

Kohlenstofffasern inspirieren den Werkzeugmaschinenbau

Die Kohlenstofffasern, die in der Luft- und Raumfahrt eine beeindruckende Erfolgsgeschichte geschrieben haben, halten Einzug in den Werkzeugmaschinenbau. Das Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen – kurz KLuB – hat gemeinsam mit dem Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen – kurz PTW – hier einen Forschungsschwerpunkt gesetzt. Die Motorspindel als Kernkomponente jeder modernen Werkzeugmaschine dient dabei als Referenzbauteil. Ziel ist es, ohne Qualitätseinbußen den Werkzeugstahl der Spindelwelle vollständig durch CFK zu ersetzen. Dazu müssen die besonderen Werkstoffeigenschaften von CFK konstruktiv berücksichtigt werden.

► *Carbon fibers inspire tooling machine design*

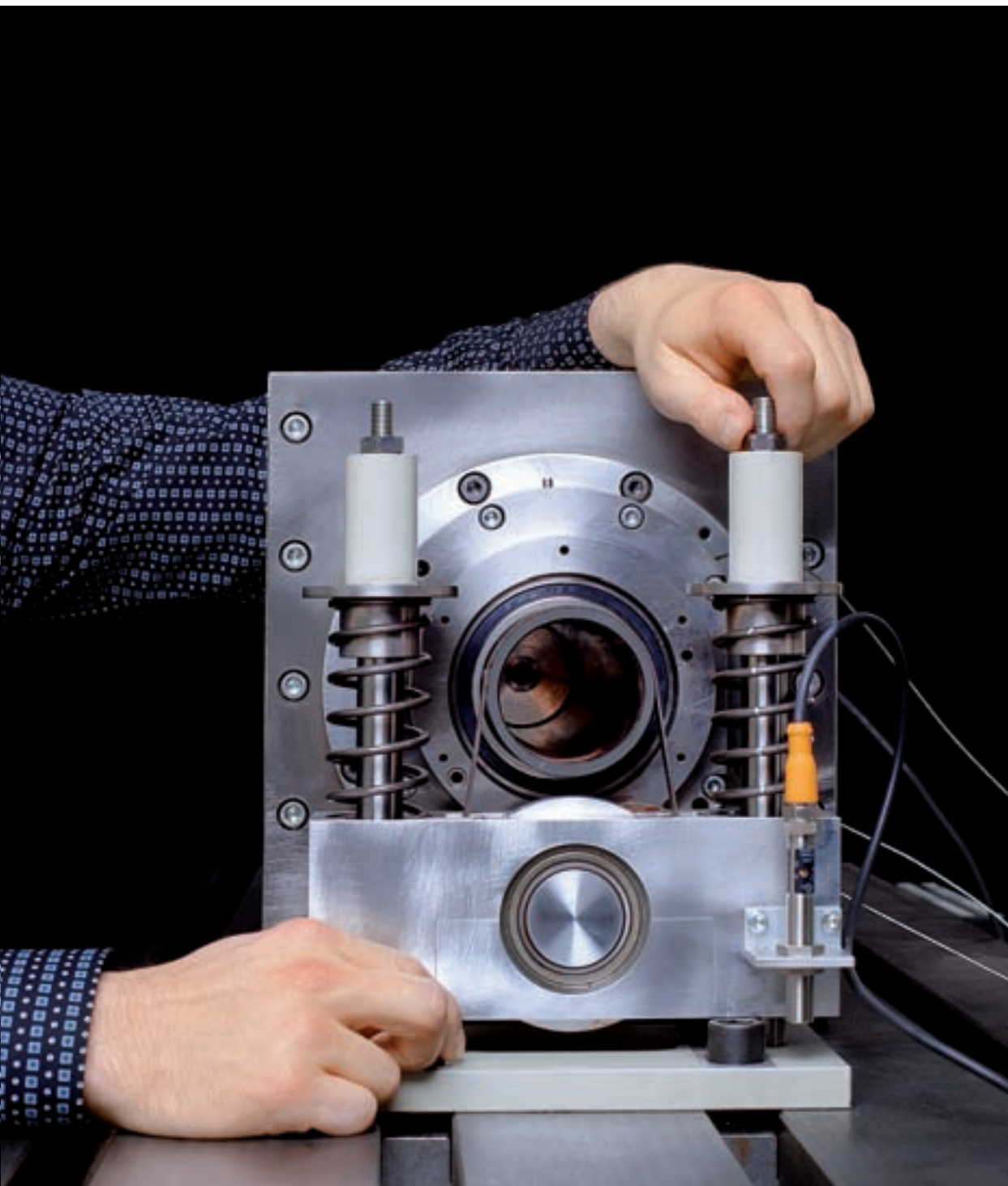
Carbon fibers, which wrote an impressive success story in the aerospace industry, are finding their way into tooling machines. The Institute for Lightweight Design and Structures – in short KLuB – sets together with the Institute for Production Management, Technology and Machine Tools – in short PTW – a research focus on this development. The motorized spindle unit represents the key component of modern tooling machines and is used as benchmark part. The goal is to substitute the steel of the spindle-shaft with cfrp, while maintaining the overall performance. In order to do so the special material properties need to be considered within the design process.

Helmut Schürmann, Eberhard Abele, Martin Klimach • Durch das wirtschaftliche Erstarken Asiens drängen immer mehr Mitbewerber auf den globalen Werkzeugmaschinenmarkt. Vor allem China und Indien machen mit einfachen, kostengünstigen Werkzeugmaschinen Druck auf etablierte Hersteller, die sich nur durch einen Technologievorsprung behaupten können. Allerdings strebt auch die asiatische Konkurrenz zunehmend in den High-End-Bereich von Werkzeugmaschinen (Abbildung 1).

Aus diesem Grund wird die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie ihre technologische Führung nur ausbauen können, wenn es ihr gelingt, zukunftssträchtige Themen frühzeitig aufzugreifen und die Grundlagen für die Anwendung neuer Technologien zu entwickeln.

Die Forderung des Markts nach weiteren Produktivitäts- und Qualitätssteigerungen wird nur erfüllbar sein, wenn die dynamisch am höchsten be-





Feinjustage
des Prüfstands für
CFK-Spindelwellen.

Veränderungen im weltweiten Werkzeugmaschinenmarkt

China

- Weltgrößter Werkzeugmaschinen-Konsument
- Größter Markt für deutsche Werkzeugmaschinen
- Drittgrößter Werkzeugmaschinen-Produzent im Bereich „Low-Tech“-Maschinen

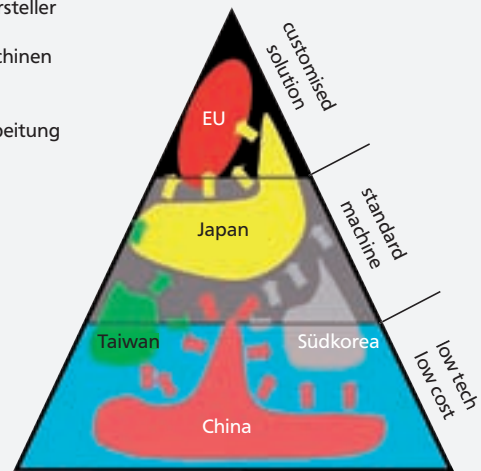


Taiwan/Südkorea

- Wichtiger Werkzeugmaschinen-Hersteller im Bereich „Low“- und „Middle“-Tech-Maschinen
- Erste Erfahrungen im High-End-Bereich

Japan

- Weltgrößter Werkzeugmaschinen-Hersteller
- Stärke im Bereich Standard-Werkzeugmaschinen
- Entwicklungstendenzen:
 - 5-Achs-Maschinen
 - Mehrtechnologiebearbeitung



anspruchten Strukturkomponenten optimiert werden. Zur Steigerung der Dynamik und der Bahngenaugkeit ist in erster Linie konsequenter Leichtbau zielführend.

Leichtbau mittels Blechstrukturen und Aluminiumgusskonstruktionen ist im allgemeinen Maschinenbau bereits Stand der Technik und auch im Werkzeugmaschinenbau „ausgereizt“.

In vielen Bereichen der Industrie, speziell im Transportsektor, finden auch Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) bereits seit 50 Jahren ein stetig wachsendes Einsatzgebiet. Ob in Luft- und Raumfahrt, im Schiffs- und im chemischen Anlagenbau oder im Automobilbau, FKV sind Metallen in vielen Fällen überlegen. Hauptnachteile, die einem breiten Einsatz im Werkzeugmaschinenbau entgegenstehen, sind derzeit die mangelnde Wirtschaftlichkeit und die in einigen Bereichen noch fehlenden überzeugenden Konstruktionslösungen. Es besteht die berechtigte Hoffnung, dass mittels FKV-Lösungen die technologische Spitzenposition des deutschen Werkzeugmaschinenbaus ausgebaut werden kann.

Die Einführung von FKV-Komponenten in Werkzeugmaschinenunternehmen stellt indes konstruktiv, aber auch fertigungstechnologisch eine

große Herausforderung dar (Abbildung 2). In dem gemeinsamen Forschungsschwerpunkt von KLuB und PTW an der TU Darmstadt werden die methodischen Grundlagen für die Bewertung und ggf. Einführung von FKV-Komponenten in Werkzeugmaschinenunternehmen erarbeitet. Ziel ist es, den Wertschöpfungsbeitrag nicht aus den Unternehmen des Werkzeugmaschinenbaus abfließen zu lassen, sondern hier die notwendigen Kompetenzen für FKV-Technologien aufzubauen.

Konkret wird derzeit an einer Kernkomponente moderner Werkzeugmaschinen – der Motorspindel (Abbildung 3) – geforscht, um hier die technisch herausragenden Eigenschaften unter Beweis zu stellen.

CFK – idealer Spindelwellen-Werkstoff

Da bei allen Beschleunigungsvorgängen die Masse linear in den Energiebedarf eingeht, bilden stark beschleunigte Bauteile, wie die Spindelwelle der Motorspindel, den idealen Ansatzpunkt zur Einführung von FKV in den Werkzeugmaschinenbau. Da hier das Verhältnis von Steifigkeit zu Dichte entscheidend ist, sind insbesondere hochsteife Kohlenstofffasern zum Stahlersatz prädestiniert. Sie erreichen im Verbund mit einer Kunststoffmatrix bei

Motorspindeln – Herzstück moderner Werkzeugmaschinen

Die Suche nach leistungsfähigeren Antriebskonzepten im Werkzeugmaschinenbau hat zur Entwicklung der Motorspindeln – kurz MSP – geführt. Eine MSP zeichnet sich durch die Integration des elektrischen Antriebs in die Spindelwelle aus. So entfallen jegliche

Getriebe – und damit deren Verluste und Trägheiten – zwischen Antrieb und Werkstück. Meist sind MSP für hohe Drehzahlen und mit automatisiertem Werkzeugwechselsystem ausgestattet und finden ihren Einsatz in modernen Mehr-Achs-Bearbeitungszentren.

Abbildung 1
Positionen und
Tendenzen
im globalen
Werkzeug-
maschinenmarkt.

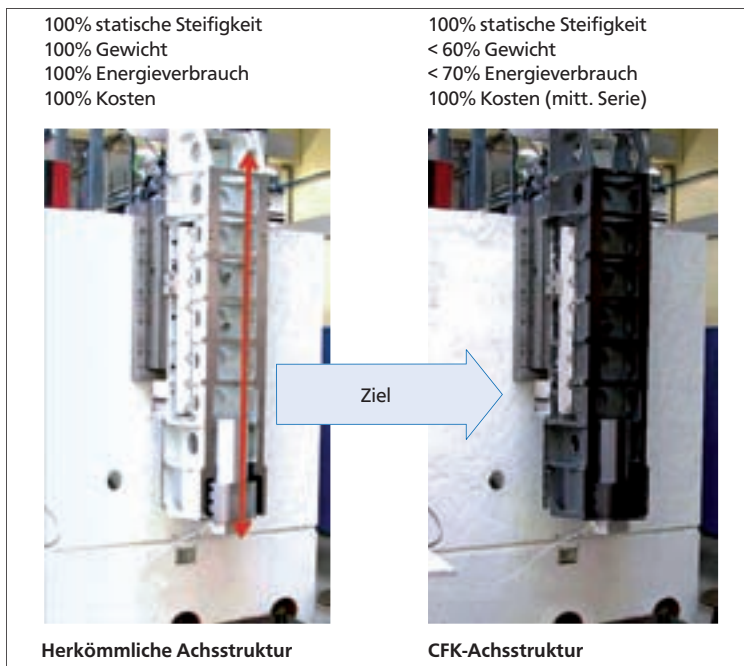


Abbildung 2
Beispiel und Anforderungen einer zu optimierenden Vorschubachse – die links in Al-Druckguss gefertigte Achsstruktur ist ein sehr gut geeignetes Objekt für eine Substitution mittels CFK.

einem Fünftel der Masse die gleiche Steifigkeit wie Stahl und dadurch eine deutlich höhere Eigenfrequenz.

Die Welle einer modernen 55 kW Motorspindel mit HSK 63 Werkzeugaufnahme wiegt mit Rotorpaket etwa 11 kg und wird beispielsweise in weniger als einer halben Sekunde auf 16.000 U/min beschleunigt. Das Gewicht der Welle lässt sich durch den Einsatz von CFK bei gleicher Biegesteifigkeit auf etwa 3 kg reduzieren. Das bedeutet eine Gewichtsreduktion von etwa 70 %. Dasselbe Verhältnis ergibt sich für den Energiebedarf bei allen Beschleunigungsvorgängen. Daran wird deutlich, welche Einsparpotenziale mittels Leichtbau erschließbar sind.

Es lassen sich aber noch weitere Vorteile konstruieren. So kann man die thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder die Umfangssteifigkeit, die für die Fliehkraftaufweitung verantwortlich ist, über Parameter im Fertigungsprozess einstellen. Allerdings sind bis zur erfolgreichen Substitution von Stahl durch CFK noch einige grundlegende Herausforderungen zu lösen.

Wellenauslegung auf Biegesteifigkeit

Bei der Auslegung von FKV-Wellen stehen dem Ingenieur deutlich mehr Konstruktionsparameter als bei Stahlwellen zur Verfügung. Zunächst gilt es die richtige Faser-Matrix Kombination zu wählen. Für höchste Steifigkeitsanforderungen sind hochmodulige Kohlenstofffasern eingebettet in eine Epoxid-Kunstharzmatrix am besten geeignet. Diese Fasern mit einem faserparallelen E-Modul von 430.000 N/mm² sind mehr als doppelt so steif wie Stahl. Im späteren Verbund belegen sie etwa 60 % des

CFK – Werkstoff der Zukunft

Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff (CFK) ist vielen aus der Luft- und Raumfahrt, aus dem Rennsport, oder von Sportgeräten her bekannt. Carbon – wie dieser Werkstoff-Verbund in der Marketingsprache oft genannt wird – weist auf die Dichte bezogen überragende Steifigkeiten und Festigkeiten auf. Die Faser selbst wird überwiegend durch Graphitisierung eines PAN-Precursors gewonnen. Dabei können sehr hohe Elastizitätsmoduln (= 450.000 N/mm²) und Zugfestigkeiten (= 7.000 N/mm²) eingestellt werden. Die Fasern werden im Fertigungsprozess mit Kunstharz getränkt und in Formen ausgehärtet. Die späteren mechanischen Eigenschaften des Bauteils hängen stark von der Faserorientierung ab.

Volumens. Die formgebende Kunststoffmatrix nimmt das restliche Volumen ein. Der faserparallele E-Modul dieses FKV's liegt mit 233.000 N/mm² immer noch über dem Niveau von Stahl.

Die Tatsache, dass der E-Modul des Verbunds quer zu den Fasern nur rund 6.000 N/mm² beträgt, macht deutlich, wie wichtig es ist die Fasern sinnvoll zu orientieren.

Eine Schicht in der alle Fasern gleich orientiert sind wird unidirektionale – kurz UD – Schicht genannt. Das gesamte Bauteil ist aus vielen dieser UD-Schichten, die alle unterschiedlich zueinander orientiert sein können, aufgebaut.

Das Ziel maximaler Biegesteifigkeit der Spindelwelle erfordert es, einen Großteil der Schichten



Helmut Schürmann leitet seit 1994 das Fachgebiet KLuB – Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen des Fachbereichs Maschinenbau der TU Darmstadt. Schwerpunkt seiner Forschungsarbeiten ist der Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden.

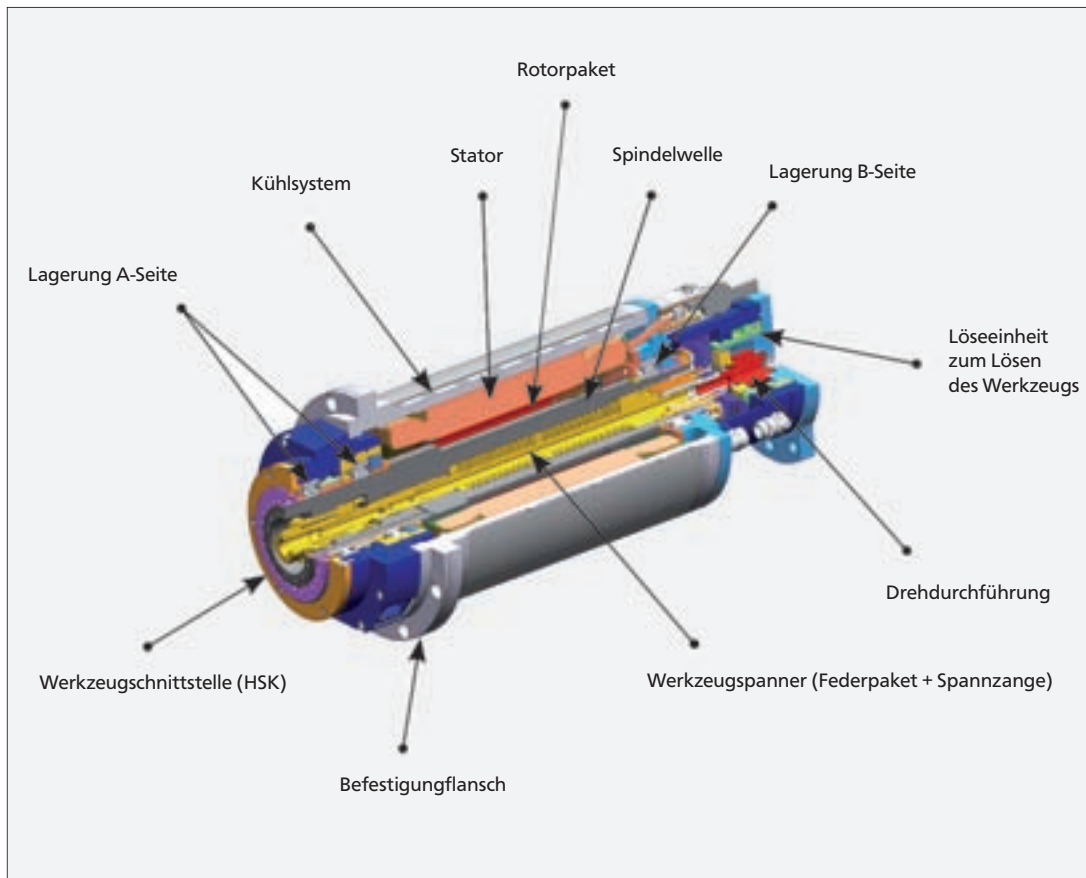


Eberhard Abele ist seit 2001 Professor an der TU Darmstadt und leitet das Fachgebiet PTW – Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen im Fachbereich Maschinenbau.



Martin Klimach arbeitet seit 2009 am KLuB. Schwerpunkt seiner Forschungsarbeit ist der Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden im Werkzeugmaschinenbau.

Abbildung 3
Schnittbild einer
konventionellen
Motorspindel mit
Benennung der
Einzelkomponenten.



axial auszurichten. Der kleinste fertigungstechnisch sinnvolle Winkel liegt bei 9° zur Wellenachse. Für eine gute Laminatqualität und Aufnahme von Torsionsbeanspruchungen, müssen zusätzlich Schichten mit größerem Winkel eingebracht werden. Dabei kann die thermische Ausdehnung oder die tangentielle Steifigkeit der FKV-Welle über diesen zweiten Winkel gesteuert werden. Durch die überwiegend axiale Orientierung der Fasern wird bereits ein sehr geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient in axialer Richtung erzielt. Deshalb wird der zweite Winkel dazu genutzt, die Reaktion der Welle auf Fliehkräfte einzustellen.

Fliehkraftaufweitung am Lagersitz

Der E-Modul in Umfangsrichtung geht ebenso wie die Dichte linear in die Nachgiebigkeit einer Hohlwelle bezüglich Fliehkraft ein, der mittlere Durchmesser dagegen fließt als Hauptparameter kubisch ein. Das bedeutet, dass – trotz gleichen Werkstoffs – Bauteile mit verschiedenem Durchmesser unterschiedliche Fliehkraftaufweitungen zeigen. Für die Stahl-Stahl-Paarung Spindelwelle und Lagerinnenring wird das bei hohen Drehzahlen und großen Lagerdurchmessern problematisch. Damit der zwingend notwendige Kontakt von Welle und Lager nicht unterbrochen wird, müssen die Lager mit einem Untermaß auf der Welle montiert

werden. Diese Überdeckung muss an die jeweilige Maximaldrehzahl angepasst, die hierbei quadratisch eingeht.

Für ein Lager mit 70 mm Bohrungsdurchmesser liegt die maximal erlaubte Überdeckung bei etwa $20\ \mu\text{m}$. Ein strengerer Presssitz würde die Lagerkinematik zu sehr beeinträchtigen.

Eine CFK-Welle kennt diese Problematik bei entsprechendem Laminataufbau nicht. Hier lässt sich der tangentielle E-Modul so einstellen, dass die Welle sich im selben Maße aufweitet, wie das Lager. Folglich genügt es, eine geringe Überdeckung zur Spielfreiheit bei der Montage vorzusehen. Für die vorliegende Spindelwelle berechnet sich der erforderliche tangentielle E-Modul zu etwa $16.000\ \text{N/mm}^2$. Ein Laminataufbau in dem 10° und 54° Schichten im Verhältnis 6 : 1 verwendet werden, wird dieser Forderung gerecht.

Ziel: Lagerung direkt auf CFK

Neben der Bestimmung der Faserorientierungen stellen insbesondere die Krafteinleitungsstellen bei FKV-Bauteilen eine Herausforderung dar. Insgesamt werden an drei Stellen in die Welle Kräfte eingeleitet bzw. übertragen.

- Der unkritischste Krafteinleitungsbereich befindet sich am Rotorpaket. Da dieses direkt mit der Welle verklebt ist, wird das Antriebsmoment groß-

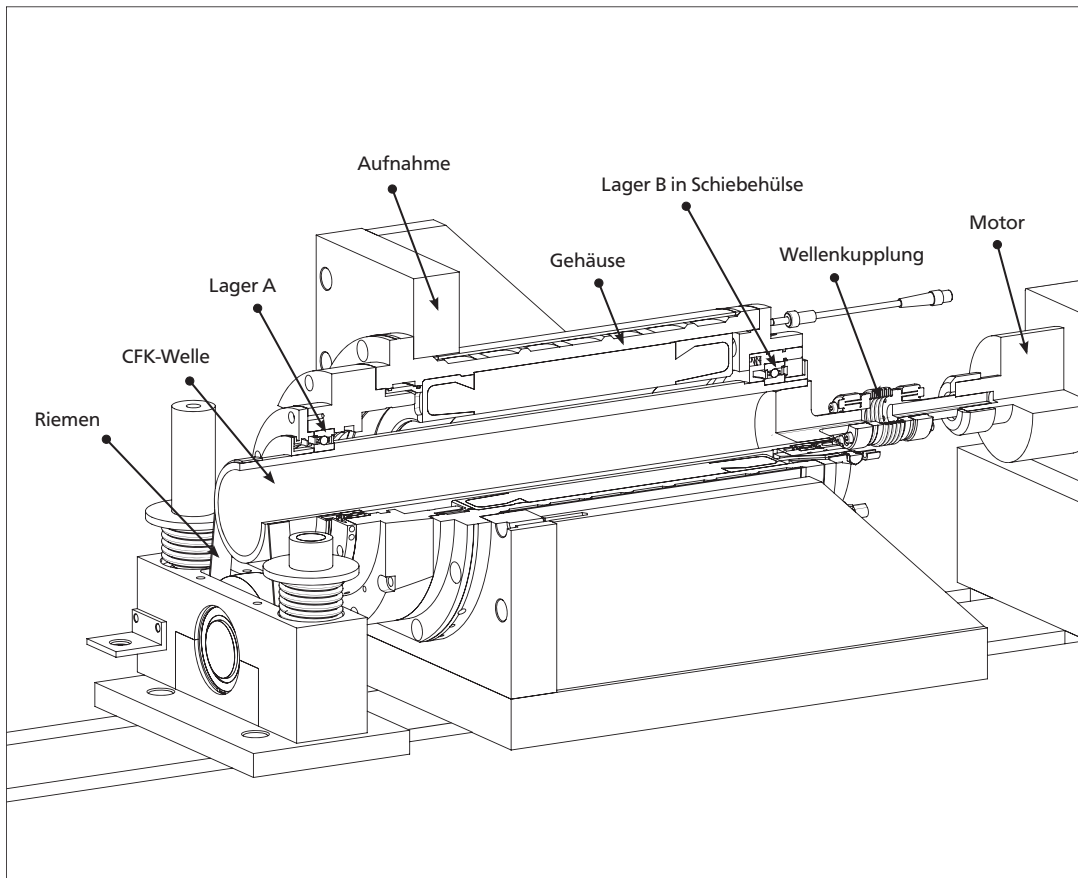


Abbildung 4
Schnittbild des Lagersitz-Prüfstands. Die CFK-Welle ist in einem originalen Motorspindelgehäuse gelagert. Der Antrieb erfolgt extern über einen Elektromotor. Die radiale Last wird über einen Riemen aufgebracht. Die Lagerstelle A ist am höchsten belastet.

flächig übertragen und es sind keine besonderen Probleme zu lösen.

- Die Werkzeugaufnahme stellt, als Bindeglied, das Kräftegleichgewicht zwischen Antriebsmoment und Lagerreaktionen der Welle und Prozesskräften des Werkzeugs her. Hier treten die größten axialen und tangentialen Flächenpressungen auf. Es ist ein Prüfstand in Planung, um zu klären, ob Stahl an dieser Stelle durch eine Kunststofflösung ersetzt werden kann. In ersten Versuchen zur Belastbarkeit von axialen Stirnflächen an CFK-Wellen hat sich gezeigt, dass durch die überwiegend axial orientierten Fasern solche Lasten problemlos aufgenommen werden können.

- Kritisch ist der Bereich um die Lagersitze. Insbesondere unter Biegebelastung (Aufmacherfoto) ist zu befürchten, dass sich die Innenringe der Lager an den Kanten in die vergleichsweise weiche Oberfläche der Welle einarbeiten. In einer aktuell laufenden Prüfstandsuntersuchung (Abbildung 4) wird analysiert, ob Spindellager, die direkt auf einer geschliffenen CFK-Oberfläche fixiert werden, alle

klassischen Anforderungen erfüllen. Bisherige Ergebnisse deuten an, dass eine axiale Vorspannung des Lagers auf der Welle eine größere Herausforderung darstellt, als die Problematik der Lagerkantenpressung.

Fertigung präziser Toleranzen

Die aktuelle Spindelwelle wird aus 100CrMo4 mit gehärteten und geschliffenen Oberflächen in engsten Toleranzen von $<10 \mu\text{m}$ gefertigt. Diese harten und präzisen Oberflächen sind sowohl für die exakte Lagerung als auch eine passgenaue verschleißfeste Werkzeugaufnahme notwendig. Will eine CFK-Lösung hier bestehen, so müssen die gleichen Toleranzanforderungen erfüllt werden. Bereits das präzise Schleifen von Passmaßen in CFK gestaltet sich aufgrund des heterogenen Werkstoffs als sehr anspruchsvoll. Für das Schleifen selbst haben sich ausschließlich Diamant-Schneidstoffe bewährt.

Der gewählte Laminataufbau, der die Welle in Umfangsrichtung sehr nachgiebig macht, verschärft diese Problematik zusätzlich. Die Spannkraften in der Schleifmaschine führen leicht zu Deformationen des Bauteils. In diesem Zustand geschliffen, kommt es zu Maß-Abweichungen nach dem Entspannen. Erste Ergebnisse zeigen, dass es jedoch durchaus möglich ist die geforderten Toleranzen zu erreichen.