

Data Analytics – Virtuelle Kraftsensorik zur Verschleißerkennung auf Basis von Tracedaten beim Fräsen

Zusammenfassung

Im Teilprojekt „Entwicklung neuartiger Bedienkonzepte zur Steuerung und Überwachung von digitaler Produktion“ in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt „Entwicklung eines Expertensystems zur Bewertung und Weiterentwicklung innovativer Fertigungsverfahren und Materialien“ des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Industry Software Application Center“ (ISAC@OTH) wurde an der Entwicklung einer Proof-Off-Konzept-Studie gearbeitet.

Am Ende der Untersuchung sollte klar sein, welche Möglichkeiten es gibt, die gesammelten Kraftdaten (Forcedaten), ermittelt mittels separater piezobasierter Kraftsensorik, mit den virtuellen Kraftdaten (Tracedaten), gewonnen direkt aus der Sinumerik-Steuerung einer Werkzeugmaschine, zu vergleichen. Außerdem sollte erkenntlich sein, welche Probleme auftreten können, wie diese gelöst werden können und welche Aussagekraft hinter der Bewertung der Datensätze steht.

Abstract

In the subproject “development of new user controls for the control and monitoring of digital production” in co-operation with the subproject “development of an expert system for the evaluation and further development of innovative manufacturing processes and materials” of the research and development project “Industry Software Application Center” (ISAC@OTH) a proof-off concept study was developed.

At the end of the study it should be clear which possibilities exist to compare the collected force data (force sensor data), determined by means of separate piezo-based force sensor technology, with the virtual force data (trace data), obtained directly from the Sinumerik control of a machine. In addition, it should be recognized which problems can occur, how they can be solved and what there is to say about significance of the evaluation of the data sets.

1 Einleitung

Im praktischen Einsatz sind typischerweise die Messung von Zerspanungskräften eine fachliche und organisatorische Herausforderung, da ein Versuch natürlich so nah wie möglich am Zielprozess durchgeführt und dabei das Werkstück, gespannt auf dem Kraftaufnehmer, im Bearbeitungsraum positioniert werden muss. Durch die notwendige Verbindung mit der Messelektronik und Messsoftware muss zudem ein Datenkabel derart im Bauraum der Maschine verlegt werden, dass es zu keiner Einschränkung des Bearbeitungsprozesses kommt. Dies ist insbesondere bei mehrachsigen und synchronen Bearbeitungsstrategien nicht immer ohne Einschränkung möglich. Zudem haben konventionelle Kraftmesssysteme den Nachteil, dass zum einen das

Bauteilgewicht durch seine Massenträgheit bei hohen Achsbeschleunigungen die Kraftmessung verfälscht und zum anderen Messungen, bedingt durch Hebeleffekte, nur in einem kleinen Bereich oberhalb des Messaufnehmers valide sind [1].

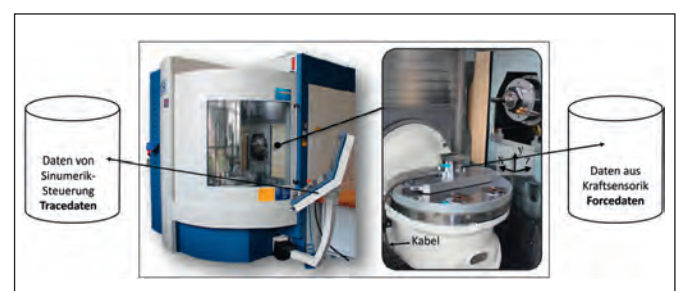


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Kraftmessung an der OTH AW [2]

Neue Messsysteme bieten durch die Nutzung von Telemetrie zur Datenübertragung den Vorteil einer größeren Flexibilität, sind jedoch bedingt durch die auftretenden Fliehkräfte bei Fräsbearbeitungen zum Bauteilschutz mit Drehzahlbegrenzungen zu betreiben [3].

Ziel der Studie ist es daher, das Potenzial einer intelligenten Analyse von verfügbaren Sensordaten der Steuerungselektronik in Werkzeugmaschinen zur Substitution von teuren sowie aufwendigen Versuchsaufbauten und Messgeräten zu bewerten. Dazu werden im ersten Schritt geeignete Versuchsdatensätze identifiziert, die Kräfte der konventionellen Messtechnik analysiert, mit den virtuell über Sensordaten berechneten Bearbeitungskräften verglichen und die Ergebnisse abschließend bewertet.

Im Rahmen einer vorangegangenen Studie wurden im Projekt ISAC@OTH verschiedene Frässtrategien zur Herstellung von Nuten detailliert untersucht [2]. Ziel war es dabei, die Einflüsse von Bearbeitungsstrategie, Werkzeug sowie Maschine auf wirtschaftliche Prozesskenngrößen wie Zeitspanvolumen und Werkzeugverschleiß beurteilen zu können.

Die dabei entstandenen Versuchs-Datensätze lassen sich vier verschiedenen Fräsprozessen bzw. -strategien zuordnen. Die Versuche mit der Bezeichnung HMILL, SCAM und SIM stehen für sogenannte trochoidale Nutfräsprozesse, welche üblicherweise in modernen CAM-Programmiersystemen Anwendung finden. Die Daten mit der Bezeichnung KONV wurden unter Verwendung einer konventionellen Vollnutbearbeitung erfasst. Bei allen Versuchen wurden, neben den Kräften und der Leistungsaufnahme mit konventioneller Messtechnik, auch die Achsdynamik während der Bearbeitung mit der sogenannten TRACE-Funktionalität der SINUMERIK Werkzeugmaschinensteuerung erfasst [2, 4]. Diese Funktion ermöglicht es, interne Sensordaten der Werkzeugmaschine während der Bearbeitung mit einer Abtastrate von bis zu 250 Hz aufzuzeichnen. Mögliche Sensordaten sind beispielsweise die Achspositionen, Geschwindigkeiten, Leistung oder Drehmoment [2, 4]. Je Fräsprozess wurden in Summe sechs Versuche durchgeführt und alle relevanten Größen bei der Nutfertigung erfasst.

2 Allgemeines

Für alle der 24 Datensätze wird ein Abgleich der konventionell gemessenen Kräfte sowie der virtuell berechneten und die Analyse der Unterschiede durchgeführt. Da beim Erheben der verschiedenen Datensätze die Signale unterschiedlich lang aufgenommen wurden, ist es notwendig, das Signal auf den relevanten Zeitbereich zu beschränken, um für den schlussendlich erwünschten Vergleich eine Aussage treffen zu können.

Durch die Konfiguration eines bestimmten Versuchsdatensatzes werden im ersten Schritt die virtuellen Kraftdaten berechnet. Anschließend wird mittels Schwell-

wererkennung das Signal auf den relevanten Teil gekürzt. Diese Selektion findet auch bei den gemessenen Kraftdaten statt. Mithilfe der normalisierten Kreuzkorrelation (NCC) [5] werden die zeitlichen Unterschiede (Lags) bei der Aufnahme der Daten wieder ausgeglichen.

Diese beiden neuen Datensätze, die konventionell gemessene Kraft sowie die Trace-Daten dienen als Ursprung für die Berechnung. In einem abschließenden Schritt wird nun verglichen, wie ähnlich die beiden Kraft-Datensätze zueinander sind. Mithilfe von Jupyter Notebook und Python werden diese Daten in den folgenden Schritten verarbeitet.

2.1 Aufbereitung der Tracedaten

Nach dem Import eines Trace-Datensatzes muss die relevante Prozesskraft durch ein physikalisches Kraftmodell anhand der vorhandenen Trace-Signale abgebildet werden. Im ersten Schritt ist es hierbei erforderlich, ein für die Kraftbestimmung geeignetes Sensorsignal der Trace-Datensätze zu identifizieren. Die Trace-Funktionalität bietet die Möglichkeit, Drehmomente der Achsantriebe sowie der Bearbeitungsspindel zu erfassen. Insbesondere das Spindeldrehmoment eignet sich hierbei ideal als Ausgangsgröße für die Berechnung der Prozesskräfte. Der durch das Werkzeug vorgenommene Materialabtrag spiegelt sich zum einen durch die eingreifenden Schneiden im Werkstück, am Kraftaufnehmer und zum anderen im, für den Materialabtrag, notwendigen Drehmoment der Spindel wieder. Zuzüglich zum daraus resultierenden Prozessdrehmoment ist jedoch außerdem ein Drehmomentanteil enthalten, welcher für die Überwindung der Reibung sowie Trägheitseffekte in der Spindel erforderlich ist. Demnach lässt sich das Spindeldrehmoment wie folgt interpretieren:

$$M_{\text{Spindel}} = M_{\text{Fräsen}} + M_{\text{Reibung}}$$

Der durch Reibung und Trägheitseffekte verursachte Anteil des Drehmomentsignals kann durch die Differenz der mittleren Drehmomentabweichung zwischen laufender Spindel mit und ohne Werkzeugeingriff im Signal kompensiert werden. Anschließend kann über das Drehmomentanteil für das Fräsen die dabei wirkende resultierende Kraft über den Werkzeugradius berechnet werden.

$$F_{\text{res,Trace}} = \frac{M_{\text{Fräsen}}}{r_{\text{Fräser}}}$$

Bei der konventionellen Kraftmessung der Zerspanungsprozesse wurden, wie technisch üblich, die x, y und z-Komponenten der auf ein Werkstück, bedingt durch den Materialabtrag, wirkenden Kräfte erfasst. Diese Signale können nicht ohne eine zusätzliche Weiterverarbeitung mit der resultierenden Kraft aus dem Trace-Signal verglichen werden. Die x- und y-Komponenten der Messsignale können als von der Werkzeugschneide beim Spanabtrag auf das Werkstück

wirkende Kräfte interpretiert werden. Die daraus berechenbare resultierende Kraft $F_{res, meas}$ kann auch als Aktivkraft bezeichnet werden [6]. Unter der vereinfachenden Annahme, dass die Aktivkraft zu jedem Zeitpunkt in guter Näherung tangential zum Werkzeugdurchmesser verläuft, kann somit ein Drehmoment durch die auf der xy-Ebene wirkenden Kräfte (vgl. Abbildung 2), berechnet werden.

$$F_{res, xy} = \sqrt{F_{x, meas}^2 + F_{y, meas}^2}$$

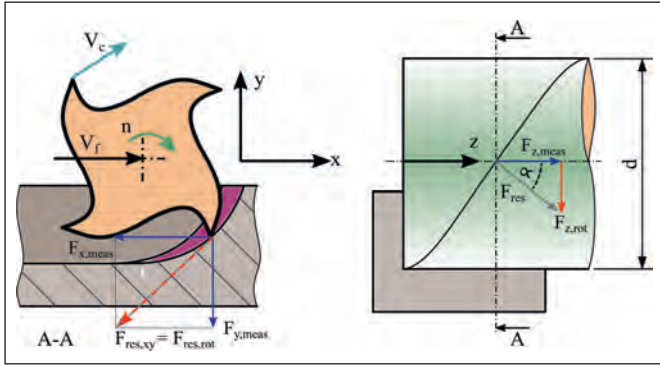


Abbildung 2: Messung und Interpretation der wirkenden Prozesskräfte

Bedingt durch eine spiralförmige Schneidenausprägung von Fräswerkzeugen wirken beim Zerspanungsprozess ebenfalls Kräfte in axialer Werkzeugrichtung (z-Richtung). Je nach Steigungswinkel (im vorgestellten Fall 38°) der Werkzeugschneide kann auch aus der dieser Kraftkomponente eine Tangential am Werkzeugdurchmesser wirkende und die resultierende Gesamtkraft beeinflussende Kraftkomponente $F_{z, rot}$ (vgl. Abbildung 3) berechnet werden.

$$F_{z, rot} = F_{z, meas} \tan \alpha$$

$$F_{res, meas} = \sqrt{F_{res, xy}^2 + F_{z, rot}^2}$$

Gegenüberstellung: $F_{res, trace} = F_{res, meas}$

Die Zusammenführung der beiden tangential wirkenden und aus den Messdaten der konventionellen Versuche berechneten Kraftkomponente bilden abschließend die Kraft, welche mit den Kraftdaten aus der Trace-Daten-Analyse verglichen werden kann. Da die Abtastraten der Mess- und Trace-Daten unterschiedlich sind, musste anschließend noch ein Resampling (lineare Interpolation auf 2 ms) durchgeführt werden, um die virtuellen Kraftdaten direkt vergleichen zu können. Ohne diesen Vorgang könnte sonst nicht zu jedem Zeitpunkt ein Vergleich zwischen den beiden Datensätzen durchgeführt werden.

2.2 Interpretation des aufbereitenden Datensatzes

Man kann den Datensätzen auf den ersten Blick entnehmen, dass sie sich ähnlich sehen, aber nicht gleich sind. Das ist auf die genaueren Sensordaten der Kraftmessung

zurückzuführen. Ebenso kann man den so gewonnenen Daten entnehmen, dass sie sich ähnlich genug sind, um zu erkennen, wann das Werkzeug ein- und wieder austritt.

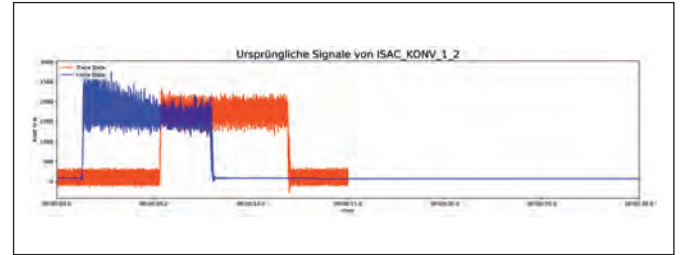


Abbildung 3: Nicht synchronisierte Trace- (rot) und Forcedaten (blau)

3 Selektion des relevanten Signals und Erkennung der Lags

Standardmäßig lagen in den Messdaten zeitliche Verschiebungen (Lags) vor, die korrigiert werden mussten, bevor ein weiterer Vergleich stattfinden kann. Außerdem wurde nur der relevante Teil des Signals der jeweiligen Messung (Signalabschnitt zwischen Anstieg und Abstieg) selektiert. Um nur die relevanten Signale miteinander zu vergleichen, wird als Erstes betrachtet, welcher Teil des Signals relevant für den aktuellen Vergleich ist. Relevant ist der Übergang vom Low- zum High-Signal und wieder zurück. Diese Signalabschnitte sollen später für einen Vergleich genutzt werden.

Um das relevante Signal selektieren zu können, berechnet man den Mittelwert aus den Höchst- und Tiefstwerten des jeweiligen Signals. Sobald ein Wert diesen Schwellwert das erste Mal überschreitet, zählt das Signal als relevant und bleibt relevant, bis es das letzte Mal diesen Schwellwert überschritten hatte. Danach ist das Signal für den Vergleich nicht mehr von Bedeutung. Um das Signalrauschen zu reduzieren wird zusätzlich ein gleitender Durchschnitt [7] verwendet.

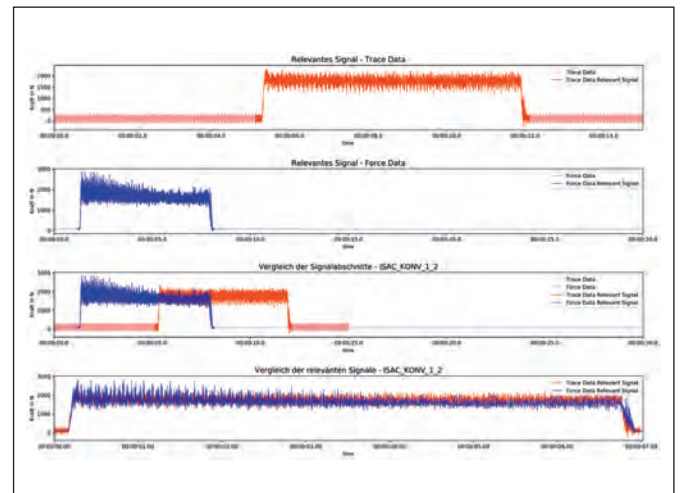


Abbildung 4: Selektion relevanter Signale mit Schwellwertalgorithmus

4 Korrektur der Lags mit der normalisierten Kreuzkorrelation

Nachdem die relevanten Signale selektiert wurden, kann jetzt die Feinjustierung der zeitlichen Verschiebung beginnen. Anhand der grob nach dem Schwellwert selektierten, relevanten Signale kann man erkennen, dass diese bereits relativ gut zu passen scheinen. Mithilfe der normalisierten Kreuzkorrelation ist es jedoch möglich, diese Signale noch etwas besser zu positionieren, indem man zu jeder Verschiebung die Korrelation zwischen den beiden Signalen berechnet und die Verschiebungsvariante mit der höchsten Korrelation verwendet.

Mithilfe der mittleren quadratischen Abweichung [8] konnte festgestellt werden, um wie viel Prozent das Signal mithilfe der normalisierten Kreuzkorrelation im Vergleich zur ursprünglichen Selektion des relevanten Signals die zeitliche Verschiebung verbessert werden konnte.

5 Ergebnis und Ausblick

Insgesamt wurde erarbeitet (vgl. Abbildung 5), dass mithilfe der normalisierten Kreuzkorrelation zwar meist eine Verbesserung erreicht wurde, diese sehr oft aber minimal ausfiel. In den Fällen, in denen mit der Verschiebung anhand der Kreuzkorrelation die Korrelation erheblich verbessert werden konnte, lag das an Testdaten, die nicht dem erwarteten Muster eines Überganges von einem Low- zum High-Signal entsprachen. Dieses erwartete Muster könnte in Zukunft aber noch verbessert werden, indem der Algorithmus angepasst wird, um diese Ausnahmen abfangen zu können. Dadurch lässt sich, mit der Möglichkeit des Verzichts auf die normalisierte Kreuzkorrelation, eventuell ein Performancegewinn erzielen.

Außerdem wurde erkannt, dass je nach Fräsprozessprogrammmodell die Korrelation zwischen Trace- und Forcedaten an unterschiedlichen Mittelwerten liegen. Das lässt sich den unterschiedlichen Frequenzen sowie dem teilweise schwer vergleichbaren Rauschen der Tracedaten

zuordnen. Für die präzise Kraftmessung ist dementsprechend die externe Kraftsensorik von Vorteil, dennoch gibt es klare Anwendungsfälle für die Verwendung der virtuellen Kraftsensorik. Ohne aufwendige Installation und Verdrahtung im Bauraum, die gerade beim 5-Achsfräsen Probleme bereitet, kann auf relativ teure Messsensorik verzichtet werden und es erübrigt sich die Problematik der Massenträgheitsmomente, die die Ergebnisse verzerren. Darüber hinaus stehen bei den Tracedaten zusätzliche Informationen, wie die Spindeldrehzahl und die Position der Vorschubachsen zur Verfügung, die weitere Möglichkeiten zur Nutzung der Daten eröffnen. Als Beispiel dafür konnte aus den Tracedaten auch ein Werkzeugbruch mittels des Drehzahlsignals der Hauptspindel erkannt werden.

Mittels der ohnehin vorhandenen Sensordaten der Steuerungselektronik in Werkzeugmaschinen können die Eingriffszeiten der Werkzeuge und deren Belastung in der Fräsmaschine näherungsweise gut berechnet und daraus folgend deren Abnutzung protokolliert werden.

	name	duration_relevant_signal [sec]	mse_before_ncc	mse_after_ncc	mse_improvement	correlation
0	ISAC_HMILL_1_1	85	12008	12008	-0.03	0.34
1	ISAC_HMILL_1_2	85	11216	11216	0.00	0.33
2	ISAC_HMILL_2_1	85	11896	11896	0.00	0.34
3	ISAC_HMILL_2_2	85	11183	11183	0.45	0.34
4	ISAC_HMILL_3_1	85	11972	11972	0.00	0.34
5	ISAC_HMILL_3_2	85	11329	11329	-0.04	0.34
6	ISAC_KONV_1_1	7	52117	52117	-4.03	0.70
7	ISAC_KONV_1_2	7	50489	50489	1.39	0.71
8	ISAC_KONV_2_2	6	128433	128433	-58.21	0.44
9	ISAC_KONV_3_1	6	175409	175409	-23.67	0.24
10	ISAC_SCAM_1_1	289	46561	46561	0.07	0.19
11	ISAC_SCAM_1_2	289	45315	45315	-0.04	0.21
12	ISAC_SCAM_2_1	289	47986	47986	0.30	0.19
13	ISAC_SCAM_2_2	290	44244	44244	0.23	0.21
14	ISAC_SCAM_3_1	289	47706	47706	0.24	0.20
15	ISAC_SCAM_3_2	289	45082	45082	0.20	0.22
16	ISAC_SIM_1_1	77	10307	10307	0.06	0.27
17	ISAC_SIM_1_2	77	10315	10315	0.35	0.27
18	ISAC_SIM_2_1	77	10214	10214	0.69	0.27
19	ISAC_SIM_2_2	77	10189	10189	0.61	0.27
20	ISAC_SIM_3_1	77	10632	10632	1.49	0.27
21	ISAC_SIM_3_2	77	10286	10286	0.20	0.27

Abbildung 5: Korrelation und Effektivität der NCC beim Signalvergleich aller Versuchs-Datensätze

Referenzen:

- [1] Kistler Instrumente AG, 1993, Winterthur Quarzkristall-4-Komponenten-Dynamometer Typ 9272. Betriebsanleitung
- [2] C. Haller, 2014, Amberg, Optimierung von Frässtrategien auf Basis von wirtschaftlichen und energetischen Kennzahlen – Masterarbeit an der OTH Amberg-Weiden
- [3] pro-micron GmbH, spike Technologie, Zerspankraft messen, drahtlose Datenübertragung, Online verfügbar unter: <https://www.pro-micron.de/spike/technologie/>, Zugegriffen am: 25.08.2019
- [4] SIEMENS AG, 2005, Erlangen, SINUMERIK 840d sl SinuCom NC: Inbetriebnahme-/Service-Tool, Systemhandbuch
- [5] M. N. O. Sadiku, S. M. Musa und S. R. Nelatury, 2014, Correlation: A Brief Introduction, International Journal of Electrical Engineering & Education, Jg. 51, Nr. 2, S. 93–99

- [6] E. Paucksch, 2008, Wiesbaden, Zerspantechnik. 12. Aufl., Vieweg+Teubner Verlag
- [7] S. W. Smith, 1997, The scientist and engineer's guide to digital signal processing, 1. Aufl. San Diego, Calif.: California Technical Publ
- [8] Will Kurt, A Deeper look at Mean Squared Error, Online verfügbar unter: <https://www.countbayesie.com/blog/2019/1/30/a-deeper-look-at-mean-squared-error>, Zugriffen am: 14.08.2019

Fördergeber:

Initiative BAYERN DIGITAL



Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Blöchl

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

w.bloechl@oth-aw.de



Prof. Dr. Dieter Meiller

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

d.meiller@oth-aw.de



Christoph Haller, M.Eng.

Siemens Healthcare GmbH
Mechatronic Products
Technology Planning
SHS MP KEM MC MA TP
Röntgenstraße 19-21
95478 Kemnath

haller.christoph@siemens-healthineers.com



Veit Stephan, M.Eng.

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

v.stephan@oth-aw.de



Stephan Prettnner

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

s.prettnner@oth-aw.de