

Hybride Zerspanung von Faserverbundwerkstoffen mit dem Industrieroboter

Tom Hühns¹ und Gerret Christiansen²

¹*tom.huehns@beuth-hochschule.de,*

Beuth Hochschule für Technik Berlin, Luxemburger Str. 10, 13353 Berlin

²*gerret.christiansen@iwf.tu-berlin.de,*

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Veröffentlicht: Erstveröffentlichung 2019 in Methoden des Fortschritts II, ISBN 978-3-948133-00-9. Zweitveröffentlichung 2021 in Reports of Science mit Genehmigung der Autoren

Schlüsselwörter: Faserverbundwerkstoff, Fräsbearbeitung, Ultraschall, Industrieroboter, Datenmanagementsystem



REPORTS OF SCIENCE

moringa.pub/ojs/index.php/reports

ISSN 2567-3394



Soweit nicht anders angegeben, ist dieses Werk lizenziert unter der Creative Commons Attribution ShareAlike 4.0

International License:

creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

Zusammenfassung: Steigende Anforderungen an die Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen lassen dem Leichtbau in der stark innovationsgetriebenen Automobilbranche eine große Bedeutung zukommen. Dies führt zu einem vermehrten Einsatz von Faserverbundwerkstoffen wie CFK oder GFK. Für die wirtschaftliche Endbearbeitung großer Strukturbauteile aus oben genannten Verbundwerkstoffen werden daher prozesssichere und flexible Bearbeitungssysteme benötigt ([2], S. 662-667). Industrieroboter sind für diese Anwendungen grundsätzlich geeignet, zeigen aktuell jedoch für viele Anwendungen unzureichende Genauigkeiten ([1], S. 706-711).

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung und Projektteam	1
2 Aufbau der hybriden Roboterzelle	1
3 Technologische Untersuchungen	3
4 Entwicklung eines Datenmanagementsystems	6
5 Wirtschaftlichkeitsberechnung	7
6 Zusammenfassung und Ausblick	9

1 Zielsetzung und Projektteam

Ziel eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundprojekts war es, eine hybride Bearbeitungsstrategie für das roboterunterstützte Fräsen von faserverstärkten Kunststoffen zu entwickeln. Die Senkung der Zerspankräfte durch den Einsatz von Ultraschall im Bearbeitungsprozess soll hierbei zu einer Verbesserung der Gesamtgenauigkeit des Robotersystems führen und damit die Bauteilqualität hinsichtlich Kantenausprägung und Geometrie steigern ([3], S. 113-123). Entlang der Wertschöpfungskette stand ein breit aufgestelltes Konsortium mit insgesamt neun Partnern aus Forschung und Industrie zur Lösungsfindung bereit (Abbildung 1).



Abbildung 1: Projektteam im Verbundvorhaben

2 Aufbau der hybriden Roboterzelle

Im Rahmen des Projekts wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin eine hochtechnisierte, hybride Roboterzelle für die Endbearbeitung großer Strukturbauteile mit Unterstützung des Projektpartners carat robotic innovation geplant, entwickelt und vollständig aufgebaut (Abbildung 2).

Parallel konnten im Projektverlauf in den Bereichen Werkzeugentwicklung, Beschichtungstechnologie sowie Ultraschall-Aktortechnik für die roboterbasierte Bearbeitung wertvolle und direkt nutzbare Ergebnisse generiert werden. Zusammen mit dem Hartmetallhersteller G-Elit Präzisionswerkzeuge wurde ein Hartmetallwerkstoff als Substrat definiert, welcher für den ultraschallüberlagerten Bearbeitungsprozess im beschichteten Zustand ein geeignetes Verhältnis von Zähigkeit zu Härte aufweist. Zudem konnte die Beschichtung mit hoher Verbundfestigkeit zwischen Substrat und Schichtsystem mit sehr dünnen, nanokristallinen CVD-Diamantschichten durch die Firma Carbon Competence sichergestellt werden. Die große Herausforderung, einen Ultraschallaktor mit hoher Rundlaufgenauigkeit der aufgenommenen Werkzeuge bei höchsten Drehzahlen bereitzustellen, konnte von den Unternehmen Weber Ultrasonics und Döinghaus Cutting And More gelöst werden. Für die Entwicklung und Bereitstellung einer für diesen hochfrequenten Einsatz-

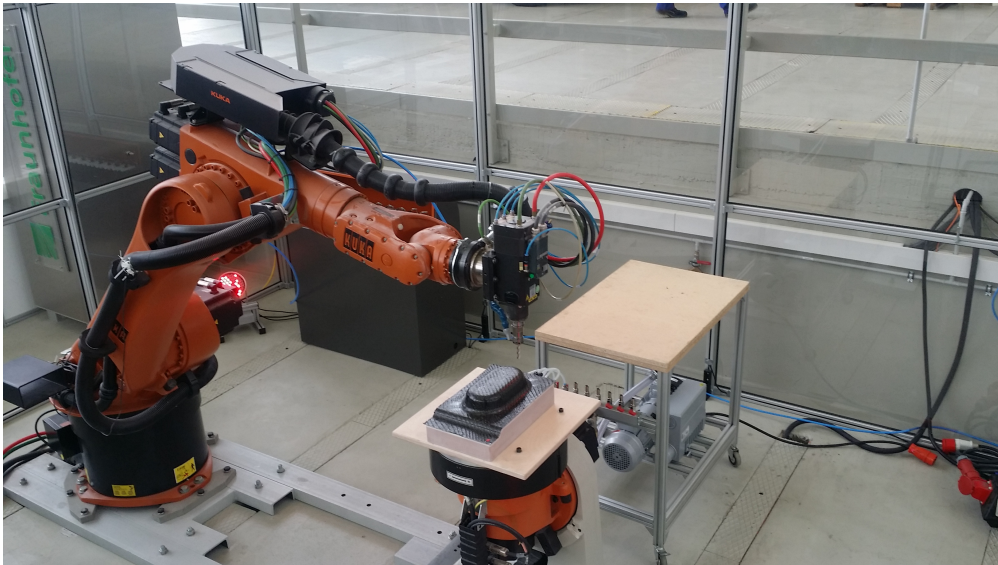


Abbildung 2: Roboterzelle im Versuchsfeld des Instituts für Werkmaschinen und Fabrikbetrieb

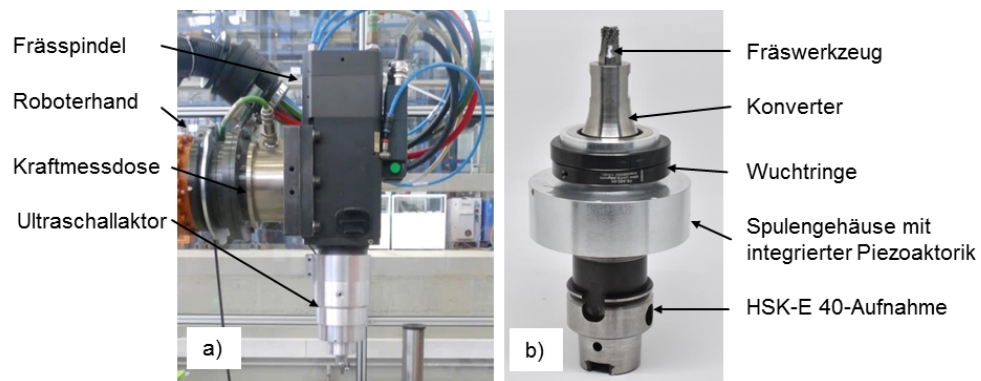


Abbildung 3: Ultraschall-Aktorsystem mit Fräswerkzeug

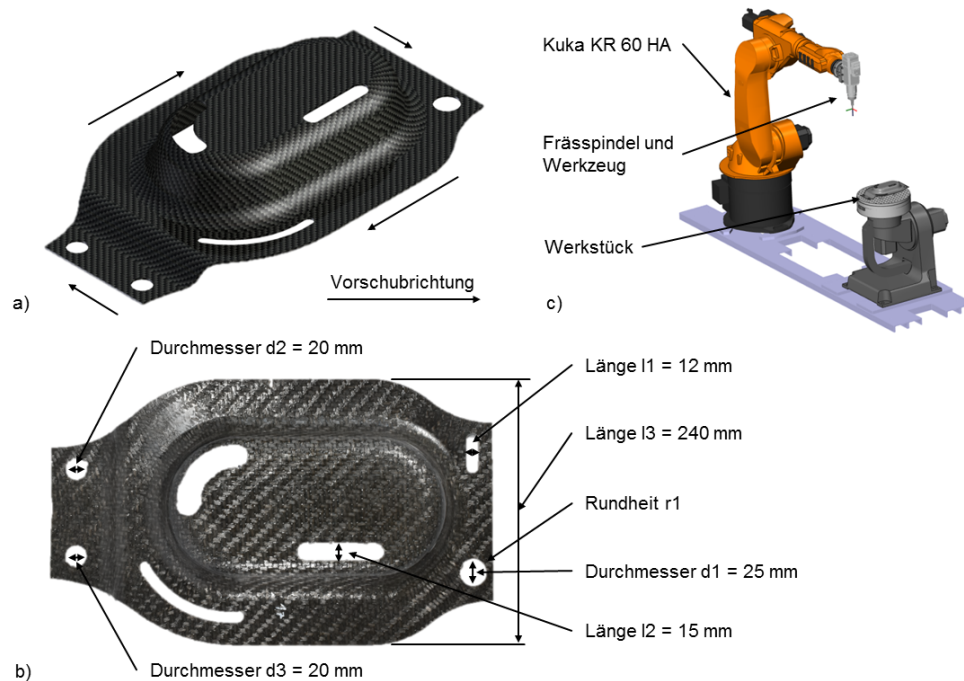


Abbildung 4: a) 3D CAD-Modell, b) reales Referenzbauteil, c) Integration des Referenzbauteils in die CAM-Roboterzelle

fall angepasste Werkzeuggeometrie stand dem Verbundprojekt mit der Firma Hufschmied Zerspanungssysteme ein starker Partner mit Kernkompetenzen in der Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen zur Verfügung. Diese Sonderwerkzeuge wurden im weiteren Projektverlauf schrittweise weiterentwickelt und optimiert (Abbildung 3).

Nach ersten technologischen Voruntersuchungen an Halbzeugen wurden die Ergebnisse dieser Untersuchungen auf die Bearbeitung eines Referenzbauteils übertragen. Dieses Referenzbauteil (Abbildung 4) wurde von der Beuth Hochschule in Zusammenarbeit mit der Firma Huber Kunststoff & Technik entwickelt und zeigt für die Bearbeitung von faserverstärkten Strukturbauteilen typischen Herausforderungen. Zu diesen Herausforderungen zählen das sog. Besäumen einer 3D-Kontur, das Einbringen von Bohrungen sowie das Fertigen von Langlöchern.

3 Technologische Untersuchungen

Die technologischen Untersuchungen zur Fräsbearbeitung mit dem Ultraschall-Aktorsystem wurden an zwei unterschiedlichen Werkstoffen durchgeführt. In einem ersten Schritt erfolgte die Bearbeitung eines thermoplastischen glasfaserverstärkten Kunststoffs, anschließend wurde ein duroplastischer CFK-Werkstoff bearbeitet. Beide Werkstoffe besaßen eine Werkstoffstärke von $t = 2$ mm. Die Bearbeitung des Werkstoffs erfolgte jeweils mit

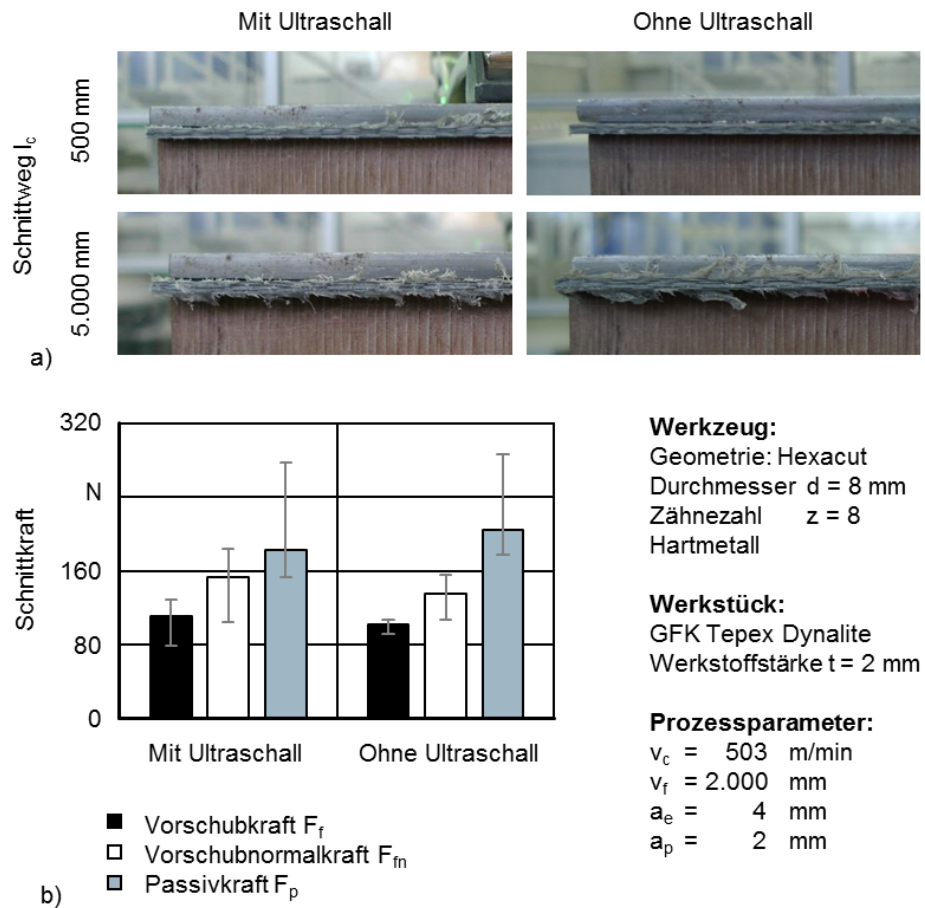


Abbildung 5: Technologische Untersuchungen am GFK-Werkstoff

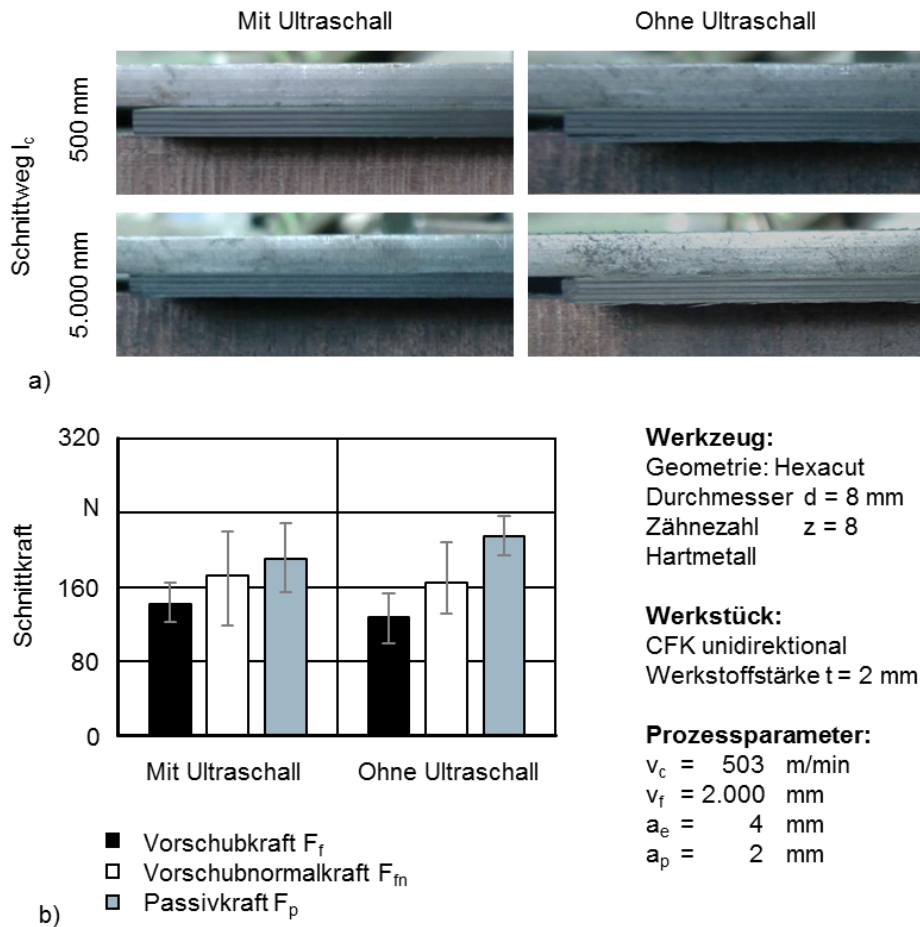


Abbildung 6: Technologische Untersuchungen am CFK-Werkstoff

konstanter Schnittgeschwindigkeit $v_c = 503$ m/min, konstanter Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 2.000$ mm/min sowie einer konstanten Schnittbreite $a_e = 4$ mm bei einer Schnitttiefe $a_p = 2$ mm. Im Rahmen der Versuche erfolgte eine kontinuierliche Messung der Zerspankraftkomponenten Vorschubkraft F_f , Vorschubnormalkraft F_{fn} und Passivkraft F_p durch eine integrierte Kraftmessensorik.

Die Bearbeitung des thermoplastischen GFK erfolgte vergleichend im ultraschallunterstützten und nicht ultraschallunterstützten Fräsprozess, um den Einfluss der Ultraschallschwingung auf das Bearbeitungsergebnis ohne sonstige Einflüsse zu beurteilen. Die Auswertung der Werkstückschnittkanten zeigt, dass weder bei der nicht ultraschallunterstützten noch bei der ultraschallunterstützten Fräsbearbeitung eine ausreichende Bearbeitungsqualität erzielt wird. Es ist dabei kein Einfluss der Ultraschallanregung auf das Bearbeitungsergebnis erkennbar. In Abbildung 5 sind beispielhaft Werkstückschnittkanten dargestellt. Als schwerpunktmäßiges Schadensbild treten Anhaftungen des thermoplastischen Matrixwerkstoffs an der Werkstückschnittkante auf. Typische

Schädigungen wie Faserüberstände oder Delaminationen können nicht aufgezeigt werden. Die Anhaftungen lassen sich im Anschluss an die Bearbeitung mechanisch entfernen, womit durch Nacharbeit industriell einsetzbare Schnittkanten erzeugt werden können. Die Auswertung der Bearbeitungskräfte zeigt nur einen geringen Einfluss der ultraschallunterstützten Fräsbearbeitung auf die betrachteten Kraftkomponenten (Abbildung 5).

Die Versuche mit dem CFK-Werkstoff zeigen hinsichtlich der vorliegenden Zerspankraftkomponenten ein ähnliches Bild. Auch hier wurde keine signifikante Reduzierung der Kraftkomponenten erreicht. Die erzeugten Werkstückschnittkanten sind allerdings bei dieser Untersuchung ohne Nacharbeit industriell einsetzbar. In Abbildung 6 sind die erzeugten Schnittkanten als Ergebnis der Fräsbearbeitung dargestellt. Auch bei der Bearbeitung von CFK ist keine Abhängigkeit der Qualität der Werkstückschnittkante von der Ultraschallunterstützung feststellbar. Bei allen Versuchen wurden weder Delaminationen, Faserüberstände noch Ausbrüche identifiziert. Dies zeigt die sehr gute Eignung der verwendeten Werkzeuge für den bearbeiteten Werkstoff.

4 Entwicklung eines Datenmanagementsystems

Unter Federführung der Beuth Hochschule für Technik wurde ein Datenmanagementsystem zur Sicherung und nachhaltigen Nutzung der Projektergebnisse entwickelt. Bereits während des Projekts sorgte das System für die permanente Verfügbarkeit aktueller Untersuchungsergebnisse und war Grundlage für fundierte Entscheidungen zur weiteren Vorgehensweise. Die anwenderfreundliche Visualisierung der Untersuchungsergebnisse unterstützte in diesem Zusammenhang die Entwicklung von Korrelationen im Gesamtsystem. Seit Projektabschluss dient das Datenmanagementsystem als Wissensspeicher für die innerbetriebliche Umsetzung der Ergebnisse und – durch seine offene Struktur – als erweiterbare Basis für Folgevorhaben im einzelnen Unternehmen sowie im Gesamtkonsortium.

Für das Datenmanagementsystem ist eine relationale Datenbankstruktur entwickelt worden, mit deren Hilfe alle Daten redundanzfrei gespeichert werden. Zusätzlich zu dieser Datenstruktur wurde die Möglichkeit geschaffen, Daten wie Bilder, Grafiken und Excel-Tabellen, die nicht in einer Zelle in Excel gespeichert werden können, abzulegen. Dafür wurde eine Ordnerstruktur zum Auslagern dieser Daten aufgebaut. Daten werden automatisch abgerufen bzw. abgelegt. Außerdem wird die Ordnerstruktur durch das Datenmanagementsystem bei Bedarf selbstständig erweitert. Um mit dem Datenmanagementsystem arbeiten zu können, wird ein Menüsystem mit Benutzeroberflächen benötigt. Im Menüsystem ist festgelegt, wie die Navigation zwischen den einzelnen Benutzeroberflächen abläuft und welche Funktionen auf den jeweiligen Benutzeroberflächen aufgerufen werden können. Entsprechend der Definition im Menüsystem sind die Benutzeroberflächen angelegt. Die Benutzeroberfläche dient sowohl zur Ein- als auch zur Ausgabe der Daten (Abbildung 7).

Ausgewertet werden die Versuche in den Kategorien Schnittkräfte, Werkzeugverschleiß, Werkstückgenauigkeit und Kantenqualität Bauteil. Exemplarisch ist nachfolgend die

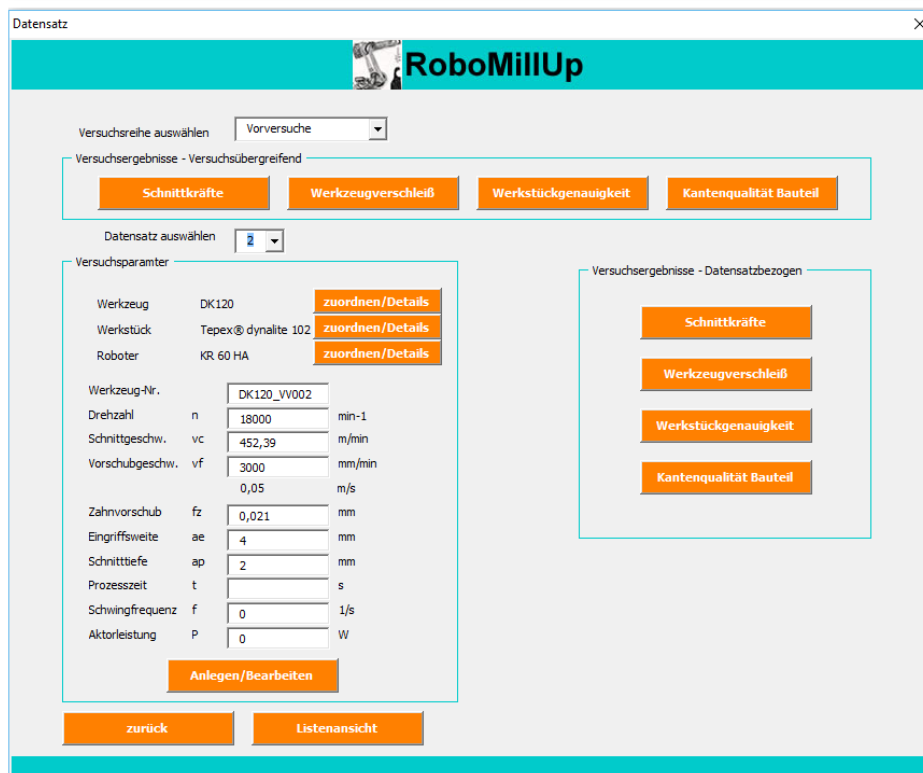


Abbildung 7: Benutzeroberfläche des Datenmanagementsystems

Auswertung des Werkzeugverschleißes dargestellt und erläutert (Abbildung 8). In den durchgeführten Versuchen ist alle 1.000 mm Schnittweg l_c der Verschleiß des Werkzeuges anhand der Verschleißmarke VB ermittelt worden. Die Verschleißmarke wird für jede Schneide des Werkzeuges ermittelt. In die Datenbank wird zur besseren Übersicht nur der jeweilige Maximalwert der Schneiden am zurückgelegten Schnittweg aufgenommen. Anhand der eingegebenen Messwerte wird durch die Datenbank ein Diagramm erstellt, welches die Verschleißmarke VB über den Schnittweg l_c darstellt.

Als weiterer Kennwert wird für jeden Versuch der durchschnittliche maximale Verschleiß aller Schneiden ($vbmax_{\varnothing}$) aufgenommen. Außerdem wird die maximale Verschleißmarkenbreite der am wenigsten verschlissenen Schneide ($vbmax_{min}$) und der am stärksten verschlissenen Schneide ($vbmax_{max}$) dokumentiert. Mit Hilfe dieser Kennwerte lassen sich die Versuche im betrachteten Versuchsbereich vergleichen.

5 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Ziel der Wirtschaftlichkeitsberechnung im Projekt RoboMillUp ist es, die die Wirtschaftlichkeit des entwickelten Zerspanprozesses zu bewerten. Zusätzlich wird auch ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Technologien ermöglicht. In diesem Zusammenhang

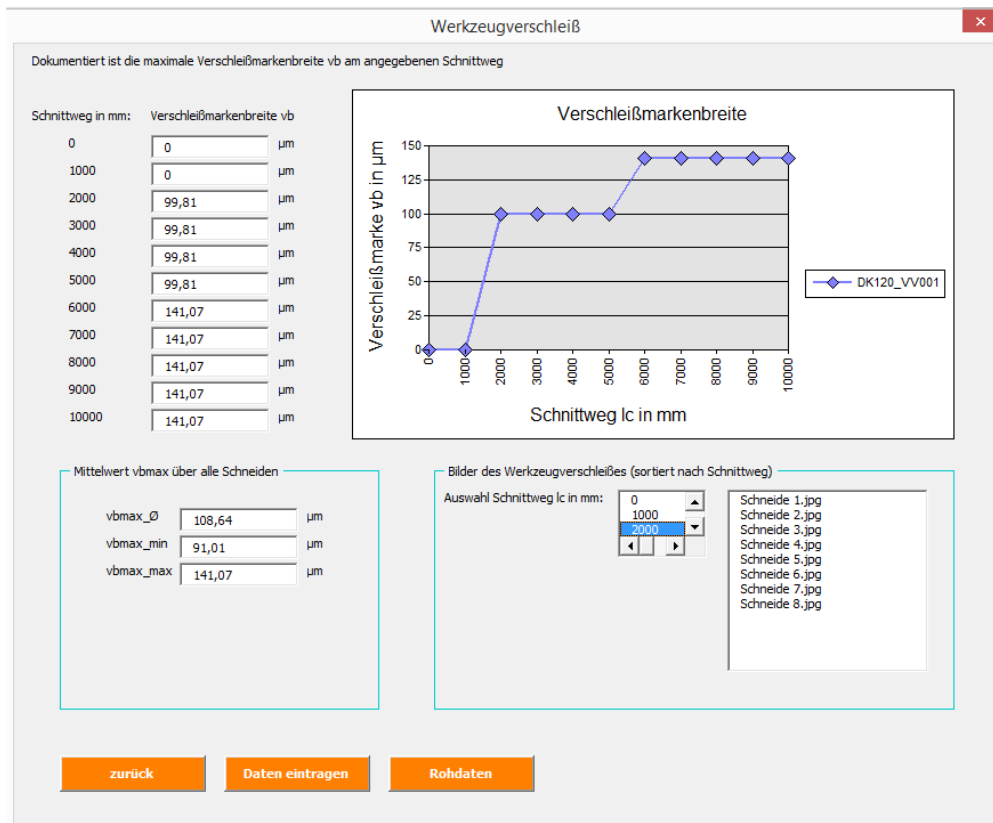


Abbildung 8: Ausgabemaske Werkzeugverschleiß

wird das oben gezeigte Datenmanagementsystem um ein Modul zur Wirtschaftlichkeitsberechnung erweitert. Die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit erfolgt auf Basis der Bestimmung der Fertigungskosten. Alle weiteren Kosten sind unabhängig von der Art der Fertigungstechnologie, damit konstant und müssen hier nicht betrachtet werden. Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit erfolgt in der Software nach der in Abbildung 9 dargestellten Grundstruktur. Der Benutzer wird durch die Berechnung geführt und kann erst zum nächsten Schritt wechseln, wenn alle notwendigen Daten eingegeben sind.

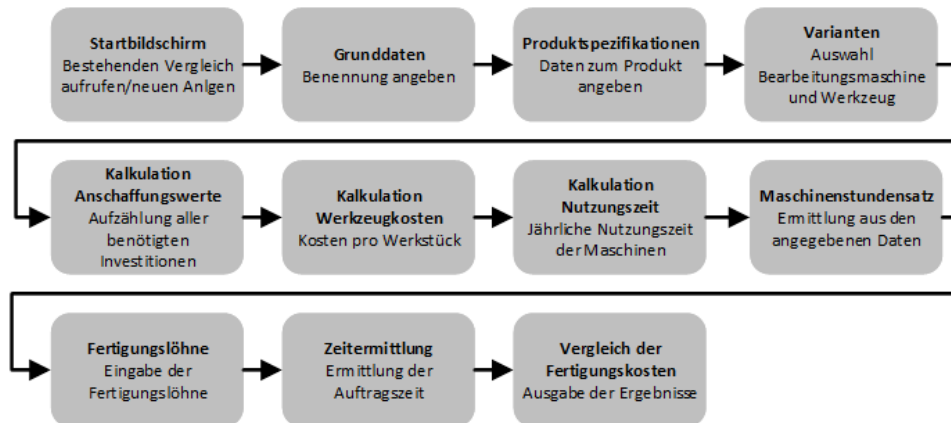


Abbildung 9: Wirtschaftlichkeitsberechnung - Grundstruktur

In der Wirtschaftlichkeitsberechnung werden zahlreiche bereits im Datenmanagementsystem verfügbare Daten genutzt. Dadurch werden Synergien zwischen der Wirtschaftlichkeitsberechnung und der bereits vorhandenen Datenbank geschaffen. Beispielhaft ist in Abbildung 10 die Benutzeroberfläche Varianten dargestellt. In dieser Benutzeroberfläche wird für die zwei zu vergleichenden Varianten die Auswahl der Bearbeitungsmaschine und des Werkzeuges getroffen. Damit wird die Kerntechnologie der jeweiligen Variante festgelegt. Die Aufteilung der Benutzeroberfläche in Variante 1 und Variante 2 ist bei allen weiteren Benutzeroberflächen ähnlich. Es werden auf jeder Benutzeroberfläche jeweils den Werten der Variante 1 die Werte der Variante 2 gegenübergestellt. Auf der Benutzeroberfläche Varianten sind zusätzlich zwei Schnittstellen zur Datenbank vorhanden. Hierbei handelt es sich um die Schnittstelle zu den in der Datenbank hinterlegten Bearbeitungsmaschinen und um die Schnittstelle zu den ebenfalls hinterlegten Werkzeugen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Ergebnis des Verbundprojekts steht am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin eine vollständig aufgebaute Roboterzelle für die ultraschallunterstützten Fräsbearbeitung bereit. Das Ultraschall-Aktorsystem sowie die Kraftmesseinheit konnte mit voller Funktionalität in das Gesamtsystem integriert werden.

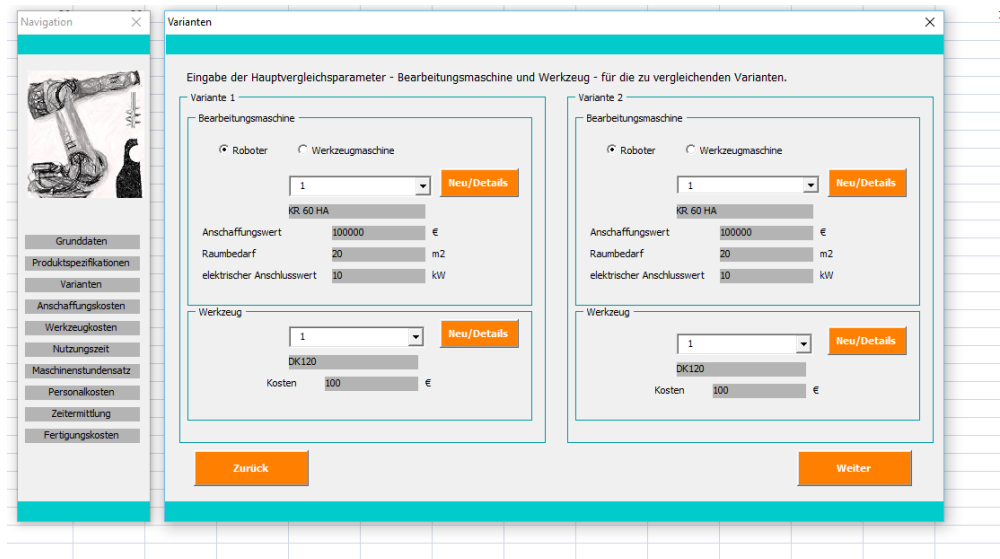


Abbildung 10: Wirtschaftlichkeitsberechnung – Varianten

Weiterhin konnten im Projekt Werkzeuge entwickelt werden, die hinsichtlich Hartmetallsubstrat, Werkzeuggeometrie und CVD-Diamantbeschichtung optimal auf die vorliegende Bearbeitungsaufgabe abgestimmt sind. Entlang der Prozesskette CAD-CAM-CNC konnten die Ergebnisse der technologischen Untersuchungen an Plattenwerkstoffen und am entwickelten Referenzbauteil evaluiert werden. Mit Blick auf die Kantenausprägung wurden beim CFK-Werkstoff vielversprechende Arbeitsergebnisse erzielt. Ein signifikanter Einfluss der Ultraschallanregung des Fräswerkzeugs auf die vorliegenden Zerspankräfte konnte aber nicht nachgewiesen werden. Das Datenmanagementsystem mit integrierter Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat bereits während der Projektlaufzeit den Erfolg des Vorhabens gestützt, nach Projektende steht das System durch seine offene Struktur nun als Grundlage für nachfolgende Projekte bereit.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde in dieser Form durch die Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung sowie durch die intensive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin, Carat robotic innovation GmbH, Dortmund, CarbonCompetence GmbH, Wattens, Österreich, Döinghaus cutting and more GmbH & co. KG, Salzkotten, G-Elit Präzisionswerkzeuge, Berlin, Huber Kunststoff & Technik GmbH, Wiedergeltingen, Hufschmied Zerspanungssysteme GmbH, Bobingen sowie Weber Ultrasonic AG, Karlsbad ermöglicht.

Literatur

- [1] E. Abele u. a. „Spanende Bearbeitung mit Industrierobotern - Thermische Einflüsse auf die Bearbeitungsgenauigkeit“. In: *wt – Werkstattstechnik online* 9 (2013).
- [2] E. Uhlmann und G. Christiansen. „Spanende Bearbeitung von Faserverbundkunststoffen - Entwicklung und Einsatz eines Ultraschallsystems für die robotergeführte Fräsbearbeitung“. In: *wt – Werkstattstechnik online* 9 (2017).
- [3] E. Uhlmann u. a. „High Speed Cutting of carbon fibre reinforced plastics“. In: *Procedia Manufacturing* 6.6 (2016).