz zur geometrischen Betrachtung einen einfachen und anschaulichen Vorgang bei der Gestaltlung des Werkzeugssfräasers ermöglicht. Die anschauliche und transparente Darstellung des Werkzeuges ermöglicht eine

schnelle Realisierung der notwendigen Veränderungen am Werkzeug, die das Erreichen der geforderten Veränderung der Verzahnung garantiert.

Title: **Contribution to the theory of toolgeneration for the rotor gearing of screw-type machines**

Abstract: The development of screw-type machines has led to research results, which did not until recently seem to be important. All the processes which are analysed from the point of view of statics, kinematics, dynamics, fluid flowing, heat generation, transfer and removal, and other phenomena connected with these basic processes, take place in the working chamber of the screw machine, in its inlet or outlet tracts. The working chamber, its formation, shape and the processes taking place in it, will always represent a problem to which continuing attention has to be paid. All the changes followed from the analyses have to be realised by modifying the present machines. This modification process also includes re-designing rotor teeth profiles and consequently the working chamber it self. Rotor gearing has the main influence on chamber shape and the processes taking place within it. Rotor gearing is produced by a generating tool. Every required change in the rotor gearing, its shape and profile, must be preceded by adaptation of the tool so as to guarantee the required change of the rotor gearing profile and its shape. Results of all analyses would be completely useless if the actual modifications to the screw machine could not be realised. The paper deals with designing screw machine rotor gearings and provides the general and particular theory of the design of a tool for gearing production. This tool is a generating cutter or a grinding or planing tool. The theory is based on kinematical principles, which, in contrast to the geometrical method, provide a simple and concrete process for the production of cutters. The concrete and rather simple theory of tool production makes possible a rapid realisation of necessary modifications to the tool, which guarantees the correct gearing changes.

# Die GASSCREW - Experimentelle Ergebnisse zur Verifikation des Simulationssystems - Teil 1

Autor(en): Prof. Dr.-Ing. K. Kauder, Dipl.-Ing. T. Unwerth  
erschienen: 2001  
in: Schraubenmaschinen Nr.9, ISSN 0945-1870, S. 73-86 ,  
Universität Dortmund, 2001

**Zusammenfassung:** Der vorgelegte Beitrag dokumentiert die ersten Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen an einer Heißgasschraubenmaschinen-Versuchsanlage (GASSCREW). Dargestellt ist zunächst der experimentelle Aufbau der Versuchsanlage sowie die zur Auswertung notwendigen Meßgrößen. Anschließend wird ein Überblick über die gewonnenen Ergebnisse gegeben und es folgt eine erste Auswertung zur Validierung der Simulation. Abschließend sollen Hinweise im Ausblick auf weitere Versuchsauswertungen sowie zum weiteren Vorgehen in der Entwicklung des GASSCREW-Antriebskonzeptes gegeben werden.

**Title:** **The GASSCREW - Experimental results for verification of the simulation system - Part 1**

**Abstract** The object of the following text is to describe the first experimental results obtained from the testing plant of a hot-gas screw-type engine (GASSCREW). First details of the construction of the plant as well as the parameters needed for evaluation are described. Furthermore the article gives an overview of the results followed by an interpretation in the light of previously performed simulations. Finally, prospects for further evaluation will be covered, as well as future plans for the GASSCREW as a drive concept.

# Lagerung von Schraubenkompressorrotoren mit nur einem einseitigen Kegelrollenlager auf der Druckseite

Autor(en): o.Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Laurenz Rinder, Dipl.-Ing. Dr. Manfred Grafinger

erschienen: 2001

in: Schraubenmaschinen Nr. 9, S. 87-92, ISSN 0945-1870, Universität Dortmund, 2001

Zusammenfassung: Aus Kostengründen und wegen der höheren Tragfähigkeit der Rollenlager ist es oft vorteilhaft, die Radial- und Axialkraft auf der Rotordruckseite mit einem einzigen einreihigen Kegelrollenlager aufzunehmen. Die Gestaltung des saugseitigen Loslagers erfolgt dann mit Zylinderrollen- oder Nadellagern. Im Kegelrollenlager wird auf Grund der geneigten Berührlinie durch die Radiallagerkraft auch eine innere Axialkraft verursacht, welche gegen den äußeren Achsschub wirkt. Damit der Rotor nicht vom Lager ablaufen kann, muss der Achsschub jedenfalls größer als diese erzeugte Axialkraft sein. Damit ist besonders der Nebenrotor mit seinem im allgemeinen geringen Achsschub bereits bei der Auslegung der Rotorgeometrie kritisch auf das Verhältnis der druckseitigen Radialkraft  $F_R$  zum Achsschub  $F_a$  zu betrachten.  $F_R / F_a$  muss je nach Kegelwinkel und Axiallastfaktor  $\gamma$  von Lagern üblicher Bauart kleiner als 1 bis 4,4 sein. Für diesen Anwendungsfall sind Lagerreihen mit großem Lastfaktor zu bevorzugen, da bei diesen durch den flacheren Kegelwinkel eine geringere Axialkraft entsteht und damit die Auslegung der Rotorgeometrie in Bezug auf die zu erwartenden Lagerkräfte weniger eingeschränkt wird. Die axiale Tragfähigkeit dieser Lagerreihen ist zwar geringer, als bei Lagern mit steilerem Kegelwinkel, jedoch wirkt als resultierende Axialkraft auf das Lager ohnedies nur die Differenz zwischen dem Achsschub und der durch die Radialkraft verursachten Axialkraft. Das Verhältnis von  $F_R / F_a$  lässt sich durch Variation der Rotorgeometrie wesentlich verändern. Der Hauptanteil des Achsschubes entsteht durch den Druck des verdichteten Mediums auf die Rotorstirnfläche. Die Größe der Radialkräfte wird hauptsächlich durch die Rotorlänge beeinflusst. Am wirksamsten ist somit eine Veränderung des Verhältnisses Rotordurchmesser zu Rotorlänge. Für die Verwendung eines einseitigen Kegelrollenlagers am Nebenrotor sind kurze Rotoren mit einem kleinen Verhältnis von  $L / D$  besser geeignet, als lange Rotoren mit großem  $L / D$ . Allerdings vergrößert sich mit

größer werdendem Durchmesser der Rotoren auch der Achsschub am Hauptrotor. Es zeigt sich, dass allein durch einen geringfügig vergrößerten Achsabstand bei gleich bleibender Zähnezahl und der damit durch die etwas weniger tief eingeschnittenen Zahnluken vergrößerten Stirnfläche am Nebenrotor ein günstiges Verhältnis von  $FR / Fa$  erreicht werden kann, ohne dabei den Achsschub am Hauptrotor wesentlich zu erhöhen. Eine Veränderung des Verschraubungsparameters hat nur sehr geringen Einfluss auf den Achsschub und ist daher zur Erzielung eines gewünschten Verhältnisses von  $FR / Fa$  nicht geeignet. Eine geometrisch ähnliche Vergrößerung aller Rotorabmessungen hat keinen Einfluss auf das Verhältnis der Lagerkräfte zueinander.

Title: **Bearing of screw compressor-rotors with only one tapered roller bearing on the pressure side**

Abstract: For financial reasons and because of the higher load-bearing capacity of rollerbearings, it is useful to cater for the radial and axial load on the rotor pressure side with tapered roller bearing. Then cylindrical or needle roller bearings are used for the inlet side movable bearing. In a tapered roller bearing, an internal axial load is also generated by the radial bearing force. It depends on the angle of the contact line and acts against the external axial load. To prevent the tapered roller bearing from coming apart, the external axial load always must be greater than the axial load caused by the radial load. Especially the female rotor with its small axial load has to be analyzed the relation between the pressure to determine side radial load  $FR$  and the axial load  $Fa$  already during the design phase of rotor geometry. With standard bearings  $FR / Fa$  has to be less than 1 to 4,4, depending on the angle of the contact line and the thrust factor  $Y$ . For this application, bearings with a greater thrust factor are to be favoured, in which a smaller axial load is generated because of the smaller contact angle. As a result the design of the rotor geometry in reference to the expected bearing loads is less limited. The axial load-bearing capacity of these bearings is smaller than in bearings with a bigger contact angle, but the resultant axial load is only the difference between the external axial load and the axial load caused by the radial load. The ratio of  $FR / Fa$  can be modified considerably by varying the rotor geometry. The main axial load results from the pressure of the compressed medium on the rotor front plane. The value of the radial load is influenced mainly by the rotor length. Consequently, a

modification of the relation between rotor diameter and rotor length is most effective. If a single tapered roller bearing is used on the female rotor, short rotors with a small ratio of  $L / D$  are more suitable than long rotors with large  $L / D$ . But the axial load on the male rotor bearing, which is also a design criterion, increases with bigger rotor diameters. However it appears that a favourable  $F_R / F_a$  ratio at the female rotor can be achieved by simply moving the centers slightly further apart and cutting the teeth correspondingly so as to enlarge the front plane. This solution does not materially increase the axial load on the male rotor. A modification of the helicoid parameter has only very small influence on axial loads and therefore, is not suitable for obtaining the desired ratio of  $F_R / F_a$ . A true to scale change of the dimensions of all rotor measurements has no influence on the ratio of the bearing loads to one another.

# Der Spaltformwiderstand von Strömungen im Vakuum

- Autor(en): Prof. Dr.-Ing. K. Kauder, Dr.-Ing. D. Wenderott  
erschienen: 2001  
in: Schraubenmaschinen Nr.9, ISSN 0945-1870, S. 93-104 ,  
Universität Dortmund, 2001
- Zusammenfassung: Im Vakuum lassen sich mit der Kontinuumsströmung, der Knudsenströmung und der molekularen Strömung drei qualitativ unterschiedliche Strömungsarten unterscheiden. Diesen verschiedenen Strömungsarten liegen unterschiedliche Modellvorstellungen zugrunde, aus denen ebenfalls drei unterschiedliche Ansätze zur mathematischen Formulierung dieser Strömungsarten resultieren. Zur einheitlichen quantitativen Beschreibung der verschiedenen Strömungsformen kann die Kennzahl des normierten Massenstroms dienen. Mit Hilfe dieser Kennzahl wird eine Flutkurvenschar, ein quantitatives Strömungskennfeld und eine Geometrievariation diskutiert. Für die ebenfalls betrachtete Spalthöhenvariation findet ein Spaltformwiderstand für Innenströmungen im Vakuum Anwendung.
- Title: **The clearance form resistance of flows in a vacuum**  
Abstract: The continuous flow, the Knudsen flow and the molecular flow can take place in a vacuum. These forms of flow possess totally different characteristics. Therefore the mathematical descriptions of these flows are based on different models. For a uniform quantification of these flows a characteristic number is used. The standardized mass flow helps to plot an array of characteristic curves, a characteristic pattern and a variation of the geometries of clearances. For the following discussion of clearance variations a gap form resistance is used.

## Anhang

- Energiewandlungsprinzip der Schraubenmaschine (Screw type machine working principle)
- Sachindex Schraubenmaschinen Heft 1/1993 bis Heft 9/2001