

PROZESSKETTE ZUM OBERFLÄCHENSCHLEIFEN VON NACHGIEBIGEN LUFTFAHRTSTRUKTURBAUTEILEN AUS KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN

S. Junghans¹, L. Köttner², J. H. Dege¹

¹Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT), Technische Universität Hamburg (TUHH), Denickestraße 17, 21073 Hamburg, Deutschland

²Boeing Deutschland GmbH, Moosacher Str. 70, 80809 München, Deutschland

Zusammenfassung

Bei der Fertigung von Strukturbauteilen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) im Flugzeugbau können herstellungsbedingte Formabweichungen auftreten. Diese führen bei der Montage zu Spalten, die bislang durch sogenanntes Shimmen kompensiert werden. Hierzu werden manuell Ausgleichsmassen an den betroffenen Stellen eingesetzt. Dieser Prozess ist jedoch zeit- und kostenintensiv. Eine vielversprechende Alternative stellt das automatisierte Schleifen der Bauteiloberflächen dar, sofern dafür vorgesehene Opferlagen vorhanden sind. Ziel ist der Verzicht auf das Shimmen durch das gezielte Abtragen der Oberflächenunebenheiten, welche die Spalte verursachen. Die Umsetzung stellt jedoch besondere Herausforderungen dar. Zum einen wirken beim Schleifen Prozesskräfte, die zu unerwünschten Bauteilabdrängungen führen können. Dies gilt insbesondere für dünnwandige, lokal abgestützte und damit nachgiebige Strukturen. Zum anderen steigen die Schleifkräfte mit zunehmendem Werkzeugverschleiß kontinuierlich an. Im Rahmen des Projekts SHILA (Shimfreie Montage von dünnwandigen Luftfahrzeugstrukturen) untersucht das Institut für Produktionsmanagement und -Technik (IPMT) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) gemeinsam mit den Projektpartnern (Boeing Deutschland GmbH, Broetje-Automation GmbH, KEBA Industrial Automation Germany GmbH, 3D.aero GmbH, WZL RWTH Aachen) unter anderem eine Schleifprozesskette, die diese Herausforderungen durch eine Kompensation der Bauteilabdrängung adressiert. Der Fokus liegt dabei auf dem Anwendungsfall der Rumpfsektionsmontage, bei der die einzelnen Rumpfsegmente Abweichungen von der Nominalkontur aufweisen. Hierfür wurden am IPMT Versuchsstände aufgebaut, um einzelne Elemente der Prozesskette sowohl in Analogieversuchen als auch unter anwendungsnahen Bedingungen zu untersuchen. Schwerpunkte sind dabei die Auswahl geeigneter Werkzeuge und Bearbeitungsstrategien, die Vorhersage der entstehenden Prozesskräfte unter Berücksichtigung des Werkzeugverschleißes sowie deren Einbindung in ein FEM-Modell zur Simulation der bauteilspezifischen Abdrängung. Basierend auf den simulierten Verformungen kann der Werkzeugweg anschließend angepasst werden, um die Bauteilabdrängung zu minimieren.

1. EINLEITUNG

Die präzise Montage großformatiger Strukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) stellt eine grundlegende Herausforderung im Flugzeugbau dar. Das korrekte Zusammenfügen einzelner Elemente zu einer Baugruppe erfordert die genaue Kenntnis über die reale Geometrie, Position und Orientierung, sodass eine exakte Ausrichtung der zu fügenden Bauteile stattfinden kann. Das anschließende Zusammenfügen erfolgt meist durch Nietverbindungen [1]. Nietverbindungen eignen sich besonders für dünnwandige Bauteile und bieten eine dauerhafte, formschlüssige Verbindung. Sie finden sich unter anderem in sogenannten Überlappungs- und Laschnennietungen wieder. Dabei handelt es sich um Überlappingsverbindungen von zwei Rumpfhautpaneelen in Flugzeugen, die durch Nieten mechanisch verbunden werden. Die dafür verwendeten Verbindungselemente (engl. Lap-Splices) stellen aufgrund komplexer Lastzustände, lokal erhöhter Spannung und Montageanforderungen eine besonders kritische Strukturzone dar [2]. Beim Fügen ist darauf zu achten, dass Montageeigenspannungen vermieden werden, um die Struktursicherheit und Lebensdauer nicht zu beeinträchtigen. Montageeigenspannungen können in den

Anlageflächen zwischen den Verbindungselementen als lokale Press- und thermisch bedingte Spannungen auftreten, hervorgerufen durch Fügekräfte, Fertigungstoleranzen, Oberflächenrauheiten und unterschiedliche Wärmeausdehnungen. Geometrische Unregelmäßigkeiten verstärken die Beanspruchung zusätzlich. Solche Montageeigenspannungen wirken überlagernd zu Betriebsspannungen und können die Ermüdungsfestigkeit der Verbindung signifikant beeinträchtigen [3]. Eine präzise Montage, optimale Oberflächenvorbereitung und genaue Passungen sind daher essenziell zur Minimierung dieser Spannungen und zur Sicherstellung der strukturellen Integrität.

Aus diesem Grund müssen Spalte zwischen anliegenden und überlappenden Flächen bei der Montage identifiziert und ausgeglichen werden. Spalte entstehen aufgrund individueller, herstellungsbedingter Abweichung der einzelnen zu fügenden Strukturbauteile. Der Ausgleich dieser Spalte erfolgt häufig durch manuelle Nacharbeit sowie dem Einsetzen individuell angefertigter Ausgleichselemente sowie flüssiger Ausgleichsmasse (engl. Shims). Dabei handelt es sich um einen personal- und zeitintensiven Prozess, der bei unsachgemäßer oder unvollständiger Durchführung die strukturelle Integrität der betroffenen Baugruppen durch das Auftreten unzulässiger Montageeigenspannungen beeinträchtigen kann.

Das Projekt SHILA greift diese Problematik am Beispiel der Montage der Rumpfsektionen aus CFK bei der Boeing 787 auf. Das BILD 1 zeigt den schematischen Ablauf einer übergeordneten Prozesskette, die die Verknüpfung einzelner Teilaufgaben für eine shimfreie Montage zeigt. Im Projekt SHILA werden diese Teilaufgaben untersucht und an einem Demonstratoraufbau zusammengeführt.

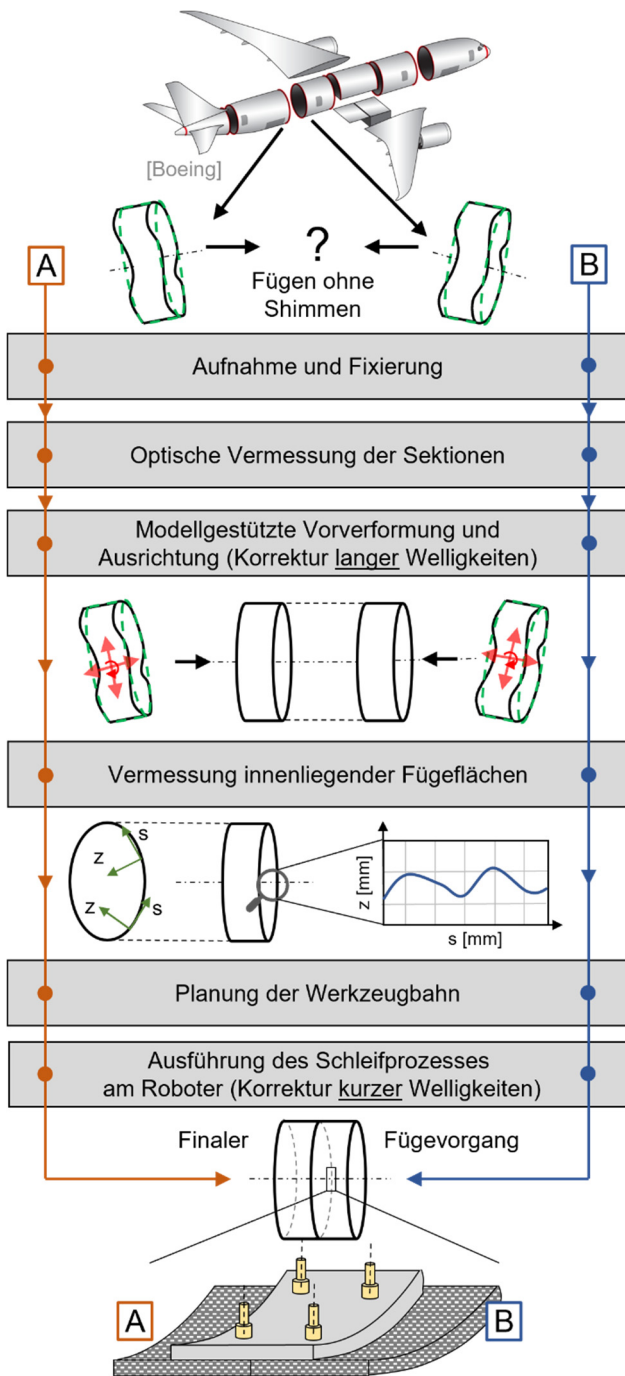


BILD 1. Übergeordnete Prozesskette für eine shimfreie Montage von Rumpfsektionen aus CFK

Die Rumpfsektionen weisen herstellungsbedingte Abweichungen von ihrer Nominalgeometrie auf, die zur Ausbildung von Spalten führen. Bei den auftretenden Abweichungen wird zwischen langwelligen und kurzwelligen Abweichungen unterschieden. Lange Welligkeiten sind Abweichungen, die sich über eine

größere Dimension entlang des Umfangs einer Rumpfsektion erstrecken und die Gesamtstruktur betreffen. Sie treten aufgrund des Eigengewichts der Strukturen auf, die bei der Montage nur an lokalen Punkten abgestützt werden. Die kurzen Welligkeiten hingegen sind Abweichungen auf der innenliegenden Oberfläche der Rumpfsektionen. Sie werden entlang des Umfangs innerhalb eines Toleranzfensters bewertet und dürfen in diesem einen maximalen Höhenunterschied von $\Delta h_{\max} = 0,125$ mm nicht überschreiten. Ein direktes Fügen der Segmente ist unter der Anwesenheit der beschriebenen Formabweichungen nicht möglich. Werden die Formabweichungen bei der Montage ignoriert, kann es nach dem Vernieten zu unzulässigen Spannungen und strukturellen Fehlanpassungen kommen. Dies wiederum führt zu einer Schwächung der Baugruppe, z. B. durch Belastungsspitzen an Verbindungsstellen, Delaminationen im Faserverbund, Mikrorissen oder Langzeitschäden unter Betriebsbelastung. Eine Überschreitung der maximal zulässigen Spaltmaße führt daher zu der manuellen Nachbearbeitung und Shimmen, auf die durch SHILA verzichtet werden soll. Stattdessen sollen Abweichungen von der Nominalgeometrie, die zur Ausbildung der Spalte führen, vor dem Fügevorgang automatisiert in einem zweistufigen Prozess korrigiert werden. Langwellige Abweichungen werden durch eine adaptive Bauteilaufspannung und kurze toleranzüberschreitende Welligkeiten werden durch einen Materialabtrag an der Oberfläche beseitigt. Im Fall des Materialabtrags werden Opferlagen im Herstellungsprozess der Rumpfsektionen vorgesehen, an denen ohne Beeinflussung der strukturellen Eigenschaften Material abgetragen werden kann.

Die ersten Schritte innerhalb der Prozesskette dienen der Kompensation der langwelligen Abweichungen sowie der Bereitstellung beider Rumpfsektionen für den sich anschließenden Schleifprozess. Im ersten Prozessschritt werden die Rumpfsektionen hierzu mithilfe eines Vakuumspannsystems an ausgewählten Punkten entlang des Rumpfumfangs fixiert. Die Spanneinheiten sind wiederum auf Hexapod-Plattformen montiert, die durch ihre mehrachsige Kinematik die notwendigen Freiheitsgrade für das Aufbringen lokaler Verschiebungen an den Rumpfsektionen besitzen. Nach der Fixierung erfolgt eine optische Vermessung beider Rumpfsektionen unter Einsatz eines stereoskopischen Kamerasystems. Die Messdaten liefern die notwendige Information über die Ist-Geometrie sowie die Lage beider Sektionshälften im Raum. Anschließend folgt der Abgleich dieser Daten mit einem definierten geometrischen Zielzustand der Rumpfsektionen, der für das präzise Zusammenführen und Fügen vorausgesetzt wird. Hieraus ergibt sich die aufzubringende Verformung, um die langwelligen Abweichungen zu korrigieren. Aufgrund der Spannsituation kann eine Verschiebung jedoch nur lokal an den Spannungspunkten mithilfe der Hexapoden erfolgen. Für die Ausführung einer korrekten Verformung ist daher eine exakte Ansteuerung der Hexapoden notwendig, wobei die Wechselwirkung zwischen den Spannungspunkten sowie das Verformungsverhalten der Struktur berücksichtigt werden müssen. Im Projekt SHILA wird zu diesem Zweck ein FEM-Verformungsmodell in Kombination mit den Messdaten genutzt, um die Soll-Positionen der Hexapoden zu berechnen. Die kurzwelligen Abweichungen sollen hingegen durch einen gezielten, automatisierten Materialabtrag korrigiert werden. Dieser erfolgt im Anschluss an die Aufspannung und Verformung durch

einen robotergeführten Umfangsschleifprozess. Eine optische Vermessung der innenliegenden Fügeflächen unter Einsatz eines Laserprofilsensors liefert die notwendigen Informationen über das Höhenprofil der kurzwelligen Formabweichungen jeder Sektion. Anschließend wird je nach Ausprägung der Formabweichungen der erforderliche Materialabtrag bestimmt, um für die Oberflächengeometrie das erforderliche Toleranzfenster einzuhalten. Daraus ergibt sich der Werkzeugweg für das Schleifwerkzeug am Roboter, um den erforderlichen Abtrag an der Oberfläche zu realisieren.

Während des Schleifprozesses wirkt infolge des Materialabtrags ein Anteil der Gesamtschleifkraft F normal zur Oberfläche. Dies führt unter den lokalen Nachgiebigkeiten der Struktur zu einer Abdrängung, wodurch weniger Material abgetragen wird. Unter den genannten Bedingungen ist ein präziser Materialabtrag alleine auf Basis der Oberflächenvermessung folglich nicht möglich. Bei der Untersuchung der Kompensationsstrategie werden die kritischen Fälle betrachtet, bei denen die angreifenden Kräfte in Kombination mit den Bauteilnachgiebigkeiten zu Bauteilabdrängungen von $w > 0,125$ mm führen, wodurch die geforderte Toleranz von $\Delta h_{\max} = 0,125$ mm in einem Arbeitsgang nicht erreicht werden kann. Zur Steigerung der Präzision während des Schleifens wird die Bahnplanung daher um eine modellgestützte Kompensation erweitert, welches im Projekt SHILA am IPMT entwickelt wird und in die übergeordnete Prozesskette integriert ist. Hierbei werden die zu erwartenden Prozesskräfte und das Verformungsverhalten der Struktur berücksichtigt.

2. STAND DER TECHNIK

2.1. Formanpassung von Rumpfstrukturen

Mit einer gezielten Formanpassung von Rumpfstrukturen können vorhandene langwellige Formabweichungen korrigiert werden, um eine günstige Ausgangslage für die Montage zu erreichen. Die geometrischen Abweichungen resultieren vor allem aus der Heterogenität der Fertigungsprozesse, verschiedener Lieferanten sowie der Fertigungstoleranz und Materialvariabilität bei der Verarbeitung von CFK. Wen et al. [4] untersuchten ein automatisiertes System zur Formanpassung von CFK-Flugzeugrümpfen mit zehn Aktuatoren, das Fertigungstoleranzen vor der Montage korrigiert. Ein validiertes FE-Modell zeigt, dass das System effektive Verformungen ermöglicht, ohne die Struktur zu beschädigen. Die Machbarkeitsstudie bestätigt damit die Sicherheit und Praxistauglichkeit des Ansatzes. Wang et al. [5] entwickelten eine Methode zur Form- und Kraftregelung bei der Montage großer CFK-Rumpfsegmente mit Hexapoden. Durch Modellierung der Verformungen mit den Aktuatoren konnten Formabweichungen auf bis $\pm 0,6$ mm reduziert werden. Du et al. [6] untersuchten eine Methode zur optimalen Platzierung von Aktuatoren zur Formkorrektur von CFK-Rumpfsektionen. Aktuatoren werden eingesetzt, um den Rumpf punktuell zu verformen und so Formabweichungen zu minimieren. Die Autoren entwickelten ein Lernmodell, das die Relation zwischen Aktuator Kräften und Formkorrekturen abbildet und formulierten die Auswahl der optimalen Aktuatorpositionen. Eine FE-Simulation zeigt, dass die vorgeschlagene Methode gegenüber einer gleichmäßigen

Aktuatorverteilung bessere Formkorrekturen mit geringeren Kräften ermöglicht und robuster gegenüber Unsicherheiten im Bauteil ist.

2.2. Abdrängungskompensation

Eine nachträgliche Korrektur kurzweiliger Abweichungen kann ohne Shimmen nur durch einen entsprechenden Materialabtrag erfolgen. Hierbei können unabhängig vom Verfahren aufgrund der mechanischen Prozesskräfte systematische Abdrängungsfehler an der bearbeiteten Struktur auftreten. Diese entstehen, wenn sich das Werkzeug, die Struktur oder Teile des Bearbeitungssystems aufgrund elastischer Nachgiebigkeiten während der Bearbeitung verformen. Die Folge sind Abweichungen im Materialabtrag zwischen der programmierten Werkzeugbahn und der tatsächlich erzeugten Bauteilgeometrie [7, 8]. Solche Fehler beschränken die maximal erreichbare Maßhaltigkeit und Formgenauigkeit und sind daher Gegenstand der Untersuchungen von Kompensationsstrategien zur Fehlerminimierung. Die bisher in der Literatur untersuchten Ansätze hierzu lassen sich nach TAB 1 in vier Hauptkategorien unterteilen.

Kompensationsansatz	Art	Literaturquellen
Bearbeitungsstrategie	präventiv	[9, 10, 11, 12]
Offline-Kompensation	prädiktiv	[13, 14, 15]
Online-Kompensation	adaptiv	[16, 17]
Aktive Abstützung	strukturell	[18, 19]

TAB 1. Kategorisierung von Kompensationsstrategien

Durch die Auswahl geeigneter Bearbeitungsstrategien können Fehler infolge von Bauteilabdrängungen bereits in der Phase der Prozessauslegung präventiv reduziert werden. Gao et al. [9] zeigten, dass eine Werkzeugbahn, die von Bereichen hoher zu niedriger Steifigkeit verläuft, die Prozessstabilität verbessert und die Bauteilverformung deutlich reduziert. Zha et al. [10] kombinierten grobe und feine Schnitttiefen in einer gestuften Frässtrategie und konnten so die Effizienz bei der Bearbeitung von Titanbauteilen um 40 % steigern. Grossi et al. [11] haben experimentell nachgewiesen, dass sich mittels dynamikorientierter Prozessoptimierung Formabweichungen additiv gefertigter dünnwandiger Bauteile auf unter 0,1 mm reduzieren lassen. Tunc und Gulmez [12] zeigten, dass durch angepasste Werkzeugbahnstrategien und variable Restmaterialform bei der 5-Achs-Bearbeitung dünnwandiger Bauteile Formfehler reduziert und die Bearbeitungsstabilität verbessert werden können. Dies führt zu höherer Präzision und geringeren Oberflächenfehlern bei gleichzeitig verkürzten Bearbeitungszeiten. Die Reduzierung von Formfehlern aus der Bauteilabdrängung durch die Auswahl geeigneter Bearbeitungsstrategien kann mit erhöhtem Programmieraufwand, längeren Bearbeitungszeiten und eingeschränkter Übertragbarkeit verbunden sein. Eine Alternative hierzu stellen Methoden zur Offline-Kompensation dar, die eine Reduzierung des Abdrängungsfehlers unabhängig von der gewählten

Bearbeitungsstrategie und den Prozessparametern ermöglichen sollen. Hierbei handelt es sich ausschließlich um eine modellgestützte Herangehensweise, indem für die jeweilige Anwendung ein Prozessmodell zur Vorhersage der Abdrängung bestimmt wird. Anschließend werden daraus die notwendigen Kompensationswerte zur Anpassung eines Werkzeugpfads nach der Methode der Fehlerspiegelung ermittelt [13]. Ratcev et al. [14] stellen eine modellgestützte Methode zur Vorhersage und Kompensation von Bearbeitungsfehlern an nachgiebigen Bauteilen vor. Hierbei wird ein analytisches Kraftmodell mit FEM-Analysen zur Simulation der Werkstückverformung kombiniert. Die iterative Kopplung von Kraft- und Verformungsmodell ermöglicht eine Fehlerkompensation durch Anpassung der Werkzeugbahn. Die Validierung zeigt eine gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment. Wimmer et al. [15] untersuchten einen numerischen Ansatz zur Vorhersage statischer Oberflächenfehler beim Umfangsfräsen dünnwandiger Bauteile. Das Modell kombiniert FEM-Simulationen mit analytischen Kraftmodellen und berücksichtigt Prozess- und Werkzeugparameter. Die Methode wurde experimentell an dünnwandigen Aluminiumplatten validiert und ermöglicht eine genaue Fehlerprognose selbst bei kleinen radialen Schnitttiefen. Modellgestützte Offline-Kompensationsverfahren benötigen keine Sensorik und bieten bei sorgfältiger Modellierung eine hohe Prozesssicherheit für vorhersehbare Prozessbedingungen. Ihre Leistungsfähigkeit ist jedoch durch Modellannahmen begrenzt, sodass sie auf unerwartete Prozessänderungen nicht reagieren können. Im Gegensatz dazu ermöglichen Online-Kompensationsmethoden durch die Nutzung von Echtzeitdaten eine dynamische Anpassung an Abweichungen und eine adaptive Fehlerkorrektur während der Bearbeitung. Denkena und Boujnah [16] entwickelten ein System zur online Kompensation von Werkzeugabdrängung beim Fräsen. Prozesskräfte werden über integrierte Sensoren in Echtzeit gemessen und die Werkzeugsteifigkeit automatisch bestimmt. Die Abdrängung wird durch adaptive Vorschub- oder positionsbasierte Korrekturen kompensiert, wobei letztere bis zu 80 % Genauigkeitssteigerungen ermöglicht. Evers et al. [17] präsentieren eine Methode zur online Kompensation von Werkstückverformungen beim Fräsen dünnwandiger Bauteile aus TiAl6V4. Mithilfe von Wirbelstromsensoren und einem PI-Regelkreis werden die radiale Schnitttiefe und Werkzeugneigung in Echtzeit angepasst. Hierdurch konnten Formfehler an der Oberfläche um bis zu 70 % reduziert werden.

Eine weitere Methode ist die Nutzung aktiver Abstützungen im Bereich der Krafteinleitung. Durch eine rückseitige Abstützung kann die Abdrängung der Struktur auf ein Minimum reduziert werden, sodass außerhalb definierter Toleranzen keine Formabweichungen an der Oberfläche mehr auftreten. In der Literatur wurden hierzu verschiedene Ansätze untersucht. Hintze et al. [18] untersuchten ein Klemmsystem mit Mehrpunktabstützung, das Auflagepunkte an vier Stellen positioniert. Dieses Spannkonzepth führte zu einer signifikanten Reduktion der Werkstückverformung sowie der Schwingungsamplitude während der Bearbeitung. Torres et al. [19] stellten einen robotergestützten Fräsprozess vor, bei dem ein mobiler Stützkopf die Steifigkeit im Bereich des Werkzeugeingriffs während des Fräsens erhöht. In Experimenten an Bauteilen mit Wandstärken von $t = 2 \text{ mm}$ und $t = 3 \text{ mm}$ konnte durch diesen Ansatz die maximale Formabweichung gegenüber

der Bearbeitung ohne Abstützung um bis zu 60 % reduziert werden.

3. PROZESSKETTE ZUR KOMPENSATION FÜR DIE PRÄZISIONSSCHLEIFBEARBEITUNG

Die in der Einleitung vorgestellte übergreifende Prozesskette erfordert im Hinblick auf das einzuhaltende Toleranzfenster die Berücksichtigung von Bauteilverformungen. Hierfür wurde die Planung der Werkzeugbahn durch eine prädiktive, modellgestützte Prozesskette für die Kompensation von Formabweichungen für das Schleifen nachgiebiger Luftfahrtstrukturbauteile aus CFK erweitert. Das nachfolgende BILD 2 stellt diese Prozesskette mit den einzelnen Abschnitten und ihren Verknüpfungen vor. Den Start der Prozesskette bilden die 3D-Punktdaten der Oberflächenvermessung.

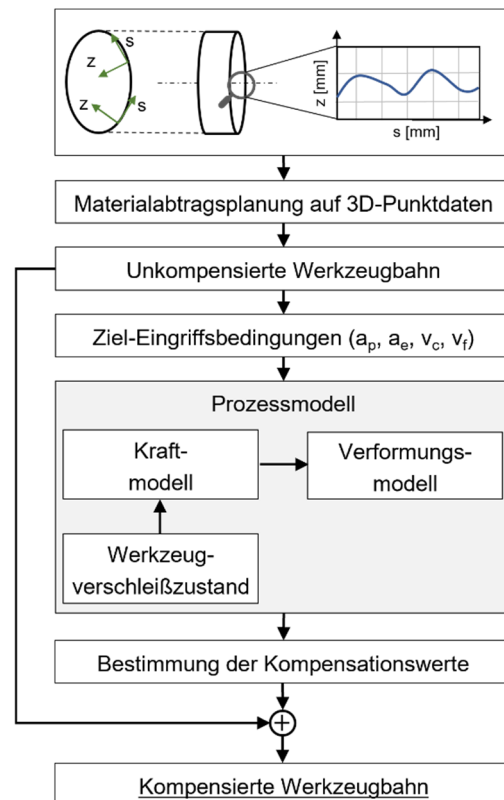


BILD 2. Prozesskette zum Oberflächenschleifen nachgiebiger Luftfahrtstrukturbauteile

Die Daten beinhalten die Informationen über die tatsächliche Oberflächenstruktur und der sich darauf befindlichen kurzwelligen Formabweichungen. Anhand dieser Informationen wird der notwendige Materialabtrag ermittelt, um toleranzüberschreitende Formabweichungen zu entfernen. Daraus ergibt sich eine Werkzeugbahn, die die angestrebten lokalen radialen und axialen Schnitttiefen unter Berücksichtigung der Werkzeuggeometrie umsetzt. Unter der Annahme einer ideal steifen Struktur würde das Abfahren dieser Bahn im Rahmen der Systemgenauigkeit an jeder Position zum geplanten Materialabtrag führen. Für den Fall nachgiebiger Strukturen stellt der ermittelte Materialabtrag weiterhin den Zielzustand dar. Hieraus lassen sich die Eingriffsbedingungen am Werkzeug, insbesondere die radiale Schnitttiefe a_e , bestimmen.

Zusammen mit weiteren vorgegebenen Prozessparametern kann über ein Kraftmodell eine Vorhersage der lokal wirkenden Prozesskräfte erfolgen. Bei der Bearbeitung über Strecken in der Größenordnung eines Rumpfumfangs wird auch immer die Maximierung der Einsatzdauer eines einzelnen Schleifwerkzeugs angestrebt, bevor es aufgrund des zunehmenden Verschleißes ausgetauscht werden muss. Hierbei ist der mit zunehmendem Werkzeugverschleiß einhergehende Anstieg der Prozesskräfte zu berücksichtigen. Die Prozesskräfte können anschließend in Kombination mit einem Verformungsmodell der Struktur zu einer Vorhersage der lokalen Durchbiegungen an der Struktur genutzt werden. Aus dem Verformungsmodell lassen sich die notwendigen Kompensationswerte als Offset der radialen Schnitttiefe a_e sowie der Einstellung eines Werkzeugneigungswinkels α ableiten. Durch ihre Überlagerung mit der ursprünglichen Werkzeugbahn kann eine präventive Kompensation von Formabweichungen erfolgen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die aktuellen Untersuchungsergebnisse und angewandten Methoden zur Prozesskette für das Oberflächenschleifen vorgestellt.

3.1. Demonstratoraufbau

Die Umsetzung des Oberflächenschleifprozesses erfolgt anhand der Bearbeitung einzelner Rumpfpaneele aus CFK in einem Demonstratoraufbau. Dieser umfasst neben der Einspannvorrichtung für ein Rumpfpaneel einen Industrieroboter, der als Endeffektor die notwendigen Systeme zur Vermessung und Schleifbearbeitung führt. BILD 3 zeigt die Anordnung der einzelnen Komponenten.

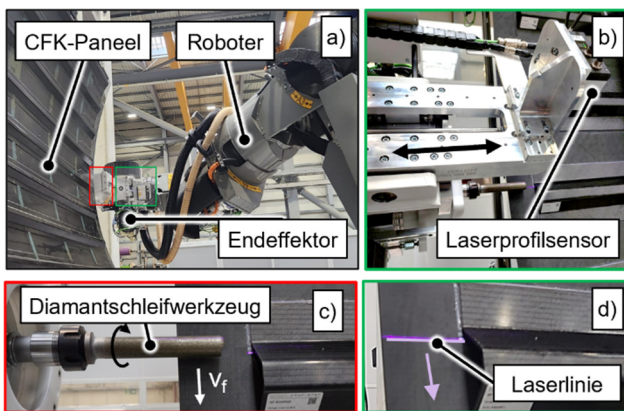


BILD 3. Demonstratoraufbau für das robotergeführte Oberflächenschleifen eines CFK-Rumpfpaneels

Am Endeffektor des Roboters befindet sich eine ausfahrbare Trägervorrichtung (b). Darauf ist ein Laserprofilsensor vom Typ Micro-Epsilon LLT 3000-100 montiert. Die Position des Sensors ist relativ zum Basiskoordinatensystem des Roboters vermessen, sodass die Messpunkte auf der Oberfläche im gleichen Koordinatensystem angegeben werden können, in dem auch die Positionierung und Orientierung des Schleifwerkzeugs erfolgt. Für eine Vermessung wird der Sensor über die Oberfläche des Bauteils gefahren. Anschließend fährt der Roboter mit konstanter Geschwindigkeit die Oberfläche entlang des Umfangs ab (d). Dabei wird in regelmäßigen Zeitabständen der Messdatensatz einer Laserlinie aufgezeichnet. Über die

bekannte Position des Laserprofilsensors können die einzelnen Datensätze zu einem Gesamtdatensatz zusammengesetzt werden. Das Ergebnis der Messung sind 3D-Punktdaten, die die Oberflächenstruktur des Bauteils im Raum beschreiben. Nach erfolgter Vermessung wird der Sensor zurückgezogen und eine Absaugglocke für den anfallenden CFK-Staub über das Werkzeug gefahren. Die Schleifbearbeitung erfolgt mit einer Magnetlagerspindel vom Typ Keba LeviSpin R140. Hierbei kommen Diamantschleifwerkzeuge verschiedener Körnungen (D126 und D252) mit einem Durchmesser von $D = 16$ mm und einer Länge des schneidfähigen Bereichs von $l = 80$ mm zum Einsatz (c). Die Bearbeitung erfolgt im Gegenlauf.

3.2. Bahnplanung auf Basis von 3D-Punktdaten

Die unbekannten kurzweiligen Abweichungen machen die Vermessung der Oberfläche notwendig. Hierzu wird im Demonstratoraufbau der Laserprofilsensor wie beschrieben an der zu bearbeitenden Oberfläche entlanggeführt. Ein einzelnes Laserprofil deckt eine Tiefe von $a_L = 70$ mm ab und setzt sich aus einzelnen Messpunkten im Abstand $b_L = 80$ μ m zusammen. Im ersten Schritt erfolgt eine Trennung der primären Form von dem darauf verlaufenden Höhenprofil der Oberfläche, um das Primärprofil der Oberfläche zu erhalten. Dies entspricht einer Abwicklung der Messdaten entlang des mittleren, gekrümmten Oberflächenprofils. Nach der Abwicklung wird das Profil durch die neuen Koordinaten b , s und z beschrieben. Die Koordinaten b und s beschreiben die Breite bzw. die Länge des abgewickelten Profils. Eine Bewegung in Richtung s entspricht der Bewegung in Umfangsrichtung des ursprünglichen Datensatzes. Alle Abweichungen relativ zum Primärprofil werden als Höhe z senkrecht zur b - s -Ebene beschrieben. Anschließend wird die Bauteilkante im Primärprofil identifiziert. Die Ausrichtung des Laserprofilsensors wurde so gewählt, dass der Messbereich über die Kante der Messfläche hinausragt, sodass in jedem aufgenommenen Laserprofil eine eindeutige Zuordnung eines Punktes zur Kante erfolgen kann. Zusätzlich wird der lokale Kantenrichtungsverlauf als Differenzvektor zwischen benachbarten Kantenpunkten ermittelt. Das BILD 4 zeigt den Ausgangszustand der Daten eines vermessenen CFK-Rumpfpaneels sowie den Zustand nach erfolgter Abwicklung und Kantendetektion.

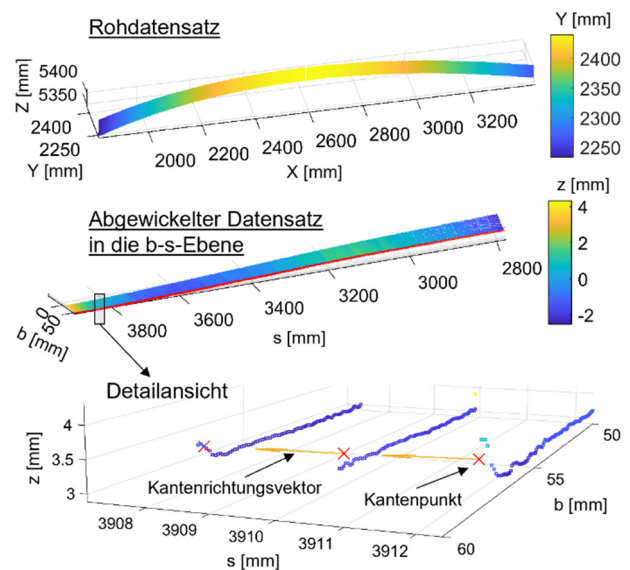


BILD 4. Vorverarbeitung der 3D-Punktdaten der Vermessung eines CFK-Rumpfpaneels

Die Kantenpunkte und Kantenrichtungsvektoren dienen als Basis für die Festlegung der Werkzeugbahn. Eine vollständige Beschreibung benötigt die Bestimmung des Tool Center Points $TCP = [X, Y, Z]$ sowie der Orientierung der Werkzeugachse als Richtungsvektor $[i, j, k]$ für jedes Laserprofil im Raum. Die Richtungsvektoren werden so gewählt, dass die Werkzeugachse zu jedem Zeitpunkt senkrecht zur Bauteilkante und parallel zur b-s-Ebene steht. Die Höhe der TCP-Positionen senkrecht zur b-s-Ebene ergibt sich aus dem gewünschten Materialabtrag. Da die Beseitigung kurzweiliger Abweichungen angestrebt wird, wird das abgewinkelte Primärprofil zunächst mit einem 1D-Gaußfilter in einen langwelligen Anteil (Welligkeitsprofil) und einen kurzweiligen Anteil (Rauigkeitsprofil) aufgeteilt. Das resultierende Welligkeitsprofil dient anschließend als Bezugspfad, entlang dem das Werkzeug geführt werden soll. Die TCP-Positionen sind zu diesem Pfad um den Werkzeugradius R versetzt. Auf diese Weise werden ausschließlich unerwünschte Abweichungen abgetragen, die dem Rauheitsprofil entsprechen. Das BILD 5 zeigt die Messdaten des Primärprofils (blau), das gefilterte Welligkeitsprofil (rot) sowie die daraus resultierenden Z-Werte der TCP-Positionen (gelb) an einer Beispielmessung.

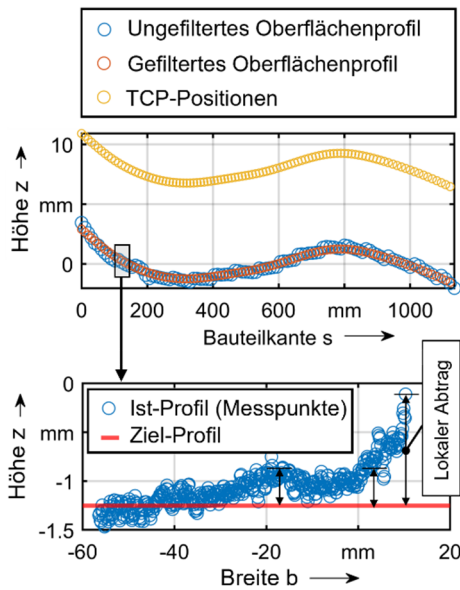


BILD 5. Primärprofil, Welligkeitsprofil und abgeleiteter Werkzeugweg (TCP-Positionen) in der z-s-Ebene (oben), Ermittlung des lokalen Materialabtrags in der b-z-Ebene (unten)

Nachdem die Festlegung der TCP-Positionen und Orientierungsvektoren erfolgt ist, wird für jeden Punkt des gemessenen Oberflächenprofils der lokale Materialabtrag in Form der radialen Schnitttiefe a_e als Differenz zwischen der Position der Werkzeugkante und jedem Laserlinienmesspunkt bestimmt. Dieser bildet die Grundlage für die Berechnung der Prozesskräfte im Kraftmodell, welche wiederum über ein Verformungsmodell die Berechnung der Kompensationswerte erlaubt. Bei den Kompensationswerten handelt es sich um einen zusätzlichen Offset der radialen Schnitttiefe a_e sowie um einen Anstellwinkel des Werkzeugs, die mit dem vorliegenden TCP-Positionen bzw. Richtungsvektoren des

Werkzeugs in der unkompensierten Bahn überlagert werden.

3.3. Kraftmodell und Werkzeugverschleiß

Die prädiktive Bestimmung der Kompensationswerte erfordert eine Modellierung der beim Schleifen von CFK zu erwartenden Prozesskräfte. Von besonderem Interesse ist hierbei die Vorschubnormalkraft F_{fn} , da sie die senkrecht zur Oberfläche wirkende Kraftkomponente darstellt und somit maßgeblich für die Durchbiegung der Struktur verantwortlich ist. In der beschriebenen Prozesskette wird hierfür auf ein mechanistisches Kraftmodell zurückgegriffen, dass sich an den von Kötner et al. [20] beschriebenen Modellansätzen orientiert. Modelle dieser Art beschreiben die grundlegenden Abhängigkeiten der Kraft gegenüber den Prozessparametern. Anhand experimenteller Kalibrationsversuche werden Kraftkoeffizienten K ermittelt, die den Einfluss des spezifischen Materials sowie der Werkzeugbeschaffenheit im Modell berücksichtigen. Aus BILD 5 geht hervor, dass die radialen Schnitttiefen a_e in Richtung der axialen Schnitttiefe a_p aufgrund des variablen Oberflächenprofils nicht konstant sind. Aus diesem Grund erfolgt eine Diskretisierung des Werkzeugs. Auf diese Weise kann der Einfluss der variierenden radialen Schnitttiefen a_e auf die Prozesskräfte berücksichtigt werden. In BILD 6 ist das Prinzip der Diskretisierung entlang der Werkzeugachse für ein zylindrisches Schleifwerkzeug dargestellt.

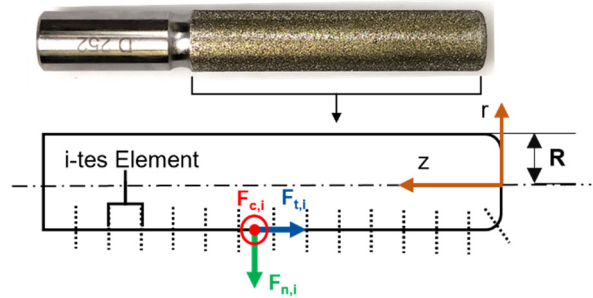


BILD 6. Diskretisierung des Schleifwerkzeugs

Im Folgenden wird eine vereinfachte Darstellung der Modellierungsansätze beschrieben. Eine detailliertere Ausführung findet sich in [20]. Die Berechnung der Kräfte erfolgt für jedes Element separat. Im lokalen Elementkoordinatensystem werden hierbei für jedes Element i die drei Kraftkomponenten $F_{c,i}$ in Schnittrichtung, $F_{t,i}$ tangential zur Werkzeugkante und $F_{n,i}$ orthogonal hierzu eingeführt. Sie setzen sich nach Gleichung (1) aus einem durch Reibung hervorgerufenen und durch den für die Materialtrennung benötigten Kraftanteil zusammen. Die elementweisen Einzelkräfte werden anschließend in ein globales Werkstückkoordinatensystem transformiert und dort über die Gesamtanzahl der Elemente N_e nach Gleichung (2) zur Gesamtschleifkraft F addiert.

$$(1) \quad \vec{F}_{cnt,i} = \begin{bmatrix} F_{c,i} \\ F_{n,i} \\ F_{t,i} \end{bmatrix} = \vec{K}_e \cdot S_i(a_{e,i}) + \vec{K}_c \cdot b_i \cdot h_i(a_{e,i})$$

$$(2) \quad F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{N_e} T_{xyz_i}^{cnt} \cdot \vec{F}_{cnt,i}$$

Die Reibkraftanteile werden durch die lokale Kontaktfläche S_i zwischen Schleifbelag und dem Werkstoff beeinflusst. Die Schnittkraftanteile hingegen werden durch das abzutragende Materialvolumen, ausgedrückt durch den Spanungsquerschnitt $b \cdot h_i$, beeinflusst. Die Einflüsse aus Werkzeug- und Werkstoffeigenschaften auf die jeweiligen Anteile werden durch die Reibkraft- und Schnittkraftkoeffizienten in K_e bzw. K_c berücksichtigt. Die Schnittkraftkoeffizienten werden anhand von experimentell zu ermittelnden Kalibrationsdaten bestimmt. Die restlichen Parameter leiten sich als Berechnungsgrößen aus den Schnittparametern und der Werkzeuggeometrie ab. Aus der Bestimmung des Materialabtrags im vorherigen Abschnitt wird hierzu jedem Element entsprechend seiner Position entlang der Werkzeugachse eine lokale radiale Schnitttiefe $a_{e,i}$ zugeordnet. Auf diesem Weg kann der variierende Materialabtrag entlang der Werkzeugachse im Modell berücksichtigt werden.

Das beschriebene Vorgehen zur Modellierung der Schleifkräfte geht von keiner Veränderung des Werkzeugzustands während der Bearbeitung aus. Beim Schleifen von CFK kommt es jedoch zu überwiegend abrasiven Verschleiß an den Diamantkörnern, der zu einem signifikanten Anstieg der Prozesskräfte über die Einsatzzeit führt. Am Beispiel vom BILD 7 ist dem Kraftverlauf für $v_f = 1000$ mm/min eine Zunahme der Vorschubnormalkraft F_{fn} von 40 % gegenüber dem Neuzustand ($l_c = 0$ m) über einen Schnittweg $l_c = 200$ m zu entnehmen. Der Schnittweg l_c beschreibt unter Berücksichtigung der Rotationsbewegung des Werkzeugs für jedes Schleifkorn die kumulierte Kontaktlänge im Eingriff. Unter den angegebenen Schnittparametern legt das Werkzeug hierbei einen Vorschubweg von $l_f = 10$ m entlang der Bauteilkontur zurück. Im Vergleich dazu beträgt der Rumpfumfang bei Großraumflugzeugen mit einem Durchmesser von $D \approx 6$ m und einem angenommenen kreisförmigen Querschnitt etwa $U \approx 18$ m. Bei der angestrebten Komplettbearbeitung eines Rumpfsegments mit einem Werkzeug ist der Verschleiß zur genauen Kompensation und zur Festlegung der Kraftobergrenzen zu berücksichtigen. Hierzu wurde das Kraftmodell um einen linearen Ansatz für die verschleißbedingte Veränderung der Reib- und Schnittkraftkoeffizienten erweitert. Die Koeffizienten werden nach Gleichung (3) als eine lineare Funktion des insgesamt von jedem Werkzeugelement zurückgelegten Schnittwegs $l_{c,i}$ beschrieben. Die k_0 -Werte beschreiben die Koeffizienten im Neuzustand des Werkzeugs ($l_{c,i} = 0$ m). Die k_R -Werte hingegen beschreiben die mit dem Schnittweg $l_{c,i}$ auftretende spezifische Kraftänderung an den einzelnen Werkzeugelementen. Neben dem Werkzeugdurchmesser D , der Vorschubgeschwindigkeit v_f und der Schnittgeschwindigkeit v_c ist der Schnittweg $l_{c,i}$ wiederum eine Funktion der lokalen radialen Schnitttiefe $a_{e,i}$. Durch die elementweise Berücksichtigung des Verschleißzustands kann ein durch variierende radiale Schnitttiefen $a_{e,i}$ hervorgerufener ungleichmäßiger Verschleiß entlang der Werkzeugachse vom Modell abgebildet werden.

$$(3) \quad \vec{K}_e(l_{c,i}) = \begin{bmatrix} k_{ce0} + k_{ceR} \cdot l_{c,i} \\ k_{ne0} + k_{neR} \cdot l_{c,i} \\ k_{te0} + k_{teR} \cdot l_{c,i} \end{bmatrix}, \quad \vec{K}_c(l_{c,i}) = \begin{bmatrix} k_{cc0} + k_{ccR} \cdot l_{c,i} \\ k_{nc0} + k_{ncR} \cdot l_{c,i} \\ k_{tc0} + k_{tcR} \cdot l_{c,i} \end{bmatrix}$$

Das nachfolgende BILD 7 zeigt die Anwendung des Modells zur Abbildung des verschleißbedingten Anstiegs der Vorschubnormalkraft F_{fn} im Vergleich zu den

gemessenen Mittelwerten beispielhaft für die Bearbeitung mit einer konstanten radialen Schnitttiefe a_e .

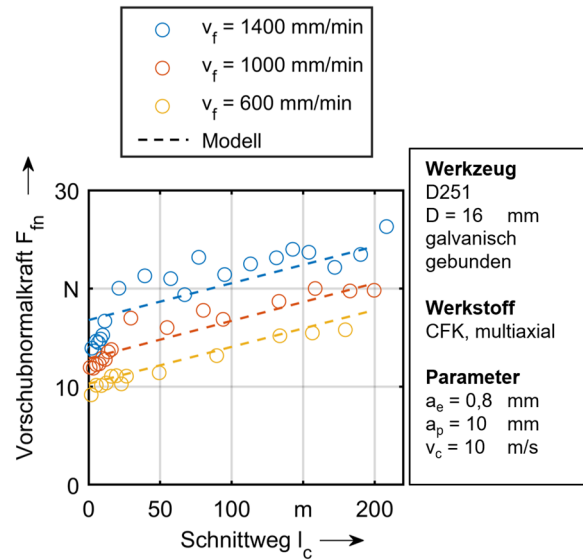


BILD 7. Modellierung der Vorschubnormalkraft F_{fn} unter Berücksichtigung des zurückgelegten Schnittwegs l_c

Die Modifikation des Modellansatzes nach Gl. (1) durch einen linearen Ansatz für veränderliche Modellkoeffizienten ermöglicht es Kraftanstiege infolge des zunehmenden abrasiven Verschleißes im Rahmen der vorgestellten Prozesskette zu berücksichtigen. Sie stellt damit ein wichtiges Element bei der prädiktiven Ermittlung der Kompensationswerte sowie der allgemeinen Prozessauslegung dar.

3.4. Formfehler und Kompensation

Das Ergebnis der vorgestellten Prozesskette zur Abdrängungskompensation nach BILD 2 ist eine Abfolge von Bahnpunkten mit zugehörigen Richtungsvektoren. Die Bahnpunkte und Vektoren sind hierbei so bestimmt, dass sie die bei der Bearbeitung durch die Verformung der Struktur verursachte Abweichung vom geplanten Materialabtrag prädiktiv minimieren. Zur Validierung werden experimentelle Zerspanuntersuchungen an CFK-Versuchswerkstücken durchgeführt. Der dafür verwendete Versuchsaufbau in einem Bearbeitungszentrum vom Typ Reichenbacher Vision II-Sprint ist im nachfolgenden BILD 8 dargestellt. Der Versuchsaufbau umfasst eine einseitig eingespannte CFK-Probe eines multiaxialen Laminats mit einer Materialstärke von $t = 5,75$ mm und einer Tiefe $b = 75$ mm, bei einer Auskraglänge von $c_L = 150$ mm. Die Bearbeitung erfolgte von der Unterseite in einem Umfangsschleifprozess mit einem Diamantschleifwerkzeug vom Durchmesser $D = 16$ mm und einer Diamantkorngröße D126.

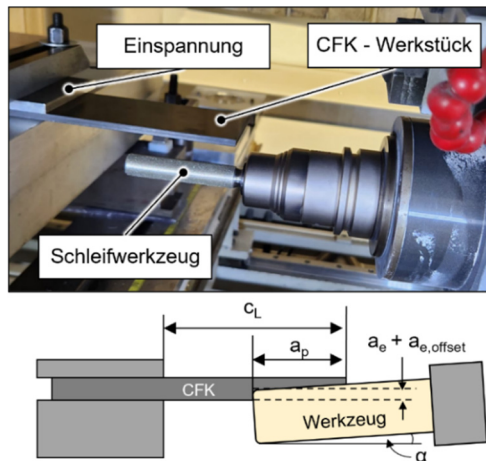


BILD 8. Versuchsaufbau zum Oberflächenschleifen von CFK mit Kompensation

Die Bewertung der Oberfläche und des erzielten Materialabtrags erfolgte anhand von Profilschnitten durch 3D-Scandaten, die vom Werkstück aufgenommen wurden. Dies erfolgte mit einem optischen 3D-Koordinatenmessgerät vom Typ Keyence VL-500. Aus den Profilschnitten können die tatsächlich im Prozess umgesetzten lokalen radialen Schnitttiefen a_e ermittelt werden. Im BILD 9 sind Profilschnitte mit und ohne Kompensation als Ergebnis der Bearbeitung abgebildet.

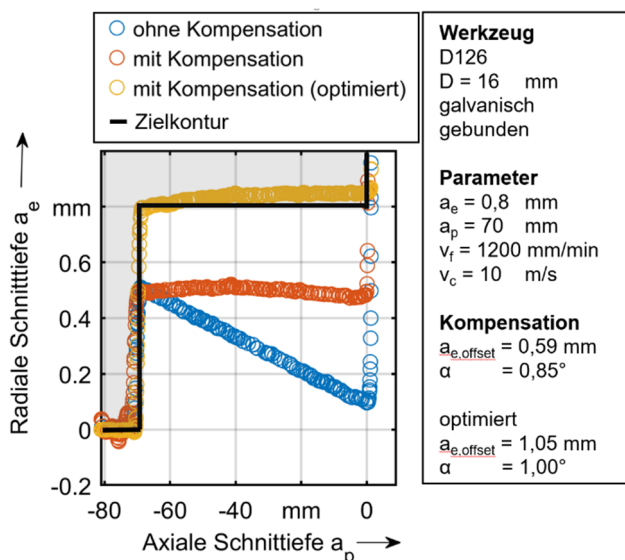


BILD 9. Gegenüberstellung von Profilschnitten geschliffener CFK-Versuchswerkstücke

Aufgrund der einseitigen Einspannung und der hohen Ausraglänge, kommt es während der Schleifbearbeitung ohne Kompensation zur Ausbildung eines Formfehlers an der Oberfläche. Der Fehler zeichnet sich durch einen Offset bei $a_p = -70$ mm aus und steigt linear bis zur Werkstückkante bei $a_p = 0$ mm an. Diese Form des Fehlers ist auf eine große Verschiebung bei einer geringen Krümmung des Werkstücks während der Bearbeitung zurückzuführen und lässt sich gut durch die geeignete Wahl eines Anstellwinkels und Offsetwerts kompensieren. Die Kompensationswerte wurden für diesen Fall mit Hilfe eines FEM-Modells bestimmt, welches die Verformung der CFK-Probe unter der ermittelten Vorschubnormalkraft F_{fn}

simuliert. Die Grafik zeigt zwei weitere Profilschnittverläufe. Einer davon zeigt einen konstanten Offset-Fehler bei einer erreichten radialen Schnitttiefe von $a_e = 0,5$ mm. Ursächlich ist die zunächst nicht ausreichend berücksichtigte Nachgiebigkeit der Bauteileinspannung. Für eine weitere Minimierung des Fehlers wurden daher Kraft-Weg-Verläufe am eingespannten Werkstück gemessen und für eine Neukalibration des FEM-Modells genutzt. Hierdurch konnte die angestrebte radiale Schnitttiefe von $a_e = 0,8$ mm mit einer maximalen Abweichung von $\Delta a_e = 30 \mu\text{m}$ (leichte Überkompensation) erreicht werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde eine im Rahmen des Projektes SHILA untersuchte Prozesskette für die Kompensation von Formfehlern während des Umfangsschleifens vorgestellt. Die Kompensation stellt eine wesentliche Komponente in der übergeordneten Prozesskette für eine shimfreie Montage von Rumpfsektionen aus CFK dar. Es wurden das Vorgehen und der aktuelle Forschungsstand innerhalb der einzelnen Teilaspekte der Prozesskette anhand realer Beispieldaten hinsichtlich der Bahnplanung und Anwendung der Kompensationswerte beschrieben. Im Detail wurden dabei die folgenden Inhalte und Ergebnisse vorgestellt:

- Entwicklung einer Werkzeugbahnplanung, die auf Grundlage der 3D-Laservermessung den Materialabtrag zur Beseitigung kurzweiliger Formabweichungen bestimmt
- Berücksichtigung der Wechselwirkung von Schleifkräften, Werkzeugverschleiß und struktureller Nachgiebigkeit in einem Prozessmodell zur Bestimmung von Kompensationswerten
- Experimentelle Validierung an CFK-Versuchswerkstücken zur Demonstration der Notwendigkeit und Wirksamkeit einer Werkzeugwegkompensation zur Reduktion von Formabweichungen infolge von Bauteilabdrängungen

- [1] Zhao, H., Xi, J., Zheng, K., Shi, Z., Lin, J., Nikbin, K., Wang, B. (2020). A review on solid riveting techniques in aircraft assembling. *Manufacturing Review*, 7, 40.
- [2] Chrisholm, S. A., Rufin, A.C., Chapman, B. D., Benson, Q. J. (2016). Forty Years of Structural Durability and Damage Tolerance at Boeing Commercial Airplanes. *Boeing Technical Journal*.
- [3] Yue, X., An, L., Ye, X., Wang, C., Cai, Y., & Xiao, R. (2020). Effect of gap and shims on the strain and stress state of the composite-aluminum hybrid bolted structure. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2020, 1–19.
- [4] Wen, Y., Yue, X., Hunt, J. H., & Shi, J. (2018). Feasibility analysis of composite fuselage shape control via finite element analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 46, 272–281.
- [5] Wang, Z., Li, D., Shen, L., Sui, Y., & Zhai, Y. (2023). Collaborative force and shape control for large composite fuselage panels assembly. *Chinese Journal of Aeronautics*, 36(7), 213–225.

- [6] Du, J., Yue, X., Hunt, J. H., & Shi, J. (2019). Optimal placement of actuators via sparse learning for composite fuselage shape control. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(10), 1.
- [7] Nghiep, T. N., Sarhan, A. A. D., & Aoyama, H. (2018). Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace Aluminum 6061-T6 alloy. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 125, 476–495.
- [8] Draz, U., & Hussain, S. (2025). Machining-induced geometric errors in thin-walled parts — a review of mitigation strategies and development of application guidelines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136(10), 4175–4214.
- [9] Gao, Y.-Y., Ma, J.-W., Jia, Z.-Y., Wang, F.-J., Si, L.-K., & Song, D.-N. (2016). Tool path planning and machining deformation compensation in high-speed milling for difficult-to-machine material thin-walled parts with curved surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9–12), 1757–1767.
- [10] Zha, J., Liang, J., Li, Y., Zhang, H., & Chen, Y. (2020). Large cutting depth and layered milling of titanium alloy thin-walled parts. *Materials*, 13(7), 1499.
- [11] Grossi, N., Scippa, A., Venturini, G., & Campatelli, G. (2020). Process parameters optimization of thin-wall machining for wire arc additive manufactured parts. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 10(21), 7575.
- [12] Tunc, L. T., & Gulmez, D. A. (2024). Tool path strategies for efficient milling of thin-wall features. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(4), 169.
- [13] Wang, L., Li, W., & Yu, G. (2023). Optimal deformation error compensation process in flank milling of thin-walled workpieces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(9–10), 4353–4367.
- [14] Ratchev, S., Liu, S., Huang, W., & Becker, A. A. (2004). Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44(15), 1629–1641.
- [15] Wimmer, S., Hunyadi, P., & Zaeh, M. F. (2019). A numerical approach for the prediction of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled structures. *Production Engineering*, 13(3–4), 479–488.
- [16] Denkena, B., Boujnah, H. (2018). Feeling machines for online detection and compensation of tool deflection in milling. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 67(1), 423–426.
- [17] Evers, L., Müller, M., Möller, C., Brouschkin, A., & Dege, J. H. (2025). Control loop based dimensional error compensation for milling of near-net-shaped, thin-walled structures. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 399–407.
- [18] Hintze, W., Wenserski, R. von, Junghans, S., & Möller, C. (2020). Finish machining of Ti6Al4V SLM components under consideration of thin walls and support structure removal.
- [19] Torres, R., Gonzalez, S., Elguea, I., Aginaga, J., Iriarte, X., Agirre, N., & Inziarte, I. (2020, August). Robotic assisted thin-wall machining with a collaborative robot. 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Presented at the 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Hong Kong.
- [20] Köttner, L., Jakele, L., & Hintze, W. (2024). Kraftmodellierung beim Schleifen von UD-CFK unter räumlichen Eingriffsbedingungen.