

F06 B 1550

TIB/UB Hannover

Verbundprojekt Aerospin – Entwicklung einer Baureihe von Hochleistungsspindeln

Untersuchungen, Konzeption, Entwicklung und Prototypenfertigung einer innovativen Baureihe von Hochleistungsspindeln

Förderung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förderkennzeichen: 02 PP 2275) gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT), betreut.

Kurzfassung

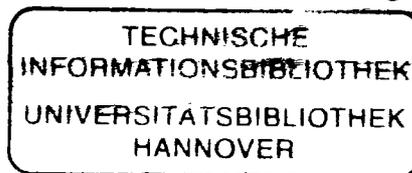
In diesem Projekt wurden je eine Baureihe von luftgelagerten Motorspindeln für die Mikrozerspanung und für die Hochpräzisionsbearbeitung konzipiert. Durch ein optimiertes Antriebskonzept konnten bisher nicht erreichbare Drehzahlbereiche erschlossen werden. Für den Bereich Hochpräzisionsbearbeitung wurde ein Demonstrator entwickelt. Zwei Demonstratoren mit Drehzahlen von 160.000 bzw. 300.000 U/min entstanden für den Bereich Mikrozerspanung. Anwendungsfälle für solche Spindeln sind in der Halbleiterindustrie, im Automobilbau, im Druckmaschinenbau und in weiteren Bereichen zu finden.

Projektdauer

01.06.2001 - 30.11.2004

Projektkoordinator

Dipl.-Phys. Georg Slotta
AeroLas GmbH
Tel.: 089 666089-34
E-Mail: gs@aerolas.de



02 PP 2275

7277

2278

" 2279

Ansprechpartner bei PTKA-PFT

Dipl.-Ing. Michael Petzold
Tel.: 0351 463-31469
E-Mail: michael.petzold@ptka.fzk.de

Verb.-Nr. 01020795

Projektbeteiligte

AeroLas GmbH, Unterhaching:
ate GmbH, Leutkirch:
Fraunhofer IPT, Aachen:
precise GmbH, Leichlingen:

Koordination, Gesamtsystem, Luftlager
Motorentwicklung
Projektleitung HP-Spindel
Fertigungstechnologie, Spannsystem

TIB/UB Hannover 89
128 674 040



Verbundprojekt Aerospin – Vorwort zur Pressemappe

Das Verbundprojekt „Aerospin - Entwicklung einer Baureihe von Hochleistungsspindeln“ wurde im November 2004 abgeschlossen. In dieser Pressemappe sind Veröffentlichungen zusammengestellt, die im Rahmen des Projekts entstanden sind.

Das Projekt Aerospin wurde vom BMBF gefördert. Eine Kurzbeschreibung des Projekts befindet sich auf der Website des Projektträgers unter:
<http://www.produktionsforschung.de/fzk/idcplg?IdcService=PFT&node=2433&T=VPDESC&ID=567>

Eine etwas ausführlichere Beschreibung stellt die Kurzfassung des anlässlich der Eröffnung der METAV in München gehaltenen Vortrags dar.

Überblick

Das Projekt wurde 2001 unter Beteiligung der folgenden Institutionen und Firmen gestartet:

AeroLas GmbH, Unterhaching:	Koordination, Gesamtsystem, Luftlager
ate GmbH, Leutkirch:	Motorentwicklung
INA Wälzlager Schöffler oHG, Herzogenaurach:	Fertigungstechnologie
Fraunhofer IPT, Aachen:	Projektleitung HP-Spindel

Nach einem Jahr schied INA aus; die entsprechenden Aufgaben wurden im weiteren Projektverlauf übernommen von der

precise GmbH, Leichlingen:	Fertigungstechnologie, Spannsystem
----------------------------	------------------------------------

Das Projekt wurde nach zwei Projektverlängerungen im November 2004 beendet.

Die öffentliche Darstellung des Projekts und der Projektergebnisse erfolgte in Veröffentlichungen in einschlägigen Fachzeitschriften sowie im Rahmen von Messen und Kolloquien.

Inhalt

Diese Pressemappe enthält folgende Dokumente:

- 1. Entwicklung einer Baureihe von Hochleistungsspindeln**
Kurzfassung sowie Folien zu einem Vortrag, der am 27.4.2004 auf einer Fachtagung zur erstmaligen Eröffnung der METAV in München gehalten wurde.
Die Kurzbeschreibung zeigt einen Gesamtüberblick über die Projektstruktur, Projektziele und die bis dahin erreichten Ergebnisse. Die Folien veranschaulichen in Schlagworten einige technische Aspekte.

2. **Aerospin – aerostatisch, synchron und hochgenau**
Beitrag in *wt Werkstatttechnik online*, Jahrgang 95 (2005) Heft 6
Dieser Beitrag stellt die Projektergebnisse umfassend dar. Es werden alle technischen Themen behandelt, die im Projektverlauf bearbeitet wurden.
3. **Für jeden den passenden Motor**
Beitrag zu *antriebstechnik*, Heft 9 2005
In diesem Beitrag wird detailliert die Entwicklung der Synchronmotoren im Projekt beschrieben.
4. **Design and Manufacture of a Carbon Fibre Spindle Rotor**
Beitrag zu *Science and Engineering of Composite Materials*, Juni 2005
Hier wird im Besonderen die Herstellung des Rotors der Hochpräzisionsspindel beschrieben. Besonderes Augenmerk liegt auf der Verarbeitung der dort eingesetzten Kohlefaser-Verbundwerkstoffe. In Englisch.
5. **„Aerospin“ Entwicklung einer Reihe von Luftlagerspindeln**
Abschlussbericht zum Teilvorhaben „Entwicklung einer hochpräzisen Schleifspindel“
Der Beitrag enthält eine sehr detaillierte Beschreibung des Teilprojekts „HP-Spindel“.

Die Projektbeteiligten bedanken sich beim BMBF, insbesondere aber bei der Projektträgerschaft für die – nicht nur finanzielle – Unterstützung, die die Bearbeitung des Projekts erst möglich machte.

Entwicklung einer Baureihe von Hochleistungsspindeln

Projektpartner

AeroLas GmbH, Unterhaching:	Koordination, Gesamtsystem, Luftlager
ate GmbH, Leutkirch:	Motorentwicklung
precise GmbH, Leichlingen:	Fertigungstechnologie, Spannsystem
Fraunhofer IPT, Aachen:	Projektleitung HP-Spindel

Projektziel und Projektgliederung

Im Rahmen des Projektes AEROSPIN wird je eine Baureihe für eine Motorspindel für die Mikrozerspanung und für die Hochpräzisionsbearbeitung konzipiert. Je Baureihe wird ein Demonstrator entwickelt und getestet. Die Spindeln werden luftgelagert. Durch ein optimiertes Antriebskonzept werden bisher nicht erreichbare Drehzahlbereiche erschlossen. Anwendungsfälle sind in der Halbleiterindustrie, im Automobilbau, im Druckmaschinenbau und in weiteren Bereichen zu finden.

Das Projekt ist in zwei Teilprojekte gegliedert. Im Teilprojekt „MZ – Spindel“ werden Spindeln zum Einsatz in der Mikrozerspanung entwickelt, die dem Anwendungsfeld entsprechend auch höchste Drehzahlbereiche erschließen. Im Teilprojekt „HP - Spindel“ wird eine Spindel für Hochpräzisionsbearbeitung entwickelt, welche bei niedrigeren Drehzahlen höchste Genauigkeit und Dynamik vereint.

Technische Rahmendaten

Alle Spindeln werden durch Synchronmotoren direkt angetrieben, welche gegenüber den insbesondere im Hochfrequenzbereich bisher eingesetzten Asynchronmotoren erhebliche Vorteile bieten. Auf gleichem Bauraum können so höhere Antriebsleistung bei geringerer thermischer Belastung des Rotors realisiert werden.

Der Einsatz von Synchronmotoren erfordert neue Entwicklungen in der Umrichtertechnologie. Diese Entwicklung wird von der Sieb & Meyer AG, Lüneburg unterstützt.

Die Luftlagerung basiert auf einer neuartigen Technologie, bei der Mikrodüsen mittels eines Laserstrahls in die Lagerfläche eingebracht werden. Sie zeichnet sich durch verbesserte dynamische Eigenschaften sowie geringen Luftverbrauch aus.

Die Spindeln sollen bestimmte technische Daten erreichen, die den Stand der Technik um einiges übertreffen. Durch den Einsatz der Spindeln in Werkzeugmaschinen können so neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Die Spezifikation für den jeweiligen Spindeltyp sind in den Tabellen dargestellt:

Spezifikation	MZ-Spindel
Drehzahl	Bis 300.000 U/min.
Lagerumfangsgeschwindigkeit	200 m/s
Rundlauffehler (an der Schneide)	< 3 μm
Luftverbrauch	< 15 NL/min
Werkzeugaufnahme	Automatischer Werkzeugwechsel
Antrieb	Synchronmotor

Tabelle 1: Spezifikation der Motorspindel für Mikrozerspanung

Spezifikation	HP-Spindel
Drehzahl	Bis 10.000 U/min.
Steifigkeit axial und radial	> 500 N/ μm
Rundlauf, Planlauf (an der Spindelnase)	< 0,1 μm
Luftverbrauch	< 30 NL/min
Werkzeugaufnahme	HSK 100 oder kleiner
Werkstückaufnahme	DIN 55026

Tabelle 2: Spezifikation der Motorspindel für Hochpräzisionsbearbeitung

Projektergebnis

Als Zwischenschritt in der Entwicklung der MZ – Spindel wurde ein Prototyp für Drehzahlen bis 160.000 U/min entwickelt. Der Prototyp erreicht die angestrebten Kennwerte, zeigt allerdings ein nicht befriedigendes Schwingungsniveau bei hohen Drehzahlen. Zur Zeit erfolgt eine Modifikation, um sowohl das Vibrationsverhalten zu verbessern als auch einen etwas höheren Drehzahlbereich zu erschließen.

Die MZ – Spindel für 300.000 U/min wurde fertiggestellt; zur Zeit erfolgt die Anpassung der Antriebstechnik (Umrichter).

Die HP – Spindel wurde fertiggestellt; hier wird zur Zeit die Antriebstechnik implementiert.

Des Weiteren wurden im Rahmen des Förderprojekts wichtige Technologiebausteine entwickelt, so zum Beispiel neuartige Mess- und Wuchtverfahren oder die Nutzung von Hochleistungsbeschichtungen auch im Luftlagerbereich. Die Anwendung dieser Technologiebausteine ist in einem weiten Gebiet möglich, was auch durch verschiedene Projekte in gänzlich anderen Bereichen (z.B. Automobil-, Hausgeräte- und Textiltechnik) belegt wird.

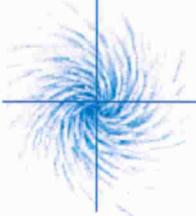
Entwicklung einer Baureihe
von Hochleistungsspindeln

Merkmale:

Neuartige Luftlagerung

Synchronmotor

Wasserkühlung



Projekt Aerospin

Projektbeteiligte

AeroLas GmbH

Unterhaching

Koordination, Gesamtsystem, Luftlager

ate GmbH

Leutkirch

Motorentwicklung

precise GmbH

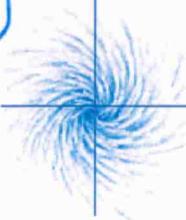
Leichlingen

Fertigungstechnologie, Spannsystem

Fraunhofer IPT

Aachen

Projektleitung HP-Spindel

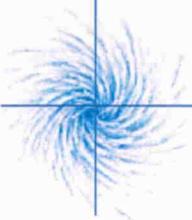


- Teilprojekt 1: Motorspindel für Mikrozerspanung
Formenbau
Halbleiterindustrie
Medizintechnik
- Teilprojekt 2: Motorspindel für Hochpräzisionsbearbeitung
Halbleiterindustrie
Solarindustrie
Präzisionsdrehbearbeitung

Teilprojekt 1

Spezifikationen der Hochleistungsspindel für
Mikrozerspanung:

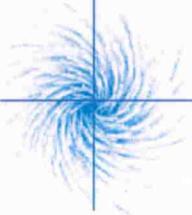
- Drehzahl bis 300.000 U/min
- Lagerumfangsgeschwindigkeit 200 m/s
- Rundlauffehler (an der Schneide) $< 3 \mu\text{m}$
- Luftverbrauch $< 15 \text{ NL/min}$

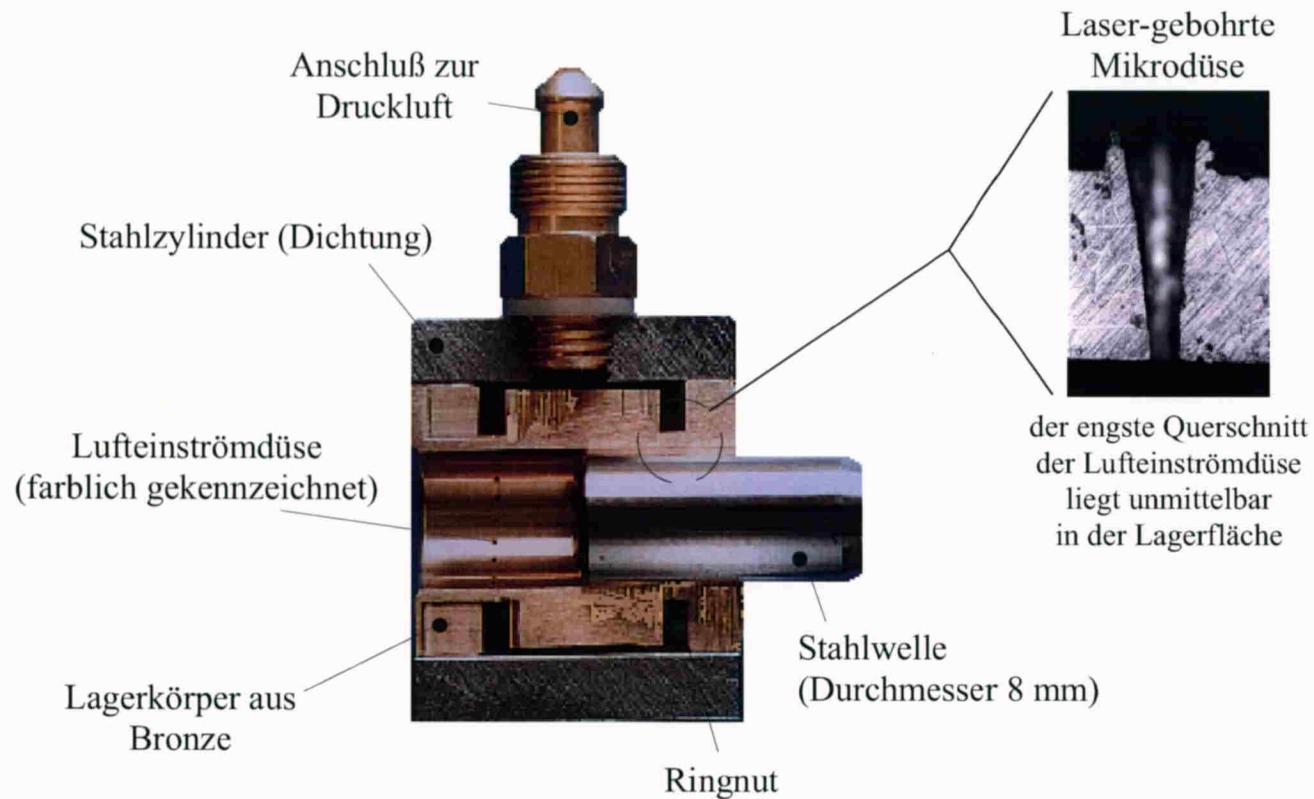


Teilprojekt 2

Spezifikationen der Hochleistungsspindel für
Hochpräzisionsbearbeitung:

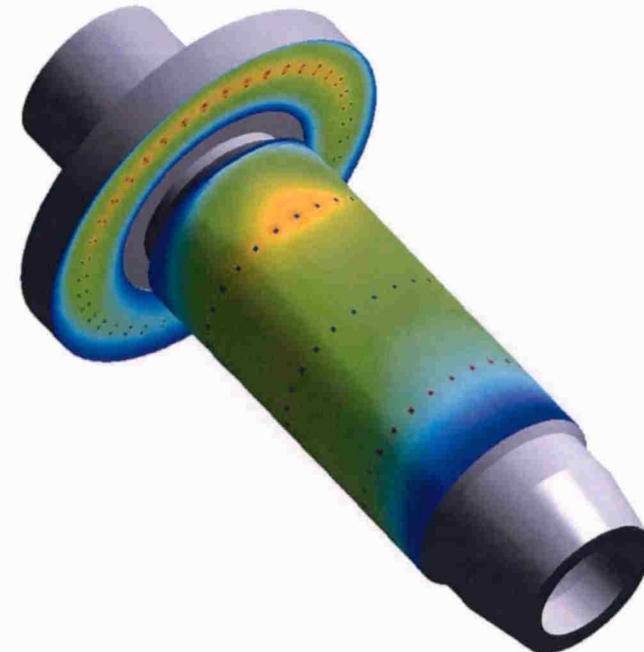
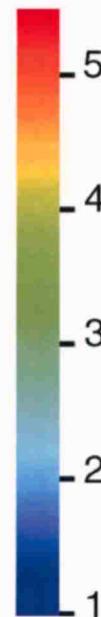
- Drehzahl 10.000 U/min
- Steifigkeit axial und radial $> 500 \text{ N}/\mu\text{m}$
- Rundlauffehler (an der Spindel Nase) $< 0,1 \mu\text{m}$
- Luftverbrauch $< 30 \text{ NL}/\text{min}$





Berechnung durch eigene Software:

- Tragkraft
- Steifigkeit
- Kippsteifigkeit
- Luftverbrauch
- Verformung
- Geometriefehler
- Aerodynamik

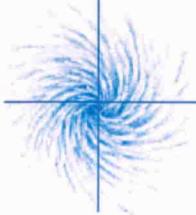


Luftlager mit Mikrodüsen (\varnothing 20 - 60 μm):

- Höhere Steifigkeit
- Bessere Dämpfung
- Geringerer Luftverbrauch

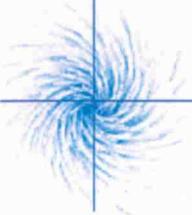
dadurch:

- Höhere Drehzahlen
- Geringere Unterhaltskosten



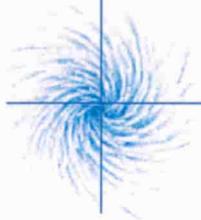
Einsatz von Synchronmotoren erfordert:

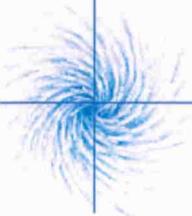
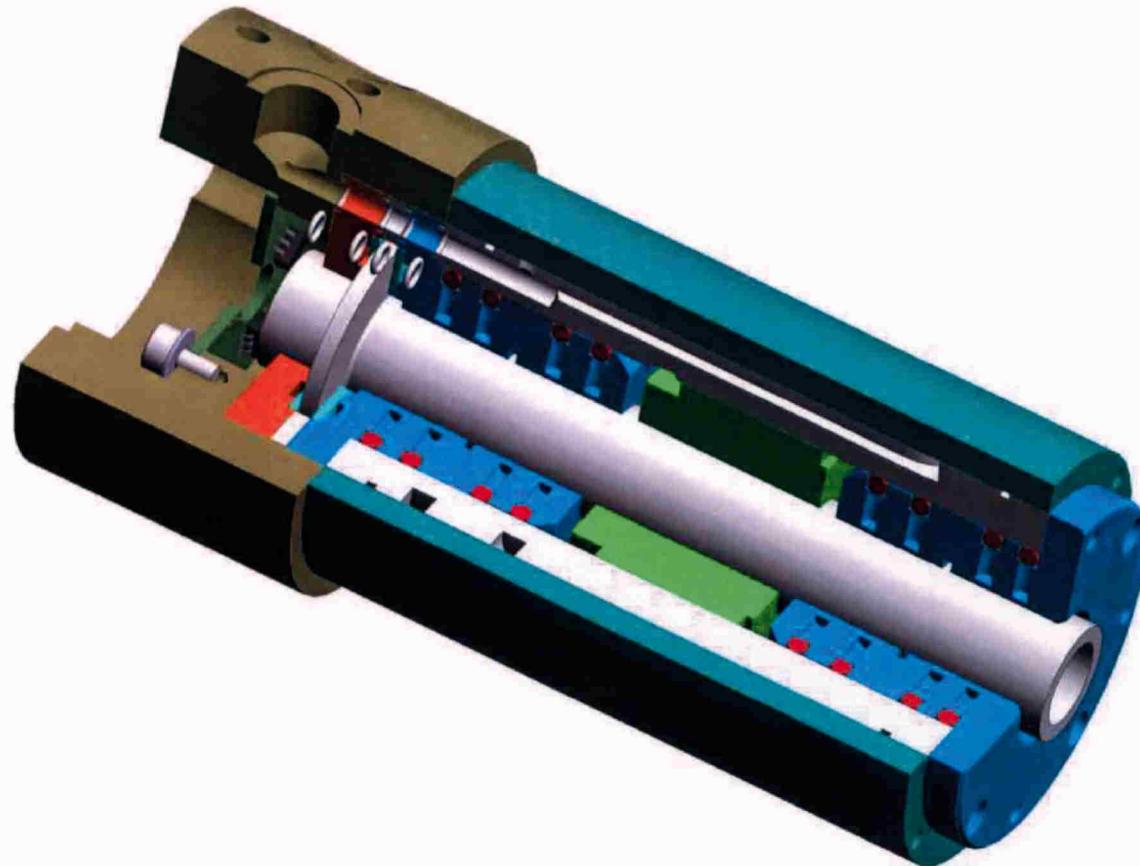
- Motorentwicklung für hohe Drehzahlen
- Elektronikentwicklung für hohe Drehzahlen
- Entwicklung geeigneter Sensorik
- Integration von Magneten in den Rotor

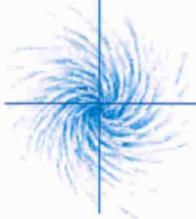


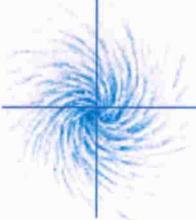
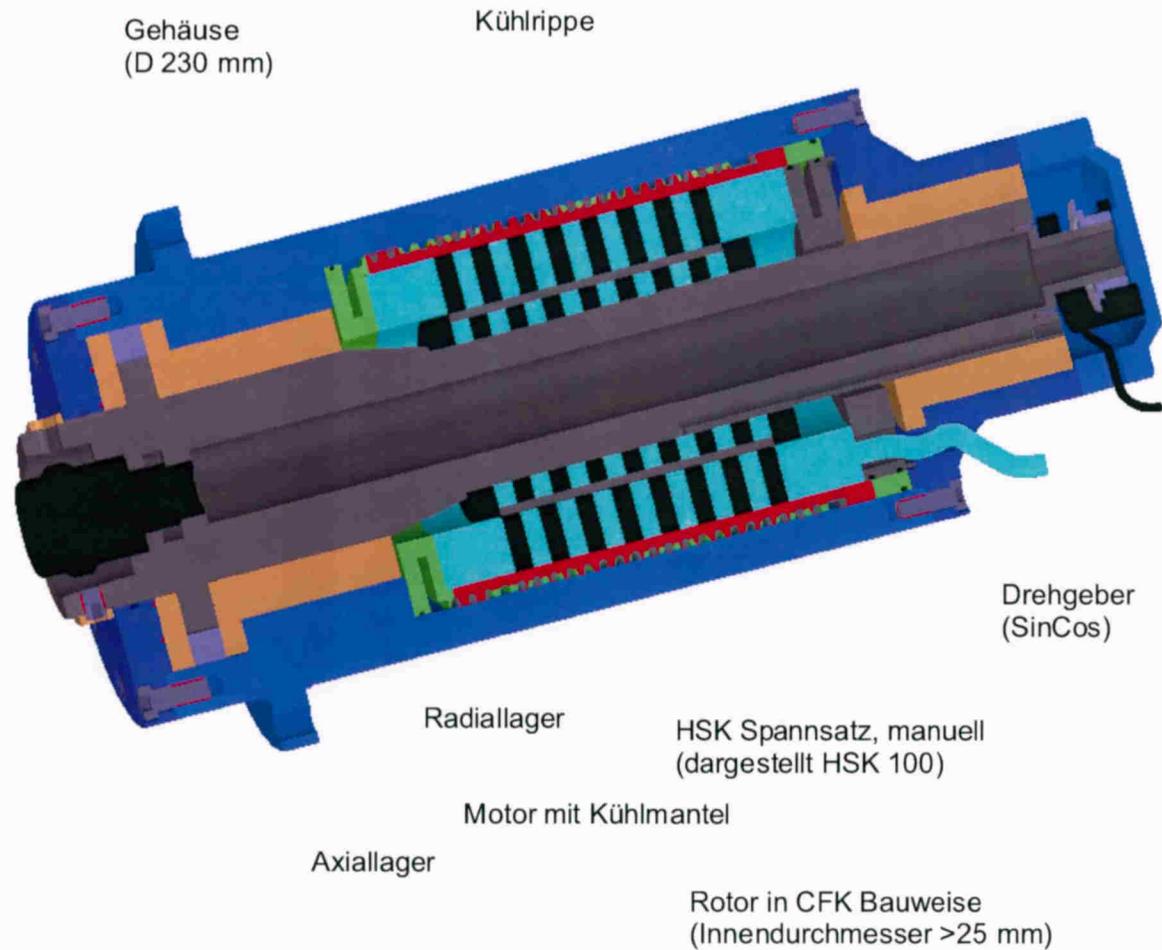
Die Vorteile des Synchronmotors sind:

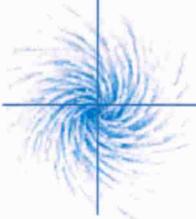
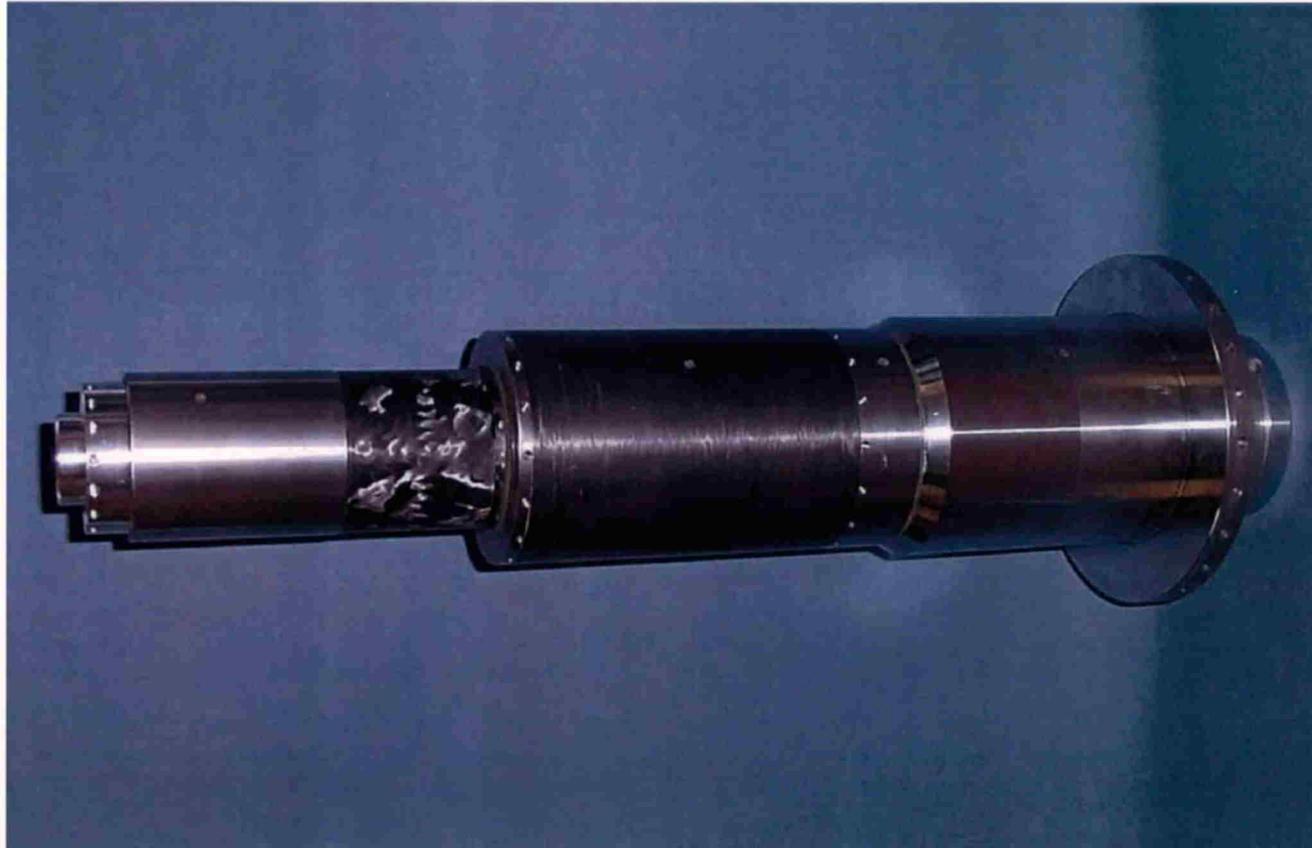
- geringere Verlustleistung
- höhere Leistungsdichte
- geringere Erwärmung des Rotors
- kontrollierte Drehbewegung
- höhere Dynamik

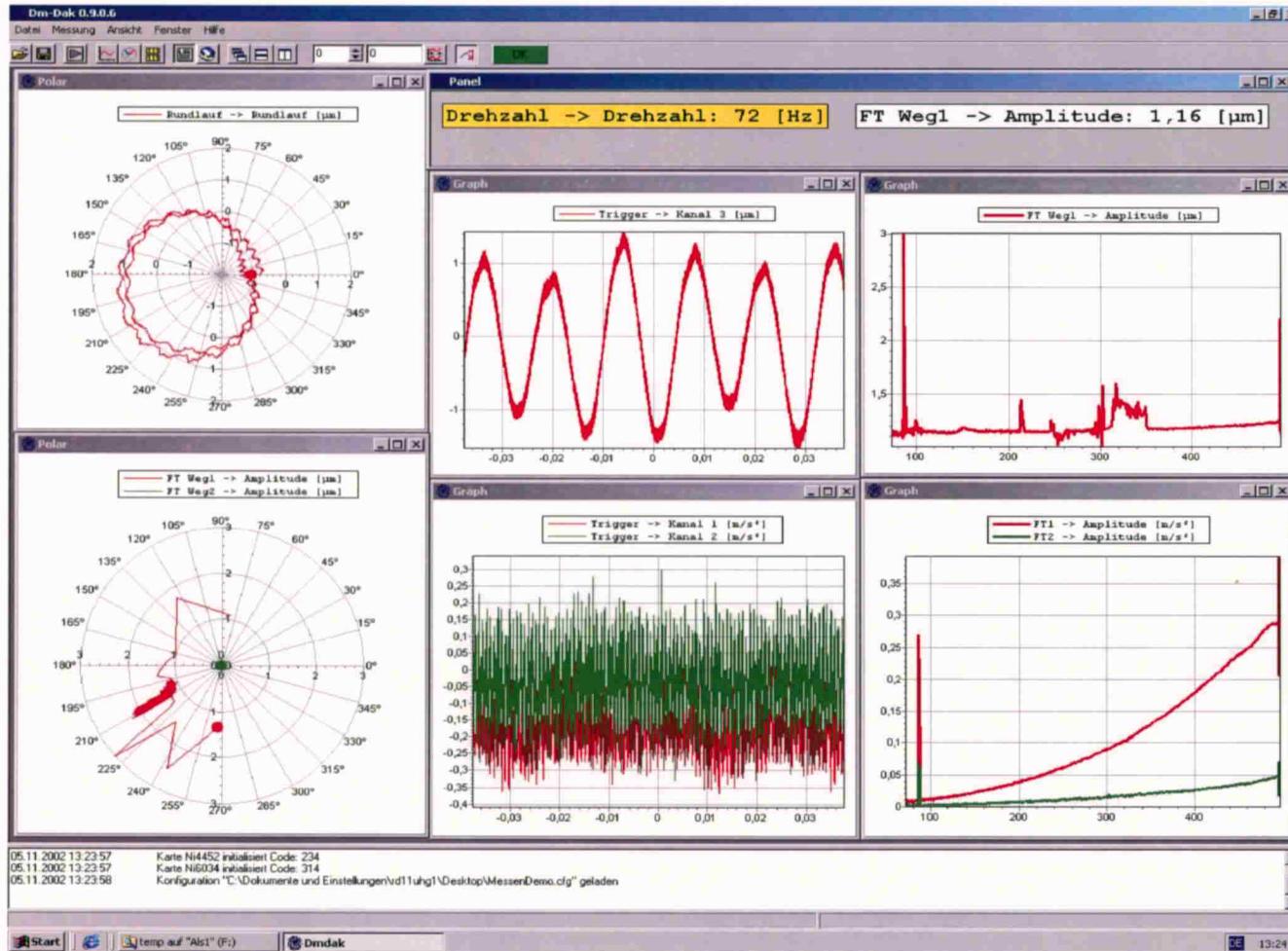


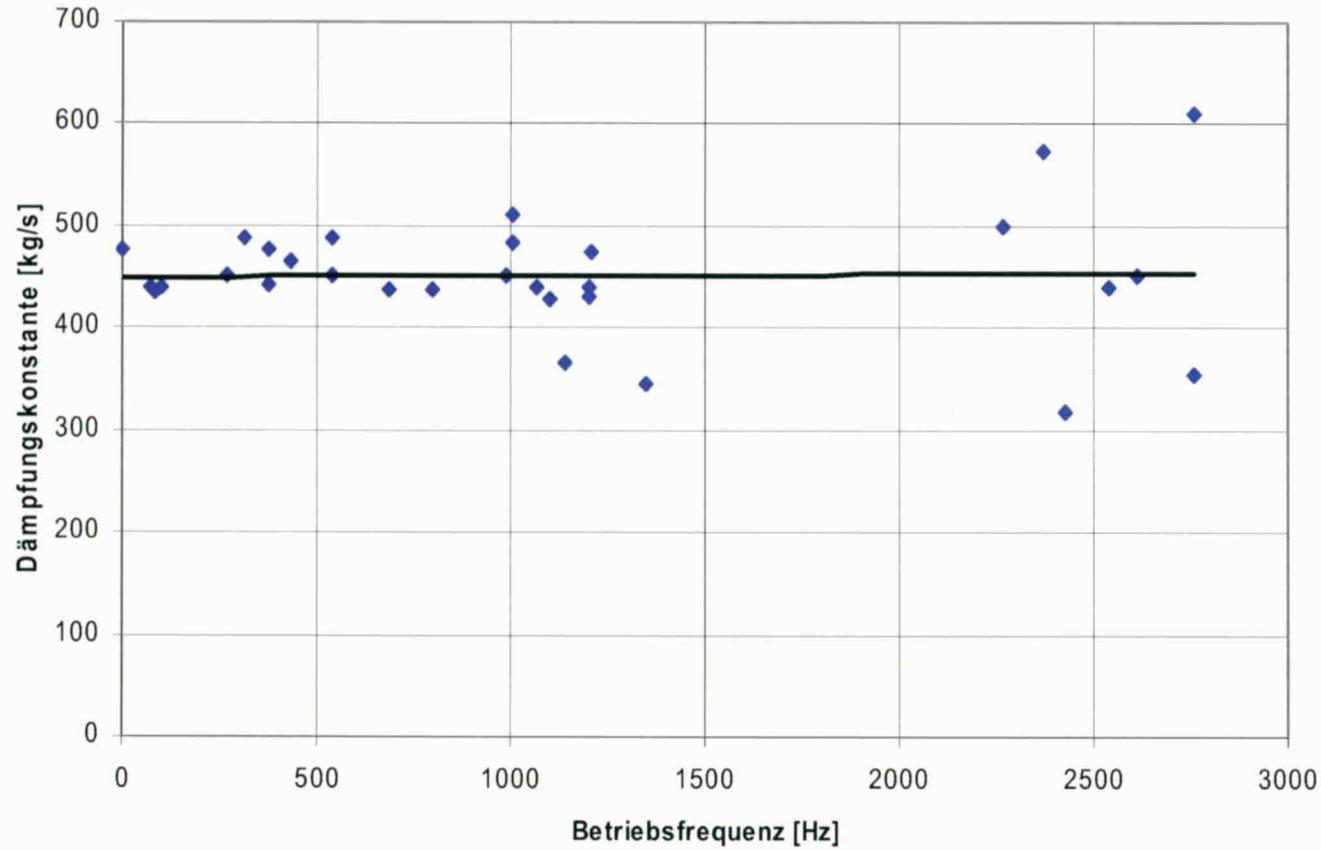










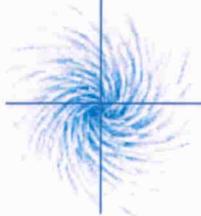


Prototyp einer Spindel mit 160.000 U/min:

- Kennwerte erreicht
- Betrieb bis 180.000 U/min
- Modifikation: Schwingungsverhalten

Prototyp einer Spindel mit 300.000 U/min:

- Prototyp fertiggestellt
- Spannsystem entwickelt
- Anpassung Antriebstechnik



Prototyp einer Schleifspindel:

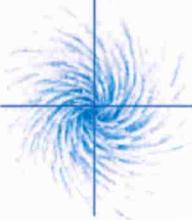
- Fertigung abgeschlossen
- Anpassung Antriebstechnik

Serienreife der Spindeln und Antriebstechnik:

MZ 160 Q3/04

MZ 300 Q1/05

HP Q4/04





Schleifen, Bohren, Leichtbau

Aerospin – aerostatisch, synchron und hochgenau

Präzisionsspindelentwicklungen für die Leiterplatten- und Waferbearbeitung

C. Brecher, A. Mayer, R. Schug, G. Slotta, W. Thaler

Inhalt Die Halbleiter- und die Elektronikindustrie stellen heutzutage höchste Herausforderungen an Werkzeugspindeln zur Planbearbeitung monokristalliner Siliziumwafer mit Planparallelitäten kleiner $1\ \mu\text{m}$ oder zur Mikrobearbeitung mit Spindeldrehzahlen deutlich über $200\ 000\ \text{min}^{-1}$. Im vom BMBF geförderten Verbundprojekt „Aerospin“ entwickelte ein Konsortium eine Reihe von hochpräzisen Luftlager-spindeln. Lagertechnik, Leichtbau und Antriebsentwicklung standen dabei im Fokus der Arbeiten.

Aerospin – Aerostatic, synchron and highly precise: Development of high precision spindles for the manufacturing of circuit boards and silicon wafers

Abstract The semiconductor and electronic industry place highest challenges at tool spindles for the treatment of silicon wafer with plan parallelisms smaller than $1\ \mu\text{m}$ and for the treatment of printed circuit boards with numbers of revolutions clearly over $200\ 000\ \text{min}^{-1}$. Within the public founded project „Aerospin“ a consortium has developed a set of highly precise air bearing spindles. Thereby the focus was put on aerostatic bearing design, lightweight construction and innovative drive solutions.

1 Einleitung

Wohl kein anderer Anwendungsbereich spiegelt die ständig steigenden Anforderungen an Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit besser wider als die Halbleiter- und Elektronik-

industrie. So werden heute monokristalline Siliziumscheiben auf ihrem Weg zum hocheffizienten Computerchip im Schleifprozess auf eine Ebenheit von deutlich unter $1\ \mu\text{m}$ geschliffen und Leiterbahnplatten zur Vorbereitung von Kontaktierungen im Minutentakt hundertfach durchbohrt. Dabei sehen sich die in diesem Zusammenhang eingesetzten Spindelsysteme höchsten Anforderungen ausgesetzt. So haben statische und dynamische Steifigkeiten der Spindeln zur Waferplanbearbeitung mit Topfschleifscheiben direkte Auswirkungen auf die erreichbare Formtreue am Werkstück und die Drehzahlen einer Bohrspindel unmittelbaren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Fertigung kleinster Bohrungen.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PFT), betreute Verbundprojekt „Aerospin“ (Förderkennzeichen O2PP2275 bis O2PP2279) sah deshalb die Entwicklung von zwei luftgelagerten Spindelprototypen vor, die gegenüber konventionellen Spindelsystemen charakteristische Spindeleigenschaften deutlich verbessern. Ein Spindelprototyp mit Drehzahlen von bis zu $10\ 000\ \text{min}^{-1}$ fokussiert dabei auf hohe Steifigkeiten von bis zu $500\ \text{N}/\mu\text{m}$ bei radialem Lagerdurchmesser von $120\ \text{mm}$ und eignet sich durch den Einsatz schmierstofffreier Luftlager für eine hochgenaue und kontaminationsfreie Bearbeitung von Siliziumsubstraten. Ein zweiter Spindelprototyp mit geringen Bauraum bei einem Rotordurchmesser von $8\ \text{mm}$ erreicht dahingegen Drehzahlen von bis zu $230\ 000\ \text{min}^{-1}$ und ist für die Aufnahme von Werkzeugen für die Herstellung von Bohrungsdurchmessern kleiner $0,1\ \text{mm}$ sowie Feinstfräsbearbeitung geeignet. Beide Spindelsysteme nutzen die gleiche Luftlagertechnik auf Grundlage von lasergefertigten Mikrodüsen, neuartige synchrone Antriebstechnik und konsequenten Leichtbau durch den Einsatz neuer Materialien.

Das Projektkonsortium, bestehend aus drei Industrieunternehmen und einem Forschungsdienstleister, bündelte das Fachwissen entscheidender Funktionsbausteine. So führten die Verbundpartner die notwendigen Entwicklungen in enger Kooperation untereinander aus, wobei der Arbeitsschwerpunkt des Industrieunternehmens AeroLas in der Entwicklung neuartiger Luftlagereinheiten und der Schwerpunkt der ATE Antriebstechnik und Entwicklungs GmbH in der Sonderentwicklung synchroner Antriebe lag. Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT war neben konstruktiven Aufgaben und Berechnungen von Spindelkomponenten mit der Auslegung und der fertigungstechnischen Umsetzung eines faserverbundverstärkten Rotors betraut und charakterisierte Spindelsysteme messtechnisch hinsichtlich des Steifigkeits- und Rundlaufverhaltens. Die Precise GmbH als Hersteller von Präzisionsspindeln war maßgeblich für konstruktive Aufgaben, die Fertigung präziser Bauteile und die Qualifizierung der Spindeln in Prüfstandsversuchen zuständig.

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Dipl.-Ing. Ralf Schug
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstr. 17, D-52074 Aachen
Tel. +49 (0)241 / 8904-147, Fax +49 (0)241 / 8904 6147
E-Mail: c.brecher@wzl.rwth-aachen.de
oder ralf.schug@ipt.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Anton Mayer
Precise Präzisionsspindeln GmbH
Am Wallgraben 2, D-42799 Leichlingen
Tel. +49 (0)2175 / 971-0, Fax +49 (0)2175 / 971-97
E-Mail: anton.mayer@precise.de

Dipl.-Phys. Georg Slotta
AeroLas GmbH
Inselkammerstr. 10, D-82008 Unterhaching/München
Tel. +49 (0)89 / 6660 89-34, Fax +49 (0)89 / 6660 89-55
E-Mail: gs@aerolas.de

Dipl.-Ing. Wolfgang Thaler
ATE Antriebstechnik und Entwicklungs GmbH
Brandenburgerstr. 10, D-88299 Leutkirch
Tel. +49 (0)7561 / 9854-15, Fax +49 (0)7561 / 9854-22
E-Mail: w.thaler@ate-systeme.de

2 Entwicklung einer hochpräzisen Schleifspindel für die Waferbearbeitung

Die Entwicklung eines hochpräzisen Spindelprototyps auf Luftlagerbasis fokussiert insbesondere auf den Einsatz im Bereich der Waferschleifbearbeitung. Hier wird der Planschleifprozess in der Herstellungskette eines Wafers heutzutage meist in zwei Schritten ausgeführt. Für die Schruppbearbeitung wird dabei eine wälzgelagerte Spindel und zur Schlichtbearbeitung eine luftgelagerte Spindel eingesetzt. Die aerostatischen Lager der Schlichtspindel unterstützen höchste Rundlaufeigenschaften und minimieren so Abweichungen von der ideal-planaren Oberfläche des Siliziumwafers. Nachteil bisher eingesetzter Luftlager sind aber ihre geringeren radialen und axialen Steifigkeiten verglichen mit wälzgelagerten oder hydrostatisch gelagerten Spindelssystemen. Hochsteife aerostatische Spindelssysteme können einen Beitrag zur weiteren Verbesserung der TTV (Total Thickness Value)-Werte von Siliziumsubstraten leisten. Deshalb fokussiert das Projekt Aerospin unter anderem auf die Entwicklung eines luftgelagerten Spindelprototyps mit maximalen Drehzahlen von bis zu $10\,000\text{ min}^{-1}$, Lagersteifigkeiten von bis zu $500\text{ N}/\mu\text{m}$ und Rundlaufgenauigkeiten an der Spindelnase von bis zu $0,1\text{ }\mu\text{m}$.

Das zur Umsetzung dieser Spezifikationen von den Verbundpartnern entworfene Spindelkonzept zeichnet sich maßgeblich durch eine Axial-Radial-Radial-Anordnung der Luftlagerflächen und eine Kohlenstofffaser-Stahl-Verbundkonstruktion des Rotors aus. Darüber hinaus gelang die Integration eines wassergekühlten Synchronmotors zur Motorspindel (Bild 1). Die gewählte Anordnung der Lagerflächen unterstützt insbesondere eine einfache Spindelmontage, minimiert thermisches Spindelwachstum zur Werkzeugseite und vermeidet weitestgehend zusätzliche Schnittstellen im Gehäuse. Zudem führte die Leichtbaukonstruktion des Rotors – begründet in der geringeren Dichte des verarbeiteten Faserverbundwerkstoffes verglichen mit konventionell eingesetzten Stählen – zu einer deutlichen Reduktion des Massenträgheitsmomentes und damit zu besseren dynamischen Eigenschaften der Spindel.

2.1 Umgesetzter Leichtbau – Entwicklung eines Kohlenstofffaser-Stahl-Verbundrotors

Eigens für die hochpräzise Werkzeugspindel wurde am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT ein Verbundrotor aus Stahl- und Faserverbundkomponenten ausgelegt und gefertigt. Die Spindelnase wurde dabei wegen einer zu integrierenden HSK-Schnittstelle aus Stahl ausgeführt, die ebenso die vordere Axial- und Radiallagerfläche integrierte. Neben der Spindelnase wurde ein CFK-Grundkörper vorbereitet, der aus zwei im Lagenaufbau gleichen CFK-Rohren unterschiedlicher Durchmesser, die jeweils in einem Wickelprozess hergestellt wurden, zusammengesetzt wurde. Im Vergleich zu einem einteiligen Aufbau konnte so der Zerspanungsaufwand von kostenintensiven Faserverbundmaterial erheblich verringert werden. Darüber hinaus mussten bei einem einteiligen CFK-Körper die Bereiche, in denen die Koh-

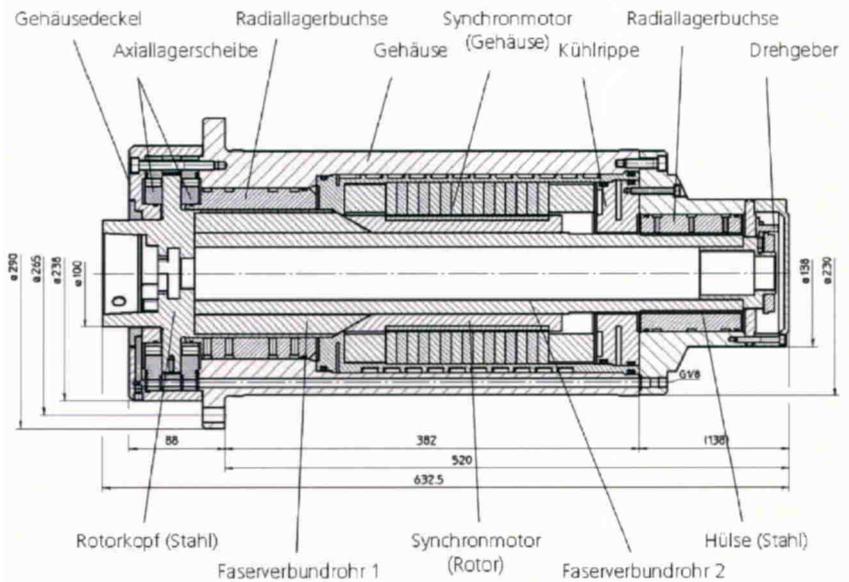


Bild 1. Spindelkonzept einer hochpräzisen aerostatischen Schleifspindel mit Faserverbundrotor
Fraunhofer IPT

lenstofffasern am Ende eines Lagenaufbaus im Wickelprozess neu ausgerichtet werden, zerspanend bearbeitet werden.

Beim Wickeln der CFK-Grundkörper wurden in einem ersten Schritt Bündel von Kohlenstofffasern („Rovings“) durch ein Tränkbad gezogen und dabei gleichmäßig mit einem Epoxidharz benetzt. Hierbei wurde erstmals die hochmodulige Kohlenstofffaser „Mitsubishi K63B12R“ mit einem E-Modul von bis zu $520\,000\text{ N}/\text{mm}^2$ in Verbindung mit einem konventionellen, duroplastischen Harzsystem verwendet. In einem zweiten Schritt wurden die benetzten Fasern mit Hilfe eines Portalrobotersystems in Gantrybauweise auf einem Wickelkern aufgewickelt (Bild 2). Dabei wurde der Roving durch ein Fadenauge so geführt, dass ein definiertes Wickelmuster entstand. Das gefertigte Wickelmuster wurde zuvor mit Hilfe der Auslegungsoftware „LAMTECH“ festgelegt. Es konnte eine gezielte Ausrichtung der Fasern mit ihrem extrem ausgeprägten richtungsabhängigen Materialverhalten derart realisiert werden, dass der Laminataufbau den Anforderungen eines Spindelrotors mit hoher Torsions- und Biegesteifigkeit bei geringer Wärmedehnung gerecht wurde. So wurden Lagen unter 0° , 22° , 45° und 89° im Wickelprozess abgelegt und dann in einem Ofen bei $80\text{ }^\circ\text{C}$ bis $120\text{ }^\circ\text{C}$ ausgehärtet. Dabei konnten



Bild 2. Wickelprozess von CFK-Rotorkomponenten
Fraunhofer IPT

anfänglich im Verbundprojekt auftretende Lunker durch iterative Optimierungsschritte des Temperprozesses vermieden werden.

Nach der Fertigung der CFK-Rohre wurden diese großflächig mit dem Kunststoffklebstoff Araldit 2020 miteinander gefügt, wobei der Klebstoff Festigkeiten im Fügeseit von bis zu 20 N/mm^2 verspricht. Um eine gleichmäßige Benetzung der Fügestelle zu gewährleisten, wurde hier eine $0,2 \text{ mm}$ tiefe Nut vorgesehen, in die der Klebstoff von außen durch eine Bohrung injiziert wurde. Der CFK-Rotor, insbesondere seine Lagerflächen, wurde nach dem Verkleben mit der Spindelnase in einer Aufspannung feinstbearbeitet. Zuvor wurde für das hintere Radiallager eine dünne Metallhülse sowie die Magnete des Synchronmotors in gleicher Weise prozesstechnisch ähnlich durch Kleben am Rotor fixiert. **Bild 3** zeigt den fertigen Rotor und die im Spindelssystem verwendeten Luftlagerkomponenten.

2.2 Lasergefertigte Mikrodüsen ermöglichen hochsteife aerostatische Präzisionslagerung

Der Einsatz von aerostatischen Lagern, bei denen ein definiertes Luftpolster für die Trennung der relativ zueinander bewegten Systemkomponenten Spindelrotor und Spindelgehäuse sorgt, bedingt im konventionellen Aufbau ein Drosselsystem vor jeder Lagertasche. Das Drosselsystem – zumeist eine definierte Querschnittsverengung in der Luftzufuhr – sorgt dann dafür, dass die jeweiligen Taschen unabhängig voneinander auf Last reagieren und so ein funktionstüchtiges Führungssystem erst unterstützen. Neben definierten Lagertaschen werden oft auch poröse Materialien eingesetzt. Hier liegt die notwendige Drosselwirkung in der Porosität und der mit ihr einhergehenden Verengungen des eingesetzten Materials selbst. Die beschriebenen zwei Lösungen führen aber prinzipbedingt zu ungewünschten Totvolumina zwischen dem zu führendem Rotor und der Luftlagerfläche; das wirkt sich negativ auf statische und dynamische Steifigkeiten aus.

Vor dem Hintergrund einer deutlichen Steifigkeitssteigerung wurden im Verbundprojekt Aerospin deshalb von der AeroLas GmbH entwickelte Luftlagerkomponenten auf Grundlage von lasergefertigten Mikrodüsen (**Bild 4**) für den Schleifspindelprototyp eingesetzt. Die Drosselwirkung übernahm hier eine Mikrobohrung, die je nach Anwendung Durchmesser zwischen $25 \mu\text{m}$ und $60 \mu\text{m}$ annehmen kann, deren kleinster Querschnitt unmittelbar mit der Luftlagerfläche zusammenfiel und so Totvolumina minimierte. Durch die höchst reproduzierbare Fertigung und die definierte geometrische Anordnung der Mikrobohrungen wurde es möglich, die Führungswirkung des aerostatischen Lagers extrem homogen zu gestalten. Das wirkte sich positiv auf die den Luftlagerelementen zuzurechnenden Rund- und Planlauffehleranteile aus – ein Grund, warum diese Technologie zuvor bereits erfolgreich in Hightech-Industriezweigen wie der Festplattenproduktion und dem DVD-Mastering zum Einsatz kam.

Die besonders grenzwertigen Herausforderungen im Bereich des Spindel systems für die Hochpräzisionsbearbeitung resultierten aus den Anforderungen an zu realisierende hohe Tragzahlen von bis zu 3500 N bei gleichzeitig hohen axialen und radialen Steifigkeiten von bis zu $500 \text{ N}/\mu\text{m}$. Bedingt durch diese Herausforderungen führte die Systemauslegung zu axialen Luftlagerflächen, die bei einem Rotordurchmesser von 120 mm einen Außendurchmesser von 220 mm besaßen.



Bild 3. Verbundrotor und Lager-Anordnung

Fraunhofer IPT

Informationen zum Projekt „Aerospin – Entwicklung einer Reihe von Luftlagerspindeln“

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PFT), betreut (Laufzeit: 06/2001 bis 11/2004).

Radiale Lagerkomponenten hatten einen Rotordurchmesser von 120 mm beziehungsweise 65 mm . Die Lagerkomponenten wurden im Verbundprojekt in dieser Größe erstmals von der AeroLas GmbH großflächig über eine Nd:YAG-Laserbearbeitung mit Mikrobohrungen versehen, nachdem die Precise GmbH Form- und Lagertoleranzen der Lagerflächen auf wenige μm genau eingehalten hatte. Die Realisierung hoher Lagersteifigkeit setzt bei aerostatischen Lagern extrem kleine Lagerspalte voraus. Andererseits bedingen fertigungstechnisch notwendige Form- und Lagertoleranzen und thermisches Wachstum des Rotors unter Last, dass ein minimales Lagerspiel nicht unterschritten wurde. Innerhalb des Verbundprojekts wurde mit einer eigens erweiterten Simulationssoftware ein Kompromiss zwischen maximaler Lagersteifigkeit

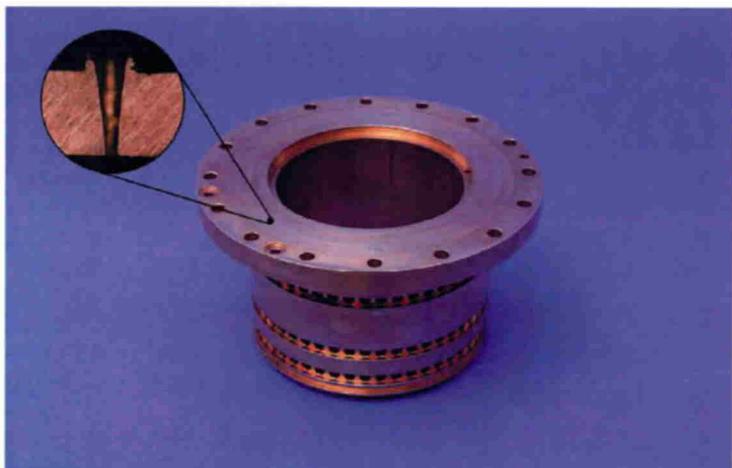


Bild 4. Axial-Radial-Luftlager mit lasergefertigten Mikrodüsen

AeroLas

keit und notwendigem Lagerspiel gefunden und für einen Lagerspalt von 12 µm eine theoretische Steifigkeit von über 500 N/µm berechnet.

3 Entwicklung einer Motorspindel für die Mikrozerspanung

Der Anwendungsbereich einer Motorspindel für die Mikrozerspanung liegt in der Bohrbearbeitung von Leiterplatten der Elektronikindustrie. Zudem finden kleine hochpräzise Spindeln auch zur gezielten Auslenkung von Spiegeln in optischen Scannern im Druckmaschinenbau ihre Anwendung. Kleine Spindelssysteme eignen sich darüber hinaus für das präzise Innenrundschleifen kleinster Löcher, die Mikrostrukturierung von Oberflächen oder die Feinstbearbeitung von Freiformflächen kleiner Formeinsätze mit Abmaßen weniger Millimetern, wie sie beispielsweise im Bereich der Medizintechnik im Spritzguss von resorbierbaren Gefäßclips eingesetzt werden.

Die im Verbundprojekt berücksichtigten Spezifikationen zur Entwicklung einer kleinen aerostatischen Motorspindel fokussierten aber insbesondere auf den erstgenannten Anwendungsbereich der Leiterplatten-Bohrbearbeitung. Die dort eingesetzten Bohrwerkzeuge besitzen kleinere Durchmesser als 1 mm. Um die bei diesen kleinen Durchmessern vom eingesetzten Werkzeugwerkstoff abhängigen technologisch optimalen Schnittgeschwindigkeiten zu realisieren, wären Drehzahlen notwendig, die weit oberhalb bisher üblicher Spindelfrequenzen liegen. Der von den Verbundpartnern konzipierte Spindelprototyp fokussierte vor diesem Hintergrund auf die Entwicklung eines Spindelprototypen mit Drehzahlen von bis zu 300 000 min⁻¹, der sich so besonders für den Einsatz kleinster Werkzeuge mit hohen Schnittgeschwindigkeiten eignet. Dabei wurde ein Rundlauffehler am Werkzeug von weniger als 3 µm angestrebt.

Das Spindelkonzept sah auch hier den Einsatz aerostatischer Lagerkomponenten mit Mikrodüsen vor. Aus Gründen dynamischer Stabilität und einer verbesserten Momentenabstützung wurde die axiale Lagerfläche zugunsten eines werkzeugnahen Radiallagers von der Werkzeugschnittstelle abgewandt positioniert und die radialen Lager in einem möglichst großen Abstand zueinander angeordnet, sodass der Spindeltrieb zwischen den Luftlagerkomponenten untergebracht werden konnte (Bild 5). Der Spindelrotor wurde in einem ersten Schritt aus Keramik ausgeführt. In ersten Unter-

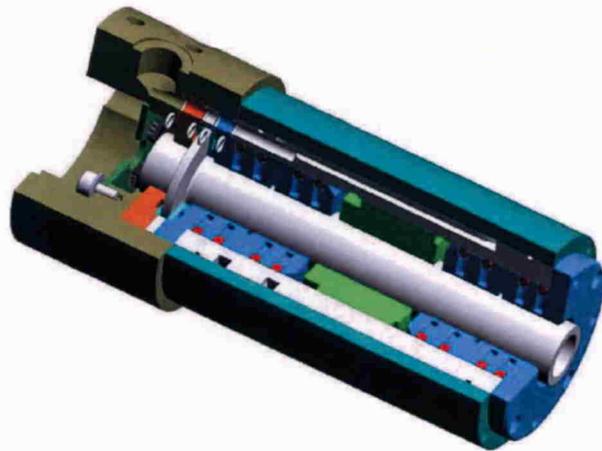


Bild 5. Konzept einer Motorspindel für die Mikrozerspanung

AeroLas

suchungen zeigte sich jedoch, dass die inhärente Sprödhheit des Werkstoffs im Fehlerfall zur plötzlichen Zerstörung der Welle führt, wobei Energien von mehreren 1000 Joule frei werden. Aus Sicherheitsgründen wurde im weiteren Projektverlauf eine Kombination verschiedener Stahlsorten eingesetzt, mit der eine maximale Drehzahl von 230 000 min⁻¹ erreicht werden konnte. Neben den offensichtlichen Vorteilen des Spindelaufbaus ist ein Hauptnachteil in der konzeptbedingten Verlagerung des Werkzeugs durch thermisches Rotorwachstum zu sehen. Deshalb lag eine wichtige Entwicklung im Verringern von rotorseitigen Antriebsverlusten.

3.1 Angepasste synchrone Antriebstechnik für hohe Drehzahlen bei kleinsten Bauräumen

Wie in der hochpräzisen Motorspindel für die Waferbearbeitung wurde auch im Bereich der Motorspindel für die Mikrozerspanung ein spindelintegrierter Synchronmotor eingesetzt. Diese Motoren bieten gegenüber den insbesondere im Hochfrequenzbereich bisher eingesetzten Asynchronmotoren erhebliche Vorteile. Auf gleichem Bauraum erreicht ein Synchronmotor mit Permanentmagneten eine höhere Antriebsleistung bei einer geringeren thermischen Belastung des Rotors. Der von der Firma ATE Antriebstechnik und Entwicklungs GmbH entwickelte Permanentmagnet erregte Synchronmotor

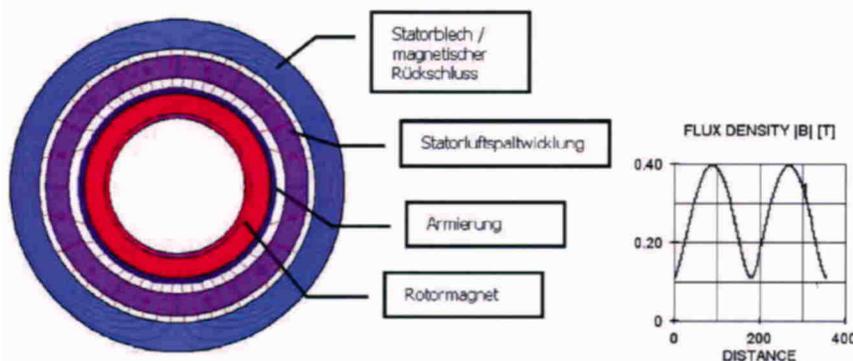


Bild 6. Simulation des Induktionsverlaufs auf der Wellenoberfläche bei einer Luftspaltwicklung

ATE

war mit einer Luftspaltwicklung ausgestattet und unterstützte in einer ersten Baugröße eine maximale Drehzahl von $160\,000\text{ min}^{-1}$ und eine maximale Leistung von etwa 1 kW bis 1,5 kW. Eine zweite Baugröße wurde für eine Drehzahl von $300\,000\text{ min}^{-1}$ und eine maximale Leistung von circa 400 W konzipiert und aufgebaut.

Im Vergleich zu herkömmlichen elektrischen Maschinen weisen beide Antriebslösungen extrem niedrige Zusatzverluste auf. Darüber hinaus konnten im Verbundprojekt bedingt durch das Aufbauprinzip der Antriebe neue extrem sprödharte Materialien wie amorphe auf Stahl basierende oder nanokristalline Werkstoffe für die Führung des Magnetflusses vorgesehen werden. Durch den Einsatz neuer Materialien, eine intensive simulationsgestützte Auslegung magnetischer Felder (Bild 6) und durch die geeignete Konstellation von Einzelkomponenten konnten Wirkungsgrade größer 95 % erreicht und die Wärmebringung in das Wellensystem gegenüber konventionellen Antrieben deutlich reduziert werden.

Bohrspindeln zur Leiterbahnplattenbearbeitung werden heutzutage oft als Gruppenantriebe an einer Elektronik betrieben. Deshalb wurde im Rahmen des Verbundprojektes Aerospin auch die Möglichkeit untersucht, die entwickelten Permanentmagnet erregten Synchronmotoren als Gruppenantriebe an einem Elektroniksystem zu betreiben. Da jede Spindel einzeln, abhängig von der Winkellage bestromt werden muss, war hierfür ein entsprechendes Drehgebersystem vorzusehen. Die oft verwendeten Hall-Sensoren haben bei der Synchronbauweise den Nachteil, eine Unwucht der Welle hervorzurufen, die insbesondere bei kleinen Spindelrotoren nicht vollständig kompensiert werden kann. Im Projekt kamen deshalb optische Sensoren zum Einsatz, die hell-dunkel Bereiche des Rotors detektieren und so prinzipbedingt Unwuchten minimieren. Diese liefern auch bei höchsten Drehzahlen Signale von hoher Phasentreue; sie sind kostengünstig, benötigen nur wenig Bauraum und werden nicht durch Streufelder gestört.

3.3 Spannsysteme für kleinste Werkzeugdurchmesser

Während aerostatische Präzisionslagerungen Rundlaufgenauigkeiten von unter 100 nm erreichen, liegen Wiederholgenauigkeiten moderner Werkzeugschnittstellen im μm -Bereich. Damit verbunden haben Spannsysteme maßgeblichen Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften und das Rundlaufverhalten eines Spindel­systems. Noch entscheidender ist ihre Gewichtung bei kleinsten Werkzeugen. Hier kann eine hochgenaue HSK-Schnittstelle aus Platzmangel nicht umgesetzt werden. Ein für die Motorspindel zur Mikrobearbeitung geeignetes Spannsystem zeichnet sich durch eine hohe Stabilität des Schafthaltmoments und des dynamischen Rundlaufs aus. Diese wird unter anderem durch Bauteil­aufweitungen durch Zentrifugalkräfte und prozessbedingte Schwingungskorrosion negativ beeinflusst.

Im Verbundprojekt wurde in einem ersten Schritt ein Spannsystem untersucht. Es basiert auf einer geschlitzten Spann­zange, die durch ein Tellerfederpaket in einen Konus eingezogen wird (Bild 7). Die Genauigkeit der Schnittstelle, speziell der dynamische Rundlauf, ist bei diesen Spannsystemen abhängig von den Form- und Lagetoleranzen der Umgebungsbauteile sowie den dynamischen Einflüssen auf die Bauteile bei Drehzahl. Das vor dem Projekt eingesetzte Basis­spannsystem zeigte in ausgiebigen Versuchen mit eigens im



Bild 7. Präzisionsspannsystem für den Einsatz kleinster Werkzeuge
Precise

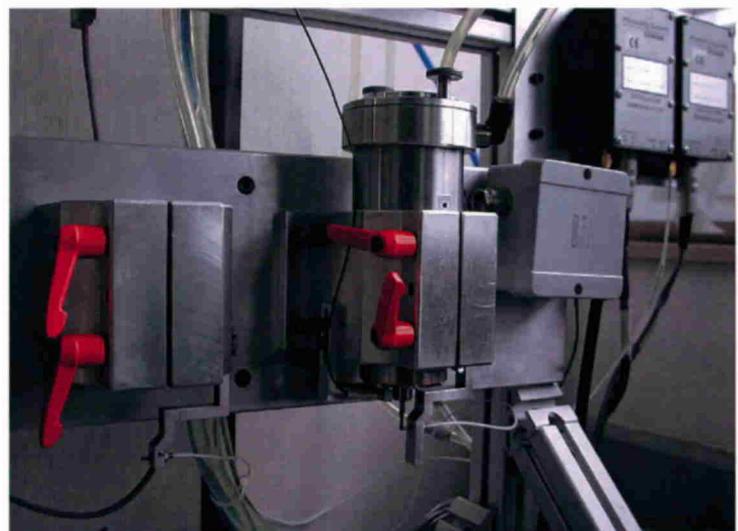


Bild 8. Qualifizierung der Motorspindel für die Mikrozerspannung im Prüffeld
Precise

Verbundprojekt entwickelten Prüf- und Messständen (Bild 8) zwar gute, jedoch uneinheitliche Messergebnisse. Auf Basis der in den Grundlagenversuchen ermittelten Daten, konnten die Einflüsse der einzelnen Parameter und Bauteile auf den dynamischen Rundlauf ermittelt werden. Hier hat sich gezeigt, dass eine generelle Überarbeitung des Spannsystems hinsichtlich Form-, Lagetoleranzen und Massesymmetrien notwendig ist.

Ein mit den Erkenntnissen aus den Basisversuchen überarbeitetes Spannsystem zeigt eine erhebliche Verbesserungen des dynamischen Rundlaufs. Hier ist durch gezielte Maßnahmen eine Verbesserung der dynamischen Genauigkeit um den Faktor 3 erreicht worden. Abschließende Versuche unter Produktionsbedingungen bis zu einer Drehzahl von $210\,000\text{ min}^{-1}$ zeigten, dass das modifizierte Spannsystem den Anforderungen in weit besserem Maße entsprach als das ursprüngliche System (Bild 9) und noch Potential für weitere Leistungssteigerungen bietet.

4 Zusammenfassung

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt Aerospin wurden zwei Spindelprototypen entwickelt. Dabei eignet sich ein Spindel-

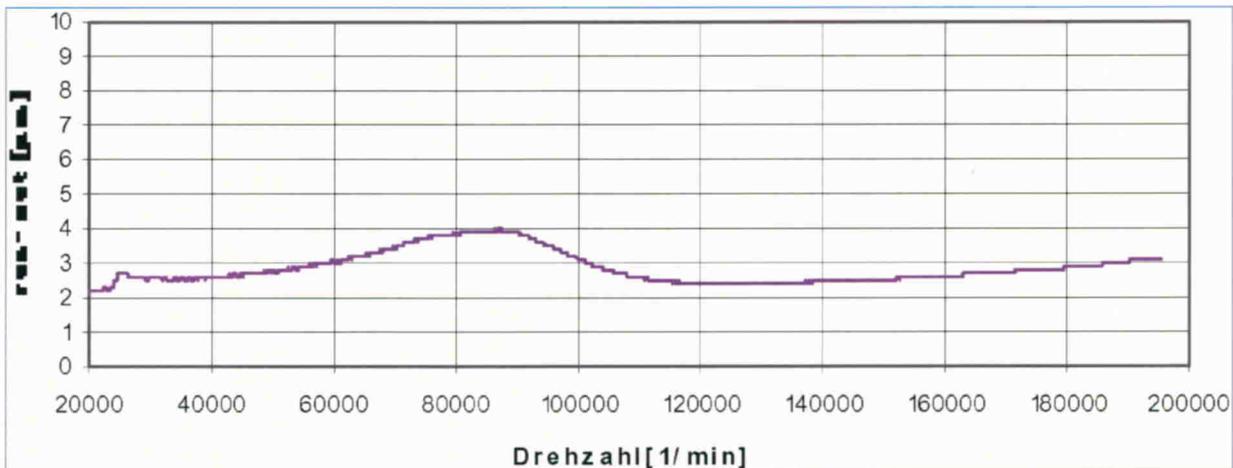


Bild 9. Rundlaufgenauigkeit der Motorspindel für die Mikrozerspanung

AeroLas

system für die Schleifbearbeitung von Siliziumwafer (Bild 10), während ein weiterer Prototyp auf HSC-Anwendungen und die Bohrbearbeitung von Leiterbahnplatten fokussiert. Beide Spindelssysteme nutzen erfolgreich eine Steifigkeit steigernde Luftlagertechnik auf Grundlage lasergefertigter Mikrodüsen und neuartiger synchroner Antriebstechnik. Darüber hinaus verbesserte ein Kohlenstofffaser-Stahl-Verbundrotor die dynamischen und thermischen Eigenschaften des Spindel-systems für die Planbearbeitung von Siliziumsubstraten. Erstmals konnten hierfür prozesssicher extrem hochmodulige Fasern eingesetzt werden. Neben modernen Faserwerkstoffen konnte im Rahmen der Entwicklung einer Motorspindel für die Mikrozerspanung ein Rotor aus Keramik eingesetzt und getestet werden. Neben dem Einsatz neuer Materialien wurde die Entwicklung einer präzisen Werkzeugschnittstelle für kleine Werkzeuge durchgeführt. Diese konnten spezifikationsgerecht mit Rundlaufgenauigkeiten kleiner 3 µm bis zu 230 000 min⁻¹ qualifiziert werden. Durch die Steigerung charakteristischer Eigenschaften der im Verbundprojekt entwickelten Spindelprototypen und der mit ihr verbundene Erweiterung allgemeiner Prozessfähigkeit von Maschinensystemen der Halbleiter- und Elektronikindustrie kann zukünftig ein großer Markt bedient werden.

Die Verbundpartner planen weitere enge Kooperationen untereinander und verwerten den im Verbundprojekt erarbeiteten Erkenntnisgewinn zusätzlich unabhängig voneinander in verwandten Anwendungsfeldern.



Bild 10. Hochpräzise Luftlagerspindel für die Waferbearbeitung

Fraunhofer IPT

Ansprechpartner für weitere Informationen

Georg Slotta – Ralf Schug (Kontakt-daten siehe vorne)

Michael Petzold
 Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
 Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe
 Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT)
 Außenstelle Dresden
 Hallwachsstr. 3, D-1069 Dresden
 Tel. +49 (0)351/463-31469
 E-Mail: michael.petzold@ptka.fzk.de

Weiterführende Literatur

Weck, M.: 13 Mitautoren: Konstruktion von Spindel-Lager-Systemen für die Hochgeschwindigkeits-Materialbearbeitung. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verlag 1990

Schulz, B.: Herstellung von aerostatischen Lagern mit Laserendbearbeitung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999

N. N.: Composites Design Handbook. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division 2004

Hendershot, J. R.; Miller, T.: Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Oxford: Oxford University Press 1994

Stölting, H. D.; Beise, A.: Elektrische Kleinmaschinen. Stuttgart: Teubner Studienbücher 1986

Für jeden den passenden Motor

Synchronmotoren für Hochgeschwindigkeits- oder Hochpräzisionsanwendungen



1: Neu entwickelter zweipoliger permanentmagneterregter Synchronmotor für Drehzahlen bis 300 000 min⁻¹

Mark Vohrer, Wolfgang Thaler

Hochgeschwindigkeit bei Werkzeugmaschinenantrieben bedeutet, Drehzahlen bis 300 000 min⁻¹ zu erreichen. Die Bemessungsleistung für die eingesetzten Motoren liegt bei einigen 100 W und geht bis etwa 2 kW. In letzter Zeit wird dabei von den Kunden immer häufiger gefordert, diese Hochgeschwindigkeitsmotoren auch im unteren Drehzahlbereich (einige 10 000 min⁻¹) noch mit einem brauchbaren Drehmoment auszustatten. Eine weitere Anwendung von Elektromotoren besteht in aerostatisch gelagerten Hochpräzisions-Bearbeitungsspindeln. Hier steht weniger die Anforderung an hohe Drehzahlen im Raum, sondern vielmehr das Erreichen einer hohen und lastunabhängig gleichbleibenden Bearbeitungsgüte der Spindel bei Drehzahlen von 5 000 bis 10 000 min⁻¹ und einer Wellenleistung von 40 kW.

Autoren-
bild fehlt Autor: Dipl.-Ing. (FH) Mark Vohrer ist bei der ATE Antriebstechnik und Entwicklungs GmbH in Leutkirch tätig

Autoren-
bild fehlt Autor: Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Thaler ist bei der ATE Antriebstechnik und Entwicklungs GmbH in Leutkirch tätig

Immer mehr Anwendungen in der Antriebstechnik erfordern hohe Drehzahlen in Verbindung mit Leistungsfähigkeit und gesteigertem Wirkungsgrad. Mit Mitteln des vom BMBF geförderten Rahmenkonzepts „Forschung für die Produktion von Morgen“ wurden in dem Teilprojekt „Aerospin“ derartige Antriebskonzepte entwickelt und untersucht. Die Betreuung erfolgte über den Projektträger, dem Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) bzw. dem Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PFT). Teilaufgabe von ATE war es, permanentmagneterregte Synchronmotoren für Hochgeschwindigkeits- und Hochpräzisionsanwendungen zu entwickeln (Bild 1).

Oft werden Antriebe in Werkzeugmaschinen als Gruppenantriebe an einer Elektronik betrieben. Bei aktuellen Antrieben und am Markt eingeführten Systemen sind Asynchronmotoren vorgesehen, die als Gruppe an einem Umrichter betrieben werden können, die aber bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit und auch ihren konstruktiven Möglichkeiten teilweise Nachteile aufweisen. Deshalb wurden im Rahmen des Projektes auch die Möglichkeiten der Elektronik, auch in Bezug auf Gruppenantriebe, im Zusammenhang mit dem permanentmagneterregten Synchronmotor erörtert. Ein Schwerpunkt wurde auf möglichst hohe Leistungsausnutzung in Verbindung mit einem hohen Wirkungsgrad gelegt. Ein weiteres Kriterium ist, den Motor so zu gestalten, dass eine möglichst kostengünstige und serientaugliche Fertigung gewährleistet ist.

Da in vielen Anwendungen der mechanische Aufbau (Gehäuse, Welle, Lagerung usw.) und der elektromotorische Aufbau von Antriebssystemen getrennt betrachtet werden, entstehen oft Kompromisse in der konstruktiven Lösung für das Antriebssystem.

tem. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern werden deshalb möglichst integrative Lösungen (Lager-/Motorsystem, Motor-/Kühlsystem, Rotor-/Wellensystem) angestrebt. Dadurch ergeben sich Vorteile in der Nutzung des zur Verfügung stehenden Bauraumes (Leistungsausnutzung, Vereinfachung von Kühlsystemen, Reduzierung von Lagerabständen mit dem Vorteil der Optimierung von schwingungskritischen Drehzahlen) und in der Reduzierung der Anzahl der Baukomponenten des Antriebsystems.

Permanentmagneterregte Hochgeschwindigkeitsmotoren

Bei aerostatisch gelagerten HSC-Spindeln (Bild 2) sollen die Forderungen Fräsen bei niedrigen Drehzahlen und Bohren bzw. Feinbearbeitung bei Höchstdrehzahlen in einer Spindel erfüllt werden. Der Fräsprozess bei niedrigen Drehzahlen benötigt den Aufbau mit einem möglichst großen Wellendurchmesser aufgrund der notwendigen Wellen- bzw. Lagersteifigkeit. Jedoch sollen mit dieser Spindel auch Bohr- oder Feinbearbeitungsprozesse bei hohen Drehzahlen möglich sein. Das bedeutet aber, dass aufgrund des großen Wellen- bzw. Lagerdurchmessers hohe Verlustleistungen in der Lagerung bei hohen Drehzahlen anfallen. Außerdem werden Rotorumfangsgeschwindigkeiten von 200 bis 300 m/s erreicht, die aus Festigkeitsgründen einen neuen Rotoraufbau notwendig machen. Aus diesen Gründen war es notwendig, eine neue Motorkonzeption zu entwickeln.

Das entwickelte Motorkonzept ist ein zweipoliger permanentmagneterregter Synchronmotor, der mit einer Luftspaltwicklung ausgestattet ist. (Bild 3). Eine erste Baugröße ist für eine maximale Drehzahl von 160 000 min⁻¹ und einem Drehmoment von 0,15 Nm im unteren Drehzahlbereich bis 60 000 min⁻¹ ausgelegt. Die Leistung entspricht dabei 1 bis 1,5 kW. Die zweite Variante erreicht Drehzahlen bis 300 000 min⁻¹ bei einem maximal möglichen Drehmoment von 13 mNm. Im Vergleich zu herkömmlichen elektrischen Maschinen weist dieses System sehr niedrige Zusatzverluste auf. Bei entsprechender Antriebskonstruktion können dadurch Wirkungsgrade grö-



2: Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsspindel

Quelle: Firma Precise

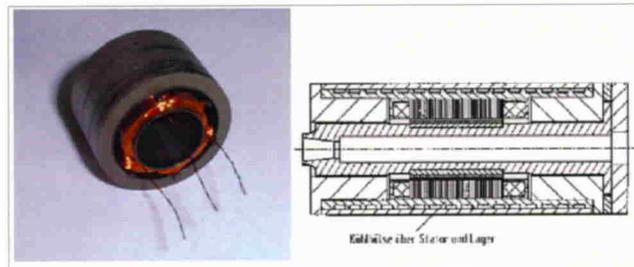
Über 95 % erreicht werden. Außerdem ist die Wärmebringung auf das Wellensystem sehr niedrig. Um jedoch diese Werte zu erhalten, wurden basierend auf dem Luftspaltwicklungssystem verschiedene Wicklungsanordnungen in die Berechnungen und die Entwicklung mit aufgenommen. Das Besondere an diesen Wicklungsanordnungen ist die Möglichkeit, diese Systeme kostengünstig in Serie zu produzieren und mit einem hohen Integrationsgrad in das Antriebskonzept integrieren zu können. Bedingt durch das Aufbauprinzip entstand auch die Möglichkeit, neue Materialien für die Führung des Magnetflusses vorzusehen. Weiterhin wurden die Permanentmagnete in das Wellensystem integriert. Dadurch konnte man der Forderung nach den hohen Umfangsgeschwindigkeiten gerecht werden.

Entwicklungsschwerpunkte der Hochgeschwindigkeitsmotoren

Die Entscheidung für die Motortopologie „permanentmagneterregter Synchronmotor mit einer Luftspaltwicklung“ bietet folgende Vorteile bzw. basiert auf folgenden Gründen:

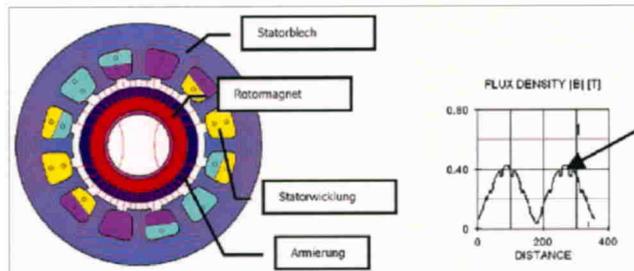
- Große Gestaltungsfreiräume des Motors im Aufbau bzw. in der Integration in das Gesamtsystem. So kann die Kupferwicklung mit sehr kleinen bzw. kurzen Wickelköpfen ausgeführt und damit die kritische Länge des Rotors und der Radiallagerabstand reduziert werden. So wurde z. B. bei der Ausführung mit $300\,000\text{ min}^{-1}$ ein Motor mit 30 mm Außendurchmesser und einer Wickelkopflänge von 5 mm realisiert.
- Bekannt ist, dass bei herkömmlichen genuteten Statorausführungen zusätzliche Verluste, hervorgerufen durch die Nutzung (Nutharmonische bzw. Nutpulsationen), auf der Rotorseite auftreten. Die Höhe der Verluste steigt mit der Anzahl von Nuten

3: Konstruktionsprinzip der Luftspaltwicklung



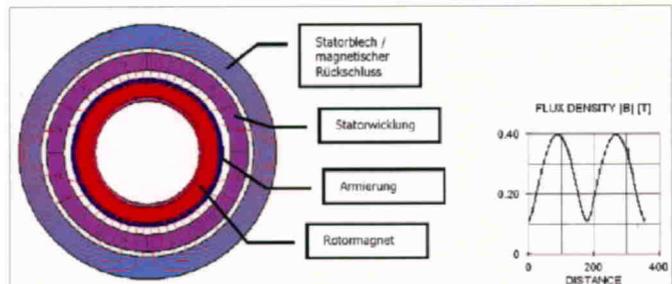
Quelle: Firma Precise

4: Induktionsverlauf auf der Wellenoberfläche bei einer genuteten Statorausführung

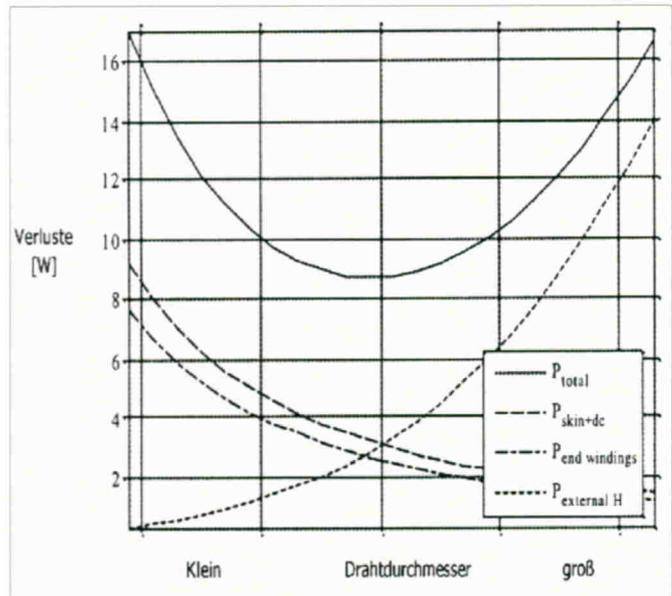


Quelle: Firma HS Turbo

5: Induktionsverlauf auf der Wellenoberfläche bei einer Luftspaltwicklung



6: Zusammenhang zwischen Verlusten und Drahtdurchmesser

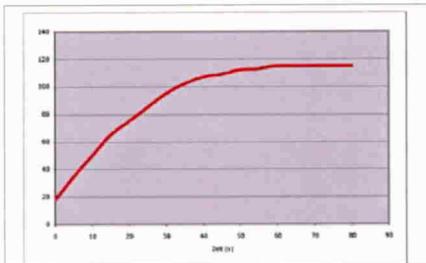


und mit der Drehzahl. Im Üblichen werden bei den schnelllaufenden Motoren Rotoren eingesetzt, die aus elektrisch leitfähigem Edelstahl aufgebaut sind. Dadurch können sich die zusätzlichen Rotorverluste in Form von Wirbelströmen auf der Rotoroberfläche ausbilden. Bild 4 zeigt die nutungsbedingte Induktionsoberwelligkeit auf der Wellenoberfläche. Der Aufbau der Luftspaltwicklung eliminiert die genannten Zusatzverluste. Bild 5 zeigt den Verlauf des magnetischen Feldes auf der Wellenoberfläche. Aufgrund der hohen Ummagnetisierungsfrequen-

zen liegt ein maßgeblicher Verlustanteil auf der Statorseite im magnetischen Rückschluss. Durch den einfachen ringförmigen Aufbau lassen sich hier extrem verlustarme Materialien einsetzen. Insbesondere treten materialbedingte permeable Ummagnetisierungsverluste und durch die elektrische Leitfähigkeit bedingte Wirbelstromverluste im Rückschluss auf. Dadurch ergeben sich zwei Forderungen an die Materialeigenschaften: Zum einen eine möglichst kleine Hysterese (kleine Fläche) der magnetischen Flussdichte-Feldstärke(B-H)-Kur-



7: Kühlsystem des Stators



8: Typischer gemessener Temperaturverlauf der Statorwicklung in einem Lastpunkt

ve und zum anderen einen möglichst hohen spezifischen elektrischen Widerstand in bestimmten Vorzugsrichtungen. Für sinusförmige Induktionen lassen sich die spezifischen Verluste gemäß Gleichung 1 darstellen (nach „Steinmetz“):

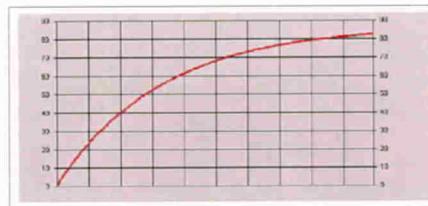
$$P_{\text{Verlust}} = C_m \cdot f^a \cdot B^b \quad (1)$$

Hierbei ist f die Frequenz des speisenden Netzes. Die Werkstoffkennwerte C_m , a und b lassen sich aus den Datenblättern der einzelnen Materialien entnehmen. In der **Tabelle** sind die relativen Verluste gängiger Werkstoffe aufgeführt. Dabei wird ein Vergleich zu herkömmlichen und im Elektromaschinenbau üblichen FeSi(Eisen-Silizium)-Materialien, basierend auf einen normierten Induktionswert und der benötigten Betriebsfrequenz, angestellt:

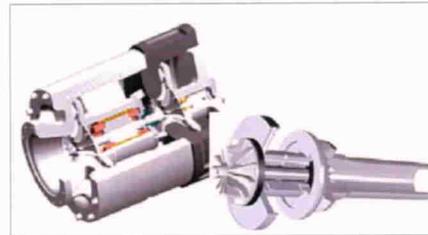
Bei Einsatz von verlustarmen Rückschlussmaterialien bleiben die Verluste in der Kupferwicklung die leistungsbegrenzende Größe des Motors. Hierdurch ergeben sich folgende Vorteile:

Werkstoff	Relative Verluste
Eisensilizium (hochwertig)	100 %
Amorphe auf Stahl basierende Materialien	~5 %
Nanokristalline Werkstoffe	<1 %
Ferrite	~5 %
Eisen Nickel	~20 %
Soft magnetic composites (SMC)	~80 %

Tabelle: Relative Verluste gängiger Werkstoffe



9: Berechneter Verlauf der Temperaturentwicklung (Übertemperatur)



10: Die Hochgeschwindigkeitsmotoren finden kommen unter anderem in Turbogebläsen zum Einsatz

- Die Luftspaltwicklung kann mit einem hohen Kupferfüllfaktor ausgestattet werden, wodurch sich die ohmschen Verluste minimieren lassen.
- Die magnetischen Feldverhältnisse im Motor sind sinusförmig. Außerdem wird durch die geeignete Wicklungsanordnung eine rein sinusförmige Gegenspannung (EMK) erreicht. Diese Zusammenhänge reduzieren maßgeblich Zusatzverlusteffekte (z. B. Querströme in der Wicklung).
- Bekanntermaßen werden derartig schnelldrehende Maschinen mit einer 120° Blockbestromung angesteuert. Falls eine feste Zwischenkreisspannung am Umrichter zur Verfügung steht, wird zudem die Ausgangsspannungshöhe über eine PWM (Puls-Breiten-Modulation) mit einer Taktfrequenz von mehreren 10 kHz eingestellt. Aufgrund des großen Luftspaltes wirken sich auch diese, auf der Rotorseite verlustbringenden Stromoberwellen nur gering aus. Erfahrungsgemäß sind diese zirka um den Faktor 1 000 niedriger als die Flussintensität des vom Permanentmagnet erregten Grundwellenfeldes.
- Ein wesentlicher Vorteil entsteht auch bezüglich den Fertigungsmöglichkeiten eines solchen Motoraufbaus. Solche Wicklungen lassen sich deutlich kostengünstiger, im Vergleich zu herkömmlichen Wicklungssystemen, auf halbautomatischen Wickelmaschinen anfertigen.
- Weitere positiven Eigenschaften sind hohe Drehmomente im unteren Drehzahlbereich sowie der Einsatz bei hohe Drehzahlanforderungen.

Basis für die Entwicklung sind die Simulations- und Berechnungsmethoden. Dafür wurden analytische Berechnungsansätze entwickelt. Unentbehrlich waren zudem numerische Berechnungsprogramme (FEM) für die Berechnung der magnetischen Felder.

Ein besonderes Augenmerk wurde auf die

Auslegung der Kupferwicklung gerichtet. Bei einer Ausführung, bei der die Wicklung in den Nuten eines Statorbleches liegt, findet die Flussführung (siehe Bild 4) in den „Blechzähnen“ seitlich um die Wicklungsführung statt. Dadurch wird die Wicklung nicht direkt dem Magnetfeld ausgesetzt. Im Gegensatz dazu sind die Verhältnisse bei der vorliegenden Ausführung als Luftspaltwicklung. Hier ist die Kupferwicklung direkt dem Magnetfeld ausgesetzt (siehe Bild 5). Für langsam laufende Maschinen mit Luftspaltwicklung werden die Kupferverluste P_s in der Hauptsache den durch den Phasenstrom hervorgerufenen. Diese berechnen sich wie folgt:

$$P_s = I^2 \cdot F \quad (2)$$

Hierbei I der Phasenstrom. Der Koeffizient F hängt vom Drahtdurchmesser, der Drahtlänge, der Leitfähigkeit und der Frequenz ab.

Für schnelllaufende Maschinen kommen zu diesen Verlusten noch die durch das Magnetfeld verursachten Ummagnetisierungsverluste P_p im Kupferdraht dazu. Diese berechnen sich wie folgt:

$$P_p = H^2 \cdot G \quad (3)$$

Der Koeffizient G hängt vom Drahtdurchmesser, der Drahtlänge, der Leitfähigkeit und der Frequenz ab.

Weiterhin müsste noch der sogenannte Proximity-Effekt (Beeinflussung von benachbarten stromdurchflossenen Leiter) berücksichtigt werden. Diese Verlustanteile sind jedoch so gering, dass diese vernachlässigt werden können.

Um die Ummagnetisierungsverluste zu minimieren muss der Drahtdurchmesser reduziert werden. Wird jedoch der Drahtdurchmesser reduziert, erhöht sich der Isolationsanteil, der wiederum den für den Phasenstrom nutzbaren Kupferquerschnitt reduziert. Somit gibt es in der Wicklungsdimensionierung ein Optimum (Bild 6).

In Hochgeschwindigkeitsspindeln wird überwiegend eine Wasserkühlung vorgesehen. Ziel war es, den Stator des Motors möglichst optimal an das Kühlsystem anzubinden. Dabei wurden verschiedene Ansätze diskutiert und ausgelegt. Diese wurden unter anderem durch die Kühlkanalstruktur und einen wärmeleitfähigen Kunststoffverguss realisiert (Bild 7).

Die gemessene Erwärmungskurve der Statorwicklung (Bild 8) zeigt, dass durch die Stabilisierung der Temperatur in einer relativ kurzen Zeit (Temperaturzeitkonstante $R_{th} \times C_{th}$ klein) eine gute Wärmeanbindung des Systems gegeben ist. Die theoretische Berechnung dazu zeigt vergleichbare Werte (Bild 9).

Um elektrische Motoren für hohe Drehzahlen messen zu können, wurde im Rahmen des Projektes ein Belastungsprüfstand

konzipiert und aufgebaut. Zum einen besteht die Möglichkeit Leistungen bis 1 kW im unteren Drehzahlbereich von 40000 bis 50000 min⁻¹ zu bremsen. Zum anderen kann der Prüfling auch bei hohen Drehzahlen von 100000 bis 300000 min⁻¹ belastet werden.

In den Tests wurden die Spindeln mit einem modifizierten Umrichter FC80 der Firma Sieb+Meyer angesteuert. Die Ansteuerung ist mit einer 120°-Blockbestromung vergleichbar. Da der Umrichter eine konstante Zwischenkreisspannung aufweist, wird die effektiv benötigte, drehzahl- und belastungsabhängige Motorspannung über eine Puls-Breiten-Modulation eingestellt. Dieser Umrichter benötigt jedoch zusätzlich eine Rotorlagensensorik. So wurde für die Prüflinge eine Rotorlagensensorik entwickelt und aufgebaut.

Einsatzmöglichkeiten der Hochgeschwindigkeitsmotoren

Die Anwendung der Motoren ist nicht nur auf den Bereich der HSC-Motorspindeln begrenzt. Vielmehr ergeben sich Anwendungen für hochtourige Antriebe in der Textilindustrie, Turbogebälse für unterschiedliche Anwendungen (Brennstoffzellen, Aufladungsturbos von Kompressoren, unterstützendes Aufladen von Verbrennungsmotoren usw.), Vakuumpumpen, Strömungsgebälse, medizintechnische Anwendungen (Fräsantriebe für operative Eingriffe, Beatmungsgeräte usw.), luftfahrttechnische Anwendungen (Pumpen, Gebläse usw.) und vieles mehr. Für diverse Anwendungen wurden Motoren, die dem beschriebenen Prinzip entsprechen, entwickelt und gebaut, wie z. B. für die Turbogebälse der Firma HSTurbo (Bild 10).

Permanentmagneterregter Synchronmotor für Hochpräzisionsanwendungen

Eine weitere Anwendung von Elektromotoren besteht in aerostatisch gelagerten Hochpräzisions-Bearbeitungsspindeln. Hier steht weniger die Anforderung an hohe Drehzahlen im Raum, sondern vielmehr das Erreichen einer hohen und lastunabhängig gleichbleibenden Bearbeitungsgüte der Spindel. Deshalb wurde die Entwicklung eines permanentmagneterregten Synchronmotors, integriert in ein aus Verbundwerkstoffen konzipierten Rotor, notwendig, der zu einem minimalen Verlustniveau auf der Rotorseite und zum anderen einen möglichst oberwellenmomentlosen Lauf der Spindel ermöglicht (Bild 11). Der Auslegungsbereich des Antriebsmotors liegt im Drehzahlbereich von 5000 bis 10000 min⁻¹ bei einer Wellenleistung von 40 kW.

Anforderung an den Motor dieses Teilprojekts war, eine aerostatisch gelagerte

Spindel bei einem gleichzeitig möglichst geringem Massenträgheitsmoment des Rotors und geringem Drehmomentoberwellenanteil anzutreiben. Dabei standen anfänglich verschiedene Motorbaugrößen zur Diskussion. Die Spindel sollte jedoch in extremer Leichtbauweise, insbesondere auf der Rotorseite, ausgeführt werden. Leichtbauweise auf der Wellen- bzw. Rotorseite bedeutet den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen. Bekanntermaßen weisen solche Werkstoffe eine schlechte Wärmeleitfähigkeit auf. Darum musste ein Motorkonzept gewählt werden, das eine minimale Rotorerwärmung aufweist. Die Entscheidung fiel auf einen permanentmagneterregten Synchronmotor. Der entwickelte Motor hat sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- Feldschwächbarkeit ab 5000 bis 10000 min⁻¹ (Anpassung an die drehzahl-, bearbeitungs- und leistungsabhängige Charakteristik).
- Betrieb an einem marktüblichen Standardumrichter.

Entwicklungsschwerpunkte des Hochpräzisionsmotors

Ein Entwicklungsschwerpunkt lag auf der Auslegung des Rotors. Folgende Forderungen mussten bei der Entwicklung berücksichtigt werden:

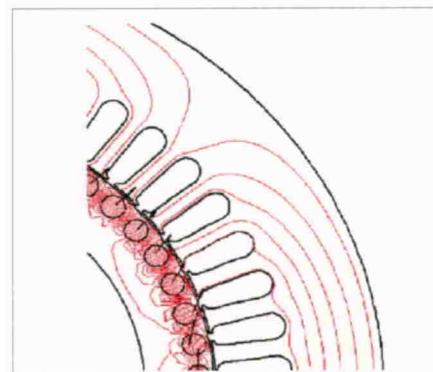
- Minimales Massenträgheitsmoment.
- optimale Ausnutzung der Magnetflussführung.
- Möglichst sinusförmiges Luftspaltfeld in Verbindung mit einer sinusförmigen EMK, um Drehmomentoberwellen bei einer Sinusbestromung des Motors zu vermeiden. Dies ist insbesondere für eine gute Bearbeitungsgüte der Hochpräzisions-spindel relevant.
- Integration des Rotors in ein aus Faserverbundwerkstoffen aufgebautes Wellensystem. Dadurch ist die Wärmeableitung von Verlusten, die im Rotor entstehen, außerordentlich schlecht. Außerdem sollte das rotorwärmeabhängige Längenwachstum des Wellensystems aus Präzisionsgründen minimiert werden.

Das Kühlsystem des Stators ist für eine möglichst gute Abführung der Statorverluste (Wärme) ausgelegt. Zudem sollten die Temperatureinflüsse auf den Rotor gering gehalten werden. Für die Auslegung und Konzeption des Systems wurden FEM-Verfahren und analytische Berechnungsmethoden entwickelt und herangezogen.

Um eine möglichst optimale magnetische Ausnutzung des Rotorbauvolumens zu erhalten, wurden verschiedene Anordnungen diskutiert. Unter anderem auch ein sogenanntes „Halbach-System“. Bei derartigen Systemen erfolgt die Feldführung nicht über einen weichmagnetischen Kern, sondern über in bestimmte Vorzugsrichtungen orientierte angeordnete Magnete, die direkt in den Faserverbund eingebaut sind (Bild 12).



11: Rotor vor der Integration in das Wellensystem

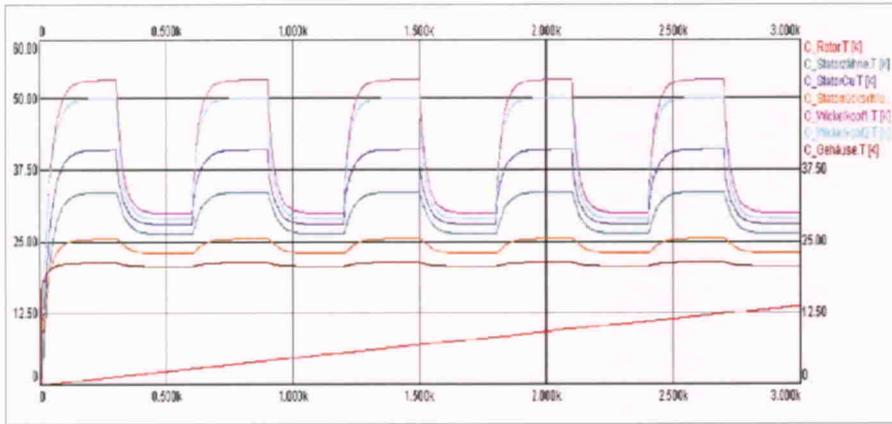


12: Beispiel Flussführung ohne weichmagnetischen Rückschluss



13: Statorsystem mit Kühlhülse

Jedoch zeigte sich, dass diese Anordnungen bezüglich der Feldausnutzung nicht grundsätzlich optimal sind und demnach auch die Ziele eines möglichst massenträgheitsmomentarmen Rotors nicht erreichbar waren. Damit wurde ein System mit radial ausgerichteten Magneten realisiert. Das erreichte Massenträgheitsmoment des Motorrotors mit zirka $12 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$ fiel damit im Vergleich zu herkömmlichen Systemen kleiner aus. Bedingt durch den Rotoraufbau werden auch zusätzliche Rotorverluste minimiert. So liegen die Verluste nur bei einigen 10 W. Geplant war auch, den Motor mit einem marktüblichen Standardumrichter anzutreiben. Die Ausgangssignale derartiger Umrichter basieren alle auf einer sinusbewerteten PWM. Dadurch ist zwar der drehmomentbildende Grundwellenstrom des Umrichters sinusförmig, jedoch ist diesem, bedingt durch die PWM, ein Oberwellenstrom überlagert. Durch den physikalischen Zusammenhang, dass der Statorwicklungsstrombelag auch feldbildend ist,



14: Temperaturverlauf in den Teilbereichen der Maschine

wirken sich derartige Oberwellenströme direkt als umrichterbedingte Zusatzverluste auf der Rotorseite aus. Glättend auf die Stromoberwellen wirkt die Induktivität des Motors. Da aber bekanntermaßen die Induktivität bei schnelllaufenden Motoren (geringe Windungszahl) klein ist, ist die Glättung demnach auch gering.

Die Kühlung des Statorsystems erfolgt durch Wasser. Durch eine optimierte Kühlkanalstruktur werden die anfallenden Verluste abgeführt (Bild 13). Die Verluste sind zum einen Kupferverluste (1 300 W im Nennpunkt) und zum anderen Eisenverluste (1200 W im Nennpunkt). Diese teilen sich

jedoch auf unterschiedliche Stellen im System auf. Der Temperaturverlauf in den Teilbereichen des Motors kann Bild 14 entnommen werden. Deutlich zu sehen ist, dass trotz des optimierten Kühlsystems und Kunststoffvergusses des Wicklungssystems mit hoher Wärmeleitfähigkeit die Wicklung bzw. die Wickelköpfe der temperaturkritische Bereich ist. Durch die schlechte Entwärmung des Rotors (CFK-Bandage bzw. Aufbau mit schlechter Wärmeleitfähigkeit), besitzt dieser eine extrem große Temperaturkonstante (stetige Erwärmung). Dies verdeutlicht auch, dass auf der Rotorseite nur einige 10 W an Verlusten an-

fallen dürfen. Würde die Verlustleistung deutlich höher liegen, könnte der Rotor thermisch versagen.

Einsatzmöglichkeiten des Hochpräzisionsmotors

Erkenntnisse des Projekts sind, dass insbesondere für Hochpräzisionsbearbeitungsspindeln (Schleifbearbeitung) ein „kalter“ Rotor erreicht werden muss, um dadurch das Problem des Wellenlängenwachstums zu minimieren. Bekannt ist, dass bis dato oft komplizierte Wellenkühlsysteme eingesetzt werden, um das Längenwachstum der Welle zu begrenzen. Es wurden zeitlich Motors auf dem oben beschriebenen Prinzip ausgelegt und aufgebaut, bei denen auf diese Rotor- bzw. Wellenkühlung verzichtet werden kann. Außerdem ergänzen die guten Gleichlaufeigenschaften des Motors die Anforderung an einen Präzisionsantrieb.

ATE

000

English Summaries: Our readers will find an English summary of this report under www.vfmz.de/summaries

Fachzeitschrift
Science and Engineering of Composite Materials
Prof. Dr. Omri Rand,
Faculty of Aerospace Engineering,
Technion - Israel Institute of Technology
Haifa 32000, Israel

Design and Manufacture of a Carbon Fibre Spindle Rotor

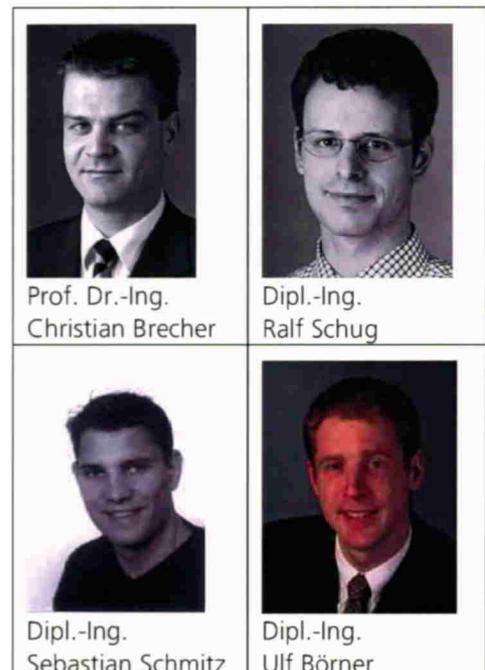
Project results "Aerospin- Development of a highly precise spindle prototype"

The work is funded by the German ministry for education and research (BMBF) and is advised by the project executing organisation "Forschungszentrum Karlsruhe PTKA" (funding identification numbers: 02PP2275 through 02PP2279)"

Fraunhofer-Institute for
Production Technology IPT
Steinbachstraße 17
52074 Aachen, Germany
Telephone: +49 (0) 2 41 / 89 04 - 147
Fax: +49 (0) 2 41 / 89 04 - 6147

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Dipl.-Ing. Ralf Schug
Dipl.-Ing. Sebastian Schmitz
Dipl.-Ing. Ulf Börner

June 2005



Contents

1	Preface	3
2	Concept and design of the carbon fibre spindle rotor	3
3	Manufacturing of the spindle rotor	10
4	Results and conclusion	13

1 Preface

No other range of applications reflects ever tighter accuracy requirements while still being economical better than the semiconductor industry. Today, monocrystalline silicon wafers achieve a parallelism of under $0,5 \mu\text{m}$ when grinding them with cup wheels in preparation for the lithography process steps within a wafer scanner. This grinding is one of the key steps on the way to a high-efficiency computer chip. Static and dynamic rigidities of the spindles used for the grinding have direct effects on shape accuracy and surface roughness of the workpiece. Therefore, the spindle systems have extremely strict performance requirements. The publicly funded project "Aerospin" aims to develop a highly precise spindle prototype, that clearly improves upon the characteristics of conventional spindle systems. The main focus of the development is to design a spindle prototype capable of a maximum spindle speed of 10.000 rpm while having a static rigidity of up to $300 \text{ N}/\mu\text{m}$. The prototype spindle has lubricant-free air bearings for a highly exact and contaminate-free treatment of silicon substrates. The spindle prototype has the following characteristics: carbon fibre reinforced plastic (CFRP) components for light-weight construction, new synchronous drive technology, and utilises new air bearing technology based on laser-manufactured micro nozzles. This article describes the concept, design, manufacturing and qualification of the prototype carbon fibre spindle rotor.

2 Concept and design of the carbon fibre spindle rotor

The spindle rotor is manufactured from carbon fibre reinforced plastic (CFRP). Carbon fibre laminates are used to manufacture the highly dynamic spindle rotor to reduce the mass moment of inertia and to achieve a small or even negative thermal expansion. The mass moment of inertia for a CFRP spindle is one third that of a similar steel spindle rotor. The axial and radial bearing gap shrinkage is minimised with the use of carbon fibers. This is because the negative coefficient of thermal expansion (CTE) of the CFRP offsets the positive CTE of the steel nose. The prototype spindle is also equipped with a highly precise HSK 100 tool interface. To accommodate the HSK interface the spindle nose is from steel and at the connection with the CFRP-rotor the steel is thin walled to minimise the expansion effects due to centrifugal forces.

The material expansion from centrifugal forces is substantially smaller with construction from carbon fibre reinforced plastics than with steel, because CFRP exhibits a similar elastic modulus as steel, but only one third of the density.

Figure 1 shows the rotor structure in detail. The spindle rotor consist of a steel HSK 100 spindle nose and two CFRP tubes to construct the spindle itself. The CFRP body is made from two individual tubes glued together with adhesive. The interface surfaces have the same laminate alignment to ensure proper adhesion, figure 8. Modern adhesives achieve a bonding strength of up to 20 N/mm². Sufficient interface rigidity is attained with the use of a large adhesive surface. In order to ensure an complete wetting of the joint, in the area of fixation a 0,2 mm deep groove was machined. Adhesive was then injected into the groove from the outside through a gating.

A substantially simplified manufacturing process was reached with a two piece CFRP design than with an one piece design. A two pieces design allowed for a significant reduction in the amount of material required. The spindle requires two different diameters: A large diameter at the steel nose and a smaller diameter at the rear section of the rotor. If the CFRP body was manufactured from one piece, a significant amount of post machining would be required to get the two different diameter sections. The outer CFRP tube forms the interface of the spindle with the spindle nose. They are also bonded together with adhesive. The two piece design allowed the CFRP rotor to be manufactured with tubular pieces. Therefore, a winding process could be used.

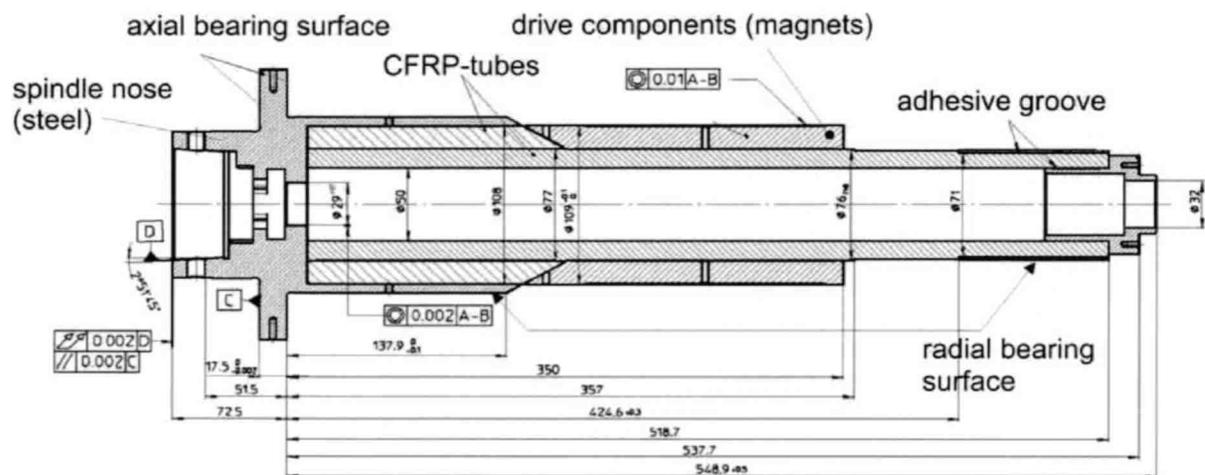


Figure 1: Design of the CFRP-spindle rotor

The laminate layer alignments were calculated with the software "Lamtech". The software accounts for the fact that CFRP component materials exhibit direction-dependent material behaviour. The design of the spindle rotor relied on these calculations to specify each laminate layer alignment in order to maximise the structure requirements accordingly.

The light weight spindle rotor was manufactured with a high modulus carbon fibre from the company Mitsubishi. A unidirectional young's modulus of one single layer of up to 520 kN/mm² in direction of the carbon fibers was achieved. The following characteristics were calculated for the laminate structure:

Laminate characteristics:

Fibre:	Mitsubishi K63B12R
Matrix:	LY 556
Fibre volume:	60%
Density:	1,75 g/cm ³

Longitudinal rotor characteristics:

Young's modulus:	218.530 N/mm ²
Coefficient of thermal expansion:	-6,43 * 10 ⁻⁷ 1/K

Circumferential rotor characteristics:

Young's modulus:	166.280 N/mm ²
Coefficient of thermal expansion:	-1,74 * 10 ⁻⁷ 1/K

Layer alignment with respect to the rotor axis:

Layer 1 / 2	+/-12°	Layer 12 / 13	+/-12°
Layer 3	90°	Layer 14 / 15	+/-45°
Layer 4 / 5	+/-45°	Layer 16	90°
Layer 6	90°	Layer 17 / 18	+/-45°
Layer 7 / 8	+/-45°	Layer 19	90°
Layer 9 / 10	+/-12°	Layer 20 / 21	+/-12°
Layer 11	90°		

The expansion of the rotor due to centrifugal forces at 10.000 rpm had to be examined because air bearings with only a 12 µm gap are utilized. The spindle nose manufactured from steel with an outside diameter of 120 mm and an inside diameters of 108 mm, radial expansion was calculated to 7.5 µm. This would be the equivalent shrinkage of the air bearing gap. If the tubes of carbon fibre reinforced plastic and splicing tape are also considered, the radial expansion was reduced to less than 5 µm. The favourable relationship of the CFRP and steel design comes from both the young's modulus and the density of the CRFP-components. The CFRP body without the splicing tape expands only

about $0,9 \mu\text{m}$ in the radial direction. With this calculation it is shown that a spindle speed of 10.000 rpm is a safe operation condition.

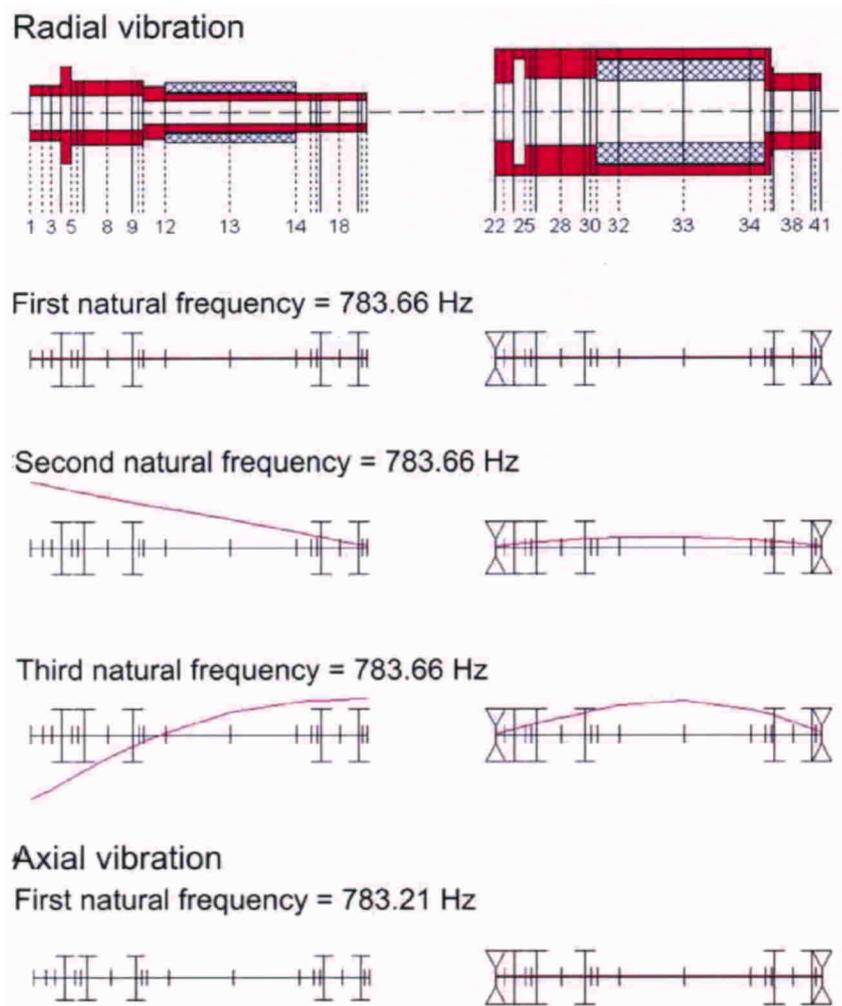
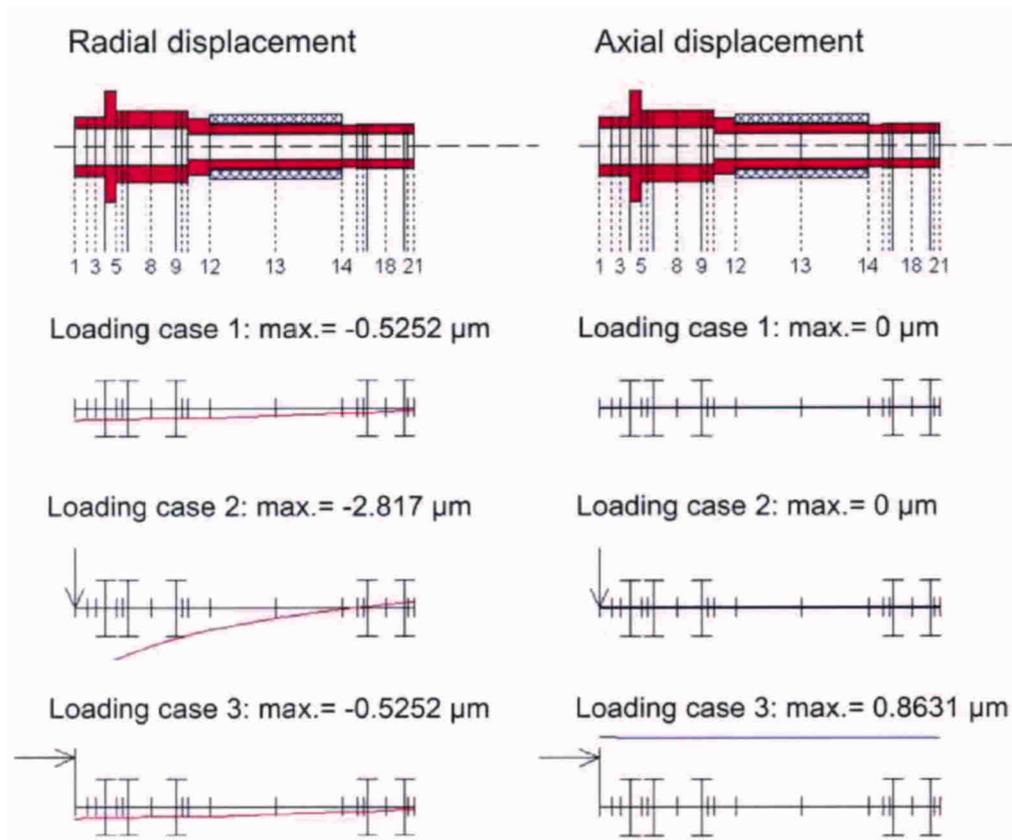


Figure 2: Spindle system natural frequencies calculation



Loading case 1: self loaded (own weight)
Loading case 2: self loaded + 500 N load at spindle nose in radial direction
Loading case 3: self loaded + 500 N load at spindle nose in axial direction

Figure 3: Displacement of the rotor by static forces at the spindle nose

An analysis of the dynamic behaviour of the spindle system was accomplished with the software "SPILAD" (Figure 2). A simplified model of the spindle was provided for this analysis. Components of the drive system were considered as auxiliary masses which do not make a contribution to the rigidity of the spindle (hatched in sketch). The rotor vibration calculation considered the air bearing rigidities. The radial air bearings were approximated by two supporting surfaces on points 7 and 9 for the front bearing and on points 17 and 19 for the rear bearing (Figure 2 and Figure 3). With a rigidity of 250 N/μm for each supporting surface. The axial-thrust bearing was simulated with 500 N/μm at plane 4 (Figure 2 and Figure 3). The results of the calculation showed that the first natural frequency is about 780 Hz. This corresponds to a spindle speed of 46.000 rpm. This value lies far above the desired spindle speed of 10.000 rpm.

Therefore, problems with oscillations are not be expected with intended use. Similar calculations were accomplished for the static displacement of the spindle rotor under load. The results with a load of 500 N at the tool are presented in Figure 3.

The simulation results in a system rigidity of 220 N/ μm which is less than the required 300 N/ μm . The stiffness of geometrical connections as well as rigidity of the rotor and the air bearings are likely causes for the insufficient system rigidity. A rotor with higher rigidity can only be realised by the enlargement of the rotor diameter and cannot be achieved by changing the material properties any more, because the material parameters are already at same level as steel. A larger rotor diameter of the rotor causes an equal enlargement of the outside diameter of the spindle. An enlargement of the external dimensions leads to a substantially more difficult integration into processing machines. An alternate method to increase the system rigidity is to use air pressures higher than the intended 6 bar. If this pressure is not available in-house than additional air compressors could be used.

3 Manufacturing of the spindle rotor

The carbon fibre reinforced plastic (CFRP) components were manufactured with a continuous filament winding technique. In this manufacturing process a roving of bundled carbon fibres is pulled through a resin impregnation bath (figure 4) where the fibres are homogeneously impregnated with resin. The high modulus carbon fibre, Mitsubishi K63B12R, is used in combination with a conventional epoxy resin.

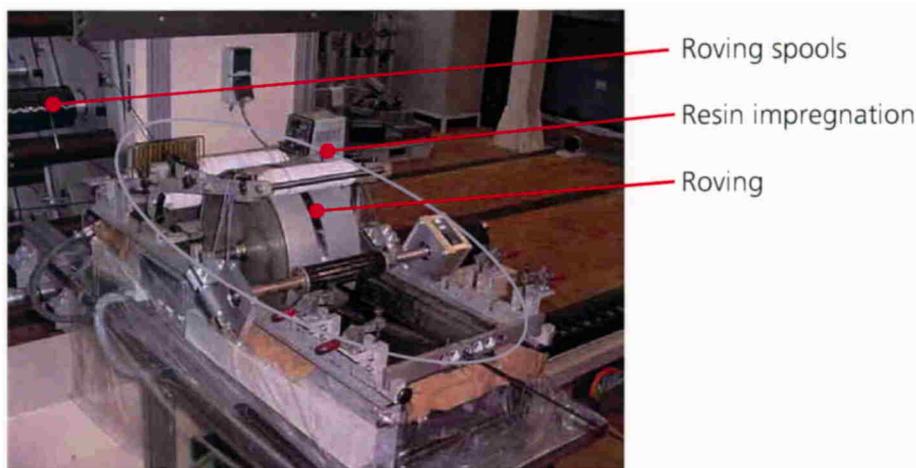


Figure 4: Epoxy impregnation bath for carbon fibre rovings

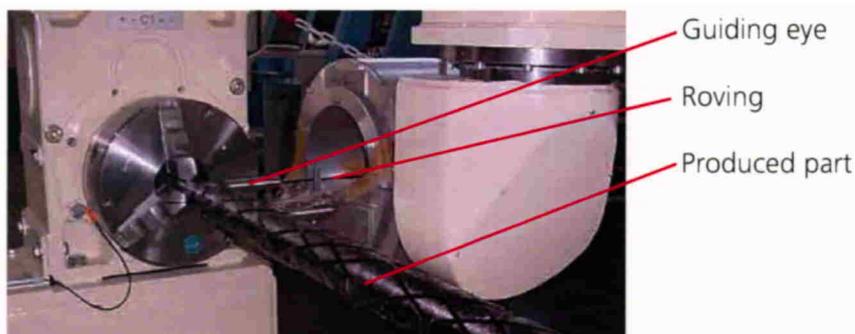


Figure 5: Winding of the CFRP-rotor

In a second step, the impregnated roving is placed on a rotating core (Figure 5) using a portal robot system. A guiding eye leads the moistened roving to the position described in chapter 1 and places the tacky roving on the steel core. After placing all layers of fibres on the core with the calculated architecture, the lay-up is placed in an oven to cure the resin. The epoxy matrix is cured for 8 hours at 120°C, during which the lay-up is continuously rotated. The lay-up

rotation enables an equable determination of the matrix system and prevents the matrix from dripping off the lay-up.

As demonstrated in Figure 1, the CFRP spindle body is built up from two pieces: a basic body (inner tube) and a distance bushing (outer tube). Both components are manufactured separately in the form of a thick walled tube. The 25 mm wall thickness tubes has shown shrinkage holes (Figure 6) during the tempering process. The reason for the occurrence of these failures in the laminate is in the direction dependent thermal dilatation of the layers. This causes a shrinkage of the circumference of the tube between several layers, whose fibre direction is in the area of 90° , compared to layers with a fibre angle almost parallel to the rotor axis, that show a positive thermal dilatation. This caused shrinkage holes in the laminate which even a change in the curing cycle could not fix. After extensive investigation of the tempering process, a laminate manufactured in two steps achieves a pore-free laminate. Thus, the first 12.5 mm thick laminate was placed on the core, then a curing cycle with a temperature of 80°C was performed. In this cycle the epoxy matrix was only cured to a form stable solid state. In a second manufacturing step, the residual laminate thickness was placed on the part, then the tube was tempered at 120°C . With the preliminary curing cycle at 80°C , the inner section of the laminate was fixed and reduced the thermal dilatation in the final 120°C curing cycle. In this laminate defects did not occur.



Figure 6: Shrinkage holes within the CFRP-tube

Both CFRP tubes were manufactured in this way and subsequently assembled. The assembly of the parts is demonstrated in figure 7 and 8. To inject the bonding adhesive, a pressure tank containing the reactive glue was used. The epoxy adhesive Araldite 2020 was used because of its suitability for the bonding of FRP parts and its low viscosity, so that it would fill the bonding gap. The gap between the contact surfaces was filled via a flexible tube that was mounted between the tank and the split. At the highest point of the gap a riser was placed. The glue was injected until bubble-free epoxy adhesive occurred in

the riser. This ensures a complete and homogeneous filling of the bonding gap. With the same manufacturing method, the spindle nose, the drive and the backward bearing socket were glued. The individual parts were adjusted by centering blocks during the assembly.

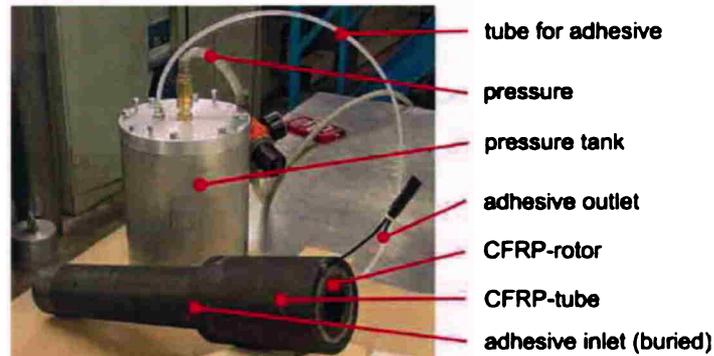


Figure 7: Bonding of the CFRP components using a pressure tank

Once all parts were glued together, the rotor was pretreated in a turning process. A grinding allowance of 0.3 mm was aimed for. To achieve a highly exact true runout all surfaces of the spindle and the chuck were grinded in one working operation. The subsequent runout shows a deviation of less than 1 μm , which is within the required tolerance field. Figure 9 shows the rotor after the final manufacture step.

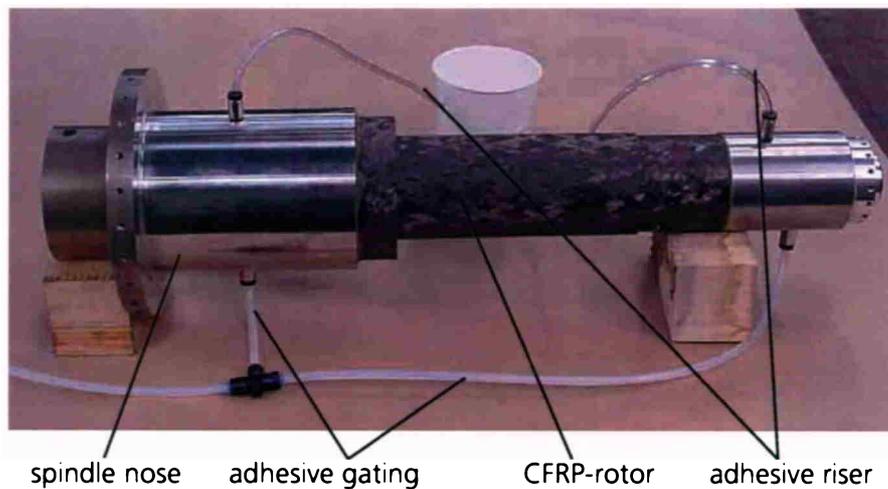


Figure 8: Bonding of the spindle nose and the backward bearing socket

4 Results and Conclusion

Within the project "Aerospin" a new spindle rotor from carbon fibre reinforced plastics (CFRP) was developed and prototyped. This new rotor leads to a clear reduction of the rotor weight in comparison with a rotor from steel, but also possesses a high static rigidity of more than $500 \text{ N}/\mu\text{m}$. Among other things, filament winding methods and adhesive based joining processes were qualified with an extremely high young's modulus carbon fibre. The result is an extremely light weight but high-strength spindle rotor for a high precision aerostatic spindle for the treatment of silicon wafers (Figure 9). The software packages "Spilad" and "Lamtech" were used to optimise the rotor structure. To the manufacture of rotor methods like winding, turning, grinding and gluing were successfully used.



Figure 9: Finished carbon fibre spindle rotor

First tests have shown that the spindle integrated rotor ensures a true runout clearly smaller than $1 \mu\text{m}$. The rigidity of the assembled spindle was measured at $210 \text{ N}/\mu\text{m}$ and a spindle speed of 8000 rpm was reliably reached in first tests. The measurement of the dynamic behaviour of the rotor shows that the rotor does not possess resonance frequencies in low speed ranges. The first clear resonance was found at 1276 Hz in a support-free experimental setup of the rotor (Figure 10).

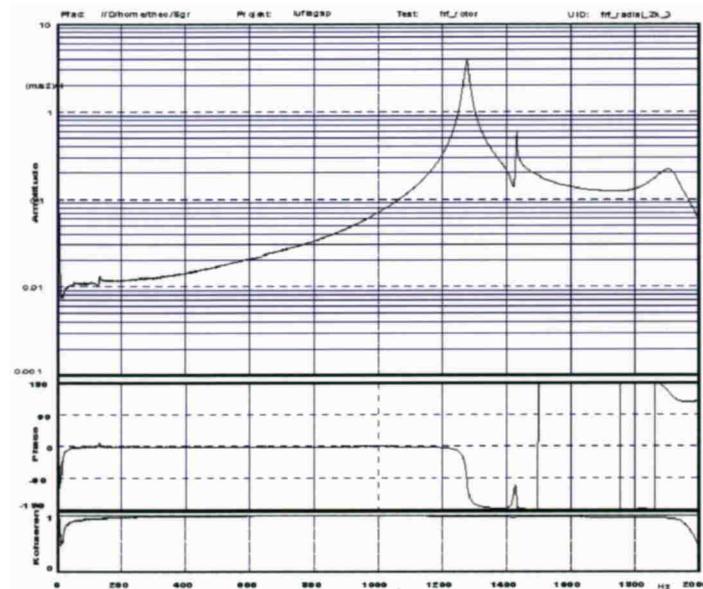


Figure 10: Frequency response of the spindle rotor

The Fraunhofer Institute for Production Technology IPT plans, designs and optimises machine parts and machines for production engineering in close cooperation with industrial partners. It uses lightweight constructions everywhere high accelerations and/or small weights are demanded. Therefore, fibre-reinforced plastics are used, which can be treated process-sure with different production technologies within the institute. As implemented in the project "Aerospin", new and non-conventional concepts can achieve technical competition advantages for our customers.



Figure 11: View on the spindle system with cup grinding wheels

»AeroSpin«
Entwicklung einer Reihe von Luftlagerspindeln
Abschlussbericht zum Teilvorhaben
»Entwicklung einer hochpräzise Schleifspindel (HP-Spindel)«

In Kooperation mit den
Verbundpartnern:

AeroLas GmbH, Unterhaching
Precise Präzisionsspindeln GmbH, Leichlingen
ATE Antriebs- und Entwicklungs GmbH, Leutkirch

**Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnologie IPT**

Steinbachstraße 17
52074 Aachen
Telefon: +49 (0) 2 41 / 89 04 - 147
Fax: +49 (0) 2 41 / 89 04 - 6147

Erstellt von
Dipl.-Ing. Ralf Schug

Aachen, 30. Mai 2005

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Ziele für die Entwicklung der hochpräzisen Schleifspindel	3
2	Konzeption und Konstruktion der Hochpräzisions-Spindel	4
2.1	Konzeptentwicklung	4
2.2	Detailkonstruktion	5
2.3	Konstruktion und Auslegung des Spindelrotors	11
3	Luftlagerentwicklung für die hochpräzise Schleifspindel	18
4	Motorentwicklung für die Schleifspindel	23
5	Fertigung der Spindelkomponenten	29
5.1	Fertigung der rotorseitigen Lagerkomponenten	29
5.2	Fertigung der gehäuseseitigen Lagerkomponenten	31
5.3	Herstellung des Spindelrotors	32
6	Montage der Spindel	36
7	Messtechnische Untersuchung	39
8	Bewertung der erreichten Ergebnisse	44
9	Verwertungsplan	46
9.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	46
9.2	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten	47
9.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	49

1

Einleitung

Bohren, Fräsen, Schleifen und Schneiden sind spanende Bearbeitungsverfahren, die auch in High-Tech-Branchen wie der Halbleiter- oder Elektronikproduktion fester Bestandteil des Fertigungsprozesses sind. Im Unterschied zu „konventionellen“ Anwendungen des Maschinenbaus sind die Anforderungen an das Bearbeitungsergebnis jedoch um ein Vielfaches höher. Die fortschreitende Miniarisierung erfordert eine konsequente Weiterentwicklung dieser Bearbeitungsverfahren. Zur Steigerung der Produktivität ist der Trend zu höheren Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei höheren Laufgenauigkeit der Welle ungebrochen. Spindeln zum Bohren und Fräsen werden dabei v.a. in der Leiterplattenproduktion und als Schleif-/Dreh-/Schneidspindeln mit verbesserten Kennwerten im Frontend- und Backend der Halbleiterproduktion benötigt. Weiterer Bedarf liegt auch in Märkten, wie z.B. in der Automobilbranche oder in der Medizintechnik.

Im Rahmen des Projekts »AeroSpin – Untersuchung, Konzeption, Entwicklung und Prototypenfertigung einer innovativen Baureihe von Hochleistungsspindeln« werden daher Spindeln für den Anwendungsbereich Leiterplattenbohren und für das hochpräzise Schleifen entwickelt.

Der vorliegende Bericht befasst sich ausschließlich mit dem Teilprojekt einer hochpräzisen Schleifspindel und schildert die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten und die entstandenen Ergebnisse.

1.1 Ziele für die Entwicklung der hochpräzisen Schleifspindel

Für die Entwicklung der hochpräzisen Schleifspindel (HP-Spindel) werden im Rahmen des Projekts die folgenden Ziele definiert:

Hauptziele	HP-Spindel
Drehzahl	bis 10.000 U/min
Steifigkeit axial und radial	> 500 N/ μ m
Rundlauf, Planlauf (an der Spindelnase)	< 0,1 μ m
Luftverbrauch	< 30 NL/min
Werkzeugaufnahme	HSK 100
Werkstückaufnahme	DIN 55026

Tabelle 1: Entwicklungsziele der hochpräzisen Schleifspindel

Trotz des Einsatzes von Luftlagern wird auf die Realisierung von hohen axialen und radialen Steifigkeiten geachtet. Diese Forderung wird insbesondere bei der Planbearbeitung von Wafern gestellt, wo TTV Werte (Total Thickness Value) von 0,5 μ m für einen Wafer mit einem Durchmesser von 200 mm gefordert werden. Um diese Forderung erreichen zu können, ist ein steifer Maschinenaufbau, insbesondere auch eine steife Spindel, notwendig. Daher wird im Rahmen dieses Projekts ein Steifigkeitswert vorgesehen, wie er normalerweise nur bei hydrostatisch gelagerten Spindeln realisiert werden kann. Ebenso muß ein Rund- und Planlauf des Spindelrotors von weniger als 0,1 μ m, gemessen an der Spindelnase, realisiert werden. Der maximale Luftverbrauch soll weniger als 30 NL/min betragen, wodurch die Betriebskosten der Spindel gering gehalten werden können. Die maximale Drehzahl beträgt 10.000 U/min, als Werkzeugschnittstelle wird ein HSK 100 eingesetzt. Die Integration einer Spindelnase nach DIN 55026 soll ebenfalls möglich sein. Um die Integration in Bearbeitungsmaschinen zu vereinfachen, wird auf eine kompakte Bauweise geachtet. Ein maximaler Außendurchmesser von 250 mm bei einer Gesamtlänge von 650 mm wird nicht überschritten. Für den Antrieb der Spindel wird ein Synchronmotor eingesetzt, der sich durch geringe Verluste und damit verbunden eine geringe Wärmeentwicklung auszeichnet.

2

Konzeption und Konstruktion der Hochpräzisions-Spindel

2.1 Konzeptentwicklung

Innerhalb der Konzeptphase der Spindel werden zusätzlich zu den in Kapitel 1.1 genannten Zielvorgaben die folgenden Forderungen erarbeitet, die als Randbedingungen bei der Konzeption und Konstruktion berücksichtigt werden:

- Geringes axiales Längenwachstum bei Erwärmung
- Axiallager nahe an der Werkzeugschnittstelle
- Wasserkühlung für den Antriebsmotor
- Medienversorgung an der Rückseite der Spindel

Basierend auf diesen Eingangsdaten wurde das in Bild 1 dargestellte Grobkonzept für die Spindel entwickelt.

Als Antrieb wird ein wassergekühlter Synchronmotor eingesetzt, der zwischen den beiden Radiallagern angeordnet wird. Das Axiallager befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Werkzeugschnittstelle, sodass das axiale Längenwachstum bei Erwärmung der Spindel minimiert werden kann. Hierdurch wird zwar der Abstand des vorderen Radiallagers zur Werkzeugschnittstelle vergrößert, jedoch würde eine umgekehrte Anordnung (Axiallager hinter dem vorderen Radiallager) zu einer deutlich aufwändigeren Montage und damit auch einem höheren Wartungsaufwand der Spindel führen, da das Gehäuse geteilt aufgebaut werden müsste. Um die geforderten Steifigkeiten erreichen zu können, wird das vordere Radiallager mit einem großen Durchmesser ausgeführt, für das hintere Radiallager ist ein geringerer Durchmesser ausreichend. Der Drehgeber wird am Ende der Spindel angeordnet, sodass der Lesekopf leicht zugänglich ist und die Justage erleichtert wird. Der Rotor ist aus Faserverbundkunststoffen aufgebaut, wodurch sich die rotatorische Trägheit des komplett aufgebauten Rotors um 30% gegenüber einer Lösung aus Stahl reduzieren lässt. Hierdurch können Nebenzeiten von Fertigungsprozesse erheblich reduziert werden. An den Lagerstellen wird eine Stahlbuchse vorgesehen, da die Oberflächenqualität des Faserverbundmaterials selbst nicht ausreichend ist, um eine Luftlagerfläche zu realisieren. Auch für die HSK-Werkzeugschnittstelle muss ein Stahleinsatz vorgesehen werden.

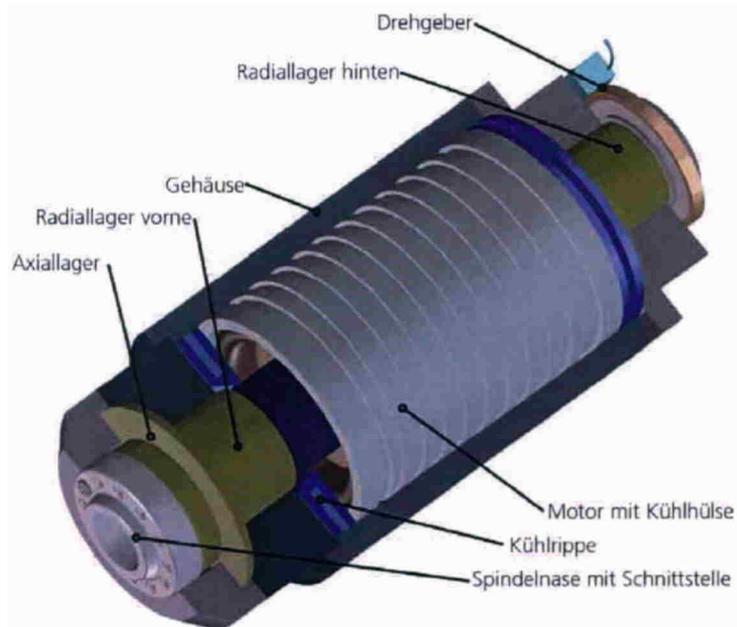


Bild 1: Prinzipskizze der Schleifspindel

2.2 Detailkonstruktion

Eingangsdaten für die Konstruktion sind neben dem entwickelten Konzept insbesondere die erforderlichen Abmessungen der Einzelkomponenten. Dabei sind insbesondere die Abmessungen der Lagerkomponenten sowie die Abmessungen des Motors maßgeblich.

Die Lagerkomponenten werden von der Firma AeroLas entwickelt und für die Spindel ausgelegt. Genauere Informationen finden sich im Kapitel 3: »Luftlagerentwicklung für die hochpräzise Schleifspindel«. Der notwendigen Abmessungen der Lagerkomponenten ergeben sich dabei zu:

Radiallager vorne

Durchmesser der Lagerfläche	120 mm
Länge der Lagerfläche	120 mm

Radiallager hinten

Durchmesser der Lagerfläche	75 mm
Länge der Lagerfläche	90 mm

Axiallager

Innendurchmesser der Lagerfläche	130 mm
Außendurchmesser der Lagerfläche	180 mm

Der Motor wird von der Firma ATE entwickelt und ausgelegt. Genaue Angaben zur Motorentwicklung finden sich im Kapitel 4: »Motorentwicklung für die Schleifspindel«. Die äußeren Abmessungen des Motors wurden wie folgt festgelegt:

Motor

Innendurchmesser Rotor	76 mm
Außendurchmesser Rotor	109 mm
Länge Rotor	150 mm
Innendurchmesser Stator	110 mm
Außendurchmesser Stator	170 mm
Länge Stator mit Wickelköpfen	240 mm

Da der Motor mit einer Kühlhülse ausgerüstet werden soll, ergibt sich für den Motor aufgrund des hierfür notwendigen Bauraums ein einbaufertiger Außendurchmesser von 190 mm. Die Kühlhülse wird dabei, wie in Bild 2 und Bild 3 dargestellt, als zweigängiges Gewinde ausgeführt. Durch die Zuführbohrungen der hinteren Kühlrippe wird das Kühlwasser zugeführt, durchströmt zunächst die hintere Kühlrippe und gelangt dann in den ersten Gang der Kühlhülse (blau dargestellt). Nachdem das Kühlwasser die zweite Kühlrippe durchlaufen hat, gelangt es in den zweiten Gang der Kühlhülse (rot dargestellt) und wird durch eine Bohrung in der hinteren Kühlrippe und dem Gehäuse dem Kühlaggregat zugeführt. Auf diese Art können die beide Kühlanlüsse am hinteren Ende der Spindel vorgesehen werden. Darüber hinaus stellt sich auf diese Art eine gleichmäßigere Temperaturverteilung entlang des Motors ein, als es bei einer Durchströmung in nur einer Richtung der Fall wäre. Durch den Einsatz von Kühlrippen kann zudem eine Trennung zwischen der Wärmequelle Motor und den eng tolerierten Luftlagern erreicht werden.

Wird zu dem Außendurchmesser der Kühlhülse die Wandstärke des Gehäuses hinzuaddiert, ergibt sich ein Außendurchmesser der Spindel von 230 mm. Ausgehend hiervon werden die Lagerkomponenten in die Spindel integriert. Somit ergibt sich der in Bild 5 dargestellte Aufbau.

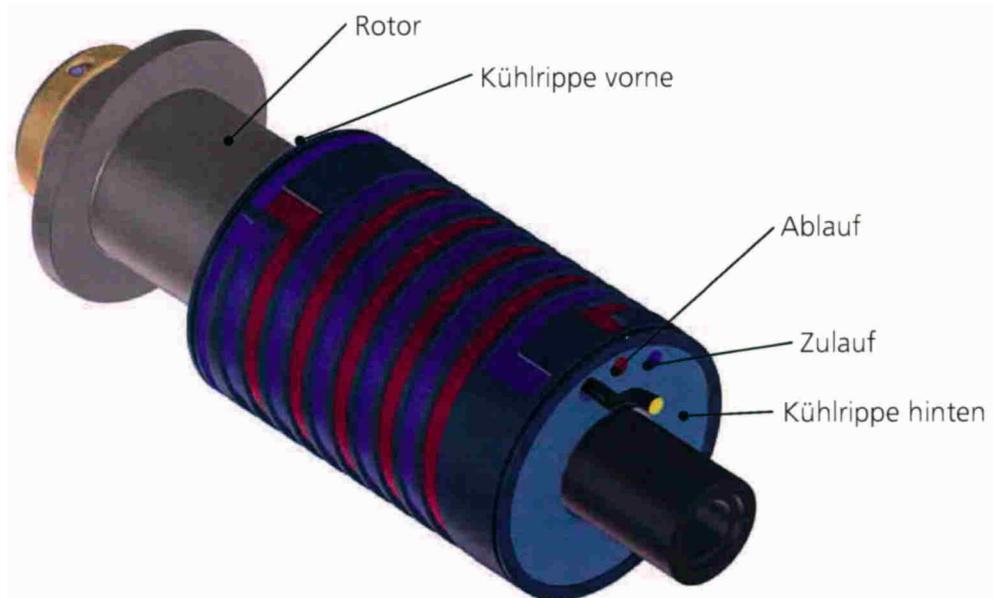


Bild 2: Kühlsystem des Motors mit Zu- und Ablauf am Ende der Spindel

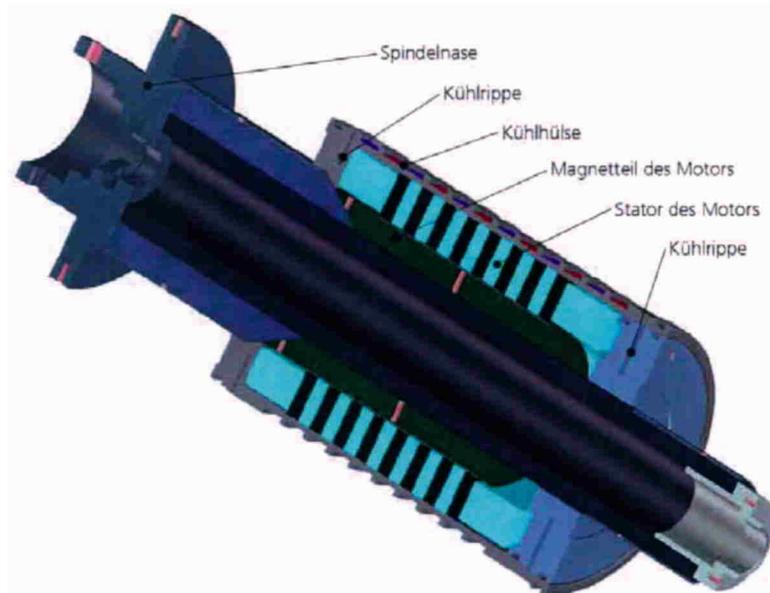


Bild 3: Kühlung des Motors in Schnittdarstellung

Um mit dem Außendurchmesser der Spindel nicht größer zu werden als die durch den Motor vorgegebenen 230 mm, werden die Axiallagerscheiben zusammen mit dem vorderen Gehäusedeckel verschraubt, Bild 4.

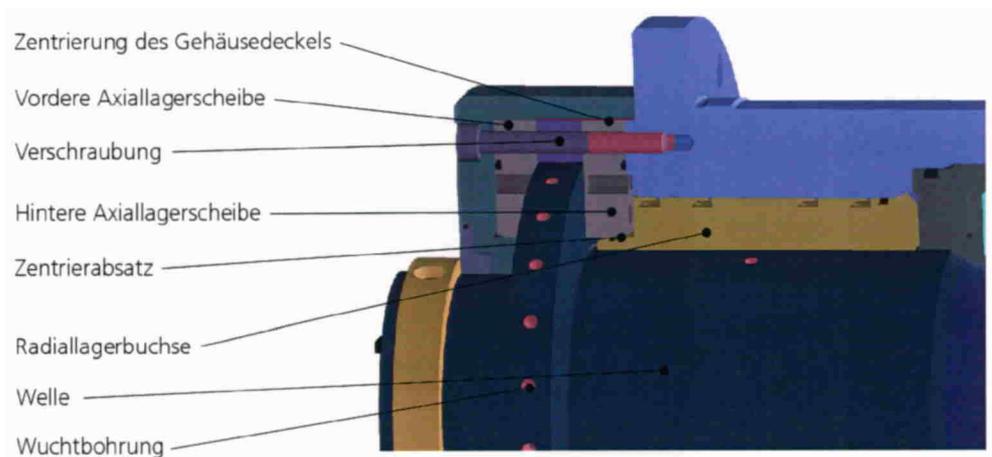


Bild 4: Verschraubung der Axiallagerscheiben und des Gehäusedeckels

Eine Zentrierung der hinteren Axiallagerscheibe wird dabei durch die Lagerbuchse des vorderen Radiallagers vorgenommen. Die Zentrierung der vorderen Axiallagerscheibe wird über den vorderen Gehäusedeckel vorgenommen. Auf diese Art kann eine sehr kompakte Bauweise erreicht werden, da eine separate Verschraubung der Axiallagerscheiben entfällt.

Die Luft für die Lager und die Sperrluft zum Schutz der Lager gegen Verschmutzung wird von hinten durch das Gehäuse zugeführt, sodass sämtliche Anschlüsse zur Medienversorgung an der Rückseite der Spindel angeordnet werden können. Ebenso wird die Abluft der Lager gesammelt und zentral am Ende der Spindel abgeführt.

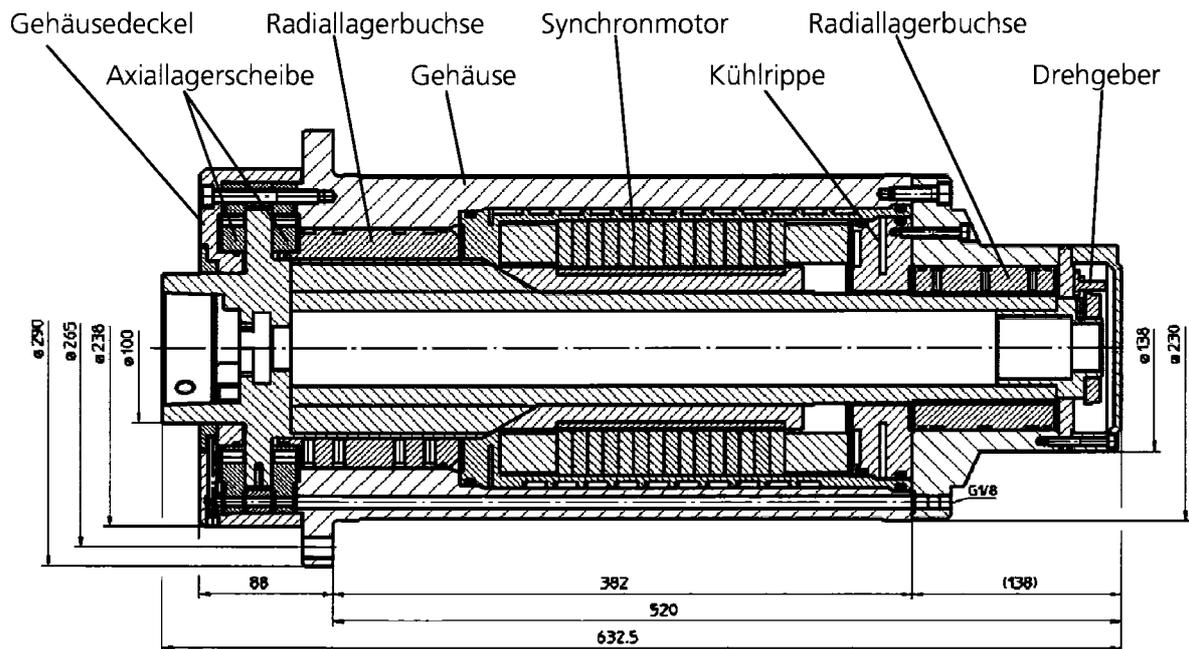


Bild 5: Schleifspindel in Schnittdarstellung

Die Sperrluft wird durch Bohrungen im Gehäuse bis zur Spindelnase geleitet und dort in einer umlaufenden Nut auf dem Umfang verteilt. Um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten, muss in den ringförmig um den Spindelrotor verlaufenden Abströmquerschnitt ein Strömungswiderstand integriert werden, Bild 6. Dieser ist in Form einer Rändelfläche realisiert, die in Kontakt mit einer Planfläche gebracht wird. Hierdurch verteilt sich die Sperrluft zuerst über dem Umfang des Rotors, bevor sie durch den Spalt abströmt.

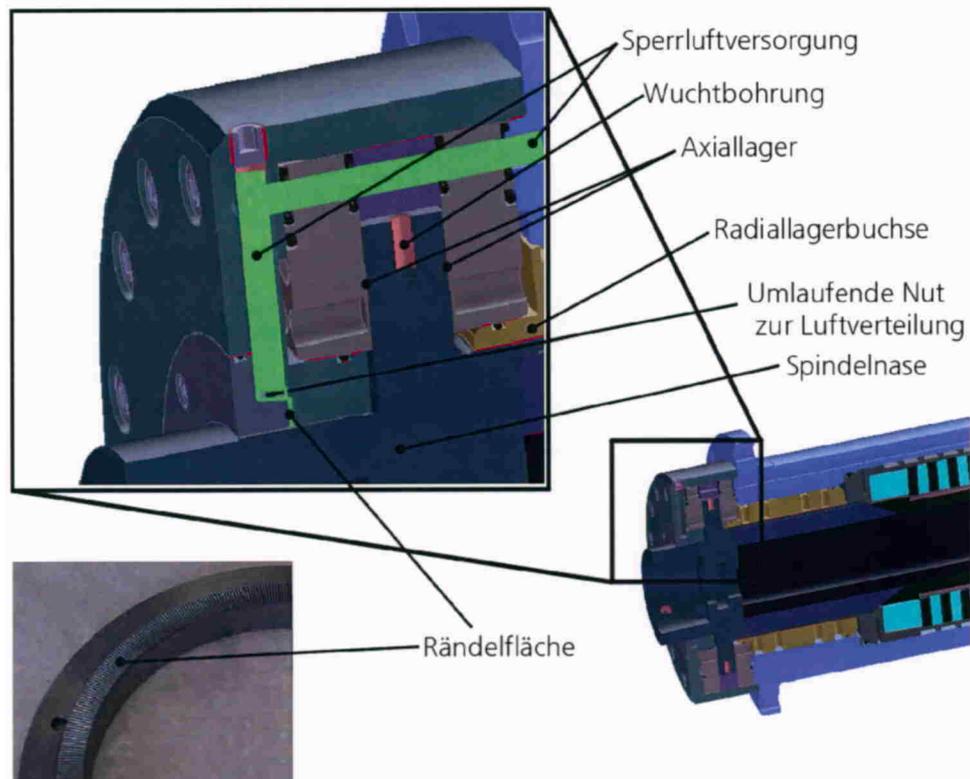


Bild 6: Sperrluftsystem an der Spindelnaese

Zum Wuchten des Spindelrotors sind am Bund des Axiallagers sowie am hinteren Ende der Spindel in der Aufnahmebuchse für das Messzahnrad Gewindebohrungen vorgesehen. Die Bohrungen sind dabei so angeordnet, dass ein Wuchten im eingebauten Zustand vorgenommen werden kann. Dazu ist im Spindelgehäuse eine verschließbare Bohrung vorgesehen, die den Zugang zu den Bohrungen der Axiallagerscheibe ermöglicht. Die Wuchtbohrungen am hinteren Ende des Spindelrotors sind nach dem Entfernen des hinteren Gehäusedeckels zugänglich, Bild 7.

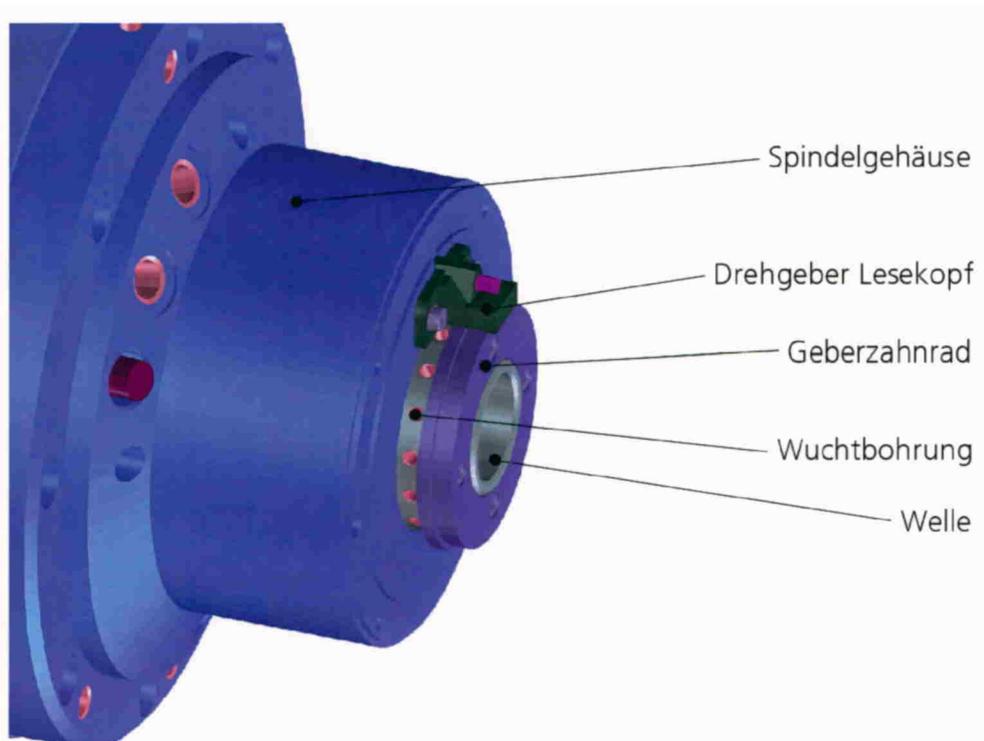


Bild 7: Lesekopf und Wuchtbohrungen bei abgenommenem Gehäusedeckel

2.3 Konstruktion und Auslegung des Spindelrotors

Der Rotor der Schleifspindel wird aus kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) aufgebaut. Dabei ist neben der Reduktion des Massenträgheitsmoments durch die geringe Dichte des Faserverbundwerkstoffs der geringe, in Richtung der Kohlenstofffasern sogar negative Wärmeausdehnungskoeffizient des CFK-Laminats als Grund für den Einsatz in der Hochleistungsspindel zu nennen. Bei einer Erwärmung des Spindelsystems kann somit die Verringerung des Luftlagerspalts am Radiallager reduziert werden. Damit dieser Effekt minimiert wird, wird zur Unterstützung dieser Eigenschaft die Rotornase aus Stahl an der Verbindung zum CFK-Rotor dünnwandig ausgeführt. Auch die Aufweitung infolge der Fliehkraft ist bei einem Bauteil aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff erheblich geringer als bei einem Bauteil aus Stahl, da das Material einen ähnlichen Elastizitätsmodul wie Stahl aufweist, die Dichte jedoch nur ein Drittel der Dichte von Stahl beträgt.

Der Spindelprototyp wird mit einer HSK 100 Schnittstelle ausgerüstet. Die Integration einer anderen Schnittstelle, beispielsweise einer Schnittstelle nach

DIN 55026, ist jedoch bei einem nahezu identischen Aufbau des Rotors ebenfalls möglich. Als Spannsystem für die HSK-Schnittstelle wird eine manuelle Spannpatrone der Firma Mapal ausgewählt, die sich durch eine kompakte Bauweise und eine einfache Integration in die Spindelnase auszeichnet. Da die Spindelnase wegen der integrierten HSK-Schnittstelle aus Stahl ausgeführt werden muss, wird für den Spindelrotor ein Aufbau entworfen, bei dem auf einem CFK-Grundkörper eine Spindelnase aus Stahl verklebt wird, die neben der HSK-Schnittstelle ebenso die vordere Axial- und Radiallagerfläche beinhaltet, Bild 8. Das Fügen dieser beiden Teile wird durch eine Klebeverbindung realisiert. Da mit modernen Klebstoffen Festigkeiten von bis zu 20 N/mm² erreicht werden können, kann mit der zur Verfügung stehenden, großen Klebefläche eine ausreichende Festigkeit erreicht werden. Um eine gleichmäßige Benetzung der Fügestelle zu gewährleisten, wird in der Fügefläche eine 0,2 mm tiefe Nut vorgesehen, in die von außen der Klebstoff durch eine Bohrung injiziert wird. Der CFK-Rotor kann somit, als einfaches, rohrförmiges Bauteil, durch Wickeln hergestellt, an der Fügestelle durch Drehen oder Schleifen vorbearbeitet und schließlich nach dem Verkleben mit der Spindelnase in einer Aufspannung endbearbeitet werden. Für das hintere Radiallager wird eine dünne Metallhülse nach dem selben Verfahren aufgebracht. In gleicher Weise wird der Motor auf dem Rotor fixiert.

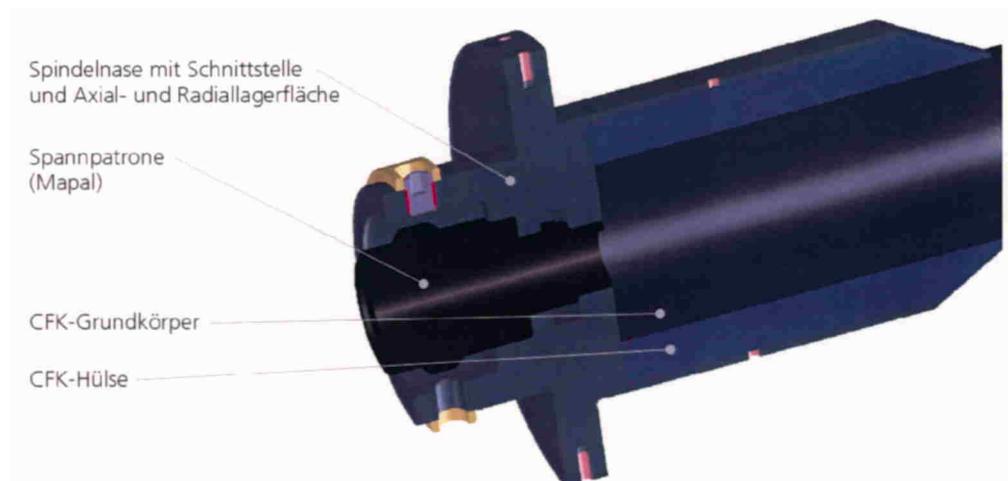


Bild 8: Spindelnase mit HSK Spannpatrone

Bild 9 zeigt den Aufbau des CFK-Rotors. Der CFK-Körper ist dabei aus zwei Teilen hergestellt. Auf einen rohrförmigen Grundkörper wird an der Vorderseite eine Hülse aus CFK mit dem selben Laminataufbau aufgeklebt, Bild 8. Im Vergleich zu einem einteiligen Aufbau wird eine erheblich vereinfachte Fertigung dadurch erreicht, dass der Zerspanungsaufwand des Faserverbundmaterials deutlich reduziert wird. Fertigt man nämlich den CFK-Körper in einem Teil, so müssen die Bereiche der Lagen, in denen die Kohlenstofffasern am Ende eines

Überlaufs beim Wickeln neu ausgerichtet werden, zerspannt werden. Wird der Rotor demgegenüber in zwei Teilen aufgebaut, so werden diese Bereiche einfach abgesägt. Die Hülse bildet die Schnittstelle zur Spindelnase, die ebenfalls durch Kleben mit dem Faserverbundwerkstoff verbunden wird.

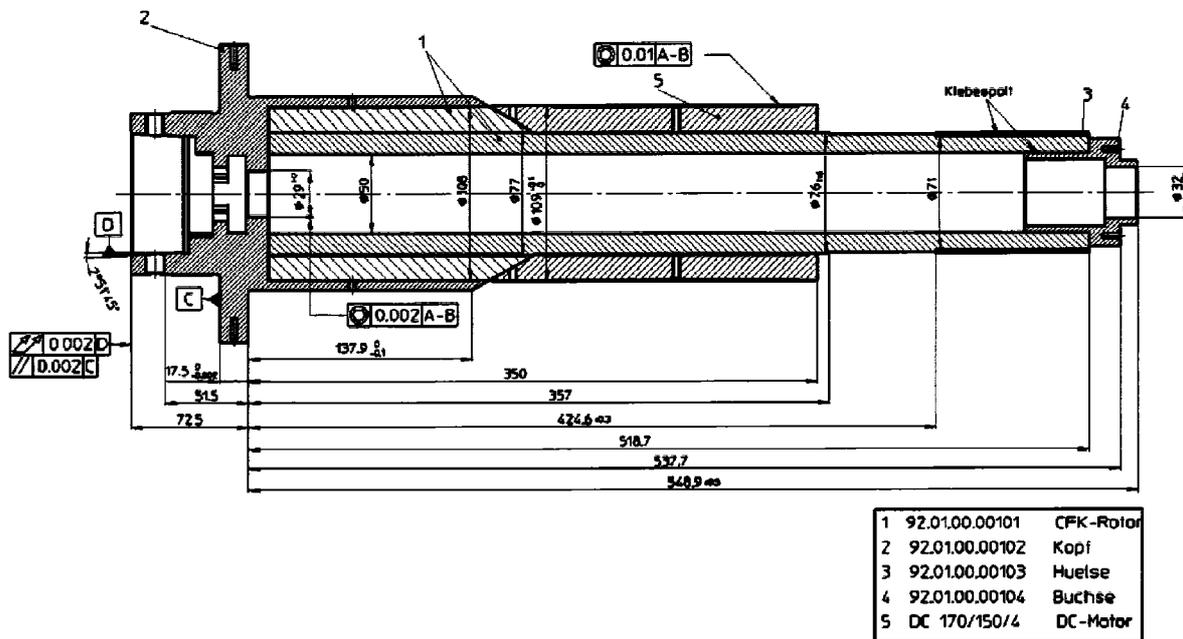


Bild 9: Aufbau des CFK-Rotors

Die Laminatauslegung für den Rotor wurde mit Hilfe der Auslegungssoftware »LAMTECH« durchgeführt. Zu beachten ist, dass Faserverbundwerkstoffe ein richtungsabhängiges Materialverhalten aufweisen. Das Bauteil wird aus mehreren Schichten, sogenannten Lagen, aufgebaut, in denen die Orientierung der Kohlenstofffasern individuell festgelegt werden können. Durch diesen Lagenaufbau können die Bauteileigenschaften den Anforderungen gezielt angepasst werden.

Für das hier berechnete Laminat werden die Kennwerte daher in Rotorlängsrichtung und in Umfangsrichtung angegeben. Für den Rotor wird eine hochmodulige Kohlenstofffaser der Firma Mitsubishi eingesetzt, mit der in einem unidirektionalen Laminat E-Module von bis zu 520.000 N/mm² erreicht werden können. Für den hier gewählten Laminataufbau ergeben sich die folgenden Kennwerte:

Allgemeine Daten des Laminates

Faser:	Mitsubishi K63B12R
Matrix:	LY 556
Faservolumengehalt:	60%
Dichte:	1,98 g/cm ³
Querkontraktionszahl:	0,32

Eigenschaften in Längsrichtung des Rotors

E-Modul:	218.530 N/mm ²
Wärmeausdehnung:	-6,43 * 10 ⁻⁷ 1/K

Eigenschaften in Umfangsrichtung

E-Modul:	166.280 N/mm ²
Wärmeausdehnung:	-1,74 * 10 ⁻⁷ 1/K

Laminataufbau (Ausrichtung der Filamente zur Rotorlängsachse)

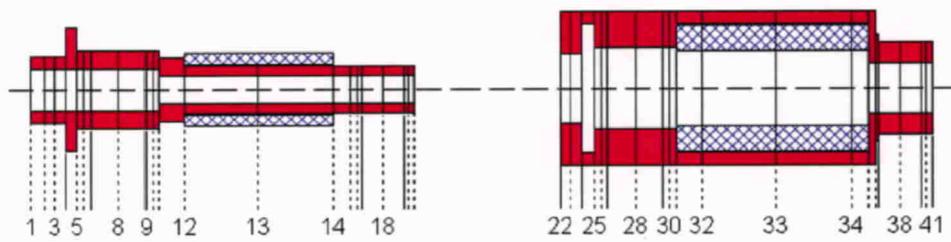
Lage 1 / 2	+/-12°	Lage 12 / 13	+/-12°
Lage 3	90°	Lage 14 / 15	+/-45°
Lage 4 / 5	+/-45°	Lage 16	90°
Lage 6	90°	Lage 17 / 18	+/-45°
Lage 7 / 8	+/-45°	Lage 19	90°
Lage 9 / 10	+/-12°	Lage 20 / 21	+/-12°
Lage 11	90°		

Da für die Spindel ein Luftlager mit einem Luftspalt von nur 12 µm verwendet wird, muss die Aufweitung des Rotors infolge Fliehkraft bei einer Drehzahl von 10.000 U/min untersucht werden. Betrachtet man zunächst nur die Spindelnase aus Stahl (Außendurchmesser 120 mm, Innendurchmesser 108 mm), so liegt die radiale Aufweitung bei Maximaldrehzahl bei 7,5 µm. Um diesen Betrag würde der Lagerspalt bei einer Drehzahl von 10.000 U/min reduziert werden. Wird nun jedoch der Grundkörper aus faserverstärktem Kunststoff und die Klebeverbindung der beiden Teile in die Berechnung mit einbezogen, so reduziert sich die radiale Aufweitung bei Maximaldrehzahl auf einen Wert von weniger als 5 µm. Hier kommt das günstige Verhältnis aus E-Modul und Dichte des Faserverbundwerkstoffes zum tragen, da sich der CFK-Körper ohne die Klebeverbindung lediglich um einen Betrag von 0,9 µm in radialer Richtung aufweitet. Somit ist ein sicherer Betrieb der Spindel auch bei einer maximalen Drehzahl von 10.000 U/min gewährleistet.

Rotorschwingungen

Gehäuseschwingungen

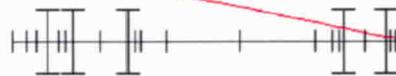
Radiale Schwingungen



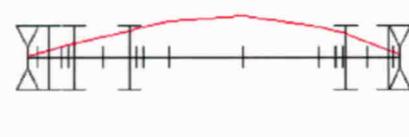
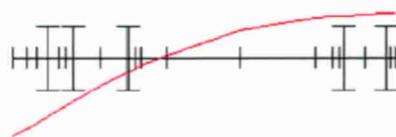
1. Eigenfrequenz = 783.66 Hz



2. Eigenfrequenz = 834.33 Hz



3. Eigenfrequenz = 1127.53 Hz

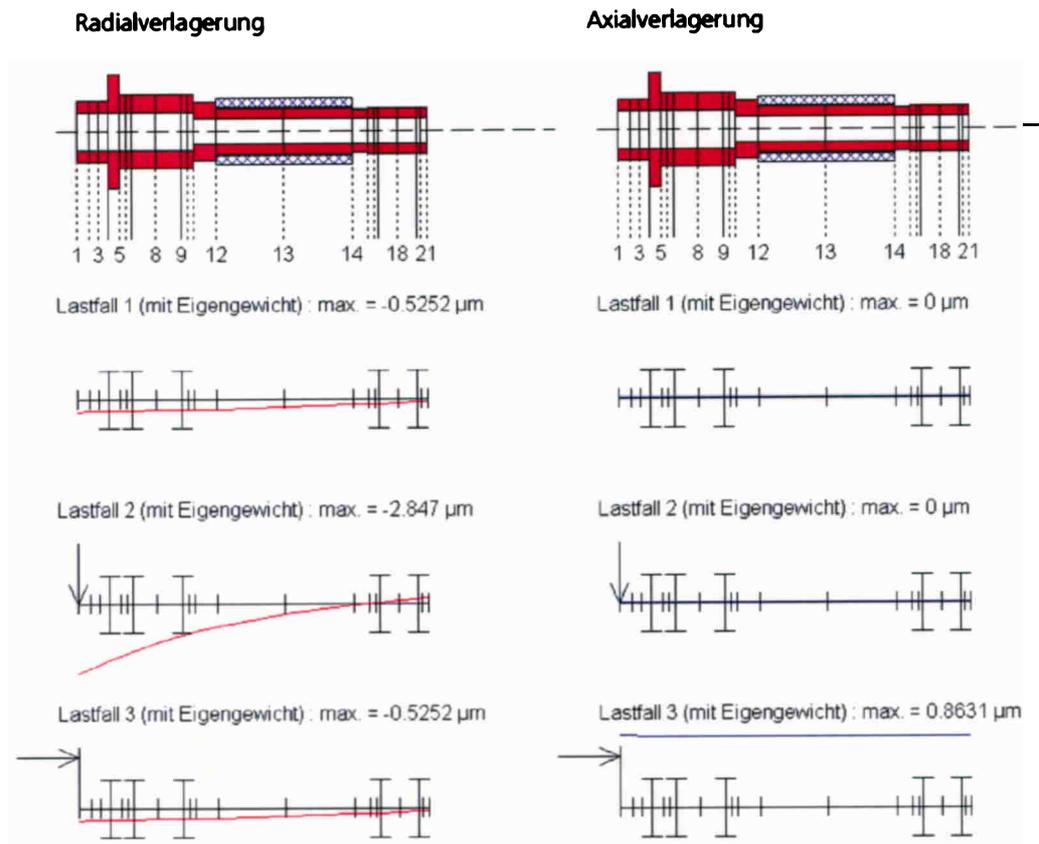


Axiale Schwingungen

1. Eigenfrequenz = 783.21 Hz



Bild 10: Berechnete Resonanzen und Schwingungsformen des Spindelrotors



- Lastfall1: Eigengewicht
- Lastfall2: Eigengewicht + 500 N in radialer Richtung an der Spindelnaese
- Lastfall3: Eigengewicht + 500 N in axialer Richtung an der Spindelnaese

Bild 11: Statische Verlagerung des Rotors bei Belastung an der Spindelnaese

Bei der Auslegung des Rotors wird zudem eine Schwingungsanalyse mit Hilfe der Software »SPILAD« durchgeführt (Bild 10). Als Grundlage der Analyse wird ein vereinfachtes Modell der Spindel erstellt. Die Motorbauteile werden als Zusatzmassen, die keinen Beitrag zur Steifigkeit leisten, berücksichtigt (schraffiert dargestellt). Die Berechnung der Rotorschwingungen erfolgt unter Berücksichtigung der von der Firma Aerolas zur Verfügung gestellten Lagersteifigkeiten. Die Luftlager werden dabei durch zwei Stützstellen an den Punkten 7 und 9 (Bild 10 und Bild 11) für das vordere und an den Punkten 17 und 19 (Bild 10 und Bild 11) für das hintere Radiallager angenähert. An jeder Stützstelle wird dabei eine Steifigkeit von 250 N/ μm angesetzt. Das Axiallager wird mit 500 N/ μm am Punkt 4 (Bild 10 und Bild 11) simuliert.

Die Berechnung ergibt eine erste Eigenfrequenz von 780 Hz, was einer Drehzahl von ca. 46.000 U/min entspricht. Dieser Wert liegt weit oberhalb der angestrebten Grenzdrehzahl von 10.000 U/min. Schwingungsprobleme sind demnach für den vorgesehenen Einsatzfall nicht zu erwarten.

Ähnliche Berechnungen werden für die statische Verlagerung der Spindel unter Last durchgeführt. Die Ergebnisse bei einer Belastung an der Werkzeugaufnahme mit 500 N sind in Bild 11 dargestellt.

Zu erkennen ist, dass die geforderten Steifigkeiten in radialer Richtung nicht erreicht werden können. Die Simulation ergibt eine Steifigkeit von 220 N/ μm . Die Ursache dafür ist in geometrischen Zusammenhängen sowie in einer begrenzten Steifigkeit des Rotors und der Lager zu suchen. Ein steiferer Rotor lässt sich lediglich durch Vergrößerung des Durchmessers realisieren. Durch Änderung der Materialeigenschaften kann diese Steifigkeit nicht mehr erreicht werden, da die Materialparameter in Achsrichtung schon jetzt auf gleichem Niveau liegen wie die von Stahl. Ein größerer Durchmesser des Rotors bedingt in gleichem Maße einen Zuwachs des Außendurchmessers der Spindel. Eine Vergrößerung der Außenabmessungen erschwert jedoch die Integration in die Bearbeitungsmaschinen erheblich, sodass von dieser Lösung Abstand genommen wird. Zur Erhöhung der Steifigkeit können alternativ zu einer Umkonstruktion größere Luftdrücke als die vorgesehenen 6 bar eingesetzt werden. Steht dieser Druck nicht durch die betriebsinterne Druckluftversorgung zur Verfügung, so können zusätzlich Druckluftverstärker verwendet werden.

Von der Zielvorgabe, eine Steifigkeit in radialer Richtung von 500 N/ μm zu erreichen, muss demnach Abstand genommen werden, da sich dieser Wert nach den Ergebnissen der durchgeführten Berechnungen nicht erreichen lässt.

3

Luftlagerentwicklung für die hochpräzise Schleifspindel

Die Spindel für die Hochpräzisionsbearbeitung stellt große Herausforderungen an die aerostatische Lagerung. Um die geforderten Genauigkeitswerte zu erreichen, müssen mögliche Fehlerquellen so weit wie möglich minimiert werden. Insbesondere die Unrundheit des Rotors in Verbindung mit geometrischen oder lagerbedingten Unregelmäßigkeiten der gehäuseseitigen Lagerfläche ruft reproduzierbare Fehler im Rund- und Planlaufverhalten hervor.

Rund- und Planlauffehler, die durch die Luftlagerung hervorgerufen werden, können gegenüber separierten Lagertaschen durch die gleichmäßige Anordnung einer großen Anzahl lasergefertigter Mikrodüsen in der Lagerbuchse minimiert werden. Mit dieser Technologie ist es möglich, die Führungswirkung des Lagers extrem homogen zu gestalten – ein Grund, warum sie in Industriezweigen mit extrem hohen Anforderungen wie der Festplattenproduktion und dem DVD - Mastering zum Einsatz kommt. Die mittels Laser gefertigten Mikrodüsen minimieren dabei die Aufgabe einer sonst vorgeschalteten Drossel und reduzieren das für dynamische Lagereigenschaften negative Totvolumen zwischen Spindelrotor und Luftlager. Bild 12 zeigt die verwendete Lagerbuchse mit einer im Querschnitt vergrößert dargestellten Einzeldüse. Der engste Kreisquerschnitt der Düse kann je nach Auslegung im Durchmesser zwischen 10-60 μm variieren.

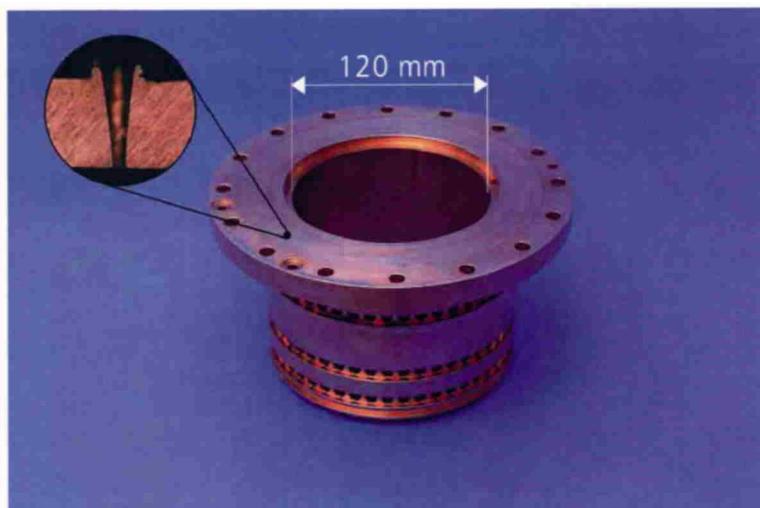


Bild 12: Aerostatisches Radial-Axial-Lager mit Mikrodüsen

Statische und dynamische Lasten am Rotor können nur selten durch eine geeignete Prozessführung ausgeglichen werden. Um eine Verlagerung und Verformung des Rotors und damit Ungenauigkeiten am Werkstück so klein wie möglich zu halten, müssen Steifigkeit und Dämpfung der Spindellagerung ausreichend hoch sein. Hohe Steifigkeiten setzen bei aerostatischen Lagern kleine Lagerspalte voraus. Andererseits darf ein minimales Lagerspiel nicht unterschritten werden, um sowohl die Einflüsse fertigungstechnischer Ungenauigkeiten als auch des thermischen Wachstums des Rotors auffangen zu können. Entsprechend liegt der radiale Lagerspalt der hochpräzisen Schleifspindel im Bereich von $12\ \mu\text{m}$, was einen Kompromis zwischen den beschriebenen Einflüssen darstellt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Luftlager stark schwankende Eigenschaften aufweist, wenn der Lagerspalt um den Auslegungspunkt variiert wird. Diese Tatsache soll am Beispiel des Axiallagers der HP-Spindel demonstriert werden. In Bild 13 ist die Reaktionskraft des Lagers bei Auslenkung aus der Mittellage für zwei verschiedene Lagerspiele ($24\ \mu\text{m}/12\ \mu\text{m}$ Spalt bzw. $40\ \mu\text{m} / 20\ \mu\text{m}$ Spalt) aufgetragen. Obwohl sich die maximale Lagerbelastbarkeit von $4500\ \text{N}$ kaum ändert, ist die Steigung der Belastungskurve deutlich unterschiedlich. Dies tritt noch deutlicher in

Bild 14 zu Tage: Die Lagersteifigkeit in der Ruhelage unterscheidet sich um einen Faktor von 5, obwohl das Lagerspiel nur um 70% vergrößert ist.

Ursächlich für dieses Verhalten ist die Auslegung des Lagers auf einen Spalt von $12\ \mu\text{m}$. Die durch Düsenanzahl und Düsengröße eingestellte Speiseluftmenge ist nicht für ein größeres Lagerspiel bemessen, sodass die Steifigkeit des Lagers überproportional abnimmt. Auch im Radiallager ändert sich die Steifigkeit stark mit dem Lagerspalt, wie Bild 15 belegt. Die Auslegung ist so erfolgt, dass bei geringem thermischem Wellenwachstum die Steifigkeit nicht abnimmt und dennoch bei dem eingestellten Sollspalt von $12\ \mu\text{m}$ ein ausreichend hoher Wert von über $500\ \text{N}/\mu\text{m}$ erreicht wird.

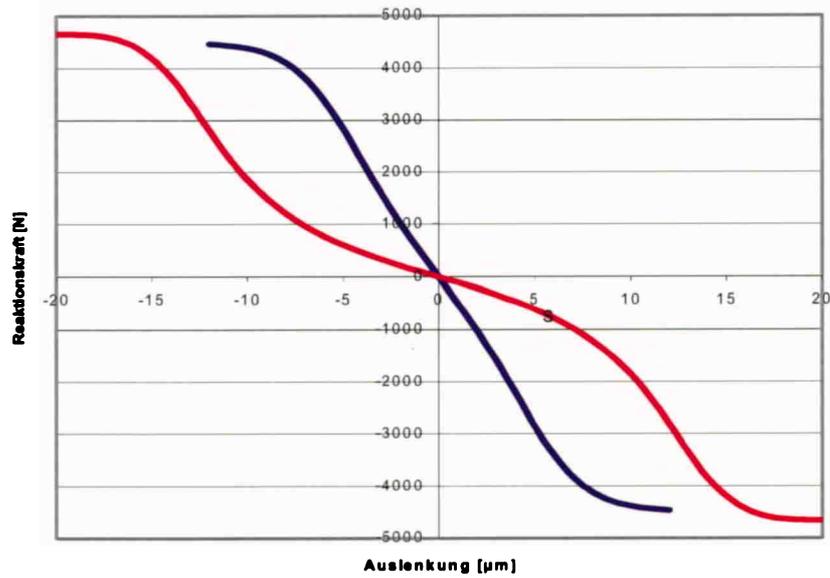


Bild 13: Axiale Tragkraft bei 24 μm (rot) und 40 μm (blau) Lagerspalt

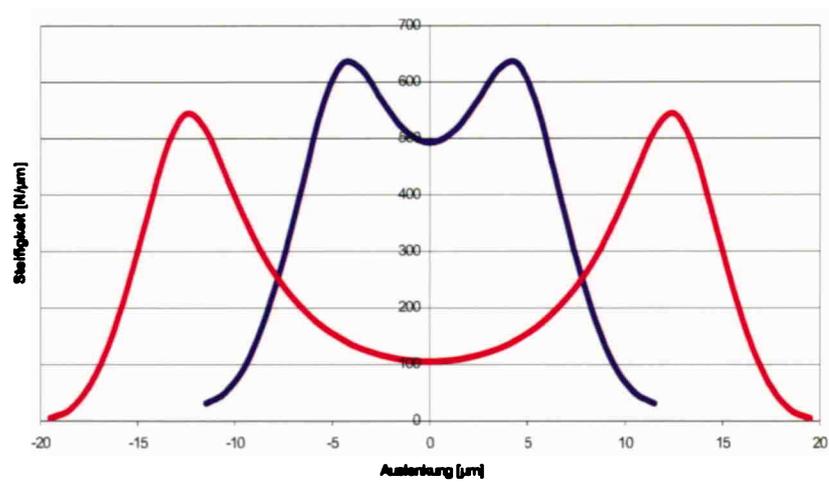


Bild 14: Axiale Steifigkeit bei 24 μm (blau) und 40 μm (rot) Lagerspalt

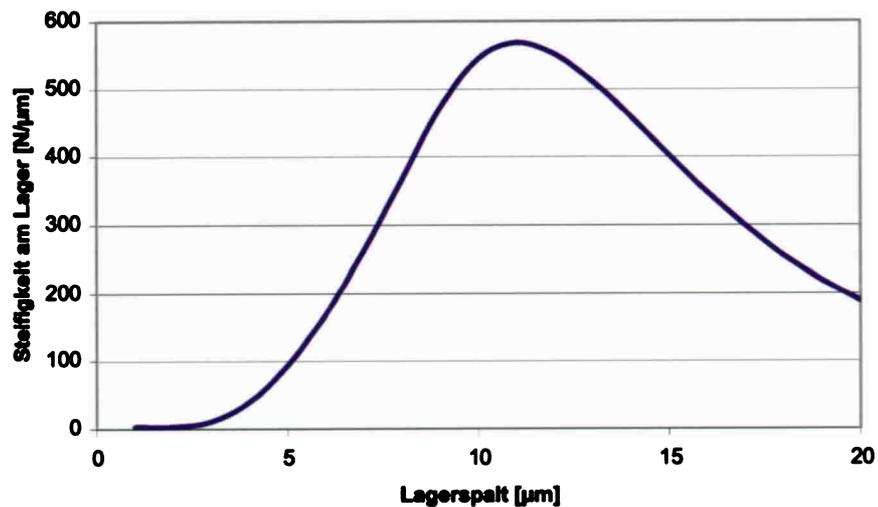


Bild 15: Radiale Steifigkeit der hochpräzisen Spindel

Im Zusammenspiel zwischen Lagerbuchse und zu führender Komponente ist die Rundheitstoleranz des Rotors von besonderer Bedeutung und muss mit einer Genauigkeit im μm -Bereich gefertigt werden. In Vorbereitung der Lagerauslegung wird ein Testträger aus Stahl (\varnothing 62 mm) gefertigt. Es wird eine Rundheit kleiner $0,2 \mu\text{m}$ erreicht (Bild 16). Am Messschrieb erkennt man den Einfluss der Werkstückspannung bei der Drehbearbeitung anhand drei um 120° versetzter Amplituden. Ferner ist eine höherfrequente Formabweichung feststellbar, die auf Drehriefen zurückzuführen ist. Die gemessenen Form- und Lageabweichungen zeigen die grundsätzlich Herstellbarkeit der rotorseitigen und gehäuseseitigen Lagerflächen in notwendiger Präzision.

In Abbildung 2 ist die Differenz von zwei verschiedenen Messdurchgängen aufgetragen. Man erkennt deutlich, dass das in Abbildung 1 aufgenommene Muster von Umdrehung zu Umdrehung sehr genau reproduzierbar ist – der verbleibende Rundlauffehler beträgt weniger als 10 nm.

Der beschriebenen Testträger zeigt, dass die Herstellung geforderter Formtoleranzen an Rotoren prinzipiell möglich ist.

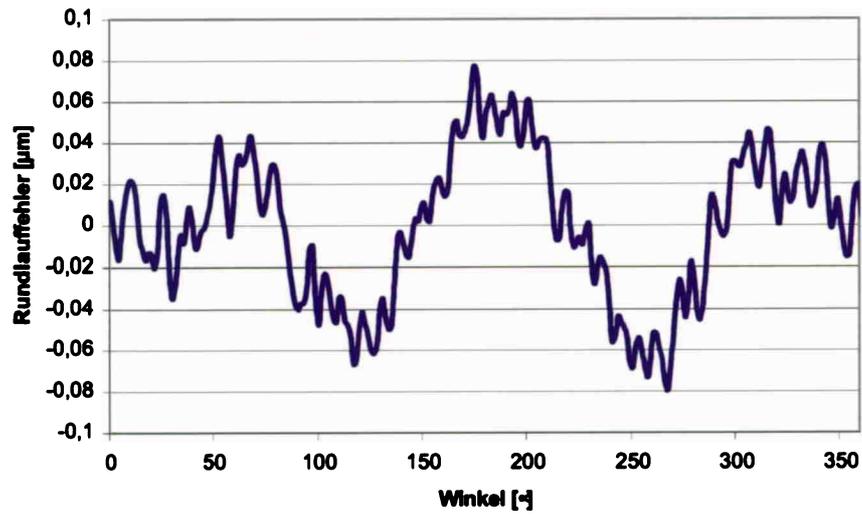


Bild 16: Wiederholbarer Rundlauffehler (RRO) am Testträger DA 62-1

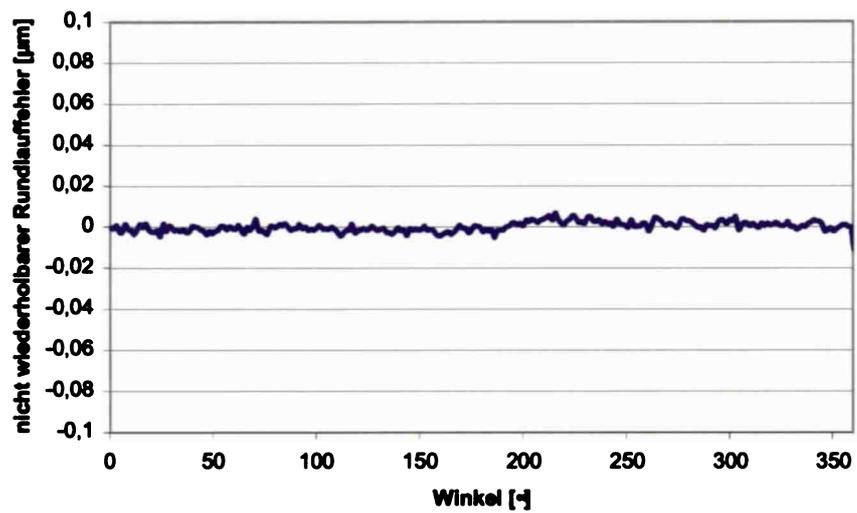
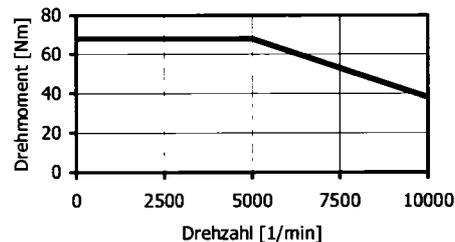
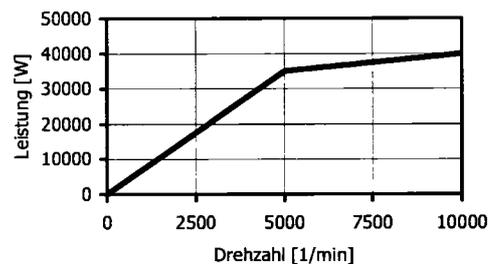


Bild 17: Nicht wiederholbarer Rundlauffehler am Testträgers DA 62-1

4

Motorentwicklung für die Schleifspindel

Der Motor der HP-Spindel hat die Aufgabe, den aerostatisch gelagerten und hinsichtlich des Massenträgheitsmoments optimierten Spindelrotors möglichst mit geringem Drehmomentoberwellenanteil anzutreiben. Dabei standen anfänglich verschiedene Motorbaugrößen zur Diskussion. Da die Spindel jedoch in extremer Leichtbauweise, insbesondere auf der Rotorseite, ausgeführt werden soll, stellt dies etliche Anforderungen an den Motor. Leichtbauweise auf der Wellen- bzw. Rotorseite bedeutet den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen. Bekanntermaßen besitzen solche Werkstoffe aber allgemein eine schlechte Wärmeleitfähigkeit. Darum muss ein Motorkonzept gewählt werden, das nur eine minimale Rotorerwärmung zur Folge hat. Die Entscheidung fällt auf einen permanentmagneterregten Synchronmotor. Der entwickelte Motor hat folgende Eigenschaften und Kennlinien:



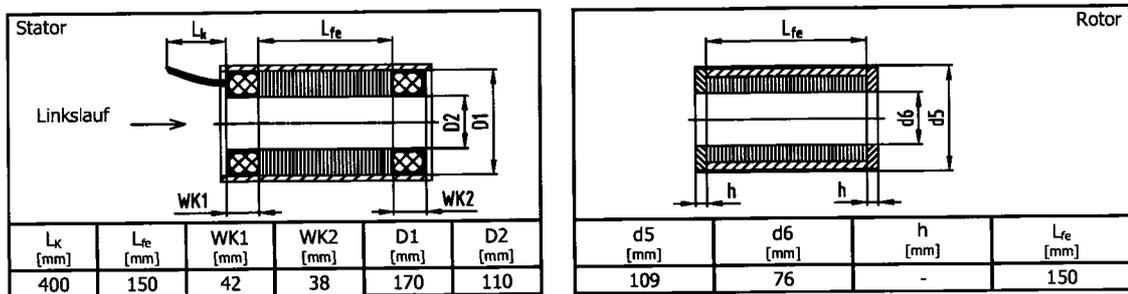
Spannung	[U]	380	380
Nennstrom	[A]	66	66
Frequenz	[Hz]	167	334
Drehzahl	[1/min]	5000	10000
Leistung	[W]	35000	40000
Drehmoment	[Nm]	68	38
Betriebsart		S1 - 100%	

Bild 18: Eigenschaften und Kennlinie des verwendeten Synchronmotors

Die Auswahl des Synchronmotors berücksichtigt darüber hinaus:

- eine Feldschwächbarkeit ab 5.000 min⁻¹ bis 10.000 min⁻¹ (Anpassung an die drehzahl-, bearbeitungs- und leistungsabhängige Charakteristik)
- ein Betrieb an einem marktüblichen Standardumrichter (z.B. Siemens 611)

Die geometrischen Abmaße des Stators und Rotors sind in folgenden Skizzen dargestellt:



Neben der beschriebenen mechanischen Auslegung des Rotors liegt ein weiterer Schwerpunkt der Antriebsentwicklung in der Optimierung elektronischer Parameter des Antriebs. Dabei werden insbesondere folgende Forderungen bei der Entwicklung berücksichtigt:

- Optimale Ausnutzung der Magnetflussführung
- Möglichst sinusförmiges Luftspaltfeld in Verbindung mit einer sinusförmigen elektromagnetischen Kraft (EMK) um Drehmomentoberwellen bei einer Sinusbestromung des Motors zu vermeiden.

Diese Forderungen sind für eine gute Bearbeitungsgüte der Hochpräzisionsspindel relevant.

Durch die Integration des Rotors in ein aus Faserverbundwerkstoffen aufgebautes Wellensystem ist der Wärmeabtransport von Verlusten, die im Rotor entstehen, außerordentlich schlecht. Da aber das rotorwärmeabhängige Längenwachstum des Wellensystems aus Präzisionsgründen minimiert werden muss, kommt dem Kühlkreislauf eine besondere Bedeutung zu. So wird das

Kühlsystem des Stators für eine möglichst gute Abfuhr der durch Statorverluste resultierende Wärme ausgelegt. Für die Auslegung und Konzeption des Systems wird das FEM-Verfahren (Software „FEMAG“) und analytische Berechnungsmethoden genutzt.

Um eine möglichst optimale magnetische Ausnützung des Rotorbauvolumens zu erhalten, werden verschiedene Anordnungen der Magnete diskutiert. Bei einem sogenannten „Halbach-System“ erfolgt die Feldführung nicht über einen weichmagnetischen Kern, sondern über in bestimmte Vorzugsrichtungen orientiert angeordnete Magnete, die direkt in den Faserverbundrotor integriert werden (siehe Bild 19).

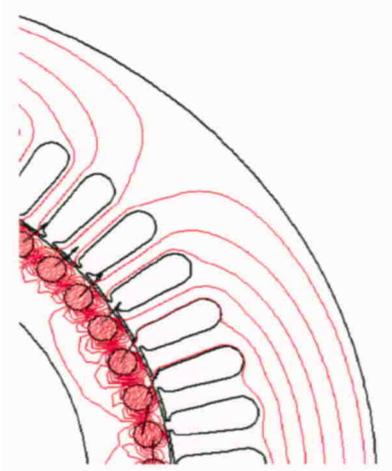


Bild 19: Flussführung ohne weichmagnetischen Rückfluss

Jedoch zeigt sich, dass diese Anordnung bezüglich der Feldausnützung nicht grundsätzlich optimal ist und demnach auch die Ziele eines möglichst massenträgheitsmomentarmen Rotors nicht ausreichend unterstützt werden. Deshalb wird letztlich ein System mit radial ausgerichteten Magneten realisiert. Das erreichte Massenträgheitsmoment des Motorrotors mit ca. $12 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$ fällt damit im Vergleich zu herkömmlichen Systemen deutlich kleiner aus, wohingegen durch den Rotoraufbau bedingte Verluste minimiert werden. Die Verluste liegen bei nur einigen 10 W. Bild 20 zeigt einen Ausschnitt aus dem realisierten Motorquerschnitt mit der Induktionsverteilung im Leerlauf.

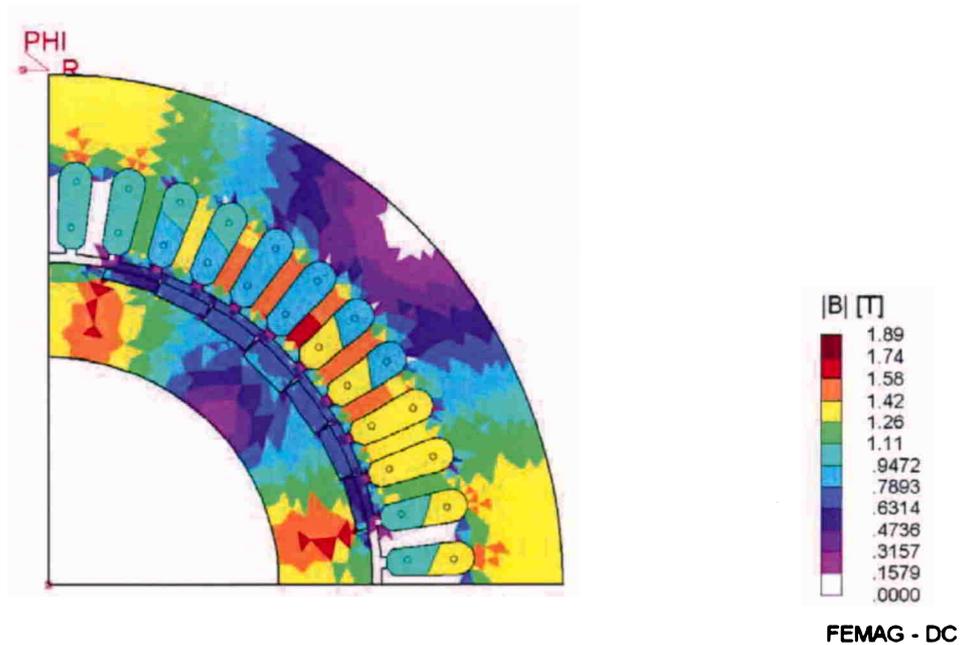


Bild 20: Induktionsverteilung im Querschnitt

Die Ansteuerung des Motors soll mit einem marktüblichen Standardumrichter erfolgen (zum Beispiel Siemens 611). Die Ausgangssignale derartiger Umrichter basieren alle auf einer sinusbewerteten Pulsweitenmodulation (PWM). Dadurch ist zwar der drehmomentbildende Grundwellenstrom des Umrichters sinusförmig, jedoch ist diesem, bedingt durch die PWM, ein Oberwellenstrom überlagert. Durch den physikalischen Zusammenhang, dass der Statorwicklungsstrombelag auch feldbildend ist, wirken sich derartige Oberwellenströme direkt als umrichterbedingte Zusatzverluste auf der Rotorseite aus. Glättend auf die Stromoberwellen wirkt die Induktivität des Motors. Da aber bekanntermaßen die Induktivität bei schnelllaufenden Motoren (geringe Windungszahl) klein ist, ist die Glättung auch gering. Bild 21 zeigt ein Beispiel eines oberwellenbehafteten Stromverlaufs durch eine mit PWM gespeiste Maschine.

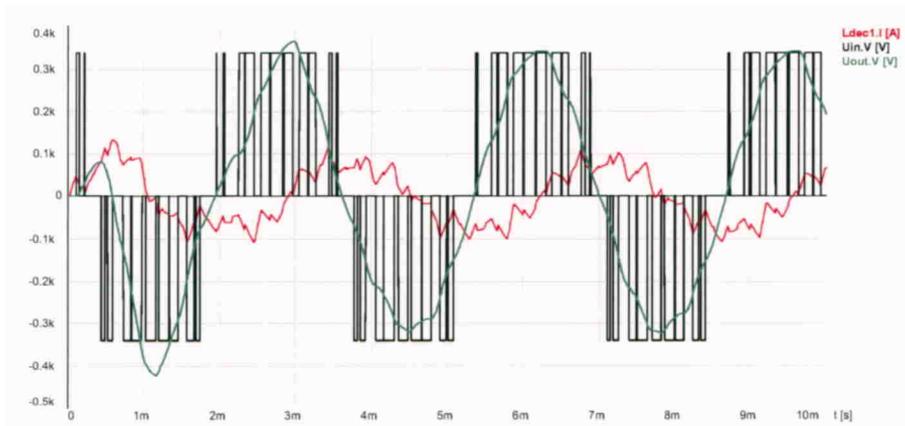


Bild 21: PWM bedingter oberwellenbehafteter Stromverlauf

Die Kühlung des Statorsystems erfolgt mit Wasser. Durch eine optimierte Kühlkanalstruktur werden die anfallenden Verluste abgeführt. Die Verluste sind zum einen Kupferverluste (1300 W im Nennpunkt) und zum anderen Eisenverluste (1200 W im Nennpunkt). Diese teilen sich jedoch auf unterschiedliche Stellen im System auf. Um die Temperatur in den Teilbereichen zu berechnen, wird ein Ersatzschaltbild des Motorsystems entwickelt (Bild 22).

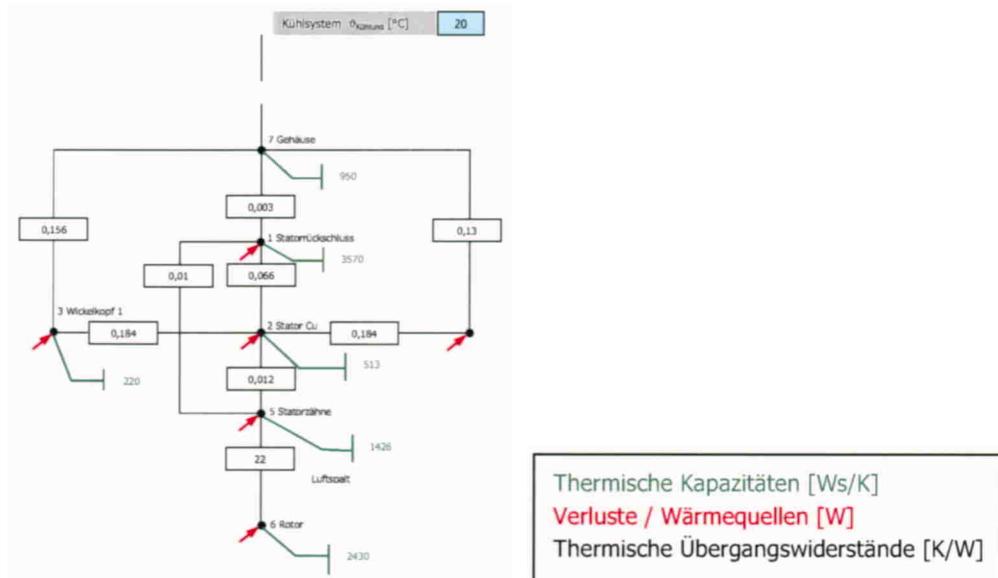


Bild 22: Ersatzschaltbild für die Wärmeberechnung des Motorsystems

Der Temperaturverlauf in den Teilbereichen des Motors kann Bild 23 entnommen werden. Deutlich zu sehen ist, dass trotz des optimierten Kühlsystems und Kunststoffvergusses des Wicklungssystems mit hoher Wärmeleitfähigkeit die Wicklung bzw. die Wickelköpfe der temperaturkritische Bereich ist. Durch die schlechte Entwärmung des Rotors (CFK- Bandage bzw. Aufbau mit schlechter Wärmeleitfähigkeit), besitzt dieser eine extrem große Temperaturkonstante (stetige Erwärmung). Dies verdeutlicht auch, dass auf der Rotorseite nur einige 10 W an Verlusten anfallen dürfen. Würde die Verlustleistung deutlich höher liegen, könnte der Rotor thermisch versagen.

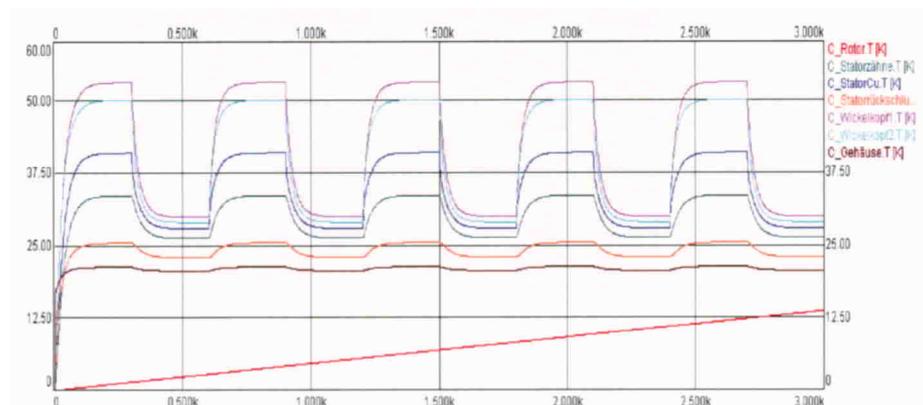


Bild 23: Temperaturverlauf in Teilbereichen des Motors

Durch die gezielte Anordnung und Ausrichtung der Magnetsegmente des Antriebs wird der Anforderung nach minimaler rotorseitiger Verluste nachgekommen. Wird bei dieser Anordnung die Maschine mit einem Sinus bestromt, so ist die Drehmomentoberwelligkeit minimal und es können gute Gleichlaufeigenschaften der Spindel realisiert werden. Bild 24 zeigt die fertige Magnethülse vor der Integration in den CFK-Rotor.



Bild 24: Magnethülse des Synchronmotors zur Integration am Rotor

5

Fertigung der Spindelkomponenten

Die Abmaße der Bauteile, in Kombination mit der herzustellenden Genauigkeit, stellt die besondere Herausforderungen im Bereich der Fertigung der Spindelkomponenten für die hochpräzise Schleifspindel dar.

Für die Fertigung der Bauteile ist es unumgänglich, für jeden Produktionsschritt eine Spann- oder/und Positionier Vorrichtung auf die jeweils eingesetzte Maschine anzupassen. Damit lassen sich unzulässige Ungenauigkeiten reduzieren, die aus Aufspannfehlern oder Spann- oder Bearbeitungskräften resultieren.

5.1 Fertigung der rotorseitigen Lagerkomponenten

Eine besondere Herausforderung an die Fertigung stellt in diesem Zusammenhang der Wellenkopf dar. Der Wellenkopf vereint einen massiven Bereich rund um die HSK-Schnittstelle und das Axiallager mit einem sehr dünnwandigen Bereich am Radiallager, so dass bei der Härtung möglichen Koaxialitätsfehlern am Bauteil in besonderem Maße Rechnung zu tragen ist.

Ein klassisches „Durchhärten“ führt, bedingt durch den erheblichen Materialdickenunterschied, zu sehr ungleichmäßigen Bauteilverzügen. Im einzelnen bieten sich bei diesem Bauteil oberflächenhärtende Verfahren an. Eingeschränkt durch die endliche Einhärte tiefe dieser Verfahren, richten sich die entsprechenden Aufmasse zum Schleifen der Welle (HSK-Schnittstelle, Axiallager und Radiallager) einerseits an der Bearbeitungszeit aus, andererseits muss in besonderem Maße dem Koaxialitätsfehler der HSK-Schnittstelle zu den Lagerstellen an der fertig aufgebauten Welle Rechnung getragen werden. Nach dem die Welle fertig bearbeitet ist, muss noch eine genügend harte Oberfläche, speziell im Bereich der HSK-Schnittstelle, vorhanden sein.

Für die Schleifarbeiten an der Spindelnase und den Arbeiten an den gehäuseseitigen Lagerbuchsen wurden CNC-Außen- und Innenschleifmaschinen der Firma Studer eingesetzt. So kam für alle Außenschleifprozesse eine Spindel mit maximaler Drehzahl von 20.000 U/min und für alle Innenschleifprozesse eine Spindel mit maximaler Drehzahl von 60.000 U/min zum Einsatz. Als Schleifwerkstoff wurde jeweils Edelmetall eingesetzt.

Bild 25 zeigt die Fertigungszeichnung der Spindelnase mit Ihrer weit auskragenden, extrem dünnen radialen Lagerfläche. Bild 26 zeigt die Fertigungszeich-

nung des Spindelrotors dessen Lagerflächen letztlich in einer Aufspannung im montierten Zustand geschliffen werden.

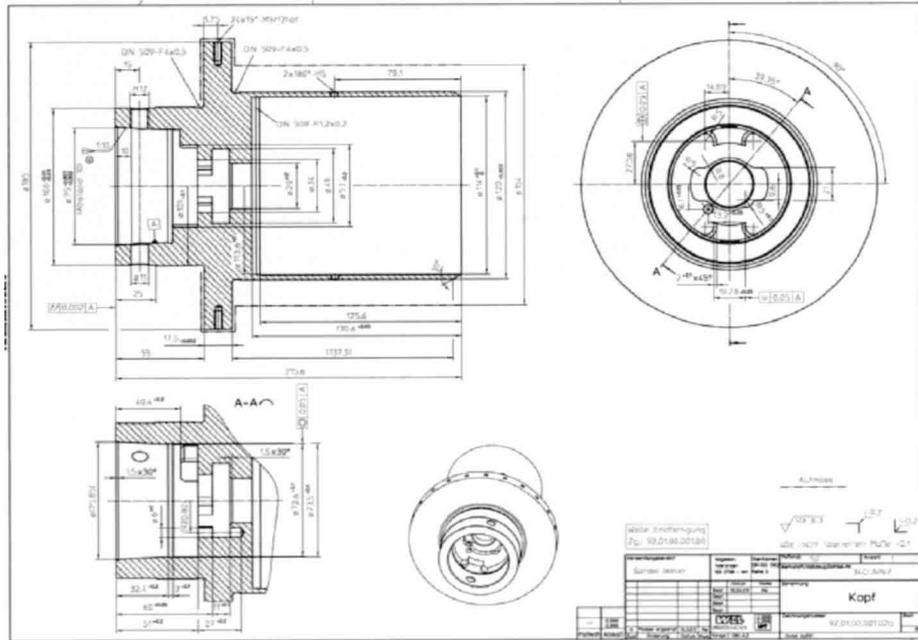


Bild 25: Fertigungszeichnung des HP-Spindelkopfs

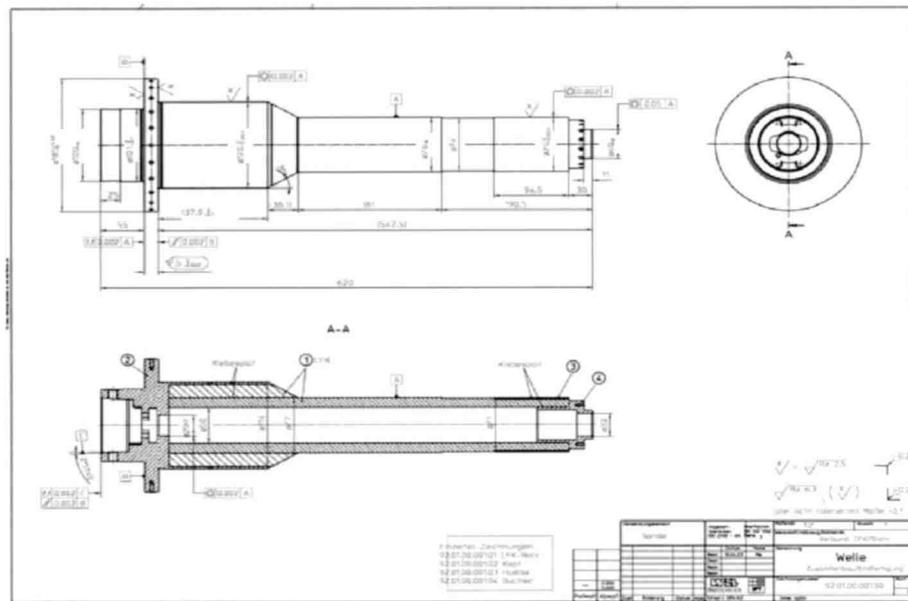


Bild 26: Fertigungszeichnung des Spindelrotors

5.2 Fertigung der gehäuseseitigen Lagerkomponenten

Die Fertigung der Lagerbauteile für die HP-Spindel ist technologisch grenzwertig. Zum einen handelt es sich um nichtmagnetische, sehr dünnwandige, lange Bauteile, zum anderen waren großflächige flache Bauteile in hoher Präzision zu fertigen. Auch hier sind für jeden Produktionsschritt die entsprechenden Spann- und Positioniervorrichtungen erforderlich.

Die Lagerbauteile selber werden aus dem extrem lunkerarmen Werkstoff CuSn7Pb15-C-GC gefertigt, mit dem sich die für die Funktion der Luftlager geforderten Oberflächengüten erzielen lassen. Speziell für diesen Werkstoff sind die Bearbeitungsverfahren soweit angepasst worden, daß sich die geforderten Oberflächengüten in Kombination mit den Form- und Lagetoleranzen erreichen lassen.

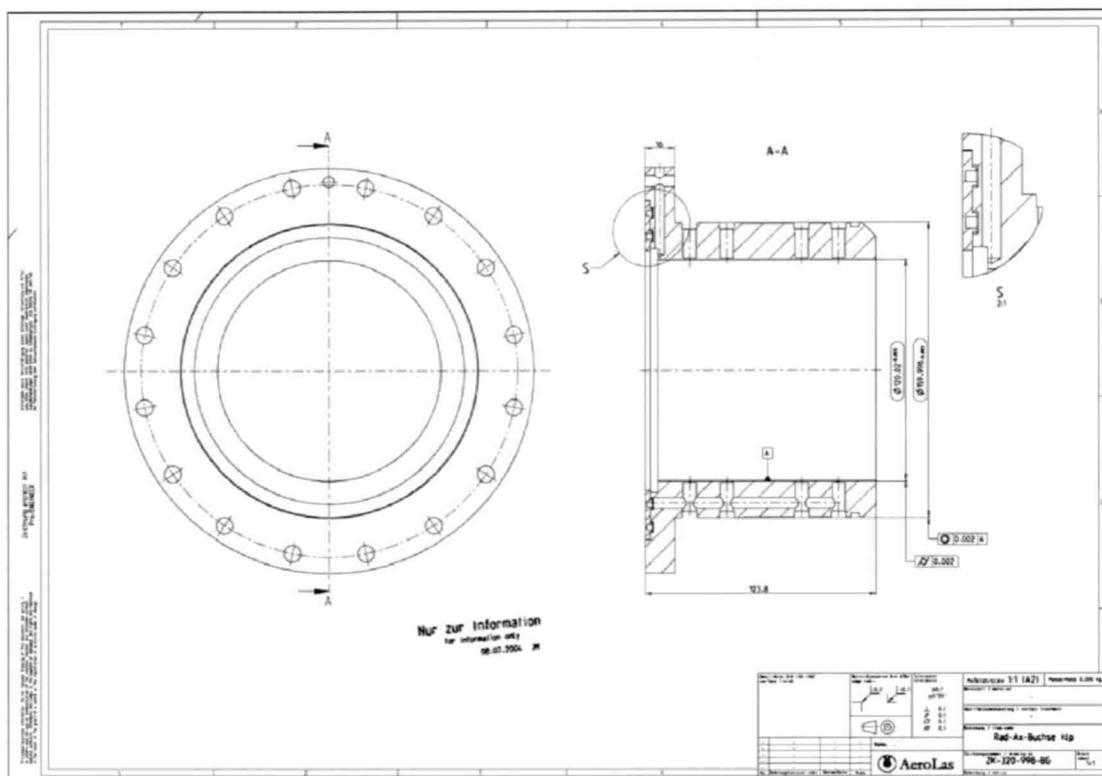


Bild 27: Fertigungszeichnung des Radial-Axial-Lagers

5.3 Herstellung des Spindelrotors

Die CFK-Komponenten werden durch Wickeln hergestellt. Dabei wird in einem kontinuierlichen Prozess in einem ersten Schritt ein Bündel von Kohlenstofffasern (Roving) durch ein Tränkbad gezogen und gleichmäßig mit einem Epoxidharz benetzt, Bild 28. Hierbei wird eine hochmodulige Kohlenstofffaser, Mitsubishi K63B12R, in Verbindung mit einem konventionellen, duroplastischen Harzsystem verwendet.

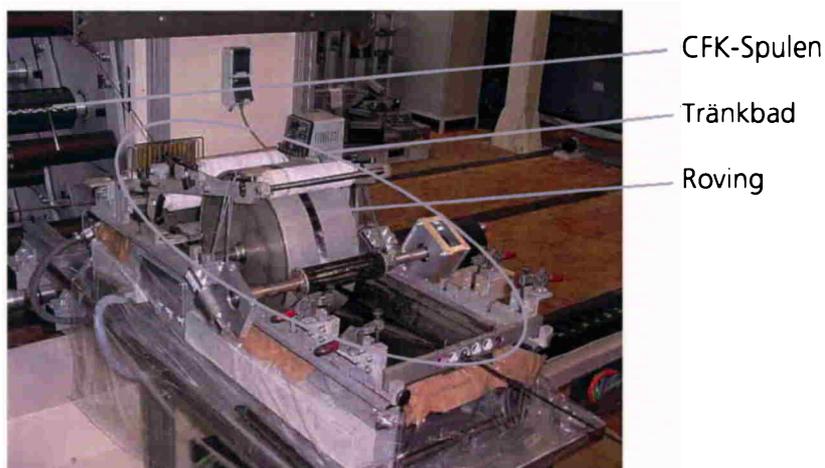


Bild 28: Tränkbad zum Benetzen der CFK-Rovings mit Harz



Bild 29: Wickeln des CFK-Rotors

In einem zweiten Schritt werden die benetzten Fasern mit Hilfe eines Portalrobotersystems in Gantrybauweise auf einen Wickelkern aufgewickelt, Bild 29. Dabei wird der Roving von einem Fadenauge so geführt, dass das in Kapitel 2.3 berechnete Wickelmuster entsteht. Nachdem alle Lagen auf diese Weise abgelegt worden sind, wird das Bauteil in einem Ofen bei 120 °C acht Stunden lang ausgehärtet. Eine Rotation des Bauteils auch während des Temperns verhindert die Bildung von Tropfen und ermöglicht somit eine gleichmäßige Verteilung des Harzes im Laminat.

Wie in Bild 8 und Bild 9 dargestellt, wird der CFK-Körper aus zwei Teilen, einem Grundkörper und einer Distanzhülse, aufgebaut. Beide Komponenten werden zunächst getrennt durch Wickeln in Form eines dickwandigen Rohres hergestellt. Hierbei stellt sich die Laminatstärke von ca. 25 mm als problematisch heraus, da sich bei dem Temperprozess im Laminat Lunker bilden, Bild 30. Ursache hierfür ist vermutlich der unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizient der einzelnen Lagen. Aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung der Fasern in den einzelnen Lagen reduziert sich der Umfang des Rohres in den Lagen, in denen die Ausrichtung der Kohlenstofffasern im Bereich von 90° liegt, während er sich in Lagen, in denen die Fasern eine Ausrichtung in Längsrichtung des CFK-Rotors aufweisen, vergrößert. Dieser Umstand führt zu einer Lunkerbildung im Laminat, die auch durch unterschiedliche Temperaturführung beim Tempern nicht vermieden werden. Erst durch die Fertigung der CFK-Komponenten in zwei Stufen kann dieser Effekt vermieden werden. So wird zuerst ein Rohr mit einer Wandstärke von 12,5 mm gewickelt und danach das Bauteil mit einer geringen Temperatur von 80°C getempert, sodass das Epoxidharz noch nicht vollständig vernetzt ist, jedoch bereits in einem festen Zustand vorliegt. Danach werden die restlichen Lagen auf das CFK-Bauteil aufgebracht und in einem abschließenden Temperprozess bei 120°C getempert. Durch das Zwischentempere wird ein Teil des Laminates bereits fixiert, wodurch die Dehnungen im abschließenden Temperprozess reduziert werden kann. Eine Lunkerbildung kann daraufhin nicht mehr festgestellt werden.

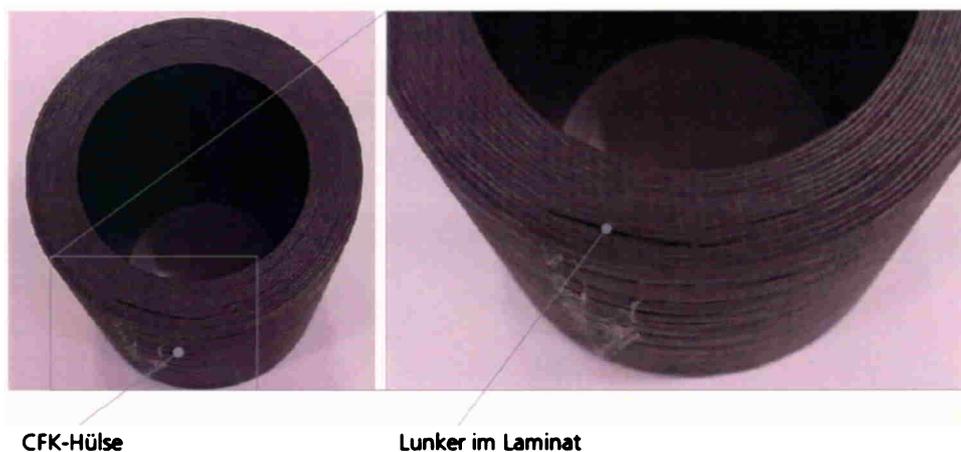


Bild 30: Lunkerbildung im Laminat

Beide CFK-Bauteile, der Grundkörper und die Distanzhülse, werden auf diese Art hergestellt und anschließend verklebt. Das Verkleben der beiden CFK-Komponenten ist in Bild 31 dargestellt. Hierzu wird ein Drucktopf eingesetzt, in dessen Inneren sich der Klebstoff befindet. Für diese Anwendung wird der Kunststoffklebstoff Araldite 2020 verwendet, da er sich einerseits für das Verkleben von Faserverbundkunststoffen eignet und zum anderen dünnflüssig ist,

sodass er in einen dünnen Klebespalt gepumpt werden kann. Dazu wird in dem Drucktopf mit Hilfe von Druckluft ein geringer Überdruck aufgebaut, wodurch der Klebstoff durch einen Schlauch in einen definierten Klebespalt zwischen den Kontaktflächen der zu verklebenden Bauteile gefördert wird. Der Eintritt des Klebstoffs wird an der Unterseite des Bauteils angebracht. An der höchsten Stelle der Klebefuge wird eine Austrittsöffnung des Klebstoffs vorgesehen. Der Klebstoff wird nun so lange durch den Klebespalt gefördert, bis er an der Austrittsöffnung blasenfrei austritt. Auf diese Weise kann eine vollständige Füllung des Klebespalts erreicht werden. In gleicher Weise wird die Spindelnase, der Motor sowie die hintere Lagerbuchse verklebt, Bild 32. Die zu verklebenden Bauteile wurden dabei bei dem Verkleben durch Zentrierabsätze zueinander ausgerichtet.

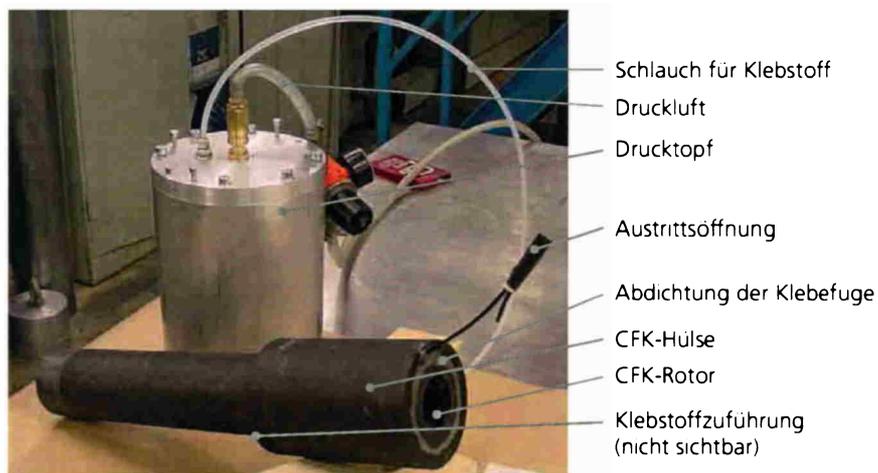


Bild 31: Verkleben der CFK-Komponenten mit Hilfe eines Drucktopfs

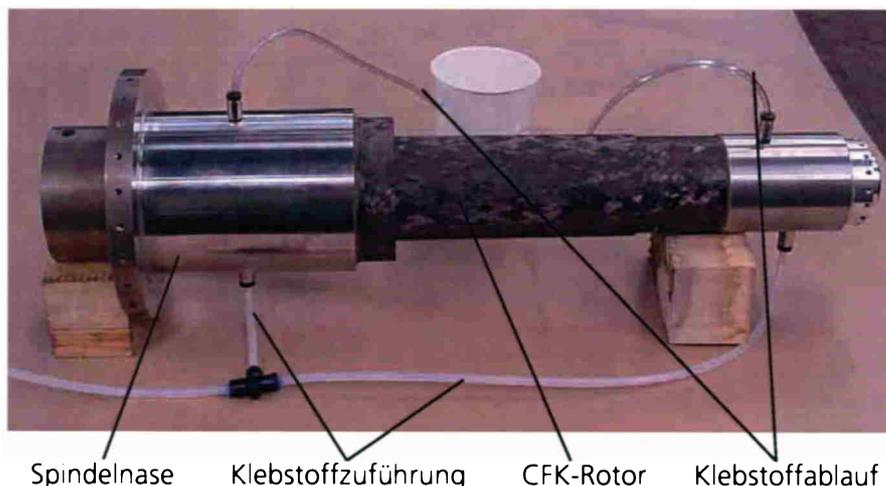


Bild 32: Verkleben der Spindelnase und der hinteren Lagerbuchse

Nach dem Fügen aller Rotorkomponenten wird der Rotor durch Drehen vorbearbeitet. Dabei wurde ein Schleifaufmass von 0,3 mm auf dem Rotor belassen. Um einen guten Rundlauf der Spindel zu erreichen, wird zum Abschluss in einer Aufspannung die gesamte Außenkontur des Rotors sowie die HSK Schnittstelle überschleift. So kann ein Gesamtlaufradius des Rotors im geforderten Toleranzbereich von weniger 2 µm erreicht werden. Bild 33 zeigt den geschliffenen Rotor der Schleifspindel nach der Endbearbeitung.



Bild 33: Endbearbeiteter Rotor der Schleifspindel

6 Montage der Spindel

Aus fertigungstechnischen Gründen ist das Gehäuse der Spindel aus zwei Teilen aufgebaut. In dem einen Teil befindet sich das vordere Radiallager und der Motor, in dem anderen Gehäuseteil befindet sich das hintere Radiallager, Bild 5. Im montierten Zustand müssen beide Lagerstellen hochgenau zueinander laufen.

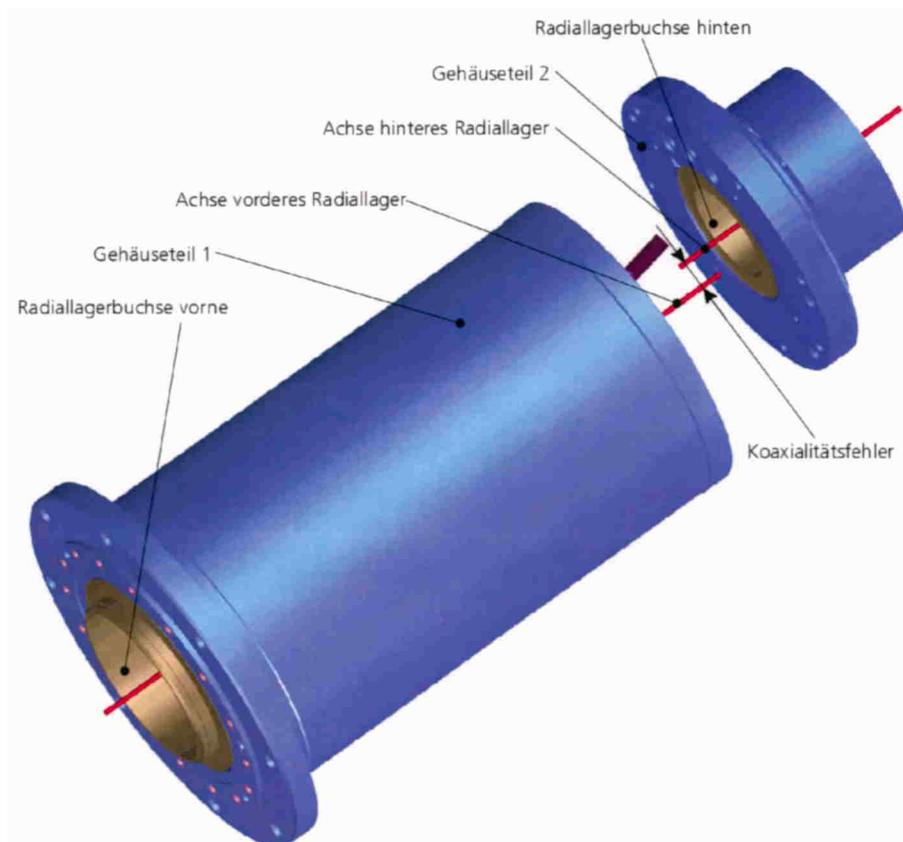


Bild 34: Montage der Gehäusekomponenten

Die Parallelität beider Achsen wird dabei durch die Fertigungsgenauigkeit beider Teile erreicht, indem die Aufnahme der Lagerbuchsen und die Trennfläche beider Gehäuseteile jeweils in einer Aufspannung geschliffen werden. Hierdurch kann eine sehr gute Winkligkeit der Lagerbuchsen zur Trennfläche

erzielt werden. Die Koaxialität beider Lagerbuchsen muss jedoch durch Ausrichten eingestellt werden (Bild 34), da aufgrund des zum Fügen notwendigen Spiels bei Positionierung über einen Zentrierabsatz nicht die geforderte Genauigkeit erreicht werden kann. Deshalb werden zunächst beide Gehäuseteile mit den Lagerbuchsen und dem Motor bestückt. Im Anschluss daran wird das Hauptteil des Gehäuses auf einem hochgenauen Drehtisch befestigt und zur Drehachse des Tisches ausgerichtet, Bild 35. Danach wird das zweite Gehäuseteil aufgesetzt und kann mit Hilfe eines hochgenauen Messmittels (Millitron) zur Drehachse des Tisches und damit auch der anderen Lagerbuchse ausgerichtet werden.

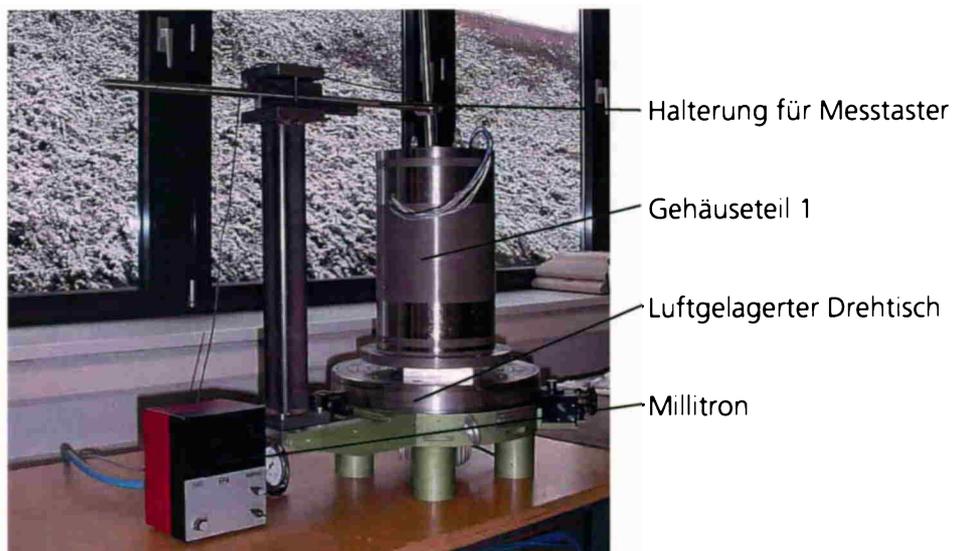


Bild 35: Ausrichten der Gehäuseteile für die Montage

Ist das Gehäuse fertig montiert und sind die Lagerbuchsen zueinander ausgerichtet, kann der Spindelrotor von vorne eingesetzt werden. Dazu wird von dem Axiallager nur die der Spindelnase abgewandten Lagerscheibe montiert, und die Zuluftbohrungen für die vordere Scheibe des Axiallagers sowie für die Sperrluft werden mit Hilfe eines Dichtrings verschlossen. Somit können die Luftlager bei der Montage betrieben werden, obwohl die Spindel noch nicht vollkommen montiert ist. Um die auftretenden Anzugskräfte zwischen den Magneten des Motors und dem Stator auffangen zu können und damit eine Beschädigung der Spindelkomponenten bei der Montage zu vermeiden, wird eine Montagevorrichtung benötigt, Bild 36.

Diese Montagevorrichtung verlängert die hintere Radiallagerfläche des Rotors so, dass das hintere Radiallager der Spindel den Rotor bereits bei der Montage trägt und somit die magnetischen Anzugskräfte auffangen kann. An der Spin-

delnase wird der Rotor durch einstellbare Backen geführt, sodass auch hier die Anzugskräfte des Motors aufgefangen werden.

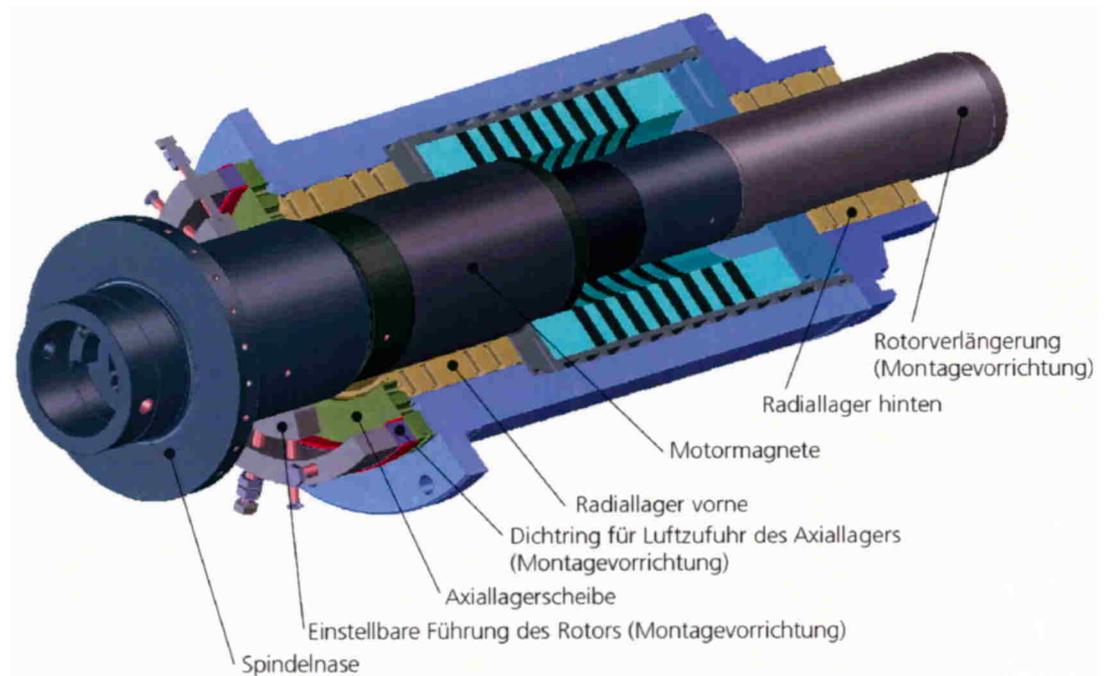


Bild 36: Montagevorrichtung für die Hochpräzisionsspindel

Zum Fügen beider Teile werden sowohl die Rotorverlängerung als auch die Stützevorrichtung an der Spindel Nase entfernt und die fehlenden Komponenten des Axiallagers zusammen mit dem vorderen Gehäusedeckel montiert.

7 Messtechnische Untersuchung

Um die messtechnischen Untersuchungen an dem Spindelprototyp durchführen zu können, wird eine Prüfvorrichtung aufgebaut, Bild 37. Hierzu wird eine Aufnahme für die Spindel konstruiert, die eine typische Einbausituation der Spindel in eine Maschine widerspiegelt und eine verzugsfreie Montage der Spindel auf einer Aufspannfläche ermöglicht.

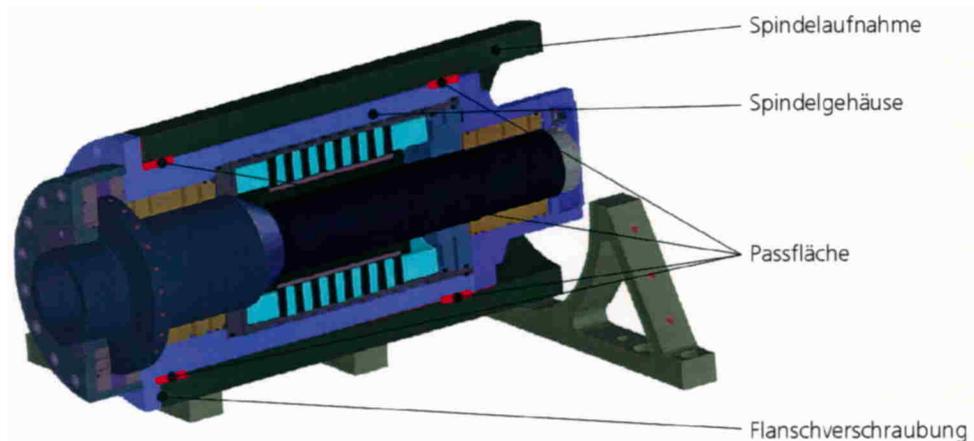


Bild 37: Vorrichtung zum Aufspannen der Spindel zu Testzwecken

Zur messtechnischen Untersuchung kann die Spindel nun auf einem massiven und steifen Stahl- oder Granitblock aufgespannt werden. Die für die Messungen notwendigen kapazitiven Sensoren werden ebenfalls auf dieser Basis befestigt.

Zur Beurteilung der Spindel wird das folgende Messprogramm durchgeführt:

- Rundlauf der Spindel an der Spindelnahe bei Drehzahlen von 5000 U/min und 10.000 U/min
- Axiales Längenwachstum der Spindel bei Drehzahlen von 5000 U/min und 10.000 U/min
- Statische und dynamische Steifigkeit des Faserverbundrotors

Vor der Montage des Spindelrotors in das Spindelgehäuse wird der Rotor hinsichtlich dynamischer Eigenschaften untersucht. Dafür wird er frei schwingend in elastischer Aufhängung fixiert, mittig mit einem Beschleunigungssensor ver-

sehen und an der Spindelnahe mit einem Impulshammer angeregt. Das Ergebnis der Messung zeigt Bild 38. Zu erkennen ist, dass der Rotor der Spindel erst bei 1280 Hz eine erste erkennbare ausgeprägte Resonanzstelle besitzt. Im dynamischen Verhalten des Spindelrotors machen sich die positiven Eigenschaften der Faserverbundkonstruktion bemerkbar.

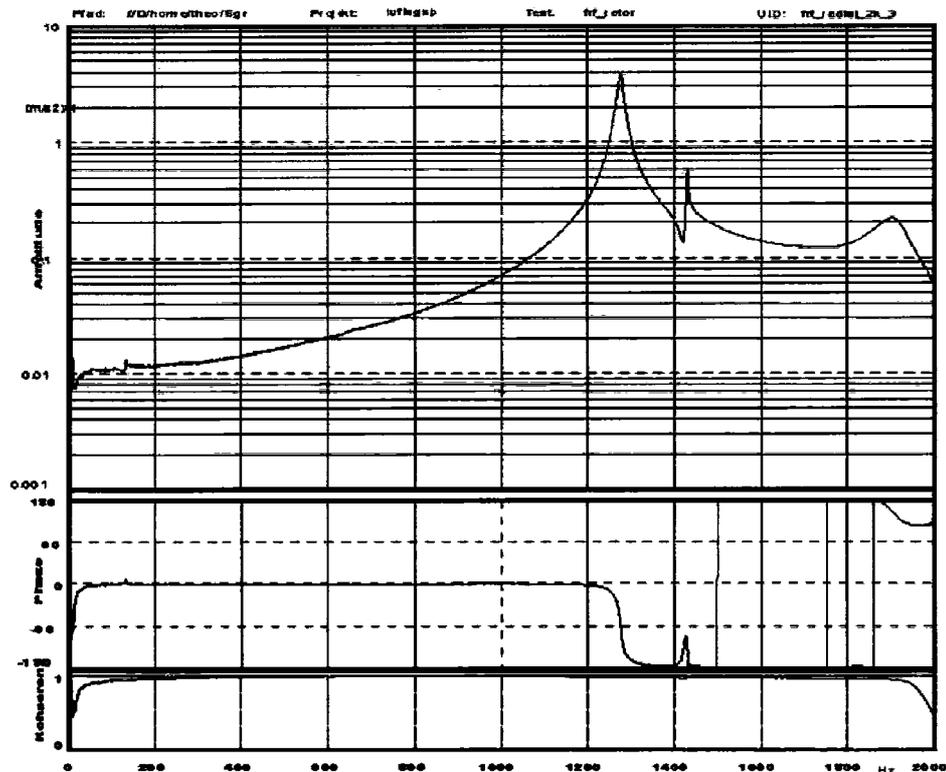


Bild 38: Frequenzgang des Faserverbundspindelrotors

Die Messungen des Rundlaufverhaltens wird mit dem Spindelmesssystem »Advanced Spindle Error Analyzer Version 7« der Firma »Lion Precision« durchgeführt. Zur Abstandsmessung werden kapazitive Sensoren (C1C) und zur Temperaturmessung Thermistoren verwendet. Die kapazitiven Sensoren werten die Veränderung des Luftspalts und damit eine Veränderung der Kapazität zwischen Sensor und Messnormal aus. Sie unterstützen nach diesem Prinzip sowohl die direkte, berührungslose Messung des Spindelrundlaufs als auch des axialen Spindelwachstums. Die kapazitiven Sensoren besitzen einen Arbeitsbereich von 50 µm und unterstützen eine Auflösung von bis zu 3,5 nm. Der Arbeitsbereich der eingesetzten Thermistoren liegt zwischen 4°C und 80°C.

Zur Messung der Rundlaufgenauigkeit wird ein kapazitiver Sensor radial zur Achse des Spindelrotors auf Höhe eines Messnormals so angeordnet, dass zwi-

schen rotierendem Messnormal und kapazitivem Sensor ein Luftspalt von etwa 100 µm verbleibt. Als Messnormal dient im vorliegenden Fall eine Kugel, die über einen zylindrischen Schaft direkt mit dem Rotor der Spindel verbunden wird.

Zur Messung des thermisch bedingten axialen Spindelwachstums wird zusätzlich ein kapazitiver Sensor axial zum Spindelrotor gestellfest fixiert. Bild 39 zeigt die beschriebene Anordnung der kapazitiven Sensoren zum Prüfnormal. Temperatursensoren werden unmittelbar hinten und vorne am Spindelgehäuse befestigt.

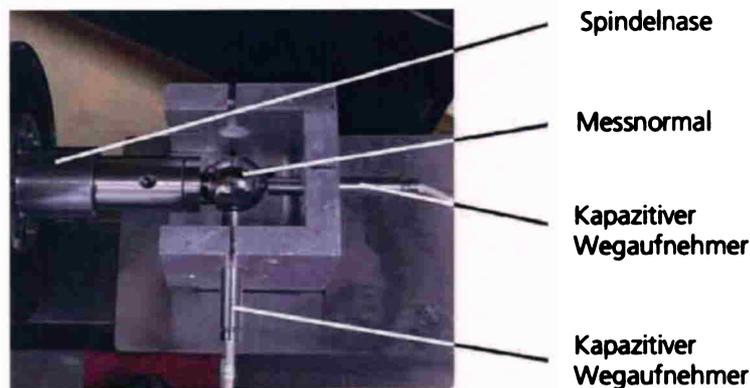


Bild 39: Messaufbau zur Erfassung des Spindelrundlaufs und axialem Spindelwachstum

Zur Messung werden die in einem Verstärker in digitale Signale gewandelten Ausgangswerte beider Sensorarten mit einem Messrechner ausgewertet. Die systemeigene Auswertesoftware des »Advanced Spindle Error Analyzer V7.0« unterstützt dabei die automatisierte Trennung der Spindelfehleranteile in Synchronfehler und Asynchronfehler.

Die Messungen des Rundlaufverhaltens des Spindelsystems werden bei 5000 U/min und bei 10.000 U/min durchgeführt. Bild 40 zeigt das Ergebnis der Messungen. Während der synchrone Rundlauffehler bei 5000 U/min im Bereich von 250 nm liegt, steigt er bei einer Drehzahl von 10.000 U/min auf ca. 380 nm an. Der im Anforderungskatalog spezifizierte Rundlauf kann demnach nicht ganz erreicht werden. Entscheidend dafür scheinen fertigungstechnische Toleranzen der geschliffenen Lagerflächen zu sein. Eine Ultrapräzisionsdrehbearbeitung mit Diamantschneide auf Maschinen mit weniger als 0,1 µm Abweichung von der geometrisch idealen Verfahrachse auf 100 mm Verfahrweg,

könnte die erreichten Toleranzen weiter optimieren und so zu einer weiteren Verbesserung des Rundlaufverhalten der Spindel beitragen.

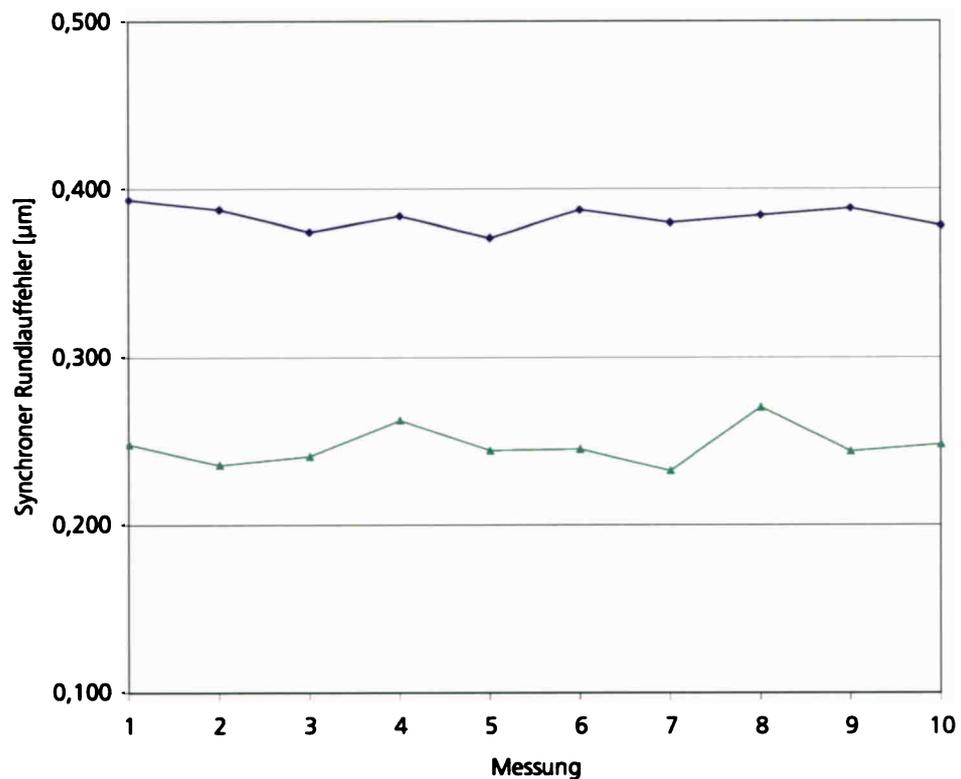


Bild 40: Synchroner Rundlauffehler des Spindelsystems bei 5000 U/min (grün) und 10.000 U/min (bau) von zehn Messungen

Das thermische Verhalten der Spindel wird für die Drehzahl 5000 U/min ermittelt. Zu Beginn einer Messung wird die aerostatische Spindel aus dem Stillstand auf die ausgewählte Drehzahl beschleunigt und dort gehalten, bis das axiale Spindelwachstum einen statischen Zustand erreicht hat. Bild 41 zeigt das axiale Spindelwachstum über der Zeit dokumentiert.

Unmittelbar nach Beschleunigen der Spindel auf 5000 U/min steigt die Temperatur am Spindelgehäuse am hinteren und vorderen Ende von ca. 25 °C auf 29 °C an und das Spindelwachstum beträgt ca. 2 µm an der Spindelnahe. Nach ca. 13 Minuten stellt sich ein stabiler Zustand ein. Ein Spindelwachstum von 2 µm ist unter Berücksichtigung der Spindel- und Rotorgröße ein gutes Ergebnis. Wünschenswert wäre aber ein beschleunigter stabiler Zustand.

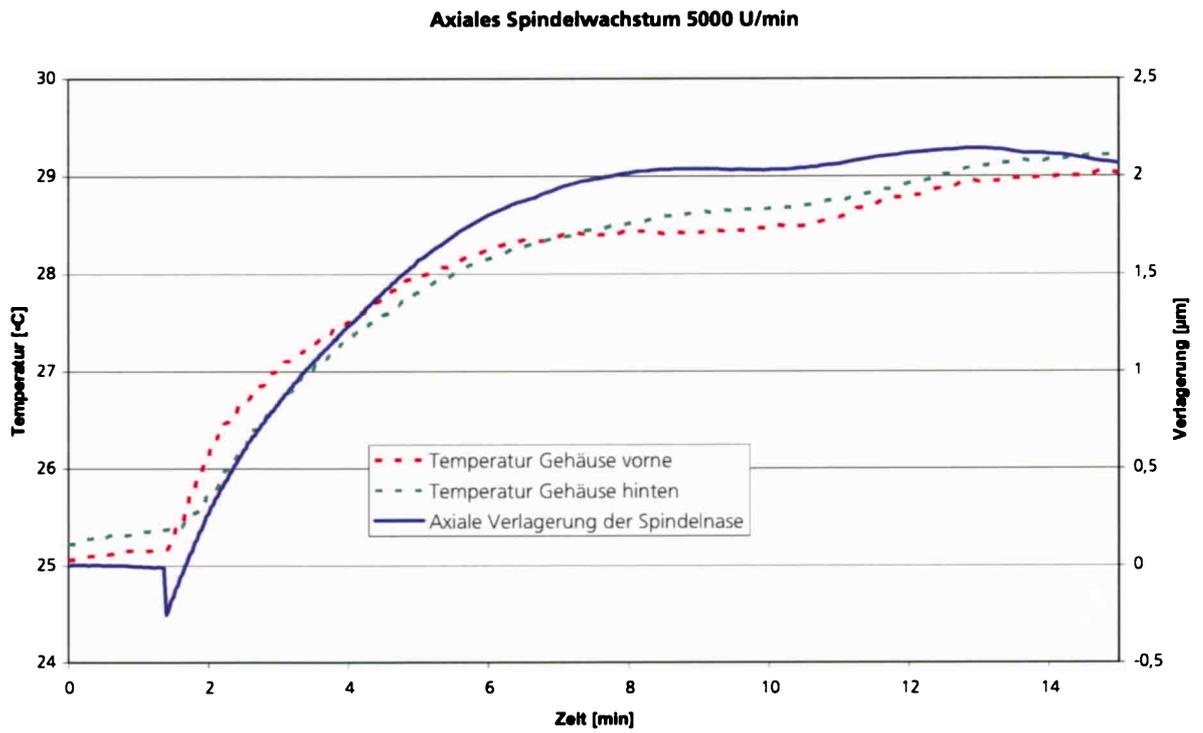


Bild 41: Axiales Spindelwachstum bei Start der Spindel aus dem Leerlauf

8 Bewertung der erreichten Ergebnisse

Die Lösung der im Projekt verfolgte Aufgabenstellung führte zu innovativen technischen Lösungen sowohl auf Ebene der Einzelkomponenten als auch in deren Zusammenspiel als Schleifspindel mit ausgeprägten Alleinstellungsmerkmalen wie Verschleißfreiheit und Kontaminationsfreiheit.

So wurde neben der Qualifizierung eines klebtechnisch gefügten Rotorsverbunds aus Stahlkomponenten und kohlefaserverstärkten Rohren, erstmals Luftlager auf Grundlage lasergefertigter Mikrodüsen in ein Spindelsystem integriert. Die eingesetzten Luftlagern eigneten sich hier prinzipbedingt aufgrund hoher theoretische Steifigkeit bei geringeren Betriebskosten als bei hydrostatischen Lagern. Beim Einsatz der Lager bestätigten sich die Potenziale der ausgewählten Technik. Hohe radiale und axiale Steifigkeiten von bis zu $180 \text{ N}/\mu\text{m}$ konnten im eingebauten Zustand gemessen werden. Ein Problem stellte lediglich die schleiftechnische Fertigung der Lagerbuchsen in den geforderten Form- und Lagegenauigkeiten dar. Die Größe der Bauteile stießen hier an die Grenzen der Arbeitsräume der zur Verfügung stehenden Maschinen. Ein bisher ungenutztes Potenzial bietet die Ultrapräzisionsdrehbearbeitung mit Diamantschneide. Auf Maschinensystemen mit weniger als 100 nm Abweichung von der geometrisch idealen Achsbewegung auf 100 mm Verfahrweg könnten die bisher erreichten Toleranzen nochmals deutlich verbessert werden.

Neuartig ist auch die Fertigung eines hauptsächlich aus Faserverbundkunststoff bestehenden Spindelrotors. In der Verbundkonstruktion bieten hier die Kohlefasern eine hervorragende Möglichkeiten zur gezielten Anpassung der statischen und dynamischen Rotoreigenschaften. Die Verarbeitung der im Rahmen des Projekts ausgewählten hochmoduligen Faser stellte sich als äußerst defizitär heraus. Das Fraunhofer IPT konnte die Fertigung durch gezielte Optimierung der Prozessparameter und der im Anschluss an den eingesetzten Wickelprozess verwendeten Temperparameter qualifizieren. So wurde die Basis für die Verwendung extrem hochmoduliger Kohlestofffasern von in Serie hergestellten Spindelsystem geschaffen.

Ebenso mündeten die Anforderungen in der Motorentwicklung zu neuen Lösungsansätzen, die zu einer Optimierung von rotorseitigen Verlusten von Synchronantrieben führten. Durch eine gezielt optimierte Anordnung rotorseitig eingesetzter Magnete konnten die Verluste auf wenige Watt minimiert werden.

Diese Ergebnisse werden durch die Fima ATE zukünftig auch in einer Vielzahl weiterer Anwendungen transferiert.

Zusammenfassend wurden die Ziele des Teilprojekts »Entwicklung einer hochpräzisen Schleifspindel« erfüllt. Obwohl einige der hoch gesteckten Ziele nicht ganz erreicht wurden, konnten Fertigungsverfahren zur Umsetzung von Leichtbaumaßnahmen qualifiziert und eine neuartige Lagertechnologie für den Anwendungsbereich der Spindeltechnik erschlossen werden.

Darüber hinaus entstanden im Partnerverbund neue Projektideen und Erkenntnisse über bisher nicht bekannte Transfermöglichkeiten der jeweils erarbeiteten Ergebnisse. So wurde unlängst am Fraunhofer IPT ein Projekt zur Entwicklung aerostatischer-hydrostatischer Hybridlager gestartet, das die Vorteile beider Lagerprinzipien in einer Lagereinheit bündeln soll.

9 Verwertungsplan

9.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die in dem Verbundprojekt „Konzeption, Entwicklung und Prototypenfertigung einer innovativen Baureihe von Hochleistungsspindeln“ zu entwickelnden Spindeln zum Bohren/Fräsen und zum Drehen/Schleifen finden mit ähnlichen, teilweise sogar gleichen Anforderungen Anwendung in einem breiten Bereich der Maschinenbauindustrie. Zu nennen sind hier neben dem in der Ultrapräzisionstechnik üblichen Einsatz von luftgelagerten Spindeln auch die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung im Werkzeug- und Formenbau, sowie die Anwendung bei ölfreien und damit umweltfreundlichen Turboladern bis hin zur Mikrobearbeitung.

Eingesetzt werden können die Prototypspindeln in vielen Maschinen, die am Fraunhofer IPT entwickelt und aufgebaut wurden bzw. in Zukunft noch aufgebaut werden. Schwerpunktmäßig sind diese Maschinen im Bereich der Präzisionstechnik angesiedelt. Insbesondere im Bereich der Präzisionsfräs- und Präzisions-schleifbearbeitung werden am Fraunhofer IPT Maschinen für öffentliche Forschungsvorhaben wie auch kundenspezifische Entwicklungsprojekte aufgebaut. So kann die entwickelte Spindel in einem von der EU geförderten Projekt zur Entwicklung einer 5-achsigen Fräsmaschine zur Schlichbearbeitung eingesetzt und weiter qualifiziert werden.

Ebenso werden am Fraunhofer IPT Schleifmaschinen für die Silizium-Bearbeitung aufgebaut, in denen Schleifspindeln benötigt werden. Der Bereich der Silizium-Bearbeitungsmaschinen wird in Zukunft am Fraunhofer IPT weiter ausgebaut werden, so dass sich auch dort Anwendungen für die in diesem Verbundprojekt entwickelten Spindeln finden werden. Die besonderen Anforderungen liegen dabei einerseits in hohen Reinheitsanforderungen, d.h. Öl- und Fettfreiheit, die durch den Einsatz wälzgelagerter Spindeln nicht erreicht werden können. Andererseits sind gute Steifigkeitswerte sowie Rund- und Planlauf Eigenschaften der Spindel erforderlich. Die hohen Steifigkeiten und Rund- und Planlauf Eigenschaften sind insbesondere bei der Bearbeitung von Wafer mit derzeit 200 mm und zukünftig 300 mm Durchmesser gefragt.

Die entwickelte Schleif-/Drehspindel kann ebenso in einer am Fraunhofer IPT entwickelten Drehmaschine zur Unrundbearbeitung eingesetzt werden, bei der neben den hohen Steifigkeiten vor allem auch eine hochdynamische Drehzahl-

änderung während der Bearbeitung erforderlich ist. Dies wird durch den Einsatz des CFK Rotors erreicht, der bei einem geringen Trägheitsmoment dennoch sehr gute Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften besitzt. Gleichzeitig können durch einen Leichtbaurotor die Energiekosten insbesondere bei Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen gesenkt werden.

Durch den Einsatz der in diesem Verbundprojekt entstandenen Spindeln ist es möglich, die am Fraunhofer IPT entwickelten Maschinen auch in Zukunft marktfähig zu halten. Ebenso können bei Verwendung hochwertiger Maschinenkomponenten in Technologieuntersuchungen qualifiziertere Ergebnisse gewonnen werden, die in Form von Industrieprojekten ebenso den kleinen und mittelständischen Unternehmen zugute kommen.

9.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

In nahezu allen Branchen lässt sich der Trend zu gesteigerten Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit von Bauteilen und deren Funktionsflächen erkennen. An die einzelnen Werkstücke werden hohe Anforderungen bezüglich der Form- und Maßgenauigkeit und auch der Oberflächenbeschaffenheit und Oberflächenqualität gestellt. Dies gilt insbesondere für die Schleifspindel zur Siliziumbearbeitung. Hier werden im Zuge immer feinerer, lithographisch auf den Wafer aufgebracht Strukturen von derzeit 10 nm, immer höhere Anforderungen an den Wafer bezüglich Ebenheit und Oberflächengüte gestellt. Diese Eigenschaften werden maßgeblich, neben technologischen Parametern, von den Maschineneigenschaften, insbesondere auch der Güte der Bearbeitungsspindeln, beeinflusst.

Die am Fraunhofer IPT bereits entwickelten und untersuchten Maschinenspindeln zur Präzisions- und Ultrapräzisionsbearbeitung erlauben schon heute gute Bearbeitungsergebnisse. Jedoch besteht ein hohes Entwicklungspotenzial im Bereich der Luftlagerungs- und Antriebstechnik. Heutige Luftlager besitzen nicht die geforderten Steifigkeiten und Dämpfungseigenschaften. Aus diesem Grund wird meistens auf Hydrostatiklager zurückgegriffen, die jedoch aufgrund von Reinheitsanforderungen, wie beispielsweise in der Siliziumbearbeitung, oder starker Wärmeentwicklung bei hohen Drehzahlen nicht eingesetzt werden können.

So brachte ATE als Spezialist bei der Motorenauslegung antriebsseitig die Kompetenzen in dieses Projekt ein, während die Luftlagertechnologie von der Firma AeroLas zur Verfügung gestellt wurde. Das Fraunhofer IPT brachte sein umfangreiches Wissen im Bereich der Faserverbundtechnik sowie der messtechnischen Untersuchung in das Projekt ein. Im Bereich der Konstruktion konnten

die umfangreichen Erfahrungen des Fraunhofer IPT sowie der Firma Precise genutzt werden, sodass dort ebenfalls ein sehr gutes Ergebnis erreicht werden konnte.

Das Fraunhofer IPT hat engen Kontakt zu einer Forschungsgemeinschaft Ultrapräzisionstechnik, in der Firmen aus den verschiedensten Bereichen des Maschinenbaus vertreten sind. Neben Maschinenherstellern aus dem Bereich der Präzisions- und Ultrapräzisionszerspanung sind auch Firmen aus der Automobilindustrie und der Messtechnik vertreten. Auf den zweimal pro Jahr stattfindenden Treffen dieser Forschungsgemeinschaft wurde das Projekt vorgestellt und über dessen Fortgang berichtet. Auf diese Art konnte während der Projektlaufzeit eine enge Bindung zur Industrie hergestellt und ein Transfer der in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse gewährleistet werden. Ebenso können in diesem Rahmen neue Anwendungen für die entwickelten Spindeln erschlossen werden. Darüber hinaus erfolgte die Präsentation der Projektergebnisse im Rahmen des Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquiums AWK 2005, dem mit weit mehr als 1000 Fachbesuchern europaweit größten Industriekolloquium im Bereich der Produktionstechnik (Bild 42). Eine Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgte in 2005 in der Online Fachzeitschrift „wt-online“. Eine weitere reviewte internationale Veröffentlichung ist vorbereitet und soll im September 2005 in der Zeitschrift »Science and Engineering of Composite Material« in Druck gehen.

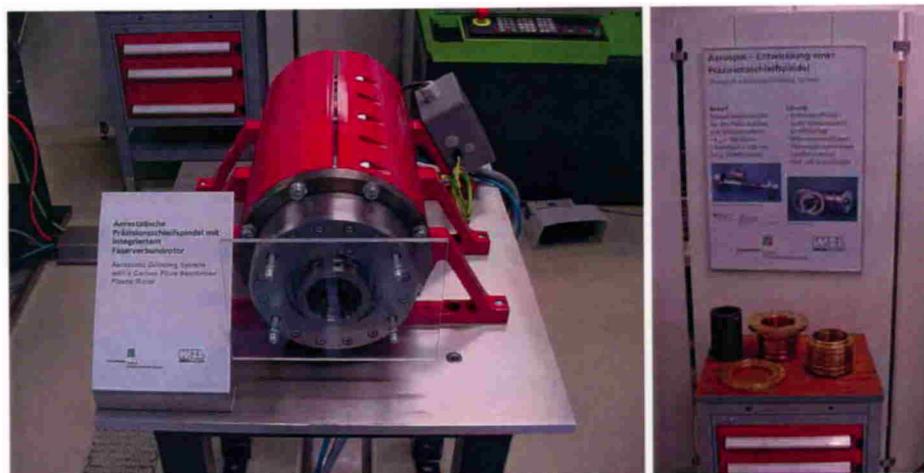


Bild 42: Präsentation der hochpräzisen Spindel auf dem AWK 2005

Weitere Einsatzfelder zeigen sich im Bereich der Schleifbearbeitung von Linsensystemen. Insbesondere bei der Herstellung von Belichtungseinheiten für Lithographieverfahren werden große Linsen benötigt, deren Durchmesser bis zu 250 mm betragen kann. Zur Herstellung dieser Linsen werden Schleif- und Polierverfahren eingesetzt. Beim Schleifen kommen Umfangsschleifscheiben zum

Einsatz, die mit Drehzahlen zwischen 5.000 U/min und 6.500 U/min betrieben werden. Die anschließende Politur erfolgt mit kleinen Werkzeugen und wird aufgrund der teilweise asphärischen Form der Optiken zonal durchgeführt. Die hohen Anforderungen an die Linsen spiegeln sich ebenso in den Anforderungen der Maschinenkomponenten wieder. So kann beispielsweise der Einsatz von Wälzlagern zu schlechten Ergebnissen führen, da sich die Wälzkörper der Lager auf der Oberfläche des Werkstückes in Form von Welligkeiten abbilden können. Um höchste Formgenauigkeit erreichen zu können, werden trotz der geringen, realisierten Zerspanleistungen hohe Steifigkeiten der Spindeln und Maschinenkomponenten gefordert.

Erste Gespräche mit Herstellern solcher Optiken lassen die in diesem Projekt entwickelte Spindel auch für diesen wirtschaftlich stark wachsenden Bereich als geeignet erscheinen. Eine definitive Eignung kann jedoch erst in einem Test nachgewiesen werden, da die hergestellten Linsen teilweise sehr sensibel auf die Art der Bearbeitung reagieren können. So kann es zum Beispiel vorkommen, dass sich bei einem zu hart parametrisierten Synchronmotor die Polpaarzahl in Form von sternförmigen Mustern auf der Oberfläche abbildet. Durch eine sehr weiche Abstimmung der Regelparameter kann dem jedoch entgegen gewirkt werden.

9.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Um einen Einsatz der hier erarbeiteten Erkenntnisse und Prototypen am Markt erreichen zu können, besteht die Möglichkeit, an den Spindeln geringe Anpassungen vorzunehmen, um diese auch für andere Anwendungen einsetzbar zu gestalten. Zu nennen sind hier insbesondere Operationen, die sich an das Schleifen der Siliziumwafer anschließen, wie beispielsweise ein Läpp- oder Polierprozess. Dabei werden an diese Maschinenkonzepte ähnliche Anforderungen wie beim Schleifen der Wafer gestellt, jedoch wird mit geringen Drehzahlen gearbeitet.

Durch eine Modifikation der entwickelten Schleifspindel ist ebenso die Integration weiterer Aufgaben möglich. Die Bearbeitung mit konstanter Andruckkraft ist beispielsweise bei der Herstellung von Optikkomponenten von Bedeutung, da die Randzonenschädigung der Werkstücke proportional zu der aufgewendeten Passivkraft bei der Bearbeitung ansteigt. Hervorgerufen durch diese Defekte müssen im Moment Schichtstärken von ca. 30 µm durch Polierprozesse abgetragen werden. Aufgrund der langen Bearbeitungszeiten sind die Kosten für diesen Bearbeitungsschritt erheblich. Durch Verringerung der Randzonenschädigungen können diese nachfolgenden Bearbeitungsschritte deutlich reduziert, in Sonderfällen sogar eliminiert werden.

Realisieren lässt sich eine solche Bearbeitung durch Modifikation der Lagerstellen und des Motors. Wird auf ein Axiallager verzichtet und stattdessen ein Motor integriert, der neben der Rotationsbewegung ebenso eine Axialkraft erzeugen kann, so ist eine kraftgesteuerte Bearbeitung möglich. Der Aufbau der Schleifspindel lässt eine solche Modifikation ohne großen Aufwand zu.



Bild 43: Hochpräzise Schleifspindel mit Topfschleifscheiben