

Titel

Hybride Spindel: Prozessabhängige Einstellung der Spindeldynamik zur Produktivitätssteigerung in der spanenden Bearbeitung

IGF-Nr.: 19590 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)

Leibniz Universität Hannover, Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL)



Ansprechpartner Institute:
M.Sc. Christian Teige
0511 762 18334
teige@ifw.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. B. Denkena
0511 762 2553
denkena@ifw.uni-hannover.de

M.Sc. Jan Königsberg
0511 762 14588
jan.koenigsberg@ial.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. B. Ponick
0511 762 2514
ponick@ial.uni-hannover.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 19590 N (Hybride Spindel: Prozessabhängige Einstellung der Spindeldynamik zur Produktivitätssteigerung in der spanenden Bearbeitung) der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. - FGW wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des Forschungsprojekts. Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Der Trend hin zur Individualisierung der Produktion erfordert eine erhöhte Flexibilität von Werkzeugmaschinen. Durch den Einsatz flexibel einsetzbarer Werkzeugmaschinen können Bauteile mit einer hohen geometrischen und stofflichen Vielfalt bei einem kleinen Maschinenpark wirtschaftlich hergestellt werden. Insbesondere die Werkzeugmaschinenspindel muss diesbezüglich so ausgelegt sein, dass Bauteile sowohl aus leicht zerspanbaren als auch aus hochfesten Werkstoffen produktiv bearbeiten werden können. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, sehr produktive Hochdrehzahlprozesse (HSC) und Hochleistungsprozesse (HPC) auf ein und derselben Werkzeugmaschine umsetzen zu können. Um die Anforderungen an HSC-Prozesse (hohe Drehzahlen) und an HPC-Prozesse (hohe Drehmomente) zu erfüllen, müssen die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Spindeln auf die Prozessanforderungen anpassbar sein. Dies betrifft besonders eine variierbare Lagervorspannung und ein umschaltbares Wicklungssystem des Motors zur Anpassung der Motorkennlinie. Dadurch ist es zum einen möglich, hohe Spindeldrehzahlen bei geringer thermomechanischer Belastung der Spindellager für HSC-Prozesse umzusetzen. Zum anderen besteht die Möglichkeit, hohe Drehmoment der Spindel bei einer hohen Lagersteifigkeit sicherzustellen.

Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsprojekts ist die Realisierung und technische Erprobung einer Frässpindel mit erweiterten Einsatzgrenzen. Durch die Anpassung der Lagervorspannung und Motorkennlinie werden die Anforderungen an die Spindel an HSC- und HPC-Prozesse erfüllt. Die Anpassung des hybriden Spindelverhaltens erfolgt über ein adaptives Lagervorspannelement und ein umschaltbares Wicklungssystem des Motors.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Der Ablauf zur Auslegung und Erprobung der Hybriden Spindel ist in Abbildung 1 dargestellt. Zunächst wurden verschiedene Lagerungskonzepte der Hybriden Spindel erarbeitet und im Rahmen von numerischen Simulationen hinsichtlich des thermo-elastischen Verhaltens untersucht. Die sich im Rahmen der Simulation ausbildenden Lagertemperaturen und thermisch induzierten Lagerverformungen dienen zur Auslegung des Vorspannelements. Die Vorspannkraft wird vom Vorspannelement über Federkräfte aufgebracht. Eine Verformung der Spindellager führt zur Änderung der Einfederung und damit zur Änderung der Vorspannkraft. Das adaptive Vorspannelement wird daher so ausgelegt, dass die Vorspannkraftänderung infolge thermisch induzierter Verformungen kompensiert werden kann. In Zusammenarbeit mit Vertretern aus der Industrie wurde für die Spindel eine praxisnahe maximale Nenndrehzahl von $n = 20.000 \text{ min}^{-1}$ und eine Motornennleistung $P_n = 60 \text{ kW}$ definiert. Anhand der Leistungs- und Drehzahlanforderungen erfolgte die Dimensionierung und die technische Realisierung des HSP

elektromagnetischen Aktivteils des Motors. Das Vorspannelement und das umschaltbare Wicklungssystem wurden in eine V100 – S20 Frässpindel der Franz Kessler GmbH integriert. Die so entstandene Hybride Spindel wurde anschließend in eine Werkzeugmaschine vom Typ Heller PFV-1 am IFW integriert und experimentell untersucht. Die experimentellen Untersuchungen umfassen die Durchführung von Modalanalysen sowie Zerspanuntersuchungen. Nachfolgend werden die Schritte bei der Auslegung und Erprobung der Hybriden Spindel näher beschrieben.

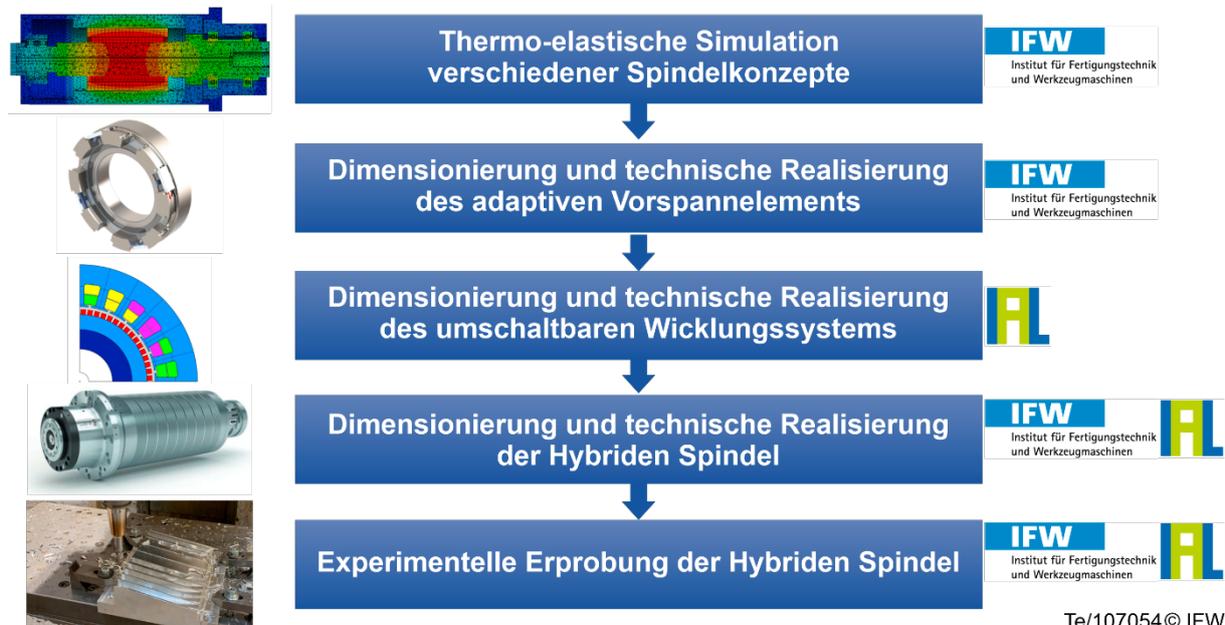


Abbildung 1: Ablauf zur Auslegung und Erprobung der Hybriden Spindel

Te/107054© IFW

Thermo-elastische Simulation von Spindelkonzepten

Im Rahmen der Simulation wurde mithilfe von numerischen Spindelmodellen die thermisch bedingte axiale Verformung verschiedener Spindelwellenlagerungen ermittelt. Diese Verformung führt bei der Spindel V100-S20 zu einer Abnahme der Lagervorspannung und somit zur ungewollten Änderung des Spindelverhaltens. Anhand der Simulationsergebnisse werden somit die erforderlichen Stellwege und Ausgleichsbewegungen des adaptiven Vorspannelements bestimmt, um eine genaue Einstellung der benötigten Aktorkräfte und -wege umzusetzen. Für die Funktionsweise des Vorspannelements ist die Temperaturverteilung im Festlager von besonderer Bedeutung. In der Simulation wurde im Bereich des Festlagers eine Temperatur von $\theta_4 = 43,9^\circ\text{C}$ bei einer Drehzahl von $n = 20.000 \text{ min}^{-1}$ ermittelt. Basierend auf der Temperatursimulation konnte die sich einstellende axiale Verformung der Spindel berechnet werden (Abbildung 2). Anhand der Ergebnisse der Simulation lässt sich eine relative axiale Verschiebung der beiden Schrägkugellager von $\Delta z = \Delta z_2 - \Delta z_1 = -36\mu\text{m} - 0\mu\text{m} = -36\mu\text{m}$ feststellen. Dies bedeutet, dass bei der Drehzahl $n = 20.000 \text{ min}^{-1}$ der Abstand der Lager um $36\mu\text{m}$ ansteigt. Das Vorspannelement, das die Vorspannkraft über Federn auf die Lager überträgt, befindet sich zwischen diesen beiden Lagern. Eine Erhöhung des Lagerabstands führt zu einer Abnahme der Einfederung zwischen dem federnden Vorspannelement und dem angrenzenden Lager und damit zur Verringerung der Lagervorspannung. Das adaptive Vorspannelement muss daher so ausgelegt werden, dass der Vorspannkraftverlust infolge der thermoelastischen Lagerverformung kompensiert wird. Das technische Konzept des adaptiven HSP

Vorspannelements zur Umsetzung einer Vorspannkraftänderung und der Kompensation der thermisch induzierten Verformungen wird nachfolgend beschrieben.

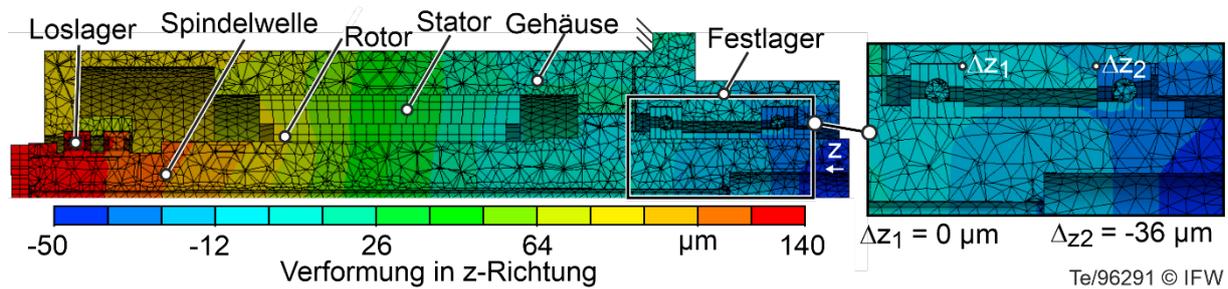


Abbildung 2: Axiale Verformung der Spindel in z-Richtung bei $n = 20.000 \text{ min}^{-1}$

Dimensionierung und technische Realisierung des adaptiven Vorspannelements

Das adaptive Vorspannelement wird auf Basis der ursprünglichen Gleitbuchse der V100-S20-Spindel ausgelegt. Dieses ersetzt anschließend die Gleitbuchse in der Hybriden Spindel. Die Gleitbuchse sowie deren Positionierung in der Hybriden Spindel ist in Abbildung 3 dargestellt.

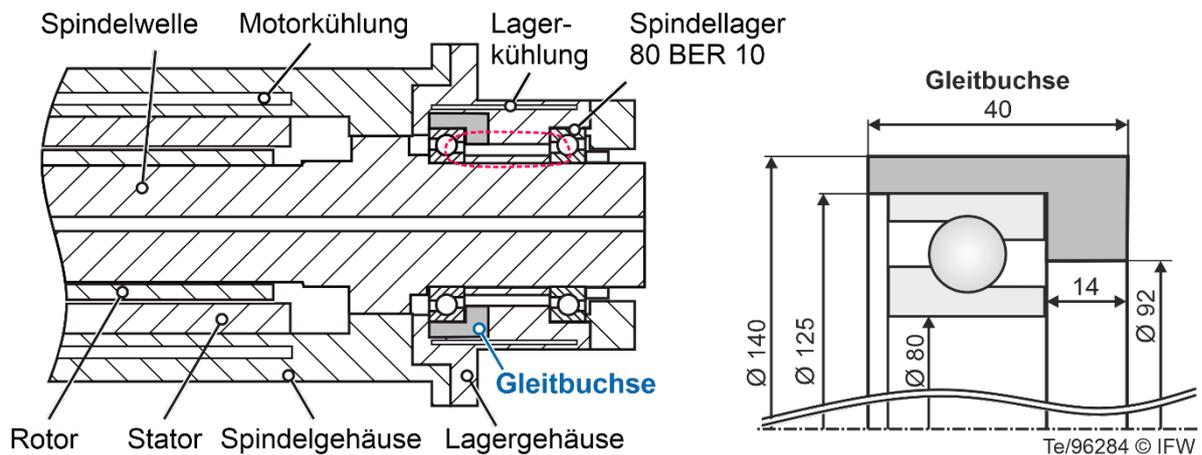


Abbildung 3: Vereinfachter Aufbau der Hybriden Spindel

Da das Vorspannelement der Geometrie der Gleitbuchse entspricht, kann das Vorspannelement in die Spindel ohne konstruktive Änderungen der V100-S20-Frässpindel integriert werden. In Abbildung 4 ist das erarbeitete Konzept des adaptiven Vorspannelements dargestellt. Das Vorspannelement besteht aus einem ringförmigen Grundkörper aus Stahl, der acht Biegefedern aus einer Ni-Ti-Formgedächtnislegierung (FGL) aufnehmen kann. Die FGL-Biegefedern dienen zur Aufbringung der Vorspannkraft auf das Lager. Diese befinden sich zwischen dem Spindelgehäuse und dem Außenring des motornahen Festlagers. Bei der Montage wird der U-förmige Blechfederquerschnitt gestaucht, wodurch die initiale Lagervorspannung realisiert wird. Werden die Blechfedern auf eine Aktivierungstemperatur $\theta_A > 65 \text{ °C}$ erwärmt, streben die FGL-Federn eine Verformung in ihren Ursprungszustand, einen ebenen Blechzustand, an. Der Vorteil dieser hohen Aktivierungstemperatur besteht darin, dass es während des Spindelbetriebs zu keiner ungewollten Aktuierung der FGL-Federn kommt. Dies liegt daran, dass infolge der Gehäusekühlung am Vorspannelement bei $n = 20.000 \text{ min}^{-1}$ Temperaturen von $\theta < 45 \text{ °C}$ auftreten. Diese liegen somit deutlich unterhalb der Aktivierungstemperatur

der FGL. Die Erwärmung der FGL-Biegefedern über die Aktivierungstemperatur hinaus erfolgt anhand von Peltierelemente vom Typ ET-063-08-15-RS. Diese verfügen über eine Gesamtleistung von $P = 80 \text{ W}$. Dadurch wird eine energiearme und einfache Aktuierung des Vorspannelements ermöglicht. Über die Regelung des Stroms durch die Peltierelemente kann die Biegefedertemperatur gezielt eingestellt werden. Eine Verformung der Biegefedern findet bei Überschreitung der Aktivierungstemperatur jedoch nicht statt, weil diese durch die an den FGL-Biegefedern angrenzenden Bauteile, dem Lageraußenring und dem Spindelgehäuse, verhindert wird. Dadurch entsteht eine axiale Zwangskraft, die zu einer Erhöhung der Lager Vorspannung führt. Durch Regelung des Stroms der Peltierelemente kann somit die Vorspannkraft des Vorspannelements gezielt eingestellt werden.

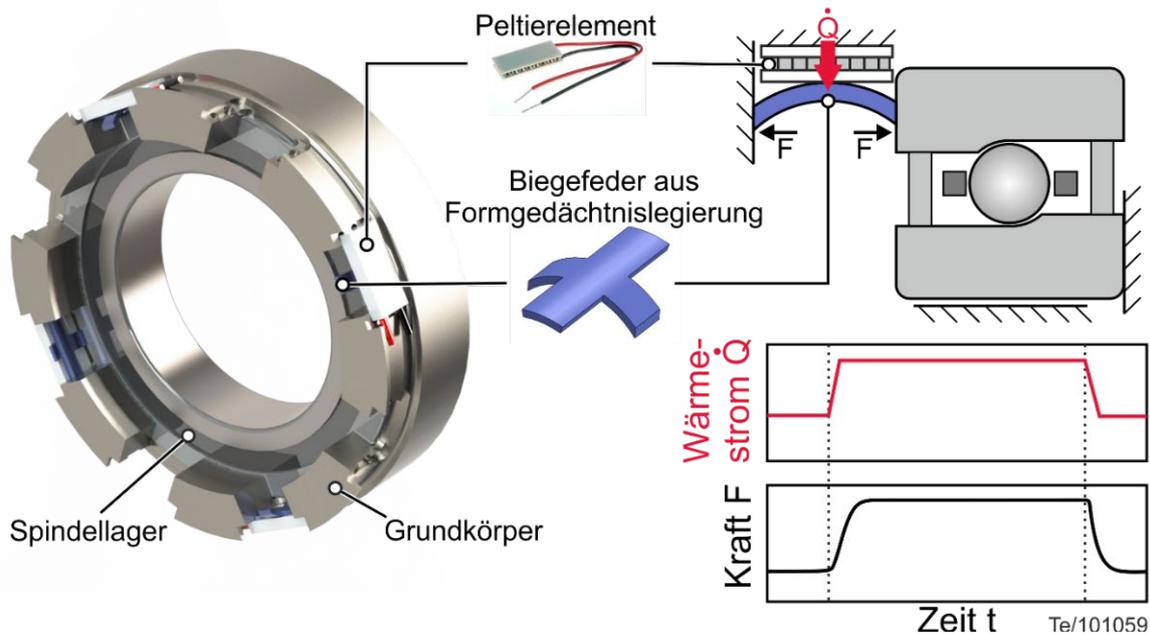


Abbildung 4: Aufbau des adaptiven Vorspannelements

Die Messung der Vorspannkraftänderung ΔF_V durch das Vorspannelement erfolgte auf Basis experimenteller Untersuchungen. Hierfür wurde das Vorspannelement auf einer Kraftmessplattform montiert und über eine Platte mit der in der Spindel zu erwartenden initialen Vorspannkraft von $F = 600 \text{ N}$ vorgespannt. Anschließend wurden die Peltierelemente bestromt, um eine Änderung der Vorspannkraft hervorzurufen. Die sich einstellende Vorspannkraftänderung ΔF_V wurde durch eine Kraftmessplattform und die FGL-Biegefedertemperatur θ anhand von Pt100-Temperatursensoren bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in der Abbildung 5 dargestellt. Die Peltierelemente wurden jeweils mit dem maximal zulässigen Peltierstrom von $I = 1,0 \text{ A}$ bestromt. Dadurch kann die Vorspannkraft um $\Delta F_V = 820 \text{ N}$ innerhalb einer Zeit $\Delta t = 112 \text{ s}$ erhöht werden. Hierbei weisen die FGL-Biegefedern eine Temperatur von $\theta = 100 \text{ °C}$ auf. Nachdem der Peltierstrom auf $I = 0 \text{ A}$ reduziert wurde, fällt die Vorspannkraft und die Biegefedertemperaturen innerhalb von $\Delta t = 240 \text{ s}$ auf den Ausgangszustand zurück. Der Versuch wurde insgesamt viermal durchgeführt, um die Wiederholbarkeit der Vorspannkraftänderung zu ermitteln. Im Rahmen der vier Versuche trat ein maximaler Fehler der maximalen Vorspannkraftänderung von lediglich $\delta_{\max} = 25 \text{ N}$ (3 %) auf. Ferner führt das Abschalten der Peltierelemente dazu, dass die Vorspannkraft stets auf den Ausgangszustand sinkt. Es bildet sich somit keine irreversible Vorspannkraftänderung aus, wodurch eine reproduzierbare

Anpassung der Lagervorspannung umgesetzt werden kann. Dadurch ist es möglich, eine wiederholgenaue Einstellung der Lagervorspannung innerhalb der für Rüstvorgänge zwischen HSC- und HPC-Prozessen üblichen Zeit zu realisieren.

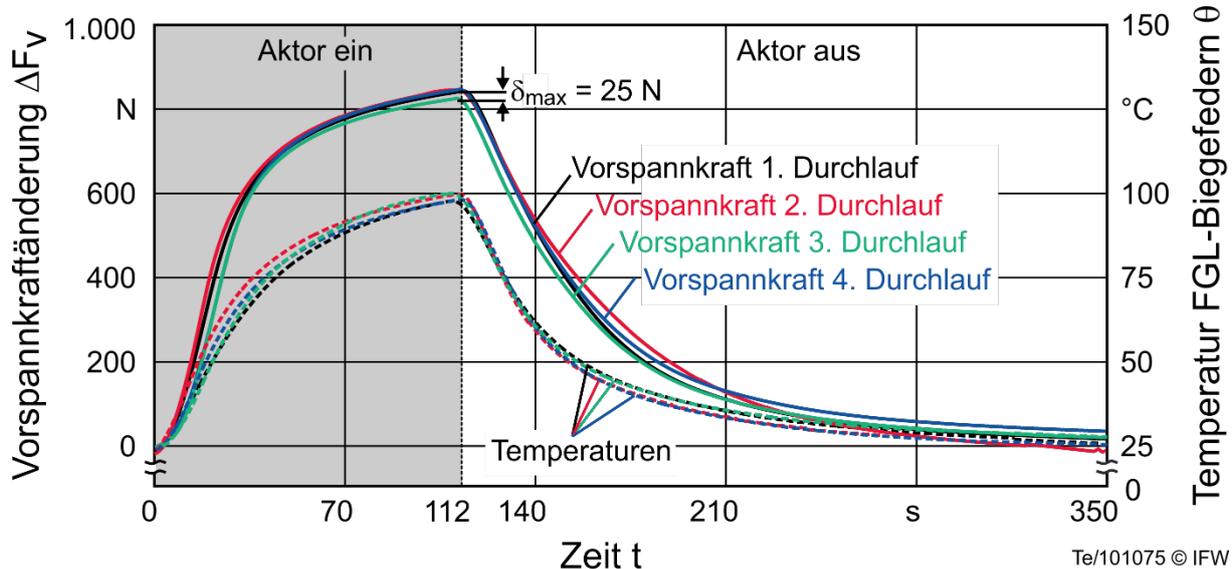


Abbildung 5: Experimentelle Untersuchung zur Einstellung der Vorspannkraft

Dimensionierung des umschaltbaren Wicklungssystems

Mithilfe der festgelegten geometrischen Randbedingungen, wurde zunächst eine Grobdimensionierung für den magnetischen Kreis erstellt. Die Grobdimensionierung umfasst unter anderem die Ermittlung der Breite der Flusswege im Läufer und im Ständer, den Polbedeckungsgrad und die Windungszahl der Ständerwicklung. Die Breite der Flusswege bei vorgegebener axialer Länge wird maßgeblich durch den HPC-Betrieb bestimmt, da hier ein höheres Drehmoment als im HSC-Betrieb benötigt wird. Dies hat eine höhere Flussdichte im magnetischen Kreis zur Folge. Die Spulengruppen der Ständerwicklung werden in Reihe geschaltet, um in allen Spulengruppen den Bemessungsstrom des Frequenzumrichters zu führen. Für den HSC-Betrieb wurde eine Dreieckschaltung mit parallelen Wicklungszweigen, auch Doppeldreieck genannt, untersucht. Der Leiterstrom teilt sich bei dieser Wicklungsschaltung auf die Stränge in Dreieckschaltung und auf deren parallele Wicklungszweige auf. Hierdurch wird bei gleichem Klemmenstrom eine geringere Flussdichte als im HPC-Betrieb hervorgerufen. Die erreichbare maximale Drehzahl im HSC-Betrieb ist von der maximalen Ausgangsspannung des Frequenzumrichters und der Grenze des Feldschwächbereichs abhängig. Die gewählte Wicklungsschaltung für den HSC-Betrieb erweitert die industriübliche Stern (Y) → Dreieck (Δ) Umschaltung um die gleichzeitige Umschaltung paralleler Wicklungszweige zu einer Stern (Y) → Doppeldreieck ($\Delta\Delta$) Umschaltung. Hierdurch kann die Eckdrehzahl gegenüber dem HPC-Betrieb auf $n_{\text{eck},\Delta\Delta} \approx 3,5 \cdot n_{\text{eck},Y}$ erhöht werden. Eine Y → Δ Umschaltung würde die Eckdrehzahl des HPC-Betriebs auf lediglich $n_{\text{eck},\Delta} \approx 1,7 \cdot n_{\text{eck},Y}$ erhöhen. Die Eckdrehzahl n_{eck} beschreibt bei einer elektrischen Maschine diejenige Drehzahl bis zu der ein konstantes Drehmoment ohne Feldschwächung abgeben werden kann. Abbildung 6 zeigt die Geometrie eines Pols der Hybriden Spindel. Die berechneten Betriebskennfelder der Hybriden Spindel für den HPC- und den HSC-Betrieb sind in Abbildung 7 dargestellt.

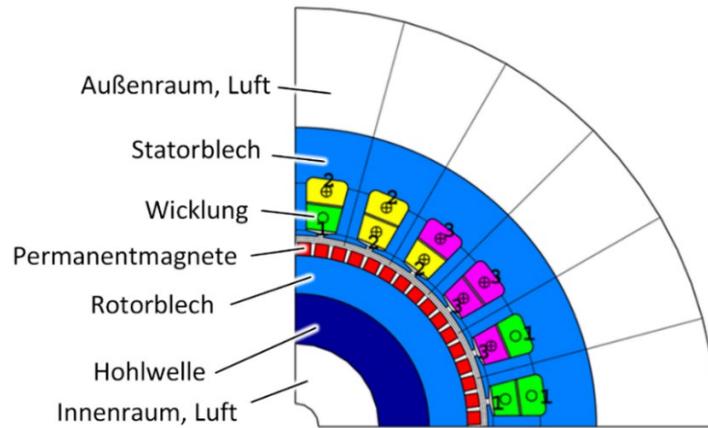


Abbildung 6: Darstellung eines Pols der Hybriden Spindel. FE-Berechnungsmodell aus FEMAG-DC.

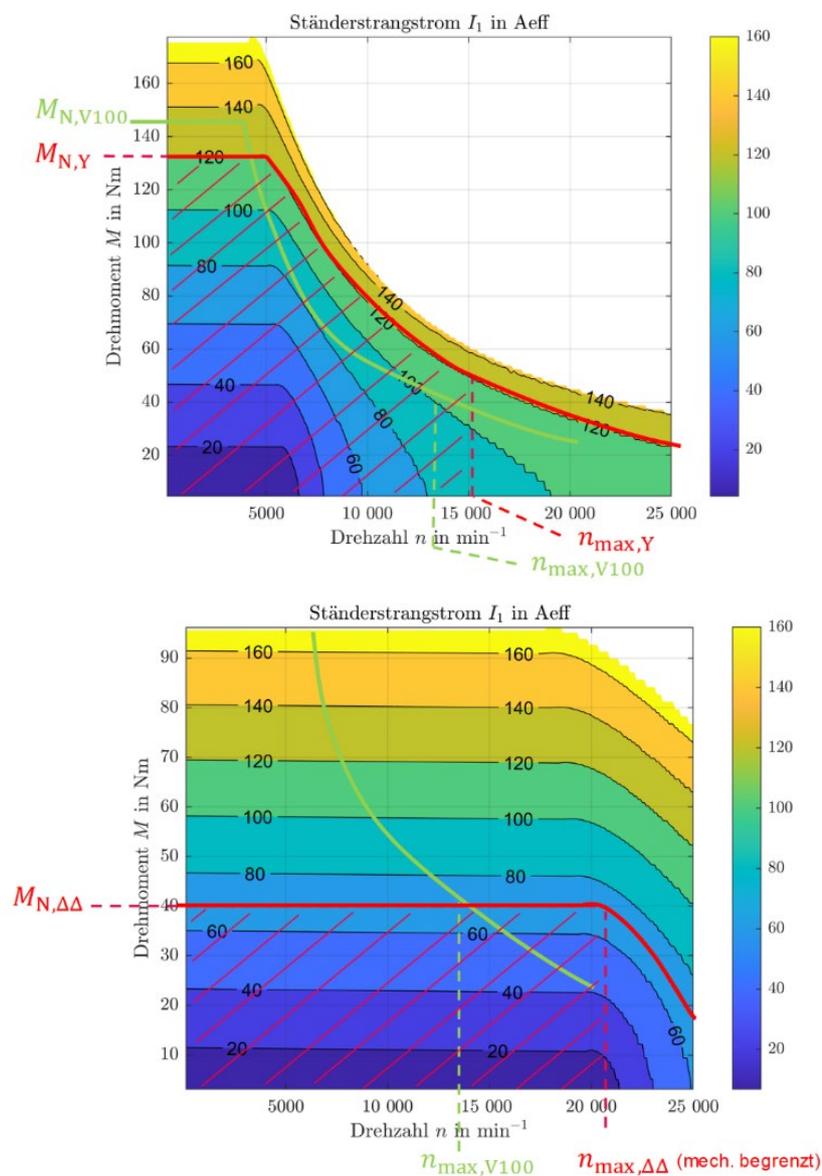


Abbildung 7: Betriebskennfelder der Hybriden Spindel für den HPC-Betrieb (rot; oben) und den HSC-Betrieb (rot; unten) und Grenzkennlinie der V100 (grün); die Skala des Ständerstroms ist nicht für die V100-S20 gültig. Der schraffierte Bereich kennzeichnet den Dauerbetriebsbereich der Hybriden Spindel

Die Hybride Spindel besitzt im HPC-Betrieb mit $P_N = 66 \text{ kW}$ eine um 10 % höhere Bemessungsleistung als die Serienspindel V100-S20. Im HSC-Betrieb (Abbildung 7 unten) besitzt die Hybride Spindel 72 % weniger Drehmoment als im HPC-Betrieb, jedoch eine um 52 % erhöhte maximale Drehzahl (88 % ohne mech. Begrenzung). Hieraus ergibt sich gegenüber der Serienspindel V100-S20 eine um 18 % höhere Bemessungsleistung. Anhand der erreichten Kennwerte, ist die Spindel in der Lage, sowohl HSC- als auch HPC-Prozesse durchzuführen.

Die Stromdichte im Ständer wurde zu $S_{1,N} = 14 \text{ A/mm}^2$ festgelegt, da Werkzeugspindeln vergossene und thermisch gut angebundene Wicklungsköpfe besitzen. Der Wicklungskopf kann somit die Stromwärmeverluste über die Kühlmantel abführen. Maßgebliche Verluste sind im HPC-Betrieb die Stromwärmeverluste in der Ständerwicklung und im HSC-Betrieb die Ummagnetisierungsverluste im Ständerblech. Die Hybride Spindel ist für den Einsatz an Standardfrequenzumrichtern geeignet. Damit kann eine hohe maximale Drehzahl im HSC-Betrieb von $n_{\max} = 21.000 \text{ min}^{-1}$ erreicht werden. Durch die Entwicklung und technische Realisierung des Motoraktivteils, wird sowohl der HPC- und HSC-Betriebsbereich durch die Umschaltung der Motorwicklung abdeckt. Das Motoraktivteil ist zudem im Bauraum einer am Markt verfügbaren Spindel integrierbar.

Technische Realisierung der Hybriden Spindel

Das adaptive Vorspannelement und das umschaltbare Wicklungssystem wurden in der Hybriden Spindel integriert. Im Anschluss erfolgte die Montage der Hybriden Spindel in die IFW-eigene Fräsmaschine Heller PFV-1. In Abbildung 8 ist der Versuchsaufbau zur experimentellen Charakterisierung der Eigenschaften der Hybriden Spindel dargestellt.

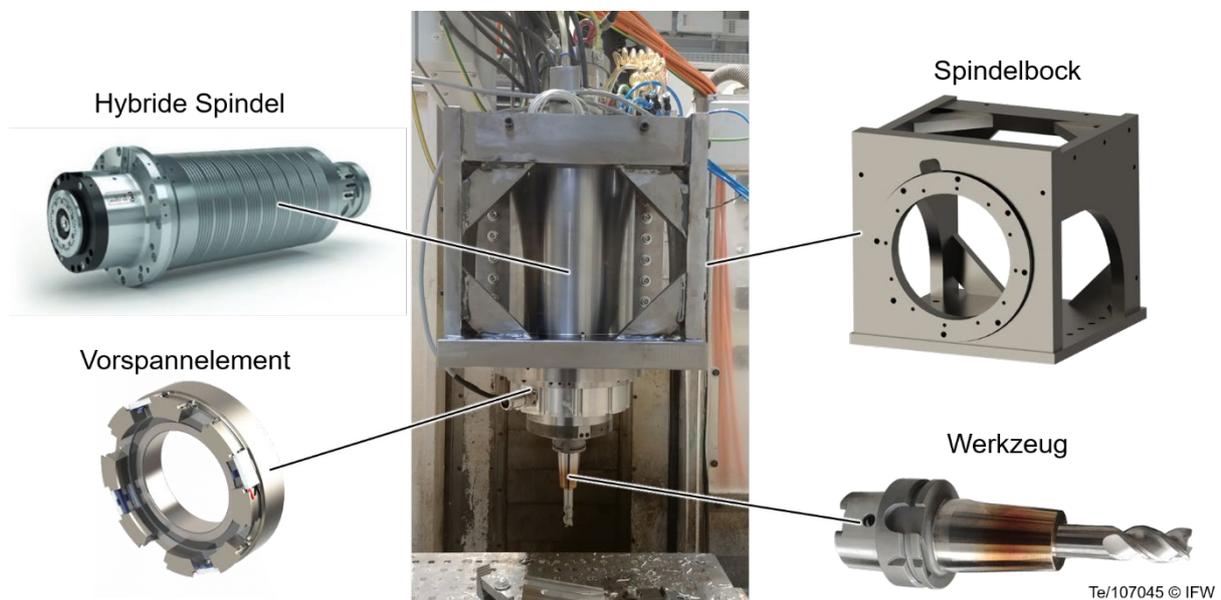


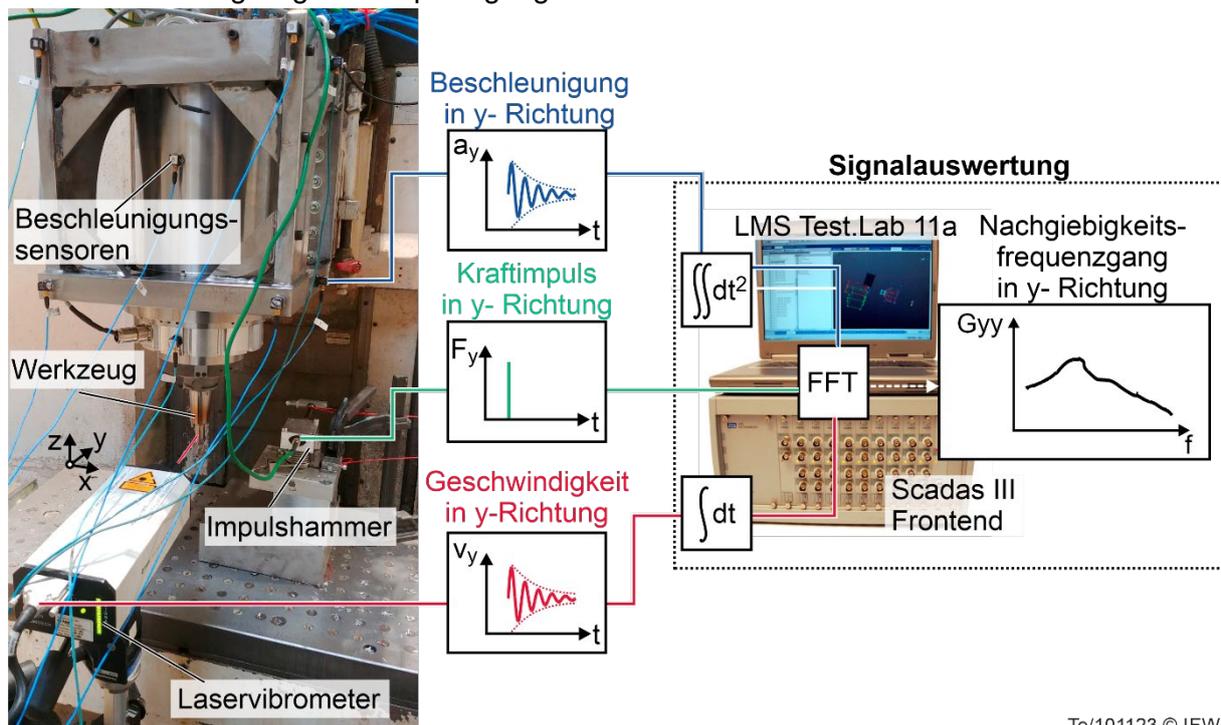
Abbildung 8: Versuchsaufbau der Hybriden Spindel

In der Hybriden Spindel wurde ein VHM-Schruppfräser mit einem Durchmesser von $D = 18 \text{ mm}$ und einer Schneidenanzahl von $z = 3$ über ein HSK-A-63-Thermoschrumpffutter integriert. Für den Antrieb der Hybriden Spindel wurde ein Frequenzumrichter vom Typ „Siemens Sinamics

S120“ verwendet. Mithilfe des so umgesetzten Versuchsaufbaus erfolgte die Untersuchung des Einsatzverhaltens der Hybriden Spindel im Rahmen von experimentellen Modalanalysen und in Zerspanversuchen. Die Versuche werden nachfolgend beschrieben.

Experimentelle Erprobung der Hybriden Spindel

Um die dynamischen Eigenschaften der Hybriden Spindel zu charakterisieren, wurde zunächst eine experimentelle Modalanalyse mittels Impulshammermethode durchgeführt. Im Rahmen der Modalanalyse wurden die Eigenfrequenzen sowie die maximale dynamische Nachgiebigkeit bei der Anregung dieser Eigenfrequenzen als Kenngrößen des dynamischen Verhaltens ermittelt. Diese Kenngrößen wurden bestimmt, weil deren Ausprägungen einen wesentlichen Einfluss auf die Prozessstabilität besitzen. Der Aufbau zur Umsetzung der Modalanalyse ist in Abbildung 9 dargestellt. Über einen Impulshammer wurde der Werkzeugschaft zu Schwingungen angeregt. Die sich einstellende Schwingung des Werkzeug-Spindel-Systems in Anregungsrichtung (negative y-Richtung) wurde über ein Laservibrometer am Werkzeugschaft gemessen. Der Einsatz eines berührungslos messenden Laservibrometers ermöglicht die Ermittlung der Nachgiebigkeitsfrequenzgänge unter Werkzeugrotation. So kann das dynamische Verhalten des Werkzeug-Spindel-Systems für Drehzahlen bis $n = 20.000 \text{ min}^{-1}$ bestimmt werden. Die Auswertung der Hammerimpulse und der sich einstellenden Schwingung der Hybriden Spindel erfolgt durch die Modalanalysesoftware LMS Test.Lab 11a. In der Auswertung werden die Nachgiebigkeitsfrequenzgänge auf Basis der Sensordaten berechnet.

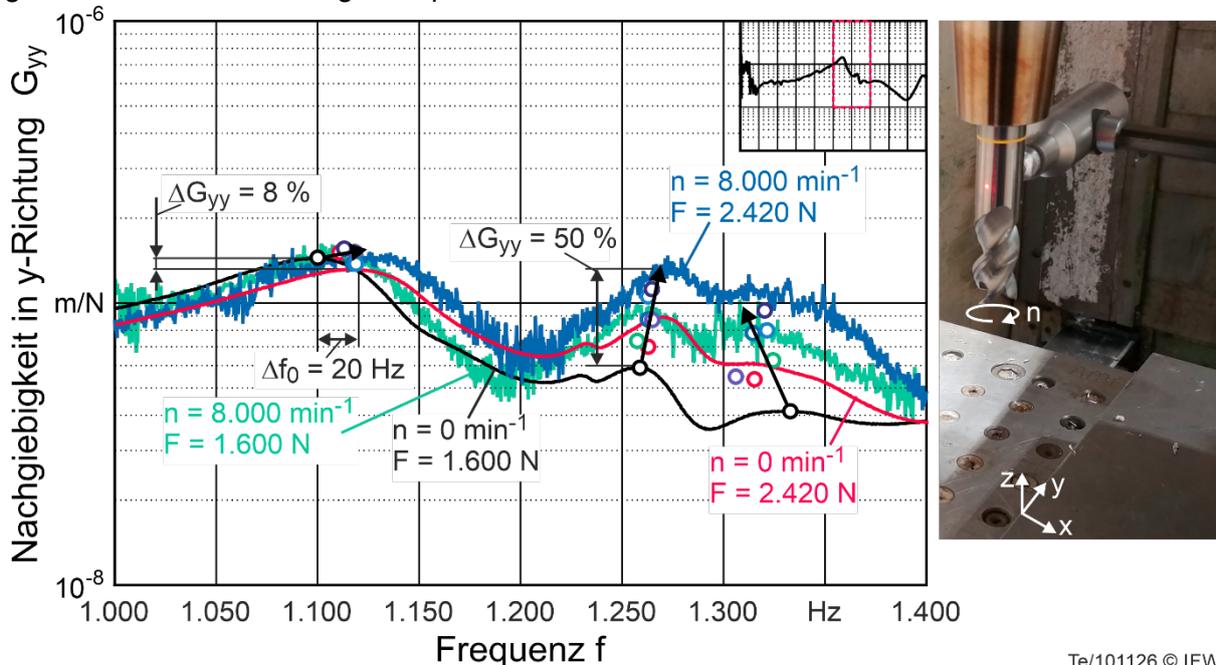


Te/101123 © IFW

Abbildung 9: Aufbau zur Erfassung der dynamischen Eigenschaften der Hybriden Spindel

Mithilfe des Versuchsaufbaus wurden die Nachgiebigkeitsfrequenzgänge zunächst für sieben verschiedene Drehzahlen bestimmt. Um die wesentlichen Eigenfrequenz des Werkzeug-Spindel-Systems zu ermitteln, wurde der Nachgiebigkeitsfrequenzgang bei $n = 0$; 8.000 min^{-1} für eine niedrige ($F = 1.600 \text{ N}$) und hohe Vorspannung ($F = 2.420 \text{ N}$) über einen breiten Frequenzbereich von $f = 0 - 2.000 \text{ Hz}$ ausgewertet. Die ermittelten Nachgiebigkeitsfrequenzgänge sind

in Abbildung 10 dargestellt. Dem Diagramm kann entnommen werden, dass eine Erhöhung der Vorspannung im Stillstand um $\Delta F = 820 \text{ N}$ zu einer Erhöhung der ersten Biegeeigenfrequenz der Spindel um $\Delta f_0 = 20 \text{ Hz}$ (2 %) führt. Ebenfalls wird die maximale dynamische Nachgiebigkeit bei der Anregung dieser Eigenfrequenz um $\Delta G_{yy} = 8 \%$ reduziert. Bei einer Erhöhung der Drehzahl addieren sich die Vorspannkraft- und Drehzahleffekte (z. B. Zentrifugalkräfte auf die Wälzlager). Dadurch kommt es zu einem weiteren Anstieg der dynamischen Nachgiebigkeit von $\Delta G_{yy} = 50 \%$ von $G_{yy} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m/N}$ auf $G_{yy} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m/N}$ im Frequenzbereich von $f = 1.200 - 1.400 \text{ Hz}$. Die Begründung für dieses Verhalten konnte in Zusammenarbeit mit dem Spindelhersteller identifiziert werden. Bei der Überhöhung der Nachgiebigkeit bei $f = 1.270 \text{ Hz}$ handelt es sich um eine weitere Biegeeigenmode der Spindelwelle. Diese Eigenform bewirkt eine geringfügige Verkippung der Spindellager. Wird die Vorspannkraftänderung über das Vorspannelement nicht gleichmäßig von allen acht FGL-Biegefedern aufgebracht, kommt es zur Verstärkung der Lagerschrägstellung. Dadurch wird die Anregung dieser Biegeeigenform begünstigt, was sich in der Einstellung einer erhöhten Nachgiebigkeit äußert. Die Anregung der Biegeeigenform ist allerdings unkritisch, weil die maximale dynamische Nachgiebigkeit geringer ist als in der ersten Eigenfrequenz bei $f = 1.110 \text{ Hz}$.



Te/101126 © IFW

ParameterDrehzahl $n = 0 - 8.000 \text{ min}^{-1}$ Anregung: Impulshammer Vorspannkraft $F = 1.600 \text{ N} - 2.420 \text{ N}$ *Abbildung 10: Einfluss der Vorspannungsänderung auf die dynamische Nachgiebigkeit*

Um den Einfluss der einstellbaren dynamischen Nachgiebigkeit der Hybriden Spindel auf das Prozessverhalten zu untersuchen, wurden Zerspanuntersuchungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau für die Fräsuntersuchungen ist in Abbildung 11 dargestellt. Für die Versuche wurde ein Werkstück aus der Aluminiumlegierung EN AW-7075 verwendet. Das Werkstück verfügt über eine Rampengeometrie, die eine linear ansteigende Schnitttiefe von $a_p = 0$ auf $a_p = 30 \text{ mm}$ bei gleichbleibender axialer Zustellung der Spindel während der Zerspanung ermöglicht. Die kontinuierliche Änderung der Schnitttiefe erleichtert später die Identifikation der

Grenzschnitttiefe. Die Grenzschnitttiefe beschreibt die Schnitttiefe, bei der es erstmals aufgrund hoher dynamischer Prozessanregungen zu einer sprunghaften Erhöhung der Schwingungsamplituden des Werkzeug-Spindel-Systems kommt. Diese plötzliche Schwingungsüberhöhung wird als Indikator der Prozessinstabilität herangezogen. Die Grenzschnitttiefe ist, neben der Schnitttiefe a_p und dem Zahnvorschub f_z , von der Drehzahl des Werkzeugs n abhängig. Daher wurden die Rampen mit unterschiedlichen Drehzahlen zerspant, um die Grenzschnitttiefen entsprechend für unterschiedliche Drehzahlen zu ermitteln. Es wurden Vollnutenschnitte mit zwei unterschiedlichen Zahnvorschüben ($f_z = 0,16 \text{ mm}$; $0,32 \text{ mm}$) durchgeführt. Mit dem eingesetzten Fräser wurde unter Anwendung industrienaher Drehzahlen bis $n = 8.000 \text{ min}^{-1}$ stets eine maximale Schnitttiefe von $a_{p,max} = 30 \text{ mm}$ erreicht. Um den Übergang zwischen stabilem und instabilem Prozessverhalten zu detektieren, wurde ein Beschleunigungssensor am Spindelflansch und am Spindelbock angebracht. Als Indikator für die Einstellung von Prozessinstabilitäten gilt das plötzliche Auftreten erhöhter Schwingungsamplituden.

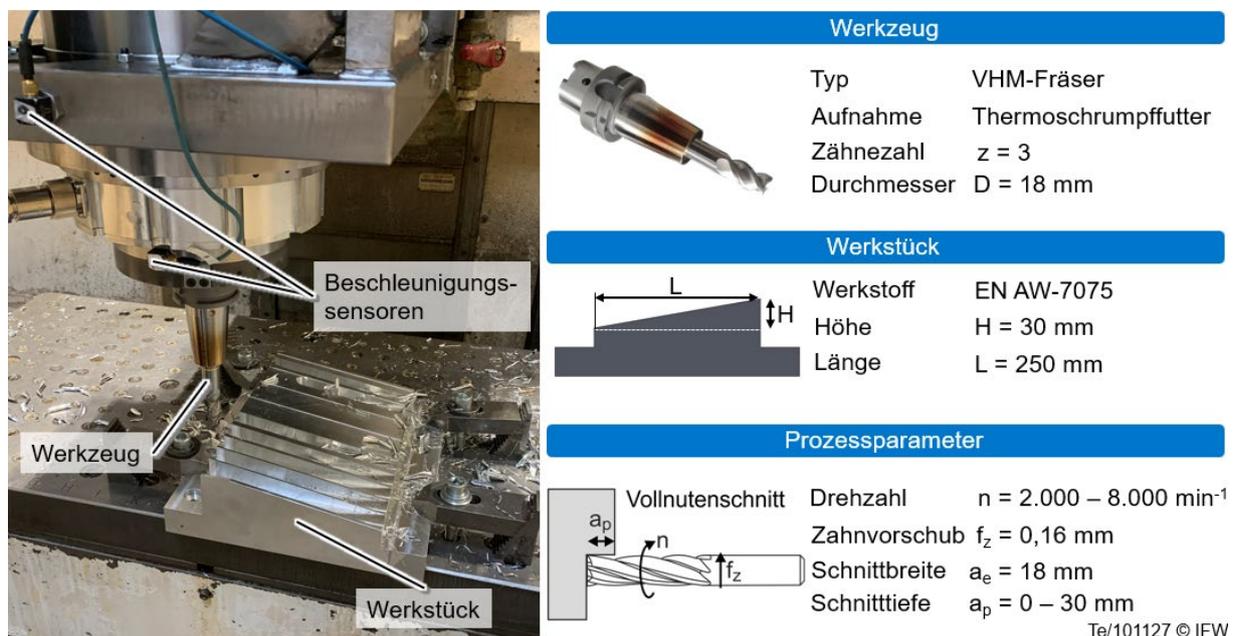
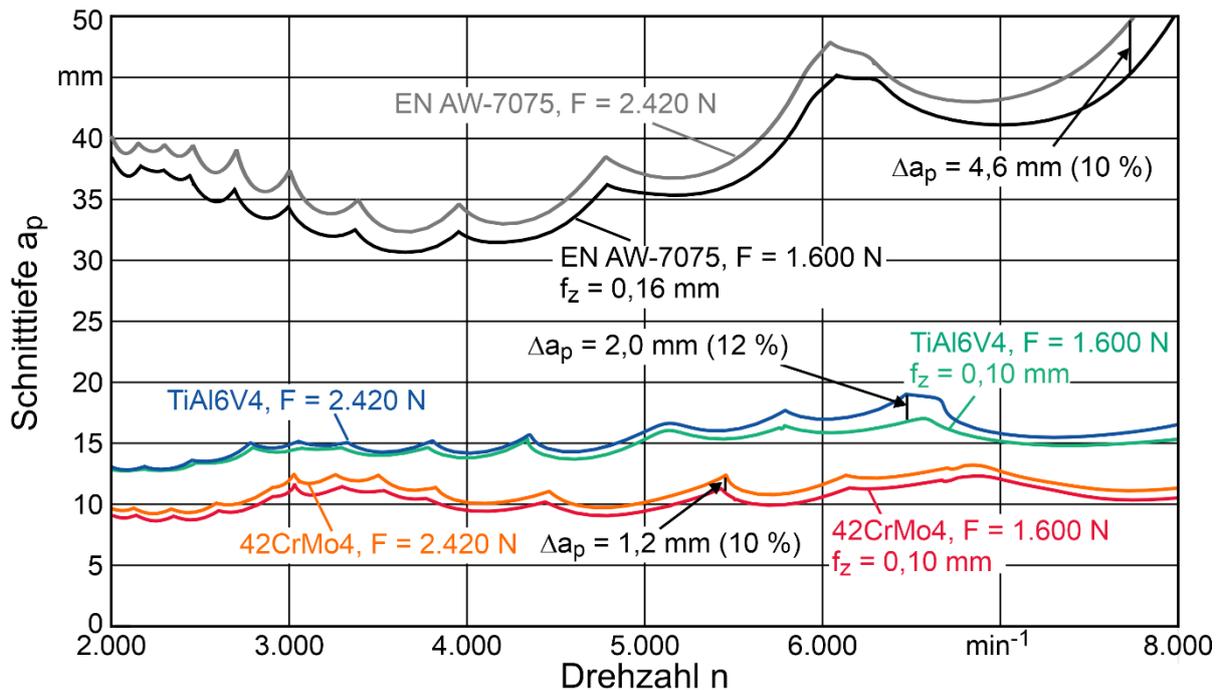


Abbildung 11: Versuchsaufbau für Fräsversuche mit der Hybriden Spindel

Es wurde beobachtet, dass es bei keinem Prozess zu Prozessinstabilitäten kam. Die erreichte Schnitttiefe von $a_p = 30 \text{ mm}$ entspricht der Schneidenlänge des Werkzeugs. Dies ist auf die hohe Steifigkeit der Werkzeug-Spindel-Systems zurückzuführen. Durch eine Erhöhung der Lagervorspannung um $\Delta F = 830 \text{ N}$ konnte, aufgrund der geringen Reduzierung der Nachgiebigkeit in der ersten Eigenfrequenz von $\Delta G_{yy} = 8 \%$ (s.o.), keine Änderung der Grenzschnitttiefe in allen Drehzahlvarianten hervorgerufen werden. Ebenso führte eine Erhöhung der maximalen dynamischen Nachgiebigkeit von $\Delta G_{yy} = 50 \%$ bei der Eigenfrequenz $f = 1.260 \text{ Hz}$ auf zu keiner Reduzierung der Grenzschnitttiefe. Grund hierfür ist, dass trotz des Anstiegs der dynamischen Nachgiebigkeit im genannten Frequenzbereich, diese weiterhin deutlich geringer ist als die dynamische Nachgiebigkeit bei $f = 1.110 \text{ Hz}$. Um dennoch den Einfluss der Lagervorspannungsänderung auf die Prozessstabilität ermitteln zu können, wurde eine simulative Stabilitätsanalyse für den beschriebenen Stirnplanprozess durchgeführt. Der Verlauf der Grenzschnitttiefe wurde auf Basis der Semi-Discretization-Methode berechnet. Hierfür wird zunächst das dynamische Verhalten des Zerspanprozesses beschrieben. Das Werkzeug wird als HSP

schwingende Masse betrachtet, die über Feder-Dämpfer-Systeme mit dem Werkstück wechselwirken. Die dynamische Anregungskraft, die auf das Werkzeug einwirkt, resultiert aus dem Eingriff des Werkzeugs in das Werkstück. Um das komplexe, zeitvariante dynamische Verhalten des Werkzeugs und damit das Stabilitätsverhalten bestimmen zu können, wird eine Diskretisierung durchgeführt. Diese betrifft zum einen die Aufteilung der Werkzeuggeometrie in Segmente entlang der z-Achse. Je feiner die Diskretisierung umgesetzt wird, desto genauer kann das dynamische Verhalten des Werkzeugs abgebildet werden. Die simulierten Grenzschnitttiefenverläufe sind in Abbildung 12 dargestellt.



Parameter

Werkzeug:	Schaftfräser	Eckenradius	$r_\varepsilon = 1,00 \text{ mm}$
Werkstoff Werkstück:	42CrMo4, TiAl6V4, EN AW-7075	Zahnvorschub	$f_z = 0,10; 0,16 \text{ mm}$
Werkzeugdurchmesser D	18 mm		
Werkzeuglänge	L = 60 mm		
Zähnezahl	z = 3 (ungleichgeteilt)		
Eingriffsbreite	$a_e = D$		
Schneidenlänge	$L_w = 30 \text{ mm}$		

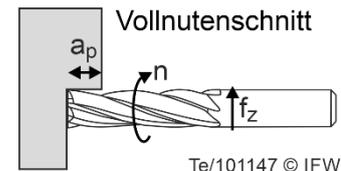


Abbildung 12: Berechnete Verläufe der Grenzschnitttiefe für unterschiedliche Werkstoffe

Der Abbildung kann entnommen werden, dass bei der Zerspaltung von Aluminium mit dem verwendeten Fräs Werkzeug und den dargestellten Prozessparametern eine Grenzschnitttiefe von $a_p = 30,5 \text{ mm}$ resultiert. Unter Verwendung eines Werkzeugs mit der Schneidenlänge $L_w = 30 \text{ mm}$ herrscht somit stets ein stabiles Prozessverhalten. Neben der Stabilitätsanalyse bei der Zerspaltung von EN AW-7075, wurden auch die Prozessstabilitäten für zwei weitere Prozesse mit unterschiedlichen Werkstoffen berechnet. Im Rahmen dieser Prozesssimulation wurde die Fräsbearbeitung von 42CrMo4 und TiAl6V4 simuliert. Die Zerspaltung dieser Werkstoffe kann beispielhaft für die Anwendung der Hybriden Spindel im Rahmen von HPC-Pro-

zessen herangezogen werden. Es lässt sich feststellen, dass durch die Erhöhung der Vorspannkraft um $\Delta F = 820 \text{ N}$ die Grenzschnittiefen bei der Zerspaltung von EN AW-7075, 42CrMo4 und TiAl6V4 beeinflusst werden können. Durch die Aktuierung des Vorspannelements gelingt es die Grenzschnittiefe, unter Anwendung einer gleichbleibenden Drehzahl von $n = 5.500 \text{ min}^{-1}$ (42CrMo4) bzw. $n = 6.500 \text{ min}^{-1}$ (TiAl4V6), um $\Delta a_p = 1,2 \text{ mm}$ (10 %) für 42CrMo4 bzw. um $\Delta a_p = 2,0 \text{ mm}$ (12 %) für TiAl4V6 zu erhöhen. Um die resultierenden hohen Grenzschnittiefen von $a_p = 18 \text{ mm}$ (TiAl4V6) und $a_p = 13 \text{ mm}$ (42CrMo4) zu erreichen, ist die Umschaltung des Motors in den HPC-Betrieb erforderlich. Dadurch können die für die Bearbeitung erforderlichen hohen Drehmomente realisiert werden. Bei der Zerspaltung von EN AW-7075 wurde eine Erhöhung der Grenzschnittiefe um $\Delta a_p = 4,6 \text{ mm}$ (10 %) bei einer Drehzahl $n = 7.800 \text{ min}^{-1}$ berechnet. Es konnte anhand von experimentellen Untersuchungen in Verbindung mit der Simulation gezeigt werden, dass die Hybride Spindel durch Anpassung der dynamischen Nachgiebigkeit die Produktivität von HSC- und HPC-Prozessen zu steigern.

Zusammenfassung

Im abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurde eine Hybride Spindel technisch realisiert und erprobt. Durch das umschaltbare Wicklungssystem und das adaptive Vorspannelement ist die Hybride Spindel in der Lage, zwischen einem HSC- und HPC-Betrieb zu wechseln. Im HSC-Betrieb erreicht der Spindelmotor durch die Doppel-Dreieckschaltung eine Drehzahl von $n = 21.000 \text{ min}^{-1}$. Durch die Sternschaltung gelingt es, ein Drehmoment im HPC-Betrieb von $M = 132 \text{ Nm}$ umzusetzen. Dies ist ein um den Faktor 3,3 höheres Drehmoment als bei der Doppel-Dreieckschaltung. Im HPC-Betrieb konnte eine für HPC-Prozesse hohe Drehzahl von $n = 15.000 \text{ min}^{-1}$ erreicht werden. Zur Anpassung des dynamischen Spindelverhaltens wurde ein adaptives Vorspannelement auf Basis von Biegefedern aus einer Formgedächtnislegierung in der Hybriden Spindel integriert. Mithilfe des Vorspannelements kann die Lagervorspannung um 820 N innerhalb von 112 s variiert werden. Dadurch ist eine Anpassung des mechanischen Spindelverhaltens an HSC bzw. HPC Prozesse im Rahmen des Rüstvorgangs möglich. Zudem konnte aufgezeigt werden, dass eine Erhöhung der Grenzschnittiefe für drei untersuchte Werkstoffe durch Anpassung der Lagervorspannung erreicht werden kann.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn M. Sc. Christian Teige unter 0511 / 762 18334 oder per Mail unter teige@ifw.uni-hannover.de / bei Herrn M. Sc. Jan Königsberg unter 0511 / 762 14588 oder per Mail unter jan.koenigsberg@ial.uni-hannover.de