Abschlussbericht

Gesamtvorhabensbezeichnung

CVD-Diamantschichtsysteme mit maximaler Materialeffizienz für die Bearbeitung ubiquitärer Leichtbau- und Hochleistungswerkstoffe - DIAMAX -

Teilvorhaben

Analyse und Auslegung der Werkzeuganforderungen bei der Bearbeitung von Leichtbau- und Hochleistungswerkstoffen am Beispiel der Anwendungsfälle Bohren und Fräsen

Teilprojektleitung

Hr. Max Prem

WEMA Zerspanungswerkzeuge GmbH

Raiffeisenstr. 9

85276 Pfaffenhofen

Förderkennzeichen

03XP0391B

Laufzeit des Vorhabens

01.08.2021 bis 30.04.2024

Berichtszeitraum

01.08.2021 bis 30.04.2024

Programm und Projektträger

KMU-innovativ, Projektträger Jülich

Teil I: Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung sowie Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

Im Bereich der Zerspanungswerkzeuge bieten CVD-Diamantschichten aufgrund ihrer hohen Verschleißbeständigkeit und Härte großes Potential für die Bearbeitung von aktuellen Leichtbau- und Hochleistungswerkstoffen wie faserverstärkten Kunststoffen und Aluminium-Silizium-Legierungen. Wesentlich für die Einsatz- und Leistungsfähigkeit von CVD-Diamantschichten ist die Haftfestigkeit und Stabilität der Schicht auf dem Hartmetall-Grundkörper. WC-Co-Hartmetalle müssen hierzu üblicherweise aufwendig ätztechnisch vorbehandelt werden und sind zudem auf geringe Kobaltgehalte beschränkt, um eine ausreichende Prozesssicherheit zu ermöglichen. Aktuelle Herausforderungen sind hierbei ein frühzeitiges Schichtversagen während des Einsatzes und damit eine geringe Wirtschaftlichkeit der Bearbeitung.

Ziel des Verbundvorhabens „DIAMAX“ war die Erforschung ultrahaftfester CVD-Diamantschichtsysteme durch die Entwicklung anwendungsoptimierter und hartmetallunabhängiger Zwischenschichten. Somit sollte die ätztechnische Vorbehandlung des Hartmetalls substituiert, die Beschränkung auf bestimmte Kobaltgehalte aufgehoben und ein anforderungsgerechtes Materialsystem aus aufeinander abgestimmten Schichttypen und -morphologien erarbeitet werden. Für das Erreichen der Vorhabensziele wurde eine Reihe komplexer Fragestellungen bearbeitet. Im Folgenden sind diese für jeden Verbundpartner aufgeführt.

WEMA Zerspanungswerkzeuge GmbH:

Arbeitsschwerpunkt: Analyse und Auslegung der Werkzeuganforderungen bei der Bearbeitung von Leichtbau- und Hochleistungswerkstoffen am Beispiel der Anwendungsfälle Bohren und Fräsen

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST:

Arbeitsschwerpunkt: Grundlegende Erforschung von hartmetallunabhängigen CVD-Diamantschichtsystemen für eine maximale Haftfestigkeit und Belastbarkeit auf Probekörpern und einfachen Geometrien

Weber Technologies GmbH (Verbundkoordinator):

Arbeitsschwerpunkt: Erforschung und Übertrag der anwendungsoptimierten CVD-Diamantschichtsysteme auf die industrierelevante Anlagentechnologie und komplexe Werkzeuggeometrien

1.2 Ablauf des Vorhabens

Die Verbundarbeiten wurden zeitlich und inhaltlich ineinandergreifend und im stetigen Austausch der Verbundpartner durchgeführt. Zunächst erfolgte die Analyse aktueller Anwendungsfälle von CVD-diamantbeschichteten Zerspanungswerkzeugen sowie die Auswahl der für das Projekt zu betrachtenden Zerspanungsaufgaben. Ausgehend von aktuellen Herausforderungen am Markt wurden das Fräsen und

das Bohren übereutektischer Aluminium-Silizium-Legierungen sowie von CFK ausgewählt, da hier durch die Eigenschaften der Materialien hohe Anforderungen an das Werkzeug gestellt werden.

Im Anschluss erfolgte die Auswahl, Festlegung und Beschaffung von fünf marktüblichen WC-Co-Hartmetallsorten mit Cobaltgehalten von 6 % bis 10 % in zwei Probekörpergeometrien (ebene und zylindrische Probekörper) sowie die grundsätzliche Auslegung und Konstruktion der spezifischen Werkzeuge für das Bohren in AlSi17 und CFK sowie für die Fräsbearbeitung von CFK.

Es wurden umfangreiche Untersuchungen verschiedener Schichtsysteme auf den ebenen Probekörpern durchgeführt. Hierbei wurden bis zu fünf Zwischenschichtvarianten erforscht. Anschließend erfolgte der Übertrag der drei vielversprechendsten Zwischenschichtsysteme auf zylindrische Probekörper sowie die Erarbeitung und Evaluation haftfester diamantprozess-spezifischer Kombinationen aus Zwischenschicht und Diamantschicht. Anschließend wurden die konstruierten Schaftwerkzeug-Grundkörper für das Bohren in AlSi17 und die Fräsbearbeitung von CFK aus allen fünf Hartmetallsorten gefertigt und analysiert (200 Werkzeuge). In drei Zwischenschichtprozessen und in Summe sieben CVD-Diamantschichtprozessen wurden die Schichtsystemvarianten auf den Werkzeugen abgeschieden und eingehend analysiert. Im Anschluss erfolgten Zerspanversuche und die detaillierte Untersuchung und Bewertung der Werkzeuge im Hinblick auf Schichthaftung und Verschleiß.

1.3 Wesentliche Ergebnisse des Vorhabens DIAMAX

Das Verbundvorhaben wurde mit einer Vielzahl an Erkenntnissen und Ergebnissen abgeschlossen. Im Folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse, entsprechend der Abfolge im Arbeitsprogramm und angelehnt an die Teilvorhaben aufgeführt:

- Werkzeuggeometrie, Schneidengeometrie und Schneidkantenausführung wurden unter Einbezug der Eingriffsbedingungen für drei Anwendungsfälle ausgelegt und konstruiert
- Fertigung, Beschichtung und Analyse der Schaftwerkzeug-Grundkörper für das Bohren in AlSi17 und die Kantenbearbeitung von CFK wurden erfolgreich durchgeführt
- Erfolgreiche Voruntersuchung an ebenen Probekörpern zur Identifikation von vielversprechenden Zwischenschichten sowie erfolgreicher Übertrag und Abscheidung der drei vielversprechendsten Zwischenschichten auf Zylindergeometrien
- Erfolgreiche Evaluierung haftfester diamantprozess-spezifischer Kombinationen aus Zwischenschicht und Diamantschicht
- Erfolgreicher Übertrag und Abscheidung der zwei vielversprechendsten Zwischenschichten auf komplexe Werkzeuggeometrien
- Hoher Anteil von haftfesten und einsatzfähigen Diamantschichten auf allen Hartmetallsorten
- Sehr gute Zerspanungsergebnisse, beim Fräsen bereits auf Referenzniveau

Teil II: Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse (ausführlicher als bei Teil I)

Die detaillierte Darlegung der durchgeführten Arbeiten und der erzielten Ergebnisse ist im Folgenden entsprechend den Arbeitspaketen der Vorhabensbeschreibung aufgeführt.

AP 0: Koordination des Vorhabens

Die Koordination und das Management des Verbundprojekts erfolgte federführend durch Weber Technologies. Hierzu wurden in enger Absprache mit den Projektpartnern die Projekttreffen mit Projektträgerbeteiligung, projektinterne Arbeitstreffen sowie ergänzende Webmeetings für kurzfristige Besprechungen beispielsweise zu den Materialbeschaffungen organisiert. Eine Übersicht der durchgeführten Projekt- und Arbeitstreffen zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der koordinierten Treffen der Verbundpartner

Datum	Ort	Art des Treffens
25.08.2021	Weber Technologies, Potsdam	Projekttreffen, Kick-Off
24.11.2021	Webmeeting	Arbeitstreffen
23.02.2022	Webmeeting	Projekttreffen
08.03.2022	Webmeeting	Arbeitstreffen
08.07.2022	Webmeeting	Arbeitstreffen
27.09.2022	Fraunhofer IST, Braunschweig	Projekttreffen
23.01.2023	Webmeeting	Arbeitstreffen
16.05.2023	WEMA, Pfaffenhofen	Projekttreffen
13.12.2023	Webmeeting	Arbeitstreffen
08.02.2024	Webmeeting	Arbeitstreffen
11.04.2024	Weber Technologies, Potsdam	Projekttreffen, Abschluss

AP 1: Analyse und Auslegung der Werkzeuge und Materialsysteme

Durchgeführte Arbeiten:

In enger Abstimmung mit den Projektpartnern wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Festlegung der zu betrachtenden Anwendungsfälle
  - Bohren ins Volle in übereutektische Aluminium-Silizium-Legierung (AlSi17)
  - Kantenfräsen von CFK
  - Durchgangsbohren von CFK
- Analysen und Recherchen zu marktüblichen Werkzeugen für die ausgewählten Zerspanungsaufgaben (Geometrie, Typ, Schneidenanzahl)
- Festlegung der Werkzeuggeometrie
  - Durchmesser d = 6 mm, Werkzeuglänge l = 52 mm
- Auslegung, Konstruktion und Fertigung der Werkzeuge

  - Für die Werkzeugfertigung wurde die Schleifscheibenspezifikation entsprechend der zielführenden Oberflächenrauheit (siehe AP 2) ausgewählt und eine passende Abrichtstrategie umgesetzt
- Festlegung der Probekörpergeometrien für Beschichtungsversuche
- Festlegung der Hartmetallsorten für die grundlegenden Beschichtungsversuche mit unterschiedlichen Kobaltgehalten
  - EMT 100 (6 %-Co), EMT 609 (9 %-Co), EMT 210 (10 %-Co)
  - K6UF (6 %-Co), K55SF (9 %-Co)
  - CTS20D (10 %-Co)
- Bestellung / Beschaffung der Probekörper
- Auswahl und Beschaffung zylindrischer Grundkörper für die Werkzeugfertigung
- Auswahl und Festlegung zu untersuchender Zwischenschichtsysteme
- Beschaffung der zu zerspanenden Werkstücke
- Nach Zerspanversuchen (AP 4): Bewertung und Analyse der eingesetzten Werkzeuge in Hinblick auf eine mögliche Geometrieoptimierung

Erzielte Ergebnisse:

1. Werkzeuggeometrie, Schneidengeometrie und Schneidkantenausführung wurden unter Einbezug der Eingriffsbedingungen für drei Anwendungsfälle ausgelegt und konstruiert
2. Fertigung und Analyse der Schaftwerkzeug-Grundkörper für das Bohren in AlSi17 und die Kantenbearbeitung von CFK wurden erfolgreich durchgeführt
   a. In Summe wurden 200 Werkzeuge gefertigt
   b. Anforderungsgerechte Oberflächenqualität & hohe Maßgenauigkeit über alle Hartmetallsorten wurden erreicht

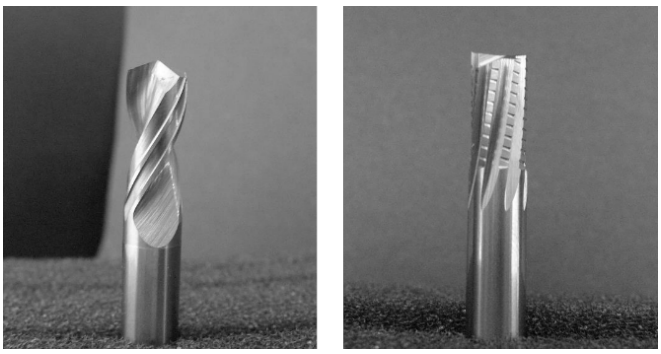

Abbildung 1: Geschliffene Werkzeuggeometrien, li.: Spiralbohrer, re.: Schaftfräser

3. Bewertungen des Einsatzverhaltens und der Optimierungsbedarfe für den Werkzeugrundkörper wurden durchgeführt

a. Die grundlegende Auslegung und Konstruktion der Werkzeuggrundkörper sowie deren Fertigung haben sich als sehr gut geeignet und damit zielführend für die Zerspanungsanwendungen erwiesen
b. Es waren keine Weiterentwicklungen am Werkzeuggrundkörper notwendig

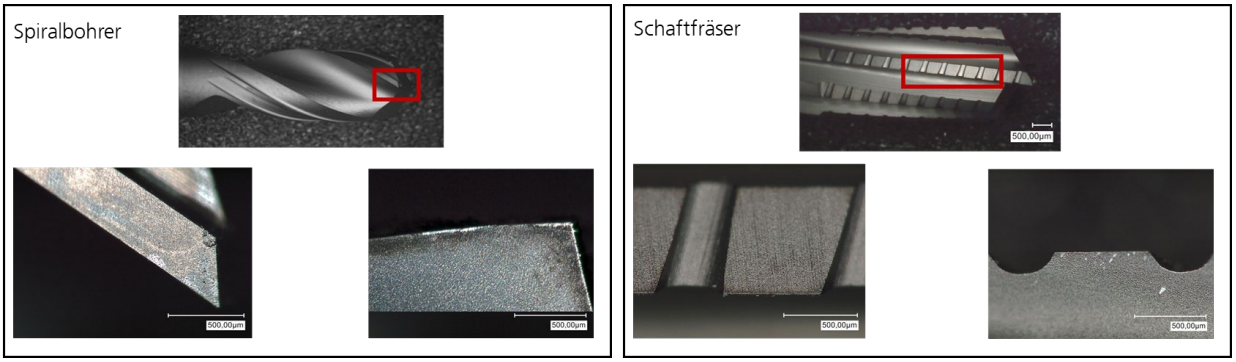

Abbildung 2: Detailansicht der Werkzeugschneiden, li.: Spiralbohrer, re.: Schaftfräser

<u>AP 2: Erforschung hartmetallunabhängiger Zwischenschichtsysteme</u>

Aus Gründen der schnellen Verfügbarkeit und der daraus resultierenden Zeitersparnis wurden zunächst an einfachen planaren Probekörpern umfangreiche Zwischenschichtuntersuchungen durchgeführt. Hierbei standen sowohl die Anbindung an das jeweilige Grundkörpermaterial als auch die Anbindung der späteren spezifischen Diamantschicht an verschiedene Zwischenschichtsysteme zur Untersuchung. Ausgehend von ebenen Probekörpern wurden anschließend zylindrische Probekörper und darauf aufbauend die komplexen Werkzeuge beschichtet und eingesetzt.

Durchgeführte Arbeiten:

- Vorbereitung, Durchführung und Analyse umfangreicher Zwischenschichtabscheidungen auf <u>ebenen Probekörpern</u>
  - Auslegung Grundkörpervorbehandlung und Anlagenplanung
  - Abscheidung von 4 metallischen Zwischenschichten mit jeweils 2 Schichtdicken
  - Abscheidung von metallischen Zwischenschichten (s.o.) mit karbidischem Abschluss, jeweils 1 Schichtdicke
  - Abscheidung mit zusätzlicher keramischer Deckschicht
  - Herstellung geätzter Referenzproben

Tabelle 2: Faktoren der Zwischenschicht-Untersuchungen auf ebenen Probekörpern

Faktor						
Hartmetall Cobaltgehalt	EMT100 6 % Co	K6UF 6 % Co	EMT609 9 % Co	K55SF 9 % Co	EMT210 10 % Co	CTS12D 10 % Co
Zwischenschicht ZW	A	B	C	D	E	
Schichtdicke d_{ZW} [Variante]	1	2	3			
Deckschicht	ja	nein				
CVD-Diamantschichten (vgl. AP 3)	IST					
Diamantschicht Typ	IST Nano	IST Mikro				
Schichtdicke Diamantschicht d_D [Variante]	1	2				

- Gemeinschaftliche Erstellung eines Versuchsplans für die Zwischenschichtabscheidung (Auswahl Schichten, Schichtdicken, Prozessvarianten) für die zylindrischen Probekörper ausgehend von den Ergebnissen auf den ebenen Probekörpern
- Vermessung der Rauheiten von unbeschichteten zylindrischen Probekörpern der verschiedenen Ausgangsoberflächen (geschliffen / spiegelgeschliffen)
- Auslegung der jeweiligen Beschichtungen und Vorplanung von Versuchsmatrizen. Die Auslegung und Durchführung wurde hierbei für die spätere Diamantbeschichtung bei Weber Technologies und am Fraunhofer IST symmetrisch geplant, um eine Vergleichbarkeit der mit unterschiedlichen Diamantprozessen erzielten Ergebnisse zu gewährleisten. Ausgehend von den Versuchen auf ebenen Probekörpern erfolgte die Eingrenzung auf drei Zwischenschichten mit überwiegend zwei Schichtdicken
    - 5 Hartmetalle
    - 2 Bearbeitungen / Ausgangsoberflächen
    - 7 Zwischenschichtvarianten
    - Geätzte Referenzen

  Insgesamt wurden 240 zylindrische Probekörper mit Zwischenschichten hergestellt (exklusive der geätzten Referenzen).
- Die gefertigten Proben wurden in vier identische Probensätze (Replikat 1 - 4) zusammengefasst, sodass nachfolgend sowohl IST- als auch WT-Diamantbeschichtungen abgeschieden und gleichwertig untersucht werden konnten (vergleiche AP 3).

Tabelle 3: Faktoren der Zwischenschicht-Untersuchungen auf zylindrischen Probekörpern

Faktor					
Hartmetall Cobaltgehalt	EMT100 6 % Co	K6UF 6 % Co	EMT609 9 % Co	K55SF 9 % Co	EMT609 9 % Co
Ausgangsoberfläche	geschliffen	spiegelge- schliffen			
Zwischenschicht ZW	A	B	C		
Schichtdicke d_{ZW} [Variante]	1	2	3		
CVD-Diamantschichten (vgl. AP 3)	WT	IST			
Diamantschicht Typ	WT Nano	WT Ultra	WT Grad	IST Nano	
Schichtdicke Diamantschicht d_D [Variante]	1	2			

- Die mit den Zwischenschichten beschichteten zylindrischen Probekörper wurden an einem Probensatz eingehend charakterisiert, die Schichtdickenverläufe in Relation zum unbeschichteten Grundkörper wurden dokumentiert, ebenso wie die jeweilige Rauheit nach Abscheidung der Zwischenschichten
- Auslegung Beschichtungsmatrix und Anlagenplanung für die Zwischenschichtabscheidung auf <u>allen Werkzeugen</u> am IST
    - 2 Werkzeugtypen
        - Spiralbohrer für die AlSi17-Bearbeitung
        - Schaftfräser für die Kantenbearbeitung von CFK
    - je 100 Werkzeuge je Werkzeugtyp
        - 5 Hartmetalle
        - 3 Zwischenschichtvarianten
        - Geätzte Referenzen
- Abscheidung, Analyse und Dokumentation der Zwischenschichtvarianten (200 Werkzeuge)
    - Aufteilung der Werkzeuge in zwei Probensätze, sodass nachfolgend sowohl IST- als auch WT-Diamantbeschichtungen abgeschieden und gleichwertig untersucht werden konnten

Tabelle 4: Faktoren der Zwischenschicht-Untersuchungen auf den Werkzeugen

Faktor					
Hartmetall Cobaltgehalt	EMT100 6 % Co	K6UF 6 % Co	EMT609 9 % Co	K55SF 9 % Co	EMT210 10 % Co
Zwischenschicht ZW	A	B			
Schichtdicke d_{ZW} [Variante]	1	2			
CVD-Diamantschicht (vgl. AP 3)	WT	IST			
Diamantschicht Typ	WT Nano	IST Nano			
Schichtdicke Diamantschicht d_D [Variante]	1	2	3		

    - Die mit den Zwischenschichten beschichteten Werkzeuge wurden charakterisiert, die Schichtdickenverläufe in Relation zum unbeschichteten Werkzeug wurden dokumentiert

Erzielte Ergebnisse:

1. Voruntersuchungen an ebenen Probekörpern zur Identifikation von vielversprechenden Zwischenschichten wurden erfolgreich durchgeführt.
2. Übertrag und Abscheidung der drei vielversprechenden Zwischenschichten auf Zylindergeometrien der fünf Hartmetallsorten mit zwei Oberflächenzuständen (geschliffen und spiegelgeschliffen) sind erfolgt.
3. Erfolgreicher Übertrag der beiden vielversprechendsten Zwischenschichten auf komplexe Werkzeuggeometrien
    a. Konturgetreu, hohe Haftfestigkeit, Homogenität und Reproduzierbarkeit

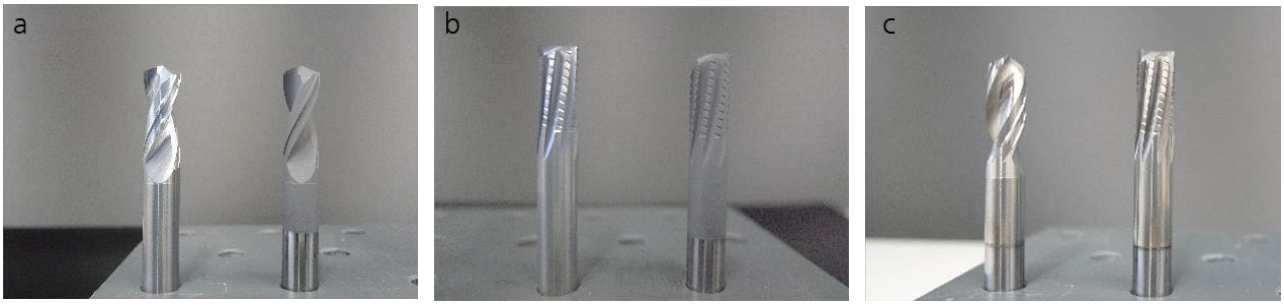

Abbildung 3: Bild a und b: li. Zwischenschicht B, re. geätzt, Bild c: Zwischenschicht A

4. Die Abscheidung und Untersuchung / Charakterisierung verschiedener CVD-Diamantschichten (Morphologie, Schichtdicke) auf Zwischenschichten wurden erfolgreich durchgeführt, es wurden zielführende Schichtsystemkombinationen identifiziert (vgl. AP 3)

<u>AP 3: Erforschung materialadaptierter, anwendungsoptimierter Diamantschichten</u>

Die Arbeiten im AP 3 umfassten die grundlegenden Untersuchungen zur Abscheidung der CVD-Diamantschichten auf die zuvor aufgebrachten Zwischenschichten. Es wurden zunächst die einfachen Probekörper (ebene und zylindrische Probekörper) beschichtet und analysiert. Aufbauend auf den Ergebnissen wurden im weiteren Verlauf die zwischenschicht-beschichteten Werkzeuge (vergleiche AP 2) sowie geätzte Referenzwerkzeuge mit den ausgewählten CVD-Diamantschichten beschichtet. Hierbei wurden anlagen- und prozess-spezifische CVD-Diamantschichten unterschiedlicher Schichtdicke und Morphologie von Weber Technologies und dem Fraunhofer IST abgeschieden und untersucht.

Durchgeführte Arbeiten:

- Festlegung der Beschichtungsmatrix (Versuchsplan) für die ebenen Probekörper und Anlagenplanung für die CVD-Diamantbeschichtungen am Fraunhofer IST
- CVD-Diamantbeschichtung (Fraunhofer IST) der in AP 2 hergestellten Zwischenschichten und geätzten Referenzen auf <u>ebenen Probekörpern</u> mit CVD-Diamantschichten definierter Morphologie (nano- und mikrokristallin) und Schichtdicke 9-11 µm
- Analyse der gefertigten Diamantschichtsysteme auf den ebenen Probekörpern
    - Haftfestigkeitstests

  - Elementanalyse an FIB-Schnitten
- Erstellung eines Versuchsplans für zylindrische Prüfkörper am Fraunhofer IST; Aufteilung der Proben in insgesamt 4 Probensätze (Replikate 1-4) zur Untersuchung unterschiedlicher Diamantschichtvarianten
- Bekeimung der zylindrischen Probensätze zur Diamantbeschichtung am Fraunhofer IST
- Bekeimung eines Teil-Probensatzes der zylindrischen Probekörper zur Diamantbeschichtung bei Weber Technologies
- CVD-Diamantbeschichtung (Fraunhofer IST) der in AP 2 hergestellten Zwischenschichten auf zylindrischen Probekörpern (Replikat 2) mit nanokristallinen CVD-Diamantschichten definierter Schichtdicke (Zielschichtdicke: 10 µm)
- CVD-Diamantbeschichtung (Weber Technologies) der in AP 2 hergestellten Zwischenschichten auf zylindrischen Probekörpern (Replikat 1 und 3) mit CVD-Diamantschichten WT Nano und WT Ultra definierter Schichtdicke (Zielschichtdicke: 10 µm)

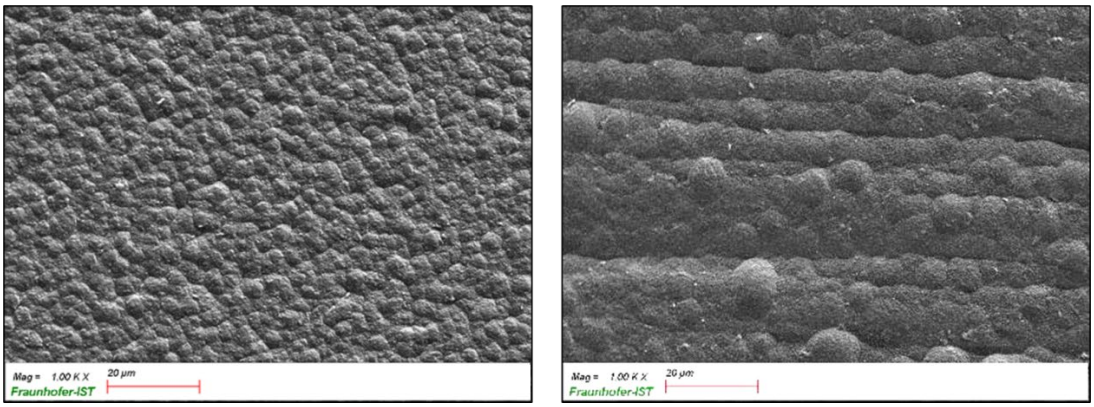

Abbildung 4: Zwischenschicht B + Diamantschicht WT Ultra auf spiegelgeschliffener Oberfläche (links) und Zwischenschicht A + Diamantschicht IST Nano auf geschliffener Oberfläche (rechts)

- Erarbeitung und Analyse anwendungsoptimierter CVD-Diamantschicht für CFK (WT Grad, Weber Technologies)
- CVD-Diamantbeschichtung (Weber Technologies) des in AP 2 hergestellten Replikats 4 mit der für die CFK-Anwendung optimierten Diamantschicht
- Ortsaufgelöste optische Durchmesserbestimmung und Analyse des Schichtdickenverlaufs entlang der Zylinderlängsachse im Ausgangszustand (unbeschichtet) und nach den Beschichtungen (Zwischenschicht, Zwischenschicht + Diamantschicht) (Fraunhofer IST)
  - Analyse und Bewertung der Diamantschichten aus dem IST-Diamantbeschichtungsprozess IST Nano auf zylindrischen Probekörpern (Replikat 2)
  - Analyse und Bewertung der Diamantschichten aus den WT-Diamantbeschichtungsprozessen WT Nano, WT Utra und WT Grad auf zylindrischen Probekörpern (Replikat 1, 3 und 4)

- Analyse und Bewertung von visuellen Auffälligkeiten auf zylindrischen Probekörpern via Rasterelektronenmikroskopie (Fraunhofer IST)
- Vermessung der Durchmesser mittels optischer Durchmesservermessung und Röntgenfluorenzenz-Analyse (Weber Technologies)
- Optische Bewertung der beschichteten Hartmetall-Zylinder (Weber Technologies)

Im Anschluss wurden die gefertigten Schaftwerkzeuge (vergleiche AP 1) für die Beschichtung vorbereitet. Hierbei haben sowohl Weber Technologies als auch, abweichend von der ursprünglichen Projektplanung, das Fraunhofer IST umfangreiche CVD-Diamantbeschichtungen auf Werkzeugen durchgeführt.

- Auslegung Beschichtungsmatrix und Anlagenplanung für die CVD-Diamantschichten auf allen Werkzeugen, aufgeteilt in Prozesse am Fraunhofer IST und bei Weber Technologies
    - 2 Werkzeugtypen
        - Spiralbohrer für die AlSi17-Bearbeitung
        - Schaftfräser für die Kantenbearbeitung von CFK
    - je 100 Werkzeuge je Werkzeugtyp, davon
        - je 5 Hartmetallsorten
        - mit in Summe drei Zwischenschichtvarianten, CVD-Diamantprozess-spezifisch aufgeteilt nach:
            - Zwischenschicht A für Diamantbeschichtungsprozesse am Fraunhofer IST (plus kleine Teilmenge Zwischenschicht B)
            - Zwischenschicht B für Diamantbeschichtungsprozesse bei Weber Technologie
        - mit jeweils geätzten Referenzen
    - IST-Bekeimung eines Teil-Werkzeugsatzes zur CVD-Diamantbeschichtung am Fraunhofer IST (geätzte Referenzwerkzeuge)
    - IST-Bekeimung eines Teil-Werkzeugsatzes zur CVD-Diamantbeschichtung bei Weber Technologies (geätzte Referenzwerkzeuge)
    - WT-Bekeimung eines Teil-Werkzeugsatzes zur CVD-Diamantbeschichtung bei Weber Technologies (geätzte Referenzwerkzeuge)
    - WT-Bekeimung eines Teil-Werkzeugsatzes zur CVD-Diamantbeschichtung am Fraunhofer IST (geätzte Referenzwerkzeuge)
    - CVD-Diamantbeschichtung (Fraunhofer IST) der in AP 2 hergestellten Zwischenschichten (Probensatz 1) auf Werkzeugen mit CVD-Diamantschichten definierter Morphologie (nano) und einer Zielschichtdicke von ca. 9 µm - 11 µm
    - Abscheidung von CVD-Diamantschichten (Fraunhofer IST) auf geätzten Werkzeugen als Referenz

- CVD-Diamantbeschichtung (Weber Technologies) der in AP 2 durch das Fraunhofer IST hergestellten Zwischenschichten (Probensatz 2) auf Werkzeugen mit CVD-Diamantschichten definierter Morphologie und spezifischen Zielschichtdicken je nach Werkzeugtyp
- Abscheidung von CVD-Diamantschichten (Weber Technologies) auf geätzten Werkzeugen als Referenz
- Weiterbeschichtung (Fraunhofer IST) ausgewählter zwischenschicht- und CVD-diamantbeschichteter Fräswerkzeuge (12 Stk.) zur Erhöhung der Schichtdicke nach Auswertung der ersten 41 Fräsversuche (vergl. AP 4)

Abbildung 5: Probensätze und CVD-Diamantbeschichtungsprozesse am Fraunhofer IST und bei Weber Technologies, in Summe wurden sieben CVD-Diamantbeschichtungsprozesse durchgeführt

- Analyse der abgeschiedenen Diamantschichtsysteme
  - Visuelle Sichtprüfung
  - Mikroskopische Sichtprüfung
  - Durchmesservermessung

Erzielte Ergebnisse:

1. Erarbeitung und Qualifizierung eines zerstörungsfreien Verfahrens zur ortsaufgelösten Messung von Schichtdicken an zylindrischen Probekörpern
2. Haftfeste diamantprozess-spezifische Kombinationen aus Zwischenschicht & Diamantschicht auf zylindrischen Probekörpern und Schaftwerkzeugen wurden erarbeitet
   a. Für die CVD-Diamantbeschichtungsprozesse des Fraunhofer IST lieferte die Zwischenschicht A die besten Ergebnisse
   b. Für die CVD-Diamantbeschichtungsprozesse der Weber Technologie wurden mit der Zwischenschicht B die besten Ergebnisse erzielt

3. Auf allen untersuchten Hartmetallsorten wurde eine hohe Ausbeute von haftfesten CVD-Diamantschichten erreicht. Von den beschichteten Werkzeugen wurden typspezifisch für die Zerspanung geeignete Werkzeuge hergestellt:
    a. Bohrer mit Zwischenschicht & CVD-Diamantschicht: 53 von 60 beschichteten Bohrern verwendbar ⇒ 88 % Ausbeute
    b. Fräser mit Zwischenschicht & CVD-Diamantschicht: 44 von 60 beschichteten Fräsern verwendbar ⇒ 73 % Ausbeute

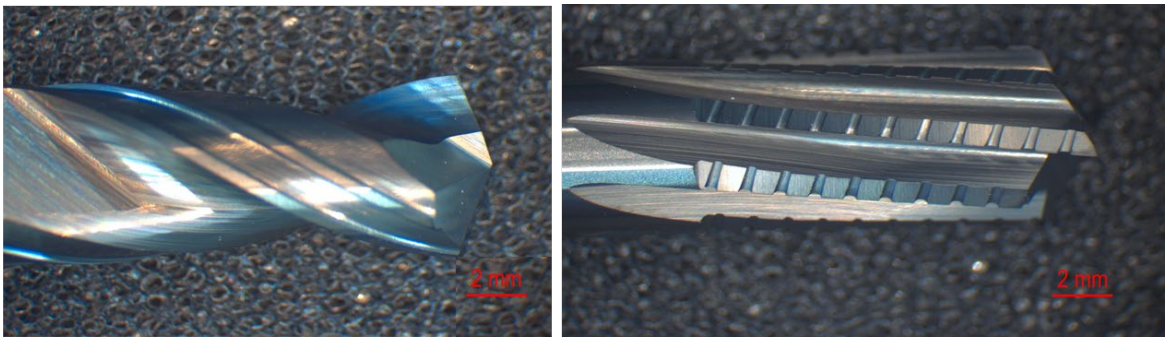

Abbildung 6: Werkzeuge beschichtet mit Zwischenschicht und CVD-Diamantschicht

4. Identifizierung spezifischer Beschichtungserfolge geätzter Referenzwerkzeuge je nach Werkzeugtyp
    a. Bohrer geätzt und CVD-Diamantschicht: 40 von 40 verwendbar ⇒ 100 % Ausbeute
    b. Fräser geätzt und CVD-Diamantschicht: 22 von 40 verwendbar ⇒ 55 % Ausbeute

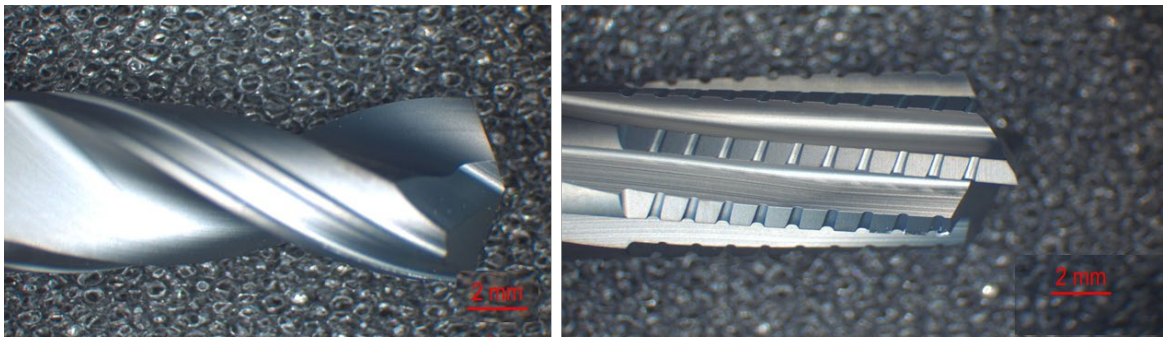

Abbildung 7: CVD-Diamantbeschichtete Referenzwerkzeuge

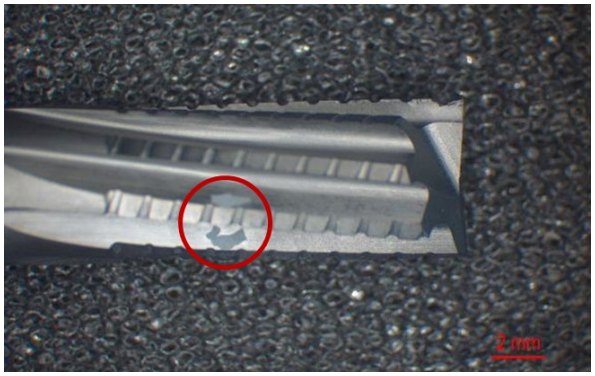

Abbildung 8: CVD-Diamantbeschichtetes Referenzwerkzeug mit Schichtabplatzungen

5. Identifizierung von signifikanten Einflussgrößen auf die Schichthaftung bei den geätzten Fräsern:
    a. Anlagen-Setup
    b. Chemische Vorbehandlung
    c. Hartmetall

<u>AP 4: Untersuchung von Haftfestigkeit und Zerspanverhalten</u>

Im Rahmen des AP 4 wurden die Haftfestigkeitsuntersuchungen an den beschichteten einfachen Probekörpern (Planarproben und Zylinder) sowie die Zerspanuntersuchungen mit den beschichteten Werkzeugen durchgeführt und bewertet. Die Haftfestigkeiten der CVD-Diamantschichtsysteme (Hartmetall- / Zwischenschicht- / Diamantschichtvarianten) wurden hierbei an den ebenen und zylindrischen Probekörpern durch Mikrostrahltests ermittelt und bewertet. Eine Gegenüberstellung der bei den Verbundpartnern Weber Technologies und Fraunhofer IST durchgeführten Mikrostrahltests unter Beachtung der Randbedingung zu Meilenstein 3 „Haftfestigkeit von mindestens 120 s unter 3 bar“ ist erfolgt.

Durchgeführte Arbeiten:

- Durchführung und Bewertung von Haftfestigkeitsprüfungen durch Sandstrahltests an den CVD-Diamantschichtsystemen auf den ebenen Probekörpern
- Durchführung und Bewertung vergleichender Sandstrahltests bei WT und am IST an den zylindrischen Probekörpern der Replikate 1 – 4
- Auslegung und Vorbereitung der Zerspanversuche, Abstimmung Anlagenplanung und Werkstückaufnahme
- Erarbeitung Versuchsmatrix und Vorgehensweise zur mikroskopischen Dokumentation
- Durchführung von Zerspanversuchen Teil 1: Bohren in AlSi17
    - Bohrung in Vollmaterial, Bohrtiefe 6 mm
    - Bestimmung Zerspanparameter, Aufspannen des Parameterfelds:
        - v_c = 75 m/min bis 220 m/min

        - f = 0,1 mm bis 0,315 mm

Abbildung 9: Gebohrte Ronde AlSi17

    - Erarbeitung von Grenzprozessen
    - Festlegung der Zerspanparameter für vergleichenden Untersuchungen mit identischen Parametern und Zerspanwegen, vergleichbare Bohrungsanzahl von 75 bis 100 Stk.
    - Erfolgreiche Durchführung der Zerspanversuche mit 41 Bohrern, davon
        - Geätzte Referenzwerkzeuge je Hartmetallsorte (Bewertungsgrundlage)
        - Alle Zwischenschicht- und Diamantschichtvarianten je Hartmetallsorte
    - Analyse und Bewertung des Zerspan- und Verschleißverhaltens der eingesetzten Bohrer
- Durchführung von Zerspanversuchen Teil 2: Fräsen von CFK
    - Kantenfräsen entlang CFK-Platte, radiale Zustellung 1 mm / 2 mm
    - Bestimmung Zerspanparameter, Aufspannen des Parameterfelds:
        - v_c = 160 m/min bis 280 m/min
        - v_f = 800 mm/min bis 2000 mm/min

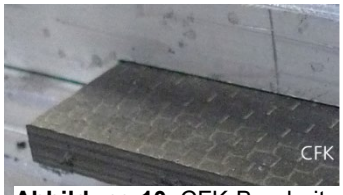

Abbildung 10: CFK-Bearbeitung

    - Erarbeitung von Grenzprozessen
    - Festlegung der Zerspanparameter für vergleichenden Untersuchungen mit identischen Parametern und Zerspanwegen, maximaler Standweg von 19,86 m
    - Festlegung der Zerspanparameter für vergleichenden Untersuchungen mit identischen Parametern und Zerspanwegen
    - Erfolgreiche Durchführung der Zerspanversuche mit 53 Fräsern, davon
        - Geätzte Referenzwerkzeuge je Hartmetallsorte (Bewertungsgrundlage)
        - Alle Zwischenschicht- und Diamantschichtvarianten je Hartmetallsorte
    - Analyse und Bewertung des Zerspan- und Verschleißverhaltens der eingesetzten Fräser
- Ableitung von Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Vorbehandlungs- und Beschichtungsprozesse. Die grundlegende Auslegung und Konstruktion des Werkzeuggrundkörpers sowie die gefertigten Werkzeuge (vgl. AP 1) haben sich als sehr gut geeignet und damit zielführend für die Zerspanungsanwendung erwiesen.

Erzielte Ergebnisse:

1. Der Aufbau von komplexen CVD-Diamantschichtsystemen (Grundkörper / Interface / Zwischenschicht / Diamantschicht) auf einfachen Probekörpern wurde durch Haftfestigkeitsprüfungen mittels standardisierten Sandstrahltests evaluiert. Unter verschärften Bedingungen (Strahlgut, Strahldruck), die bereits über den in Meilenstein M3 definierten Werten liegen (Haftfestigkeit von mindestens 120 s bei 3 bar), wurden haftfeste Schichtsysteme identifiziert.
2. <u>Projektergebnisse *für die Bohrversuche*</u>:

Die untersuchten Bohrer zeigten sowohl für die Referenzwerkzeuge als auch für die CVD-Diamantschichtsysteme sehr vielversprechende Ergebnisse:

a. Sehr gute Ergebnisse für die Referenzwerkzeuge, auch für Co ≥ 9%
b. Zwischenschichtsysteme kommen noch nicht an die Referenzergebnisse heran, zeigen aber hohes Potential nach Optimierung der Anbindung
c. Ranking: Zwischenschicht A, Zwischenschicht B

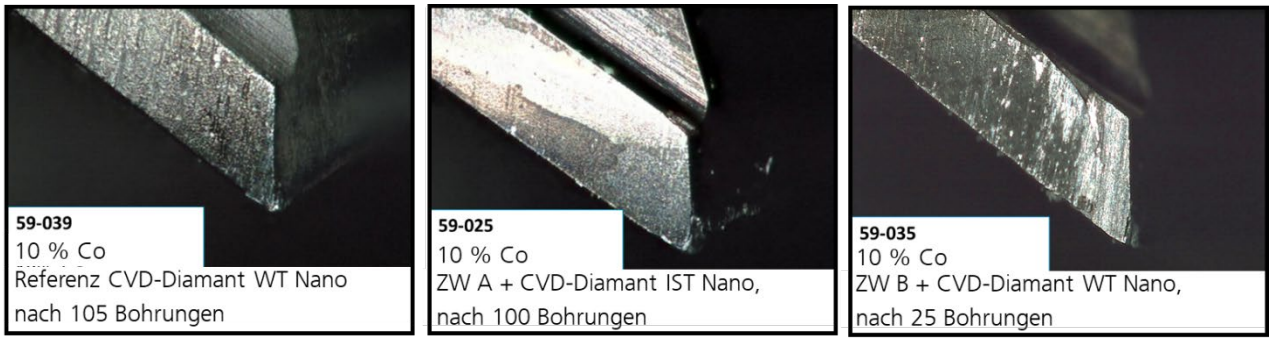

Abbildung 11: Vergleichende Darstellung verschiedener Bohrer (Blick auf Schneidenecke) nach der Zerspanung

d. Anbindung Diamantschicht an Zwischenschicht wurde als mögliche Stellschraube identifiziert
e. Es kam zu keinerlei vollflächiger Delamination während der Zerspanung

3. <u>Projektergebnisse *für die Fräsversuche*</u>:

Die untersuchten Fräser zeigten sowohl für die Referenzwerkzeuge als auch für die CVD-Diamantschichtsysteme sehr gute Ergebnisse:

a. Geätzte Referenzfräser zeigen sehr gutes Verschleißverhalten, insbesondere bei höherer Schichtdicke
b. Zwischenschicht A + CVD-Diamantschicht IST Nano zeigt hohes Potential, höhere Schichtdicke hat deutlich positiven Einfluss, die Ergebnisse sind <u>auf Referenzniveau</u>
c. Zwischenschicht B + CVD-Diamantschicht WT Nano ebenfalls <u>auf Referenzniveau</u>

Abbildung 12: Vergleichende Darstellung verschiedener Fräser (Blick auf Freiflächen) nach der Zerspanung

d. Hohe Schichtdicke ermöglicht höheres Volumen von kontinuierlichem, abrasivem Verschleiß der „arbeitenden“ Diamantschicht und dadurch längere Einsatzzeit

e. Keine flächigen Delaminationen während der Zerspanung

f. Höhere radiale Zustellung (a_e = 2 mm) für hohe Schichtdicken sehr gut möglich

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises der WEMA GmbH

Die wesentlichen Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind die Personalausgaben, die Sachmittel sowie die Reisemittel.

Personalmittel:

Die Personalausgaben umfassten bei WEMA die Mittel für die geleisteten Arbeiten von Konstrukteur (Werkzeugentwickler), Werkzeugmechaniker und Werkzeugschleifer. Diese basieren auf den oben beschriebenen Arbeitspaketen und -inhalten, insbesondere der Auslegung und Herstellung der Werkzeuggrundkörper. Hierzu gehörten sowohl deren Konstruktion und Fertigung als auch die Analyse nach Einsatzuntersuchungen.

Sachmittel:

Im Rahmen der Sachmittelausgaben wurden für das Projekt notwendige Ausgaben getätigt, unter anderem wurden beschafft:

- Schleifscheiben für die Fertigung der Werkzeuge
- Schleiföle etc.

Reisemittel:

Die Reisemittel der WEMA GmbH umfassten während der Projektlaufzeit die Aufwände für die Projekttreffen (mit Projektträgerbeteiligung) in Präsenz, die zwei Mal beim Verbundkoordinator Weber Technologies in Potsdam, einmal am Fraunhofer IST in Braunschweig sowie einmal beim Verbundpartner WEMA in Pfaffenhofen (keine Reisekosten für WEMA) stattfanden. Ein weiteres Projekttreffen sowie die sechs Arbeitsmeetings fanden neben ergänzenden kurzfristigen Abstimmungstreffen insbesondere in 2021 und 2022 aufgrund der Corona-Pandemie und den damit einhergehenden Beschränkungen per Webmeeting statt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Erarbeitung und Erforschung von CVD-Diamantschichtsystemen basierend auf verschiedenen Hartmetallsorten, Zwischenschichten und CVD-Diamantschichten für die hochaktuellen Anwendungsfälle Bohren von AlSi17 und Fräsen von CFK stellt eine komplexe Aufgaben- und Zielstellung dar. Die Arbeiten der Verbundpartner konnten durch die jeweils spezifische Expertise umfänglich geleistet werden. Sie waren für den Projektfortschritt und insbesondere den Projekterfolg notwendig und angemessen.

WEMA Zerspanungswerkzeuge GmbH:

Arbeitsschwerpunkt: Analyse und Auslegung der Werkzeuganforderungen bei der Bearbeitung von Leichtbau- und Hochleistungswerkstoffen am Beispiel der Anwendungsfälle Bohren und Fräsen

Der Stellenwert der Arbeiten der WEMA GmbH wird als hoch, wichtig und in der erfolgten Durchführung als notwendig und angemessen eingeschätzt, auch wenn die Arbeitsumfänge im Vergleich zu den beteiligten Verbundpartnern kleiner ausfallen. Der Grund hierfür ist die direkte Einbeziehung von Anwendungsfällen aus der Zerspanung von Leichtbau- und Hochleistungswerkstoffen, die die Marktbedarfe aufzeigen.

Die Arbeiten der WEMA umfassten unter anderem die Auslegung von Werkzeuggeometrie und Schneidkanten unter Analyse der Anwendungsfälle und Eingriffsbedingungen. Die anschließende Konstruktion und Fertigung der Schaftwerkzeug-Grundkörper sowie deren begleitende Bewertung während der Einsatzuntersuchungen waren für das Gesamtvorhaben essentiell. Die Erforschung und Erarbeitung der Werkzeuggeometrien für verschiedene Grundkörperspezifikationen und Prozessbelastungen waren damit notwendig und in ihrem Umfang angemessen.

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST:

Arbeitsschwerpunkt: Grundlegende Erforschung von hartmetallunabhängigen CVD-Diamantschichtsystemen für eine maximale Haftfestigkeit und Belastbarkeit auf Probekörpern und einfachen Geometrien

Die Arbeiten des Fraunhofer IST waren für das Gesamtvorhaben ebenfalls zwingend notwendig, die geleisteten Projektarbeiten haben zentrale Bedeutung im Hinblick auf die Zielerreichung. Die umfangreichen grundlegenden Untersuchungen an Probekörpern bezgl. zielführender Hartmetallsorten- / Zwischenschicht- / CVD-Diamantschichtkombinationen stellten die Basis für die Erarbeitung der einsatzfähigen Werkzeuge dar. Die Untersuchungen der Haftfestigkeiten an den Probekörpern sowie die späteren Zerspanuntersuchungen mit den Werkzeugen erlaubten Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit der erarbeiteten CVD-Diamantschichtsysteme und damit den Erfolg des Forschungsvorhabens. Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen.

Weber Technologies GmbH (Verbundkoordinator):

Arbeitsschwerpunkt: Erforschung und Übertrag der anwendungsoptimierten CVD-Diamantschichtsysteme auf die industrierelevante Anlagentechnologie und komplexe Werkzeuggeometrien

Die Arbeiten der Weber Technologies waren im Hinblick auf die industrielle Umsetzbarkeit und Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die industrielle Anlagentechnologie und Prozessführung angemessen und notwendig. Hiermit wurden industriell abgeschiedene CVD-Diamantschichten mit spezifischer Anlagentechnologie ermöglicht und in die Bewertung der Leistungsfähigkeit der abgeschiedenen CVD-

Diamantschichtsysteme einbezogen. Es konnten anlagen- und prozess-spezifisch vielversprechende CVD-Diamantschichtsystem identifiziert werden, sodass eine industrielle Verwertung und Weiterentwicklung ermöglicht wurde. Die geleisteten Arbeiten im Vorhaben waren damit notwendig und angemessen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse für die WEMA GmbH

Als Entwickler und Hersteller von Präzisionswerkzeugen bedient die WEMA GmbH zahlreiche Märkte. Durch den neuen Ansatz kann die Marktdurchdringung für diamantbeschichtete Werkzeuge stark wachsen und zu deutlich höheren Umsätzen sowohl für Werkzeughersteller, Beschichtungsunternehmen und Endanwender führen. Für den Kunden ist ein hoher technischer Nutzen bei Marktdurchdringung zu erwarten, da eine verbesserte Schichthaftung von Diamantschichten auf Hartmetallen (insbesondere WC-Co) in Zerspanungsprozessen mit rotierenden Schaftwerkzeugen zu einer höheren Standzeit und damit Prozesssicherheit führt. Durch möglicherweise zudem höhere Schnittwerte kann die Produktivität beim Endanwender optimiert werden, indem die Fertigungszeiten verkürzt werden. WEMA sieht auch in der Erweiterung der Fragestellung auf andere und insbesondere ebenfalls herausfordernde Werkstoffkombinationen wie Glasfaserwerkstoffe und keramisch verstärkte Verbundwerkstoffe eine hohe Anschlussfähigkeit, ebenso wie in der Erweiterung der Werkzeuggeometrien und spezifischen Anwendungsfälle über den Maschinenbau hinaus.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.

Während des Vorhabens sind den Verbundpartnern keine Fortschritte auf dem Gebiet der Zwischenschichtabscheidung für CVD-Diamantschichten bekannt geworden, die für die Verbundpartner und das weitere Vorgehen relevant gewesen sind. Wie im Antragsdokument dargelegt, gab es bereits vor Beginn des Vorhabens einen Stand der Technik, der verschiedene Ansätze und Zwischenschichten aufgezeigt, aber noch nicht die ganzheitliche Untersuchung bis hin zum Einsatztest zufriedenstellend abgebildet hat.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse durch die WEMA GmbH nach Nr. 5 NABF/NKBF

Zum Zeitpunkt der Schlussberichtserstellung ist noch keine Veröffentlichung erfolgt. Neben der Veröffentlichung des öffentlichen Teils des vorliegenden Berichts in der TIB, kann sich die WEMA GmbH vorstellen auf Fachsymposien zielgruppenspezifische Vorträge zur Werkzeugauslegung in Kombination mit Beschichtungsmöglichkeiten zu halten. Beispielsweise seien die folgenden Formate genannt: