Schlussbericht

gem. Nr. 8.2 NKBF 98

Für das Vorhaben

Verbundvorhaben: Advanced Machining and Sealing (ADMAS)

Einzelvorhaben: Motorspindel aus Carbon für die Zerspanung mit Roboter

Förderkennzeichen: 20W1901C LuFo ADMAS

Projektpartner

Carbon-Drive GmbH

Egerländer Str. 6

64331 Weiterstadt

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung zu 3
1 Aufgabenstellung 3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens 5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 6
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen. 6
II. Eingehende Darstellung 7
III. Anlage: Erfolgskontrollbericht 10

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

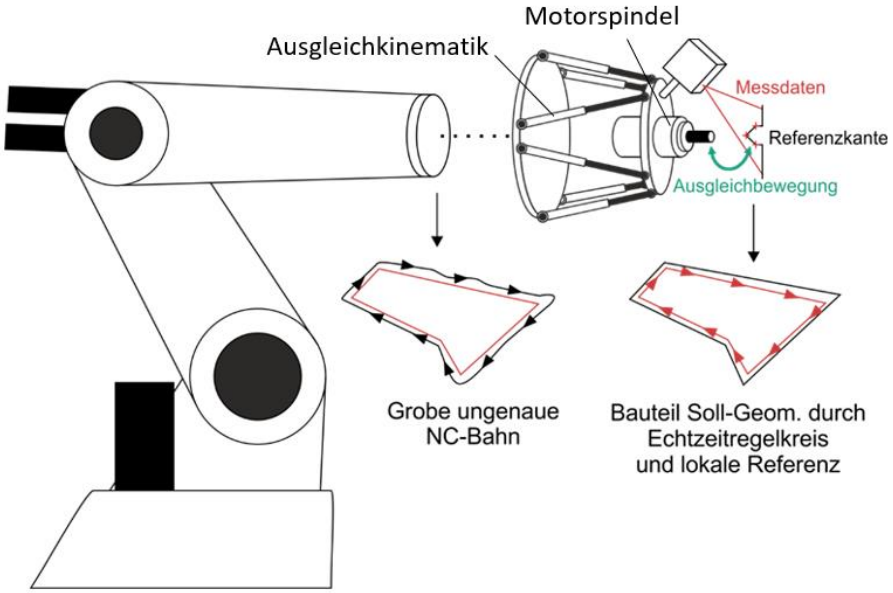
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

I. Kurze Darstellung zu

1 Aufgabenstellung

Industrieroboter als Bearbeitungsmaschinen können sehr große Arbeitsräume abdecken und sind in den Freiheitsgraden sehr flexibel. Zudem sind sie oft mit geringeren Investitionskosten gegenüber großen Werkzeugmaschinen verbunden. Damit sind sie ideal für die Bearbeitung von großflächigen Flugzeugbauteilen geeignet, die aktuell einen Engpass in der Fertigungskette in der Flugzeugindustrie darstellen. Auf Änderungen im Produktionsprozess kann schneller und platzsparender reagiert werden.

Zur Bearbeitung großer Flugzeugbauteile soll ein kombiniertes System aus Standard-Roboter und zu entwickelnder, hochdynamischer Ausgleichskinematik verwendet werden. Der Roboter übernimmt dabei die grobe Positionierung zum Bauteil, gegebenenfalls in Kombination mit einer Linearachse. Anhand gezielt vermessender Bauteilmerkmale, wird die generierte NC-Bahn zur Robotersteuerung dabei an die tatsächliche Bauteilgeometrie adaptiert. Die Feinpositionierung erfolgt mittels Ausgleichkinematik. Ein zu entwickelndes Sensorsystem erkennt dabei die eingebrachten Marken und ermöglicht eine Korrektur der Bearbeitungsbahn in Echtzeit.



Für die zerspanende Bearbeitung kommen üblicherweise traditionelle Motorspindeln aus Stahl zum Einsatz. Stahl-Motorspindeln sind allerdings für Werkzeugmaschinen konzipiert und sehr schwer. Da die Motorspindel am Ende der kinematischen Kette des Roboters sitzt, wird die Dynamik und Präzision des Roboters durch die Masse der Motorspindel begrenzt.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Im Rahmen des Verbundprojekts ADMAS wird die Carbon-Drive GmbH eine Motorspindel entwickeln, die alle strukturtragende Bauteile aus einem Kohlenstoffverstärktem Kunststoff (kurz CFK) herstellt. Diese Spindel soll speziell für die Integration in einen Roboter mit Parallelkinematik (Hexapod) am Endeffektor konzipiert werden und in der Lage sein, hochpräzise Bearbeitungs- und Versiegelungsaufgaben an Flugzeugkomponenten, insbesondere A320-Flügelschalen, durchzuführen.

Durch den neuen Werkstoff wird das Gewicht der Motorspindel mindestens halbiert. Die hohe Leistungsdichte und die sehr guten Dämpfungseigenschaften von CFK-Motorspindeln sind ideal für die Bearbeitung mit Industrierobotern. Für die adaptive Bearbeitung und die Möglichkeit Werkzeugwechsel durchzuführen, soll eine automatisierte Werkzeugspanneinheit entwickelt und in die Carbon-Spindel integriert werden.

Die Entwicklung der CFK-Motorspindel stellte einen zentralen Beitrag zum Erreichen der Gesamtziele des ADMAS-Projekts dar. Durch die Kombination von Leichtbauweise, Hochfrequenzfähigkeit und integriertem Werkzeugwechsel soll die Spindel eine adaptive Bearbeitung in Echtzeit ermöglichen. Dies würde zu einer deutlichen Steigerung der Bearbeitungs- und Versiegelungsgenauigkeiten in der Flugzeugproduktion führen und somit die Qualität und Effizienz der Fertigungsprozesse verbessern.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Unter der Federführung von Airbus und das Fraunhofer IFAM wurde das Projekt durchgeführt. Das Fraunhofer IFAM hat langjährige Erfahrung in der Kalibration, Steuerung und Regelung von Industrierobotern verschiedener Hersteller. Airbus hat die Erfahrung in der Herstellung großer Flugzeugbauteile wie z.B. Flügelschalen und kennt die damit verbundenen Herausforderungen. Das Fraunhofer IFAM hat dazu ein Konsortium an Unternehmen zusammengestellt, die jeweils in Ihrem Teilgebiet Technologieführer sind:

Carbon-Drive GmbH ist Experte für die Herstellung von Motorspindel aus CFK, die in Bezug auf thermische Stabilität und Leistungsdichte den Motorspindel aus Stahl deutliche überlegen sind. Die Aufgabe in dem Projekt liegt daher in der Entwicklung der Motorspindel für die Zerspanung mit dem Roboter.

Gühring gehört zu den führenden Herstellern von rotationssymmetrischen Schneidwerkzeugen und ist damit der Spezialist für die Entwicklung von Hochleistungswerkzeugen für die Zerspanung von großflächigen CFK Bauteilen.

Physik Instrumente (PI) GmbH, die eine Spitzenstellung auf dem Weltmarkt für präzise Positioniertechnik hat, entwickelt die Ausgleichkinematik für die präzise Positionierung der Motorspindel.

ViscoTec GmbH übernimmt als führender Hersteller für Dosieranlagen die Entwicklung eines adaptiven Dosiersystem, welches den automatisierten Auftrag eines Fluids zur Versiegelung von Bearbeitungsflächen einer CFK Flügelschale dient.

3D.aero GmbH hat seine Kernkompetenzen im Bereich Sensorik und Robotik und ist in dem Projekt für die Koordination der technologischen Entwicklung von Einmessstrategien und einem echtzeitfähigen Regelkreis verantwortlich

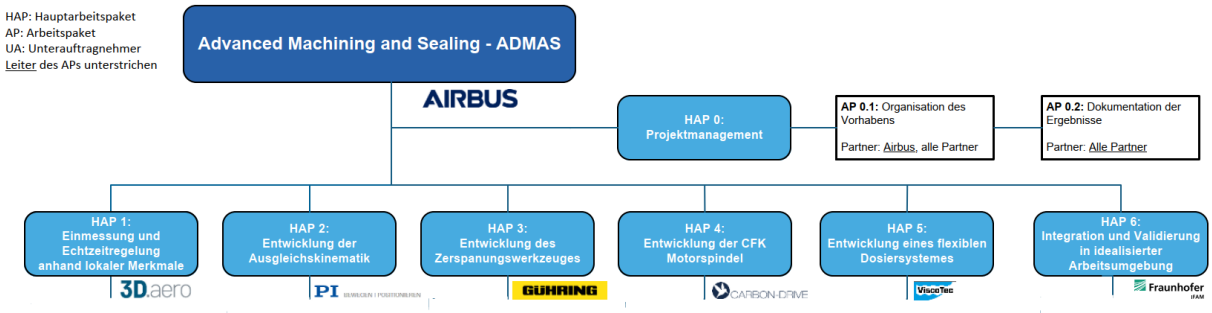
BCT bringt seine Kompetenz in der Einmessung und Auswertung 3D Scans ein, sowie die daraus abzuleitende Anpassung der NC Bearbeitungsbahnen an die Bauteilform.

Ausgangspunkt für die Entwicklung von Carbon-Drive ist eine 10 kW CFK-Motorspindel mit HSK-40 Schnittsteller und einem manuellen Handspanner. Die HSK-40 Spindel soll dahingehend weiterentwickelt werden, dass sie den Anforderungen für die automatisierte Fertigung gerecht wird.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die zentrale Koordination des Verbundprojekts ADMAS wurde durch das Fraunhofer IFAM durchgeführt. Die Herausforderung des Projekts lag vor allem darin, die komplexen unterschiedlichen Teilsysteme zu einem Gesamtsystem zusammenzuführen. Dabei wurde die Entwicklung eines Teilsystems in einzelne Hauptarbeitspakete (HAP1-6) unterteilt und einem Projektverantwortlichen zugewiesen.

Das folgende Diagramm zeigt die sich daraus ergebende Gliederung:



Die Entwicklung der CFK-Motorspindel bei Carbon-Drive folgt einer detaillierten Planung, die im Vorfeld in der Antragstellung festgelegt wurde. Die Arbeitspakete von HAP 4 leiten sich aus den Anforderungen für der Fräsbearbeitung von Großbauteilen mit Industrierobotern ab.

- AP 4.1: Entwicklung der Schnittstellen zwischen CFK Motorspindel und dem Industrieroboter, sowie der Peripherie.
- AP 4.2: Die Hauptspindelfunktion besteht im Antreiben des Werkzeugs. Die Leistungsdaten (Drehzahl, Drehmoment etc.) für die Hauptspindelfunktion ergeben sich aus den Schnittparametern zum Bearbeiten und Entgraten des Referenzbauteils.

- AP 4.3: Damit die Motorspindel zukünftig auch für hochautomatisierte Anwendungen in der Luftfahrt zum Einsatz kommen kann, wird in AP 4.3 ein automatisches Werkzeugwechselsystem entwickelt. Ziel ist hier die Integration von GFK Knickstabfedern zum Spannen des Werkzeugs.
- AP 4.4: Aufbau der Motorspindel inkl. Fettverteilungslauf und Prüfzeugnis.

Abschließend wir in AP 6.3 bis AP 6.3 in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut IFAM die Motorspindel in das Gesamtsystem integriert, in Betrieb genommen und validiert

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Carbon-Drive GmbH ist der einzige Hersteller von CFK-Motorspindeln. Die technologischen Grundalgen für die Herstellung von CFK Spindeln wurden im Rahmen der Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Klimach am Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen der TU Darmstadt, dem EnergieMSP-Projekt und des EXIST Forschungstransferprojekts gesammelt wurden. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass CFK-Spindeln das Potenzial haben, die klassischen Spindeln aus Stahl in vielen Bereichen zu übertreffen. Folgende grundlegende Probleme bzw. Fragestellungen wurden dabei bereits geklärt:

• Umsetzung von Funktionsflächen an CFK-Spindelwellen: HSK Schnittstelle, Lagersitz, Medienführung, Welle-Nabe-Verbindungen

• Verschleiß an Werkzeugschnittstelle und Lagersitz im Dauerversuch.

• Optimierter Laminataufbau: Axiale Verlagerung der Welle, thermische und fliehkraftbedingte Aufweitung der Welle und Anpassung an die Lager.

Der Anknüpfungspunkt für das Verbundprojekt war eine bestehende CFK Motorspindel mit HSK 40 Schnittstelle, 10 kW Leistung, manuellem Werkzeugspanner und einem Gewicht von 4,9 kg.

Die Integration in ein Robotersystem mit Parallelkinematik stellte neue Herausforderungen dar, die eine Weiterentwicklung der bestehenden Technologie erforderten.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Motorspindel, Hexapod, Dosiersystem und Roboter bilden zusammen ein hoch integriertes System. D.h. die Konstruktion eines Teilsystems hat Auswirkungen auf die Konstruktion der anderen Teilsysteme. Der Abstimmungsaufwand und die Zusammenarbeit waren dementsprechend hoch. Zudem wurde Carbon-Drive durch die Firma Gühring mit der Beistellung von CFK Fräsern und Bohren unterstütz. Das Fraunhofer IFAM war dabei immer zentrale Anlaufstelle, um die vielen Schnittstellen der Teilsystem aufeinander abzustimmen. Die enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den Projektpartnern trugen wesentlich zum Erfolg des Projekts bei.

II. Eingehende Darstellung

1. **der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,**

<u>Erzielte Ergebnis mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele:</u>

Spindelhauptfunktion:

Vorgegebene Ziele: HSK 40 Schnittstelle, 10 kW Leistung, 2,5 Nm Drehmoment

Erzielte Ergebnisse: HSK 50 Schnittstelle, 21 kW Leistung, 10 Nm Drehmoment bei 20.000 U/min.

Kommentar: Ursprünglich war das Ziel die bestehende HSK 40 Motorspindel weiterzuentwickeln. Erste Fräsergebnisse beim Fraunhofer IFAM haben gezeigt, dass eine größere Werkzeugschnittstelle und mehr Leistung notwendig sind, um die Bearbeitung an den Flügelschalen durchzuführen. Die Entwicklung der neuen Baugröße stand im Spannungsfeld mit dem Platzangebot innerhalb des Hexpods. Obwohl sich der Leistungsbedarf an den Spindelmotor verdoppelt hat, sollten sich die Anforderungen an die nachgelagerten Antriebe (Hexapod und Roboter) aufgrund der begrenzten Tragkraft nicht weiter verschärfen. Ziel war daher eine möglichst leichte und kompakte Bauweise. Mit einem Gewicht von 12,81 Kg und einer Länge von 320 mm bei 21 kW Leistung konnte die Vorgabe umgesetzt werden. Eine vergleichbare Motorspindel aus Stahl wiegt 46,5 kg. Somit ist die Leistungsdichte der CFK-Spindel fast 4-mal so groß.

Automatisches Spannen von Werkzeugen:

Vorgegebene Ziele: Integration eines automatischen Spannsystems in eine CFK-Spindelwelle inkl. Substitution von Tellerfeder durch ein neuartiges Konzept aus GFK-Knickstabfeder.

Erzielte Ergebnisse: Integration eines automatischen Spannsystems in einer CFK-Motorspindel

Kommentar: Ein zentrales Entwicklungsziel war die Konstruktion einer Motorspindel für die automatisierte Fertigung. Dabei ist ein automatisches Spannen von Werkzeugen unabdingbar. Hierfür wurde ein automatisches Spannsystem der Firma SIGMA in die CFK Welle integriert und erfolgreich getestet. Größte Herausforderung war dabei die großen Spannkräfte über die CFK Spindelwelle absetzen zu können und eine entsprechende Krafteinleitung zu schaffen. Die Integration eines neuartigen GFK Knickstabfederkonzepts wurde nicht umgesetzt, da im Projektverlauft weitere risikobehaftete Neuentwicklungen mit höherer Priorität notwendig waren (Siehe Liste Ergebnisse, die über die Projektziele hinaus gingen). Um nicht weitere Entwicklungsrisiken einzugehen, wurde auf die Substitution verzichtet. Für die eigentliche Kernfunktion des automatischen Spannens hat dies keine Auswirkung, da das Konzept auch mit den standardmäßigen Tellerfedern funktioniert. Dies wurde so auch schon im Projektantrag geplant und berücksichtigt.

Automatisches Lösen von Werkzeugen:

Vorgegebene Ziele: Entwicklung und Umsetzung einer Löseeinheit zum Auswerfen des Werkzeugs

Erzielte Ergebnisse: Entwicklung und Umsetzung einer Löseeinheit zum Auswerfen des Werkzeugs

Kommentar: Zum Lösen des Werkzeugs wurde ein leichtbauoptimaler pneumatischer Lösekolben entwickelt, der auf das Spannsystem drückt und das Werkzeug ausstößt.

<u>Ergebnisse, die über die Projektziele hinaus gingen:</u>

Lagerung der Spindelwelle:

Erzieltes Ergebnis: Erstmalige Umsetzung einer federnd angestellten Lagerung in einer CFK Motorspindel.

Kommentar: Aufgrund der größeren HSK-50 Werkzeugschnittstelle musste auf eine größere Lagerung gewechselt werden. Durch die größeren Lager und Drehzahlanforderung konnte keine starr angestellte Lagerung umgesetzt werden. Dies macht die Konstruktion deutlich aufwendiger und war im ursprünglichen Projektantrag nicht vorgesehen.

Neuer Krafteinleitungskonzept:

Erzieltes Ergebnis: Faserverbundoptimiertes Wellenmutter-Konzept.

Kommentar: Aufgrund des limitierten Kippmoments des Hexapods, sollte die Motorspindel möglichst kompakt und kurz sein. Grundsätzliche können Lager mit Muttern oder mit Deckeln auf der Spindelwelle befestigt werden. Deckel haben den großen Nachteil, dass diese axial deutlich mehr Bauraum benötigen. Aus diesem Grund wurden eine ein faserverbundgerechtes Wellenmutter-Konzept entwickelt, getestet und umgesetzt.

Plananlagenkontrollsystem:

Erzieltes Ergebnis: Entwicklung und Umsetzung eines Plananlagenkontrollsystems.

Kommentar: Im Betrieb der Spindel ist ein korrekt gespannter Werkzeughalter ein wichtiger Sicherheitsaspekt. Bedingt durch den begrenzten Bauraum des Hexapods konnte nicht auf eine marktübliche Lösung mit Wegmesssensoren zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund wurde ein neuartiges Konzept zur Plananlagenkontrolle entwickelt und umgesetzt.

Präzisionsschleifen

Erzieltes Ergebnis: Aufbau Fertigungskompetenz im Bereich Präzisionsschleifen

Kommentar: Aufgrund von Fertigungsproblemen bei einem Zulieferer, wurde die Fertigungskompetenz zum Präzisionsschleifen bei Carbon-Drive aufgebaut.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

2. **der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,**

Die gewährten Fördermittel ermöglichten es Carbon-Drive, umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchzuführen und die ambitionierten Projektziele zu erreichen. Die Zuwendungen wurden primär für folgende Bereiche eingesetzt:

Personalkosten: Finanzierung von hochqualifizierten Ingenieuren, die ihr Fachwissen und ihre Erfahrung in die Entwicklung der CFK-Motorspindel einbrachten. Die Personalkosten haben auch den größten Punkt im zahlenmäßigen Nachweis ausgemacht.

Sachkosten: Beschaffung von Materialien, Komponenten und Werkzeugen für die Konstruktion, Fertigung und Erprobung der Spindel.

Externe Dienstleistungen: Inanspruchnahme von externen Dienstleistern für spezielle Fertigungsschritte, Prüfungen und Analysen. Hier sind im Besonderen das präzise Schleifen von CFK und das Wuchten der Motorspindelteile zu nennen.

3. **der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,**

Im Verlauf des Projektes musste flexibel auf Änderungen und Anpassungen reagiert werden. Für die Integration und Adaption der HSK 40 Motorspindel in einen Hexapoden zur Bearbeitung großflächiger Flugzeugteile mussten einige Elemente von Grund auf entwickelt werden. Damit das Entwicklungsrisiko für die gesamte Spindel kalkulierbar bleibt, wurde jede Neuentwicklung in einer Versuchsumgebung aufgebaut:

- ➔ Faserverbundgerechtes Konzept für eine Wellenmutter: Hierzu wurde ein Wellenrohling mit optimierter Gewindesteigung entwickelt. Um die Festigkeit des Konzepts zu testen, wurde die Mutter/Welle Verbindung in einer Zug-/Druck Maschine bis zum Versagen zyklisch belastet.
- ➔ Aufbau und Entwicklung eines Prüfstands für die pneumatische Löseeinheit, um das Tribologische Verhalten zu beurteilen und die Dauerfestigkeit nachzuweisen.
- ➔ Aufbau einer Versuchsumgebung aus Plexiglas, um die Funktionsweise und Kalibrierung der pneumatischen Plananlagenkontrolle durchzuführen.

Der Aufbau der Testumgebung war notwendig, um die Funktionstüchtigkeit der Systeme isoliert zu testen und ggf. Iterationen durchzuführen. Zudem sind marktzugängliche Lösungen für eine faserverbundgerechte Bauweise oft nicht geeignet. Daher müssen für scheinbar einfach Komponenten (z.B. Wellengewinde) oft innovative Lösungen gefunden werden.

Das LuFo Projekt schaff dabei ideale Voraussetzungen, um die risikobehaftete Entwicklungsschritte zu meistern. Gerade für hochinnovative und junge Unternehmen wie Carbon-Drive können die wirtschaftlichen Risiken für die Einführung von CFK-Motorspindeln gemindert und die Etablierung am

Markt beschleunigt werden. CFK Motorspindeln versprechen dabei nachhaltig die Frästechnologie auf ein neues Niveau zu heben. Das übergeordnete Ziel ist dabei ganz klar auf höchste Kundenanforderungen zugeschnittene CFK-Spindeln anzubieten

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,

Die Drehzahlversuche und die ersten Fräsergebnisse am Fraunhofer IFAM waren sehr vielversprechend. Die Entwicklung der Lagertemperatur über das Drehzahlspektrum der Motorspindel stieg bei Maximaldrehzahl nicht über 33°C. Die Lagertemperatur ist dabei ein kritisches Kriterium für die Dauerfestigkeit der Spindel. Die moderaten Temperaturen zeigen, dass die mit Federn vorgespannten Lager gut funktionieren.

Darüber hinaus bietet das pneumatische Plananlagenkontrollsystem sehr exakte und reproduzierbare Ergebnisse über den sicheren Spannzustand des Werkzeughalters. Das System wird deshalb auch in weiteren Spindelbaugrößen von Carbon-Drive zur Anwendung kommen.

Zudem bietet auch das erworbene Know-How zum Präzisionsschleifen von CFK einen großen Mehrwert. Der damit verbundene Kompetenzgewinn innerhalb des Unternehmens verbessert die Verwertbarkeit der Forschungsergebnisse aus dem Projekt ADMAS. Zudem verringert sich die Abhängigkeit gegenüber Dienstleistern und macht Carbon-Drive resilienter gegenüber externen Einflüssen.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,

Es sind von Seiten Carbon-Drive keine Stellen bekannt, die ebenfalls auf dem Gebiet CFK-Motorspindel für die Roboterzerspanung Fortschritte erzielt hat.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

Im September 2024 wurde die HSK-50 Motorspindel auf der Internationale Messe für Maschinenbau in Stuttgart (AMB) vorgestellt. Zudem soll die Spindel auf der EMO 2025 präsentiert werden.

III. Anlage: Erfolgskontrollbericht

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages