Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–05–56

Ergebnisse aus der experimentellen Ermittlung von Stabilitätskarten

Effiziente Ermittlung dynamischer Prozessgrenzen

C. Brecher, R. Klimaschka, S. Neus

ZUSAMMENFASSUNG Die Produktivität zerspanender Fertigungsprozesse wird heutzutage nach wie vor maßgeblich durch dynamische Prozessinstabilitäten limitiert. Eine a priori Ermittlung dieser Grenzen ermöglicht einen hauptzeitminimierenden Fertigungsprozess, ist jedoch unter Nutzung konventioneller Verfahren mit wesentlichen Zeit- und Materialaufwänden verbunden. Dieser Beitrag stellt Forschungsergebnisse vor, die diese Aufwände um circa 85 % reduzieren.

STICHWÖRTER

Werkzeugmaschinen, Fräsen, Messtechnik

Efficient determination of dynamic process limits

ABSTRACT Nowadays, the productivity of machining production processes is still significantly limited by dynamic process instabilities. An a priori determination of these limits enables a main time minimizing manufacturing process. However, conventional determination methods are associated with significant time and material effort. This article presents research results reducing this effort by approximately 85 %.

1 Einleitung

Moderne Fertigungsprozesse müssen stetig steigenden Anforderungen an ihre Produktivität, Produktqualität und Ressourceneffizienz genügen. Für die zerspanende Bearbeitung metallischer Werkstücke führt die Maximierung des Zeitspanvolumens zu einem Ausreizen der Prozessgrenzen, welche häufig nicht durch die erreichbare Hauptspindelleistung einer Werkzeugmaschine, sondern durch das Auftreten dynamischer Prozessinstabilitäten in Form von Ratterschwingungen begrenzt wird [1]. Verbleibende Oberflächenmarken, erhöhter Werkzeugverschleiß, plötzlicher Werkzeugbruch oder gar Spindelschäden können Folgen einer ratterintensiven Bearbeitung sein, die zu unzureichenden Toleranzen und letztlich zu höheren Ausschussraten führt [2]. Ein effizienter Ressourceneinsatz der im Unternehmen verfügbaren Fertigungskapazitäten sowie der benötigten Eingangsmaterialien kann somit nicht gewährleistet werden. Die Kenntnis der dynamischen Stabilitätsgrenzen trägt hingegen zu einer Prozessauslegung bei, welche die eingangs genannten Zielgrößen Produktivität, Produktqualität und Ressourceneffizienz optimiert.

Stabilitätskarten zeigen den nicht linearen Zusammenhang der Prozessparameter Schnitttiefe *ap* und Spindeldrehzahl *n* grafisch. Für ihre Ermittlung kann auf simulative wie auch experimentelle Ansätze zurückgegriffen werden. Für das simulative Vorgehen sind einschlägige, analytische Modelle nötig, die auf umfänglichen Frequenzgangmessungen der dynamischen Interaktion zwischen Werkzeug und Maschine sowie unsicherheitsbehafteten Annahmen zu Schnittkraftkoeffizienten und Materialverhalten beruhen [3]. Die resultierenden Abweichungen machen Simulationen primär zur ersten Abschätzung der Stabilitätsgrenzen anwendbar. Im Gegensatz dazu bilden experimentelle Ansätze die realen Prozessgrenzen ab, sind allerdings in ihrer Durchführung mit einem erheblichen Zeit- und Materialaufwand verbunden. Aufgrund der beschriebenen Herausforderungen bleibt das Potenzial von Stabilitätskarten in der Praxis oftmals gänzlich ungenutzt.

Um Industrieunternehmen zukünftig umfassend zu befähigen, belastbare dynamische Grenzen in der Prozessauslegung auch für die Mittel- bis Kleinserienfertigung zu berücksichtigen, stellt der Beitrag eine automatisierte und standardisierte Methode vor, die den experimentellen Aufwand für die A-priori-Ermittlung von Stabilitätskarten signifikant reduziert [4]. Zudem wird die Erweiterung der zugrundeliegenden, sensorbasierten Rattererkennung auf hochfrequente Ratterschwingungen sowie der Einsatz maschinellen Lernens zur Bewertung der Prozessstabilität aufgezeigt.

Da sich die Gültigkeit berechneter oder experimentell ermittelter Stabilitätskarten auf das jeweils betrachtete System aus Werkzeug, Werkstück und Maschine sowie die vorherrschenden Randbedingungen bezieht, werden anschließend Ergebnisse der Untersuchung statistischer und deterministischer Einflussgrößen für das Stabilitätsverhalten mithilfe der effizienten Methode präsentiert.

2 Automatisierte Stabilitätskartenermittlung

In der Literatur existieren zahlreiche Ansätze zur Reduktion des Versuchsaufwands a priori ermittelter experimenteller Stabilitätskarten. Grundidee ist die Steigerung der gesammelten Stabilitätsinformationen während eines Schnitts. In [5] wird eine Methode vorgestellt, in welcher die Schnitttiefe während eines Vollnutenschnitts durch eine Anstellung des Werkstücks kontinuierlich erhöht wird. Das Konzept wird in [6] weiter untersucht,

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

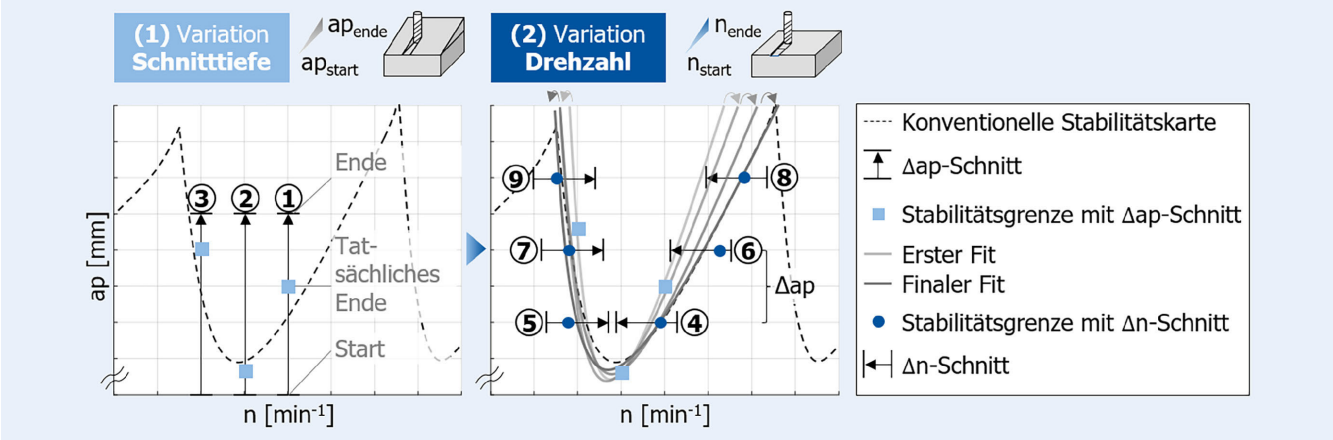

Bild 1. Strategie zur Anpassung der Schnittparameter. *Grafik: WZL*

mit dem Ergebnis, dass ein größerer Anstellwinkel zu einer erhöhten Abweichung von konventionell ermittelten Prozessgrenzen führt. Hintergrund ist, dass so der Unterschied zwischen dem Maximum und Minimum der effektiven Schnitttiefe einer Werkzeugschneide während einer Fräserumdrehung größer und damit der Rückschluss auf das eigentliche stabilitätskritische *ap* erschwert wird. Eine kontinuierliche Veränderung der Spindeldrehzahl entlang eines Schnitts wird in [7] vorgestellt. Die Schnitttiefe und der Vorschub pro Zahn werden dabei konstant gehalten. Nachteilig an diesem Ansatz ist, dass ohne initiale Kenntnis der Stabilitätskarte eine Vielzahl durchgehend stabiler Schnitte nicht ausgeschlossen werden kann bis die kritische Schnitttiefe erreicht ist. Dieser Nachteil ist beim Verfahren mit steigender Schnitttiefe nicht gegeben.

Die in diesem Beitrag vorgestellte effiziente Methode kombiniert Schnitte steigender Schnitttiefe und variierender Drehzahl, um die Vorteile beider Ansätze zu nutzen und die jeweiligen Schwächen zu kompensieren. Wie in **Bild 1** auf der linken Seite dargestellt, beginnt das Prinzip mit einem Schnitt steigender Schnitttiefe bis zur erstmaligen Instabilitätsdetektion. Analog werden in der Folge weitere Schnitte durchgeführt, bis der Scheitel des Rattersacks identifiziert wird. Im Optimalfall sind hierfür lediglich drei Schnitte erforderlich.

Um die Stabilitätsgrenzen zum einen feiner aufzulösen und zum anderen Schnitte mit höheren Zustellungen materialsparend auszulegen, werden im Anschluss Schnitte mit Spindeldrehzahlvariation durchgeführt. Die dafür erforderlichen Start- und Enddrehzahlen sowie Schnitttiefen werden auf Basis eines gefitteten Stabilitätsgrenzverlaufs festgelegt (Bild 1, rechts). Grundlage für den Fit ist die analytische Beschreibung der kritischen Schnitttiefe gemäß des Ratterregelkreises [8].

Der geschlossene Ratterregelkreis umfasst die Maschinennachgiebigkeit im Vorwärtszweig und den Schnittprozess in der Rückkopplung. Das gerichtete dynamische Nachgiebigkeitsverhalten der Maschine wird im hier vorgestellten Ansatz als PT2-Glied angenähert. Die zugrundeliegenden Systemkennwerte werden in einem unbekannten Vektor $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ beschrieben, der die spezifische Schnittsteifigkeit über x_1, die Federsteifigkeit über x_2, die Eigenfrequenz über x_3 und die Dämpfung über x_4 berücksichtigt. Für die Schnitttiefe *f(n)* folgt:

$$f(n) = \left(2 \cdot x_1 \cdot \left| Re\left\{ \left(\frac{x_2}{\frac{i \cdot n^2}{x_3} + x_4 \cdot \frac{i \cdot n}{x_3} + 1} \right) \right\}_{neg} \right| \right)^{-1} \quad (1)$$

Mithilfe einer Optimierungsrechnung wird der unbekannte Vektor x so bestimmt, dass der Fehler zwischen *f(n)* und den bis dahin ermittelten Punkten auf ein Minimum reduziert wird.

Die Optimierung erfolgt unter Nutzung des Levenberg-Marquardt-Algorithmus. Ausgehend vom Scheitelpunkt werden nun abwechselnd Schnitte auf der rechten und linken Flanke des Rattersacks durchgeführt. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis Schnitte wiederholt im instabilen Bereich starten. Aufgrund der charakteristisch spitz zulaufenden Rattersäcke wird hierdurch absolute Instabilität indiziert.

Darüber hinaus basiert die entwickelte Versuchsmethodik auf der Automatisierung des Ablaufs. Der geschlossene Wirkkreis in **Bild 2** aus Werkzeugmaschine, Messtechnik und externer Auswerteeinheit ermöglicht eine Ermittlung der dynamischen Prozessgrenzen ohne manuelle Interaktion.

Sobald ein Stabilitätsübergang detektiert wird, erfolgt ein Vorschubstopp, das Werkzeug schneidet sich frei und die Spindel verfährt in sichere Halteposition. Die Eingangsgrößen für die zugrundeliegende sensorbasierte Rattererkennung werden mittels Messhardware der Firma National Instruments prozessparallel aufgezeichnet. Sobald Rattern detektiert wird, erfolgt ein Vorschubstopp, indem ein Signal an eine steuerungsseitige digitale Input-/Output-Schnittstelle gesendet wird. Für eine Siemens „840D sl“ kann beispielsweise die Schnittstelle X132 gewählt werden. Die Parameter des darauffolgenden Schnitts (unter anderem Drehzahl, Schnitttiefe, Vorschub, X-, Y-, Z-Offset) werden gemäß der zuvor beschriebenen Strategie neu berechnet und in Form von R-Parametern über eine Kommunikationsschnittstelle (zum Beispiel Siemens X127) der Steuerung übergeben. Dort werden die Größen in ein vorprogrammiertes und flexibel parametriertes NC-Programm eingebettet. Die Freigabe für die nächste Iteration wird ebenfalls über die bereits erwähnte Digitalschnittstelle erteilt. Das parametrierte NC-Programm muss bei veränderlicher Maschinenkinematik ebenfalls angepasst werden. Aktuell erfolgt dies manuell, wobei eine zukünftige Einbindung in CAM-Systeme angestrebt wird.

Um den Einfluss einer zusätzlichen Schnitttiefenmodulation durch verbleibende Oberflächenmarken zu vermeiden, wird die

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

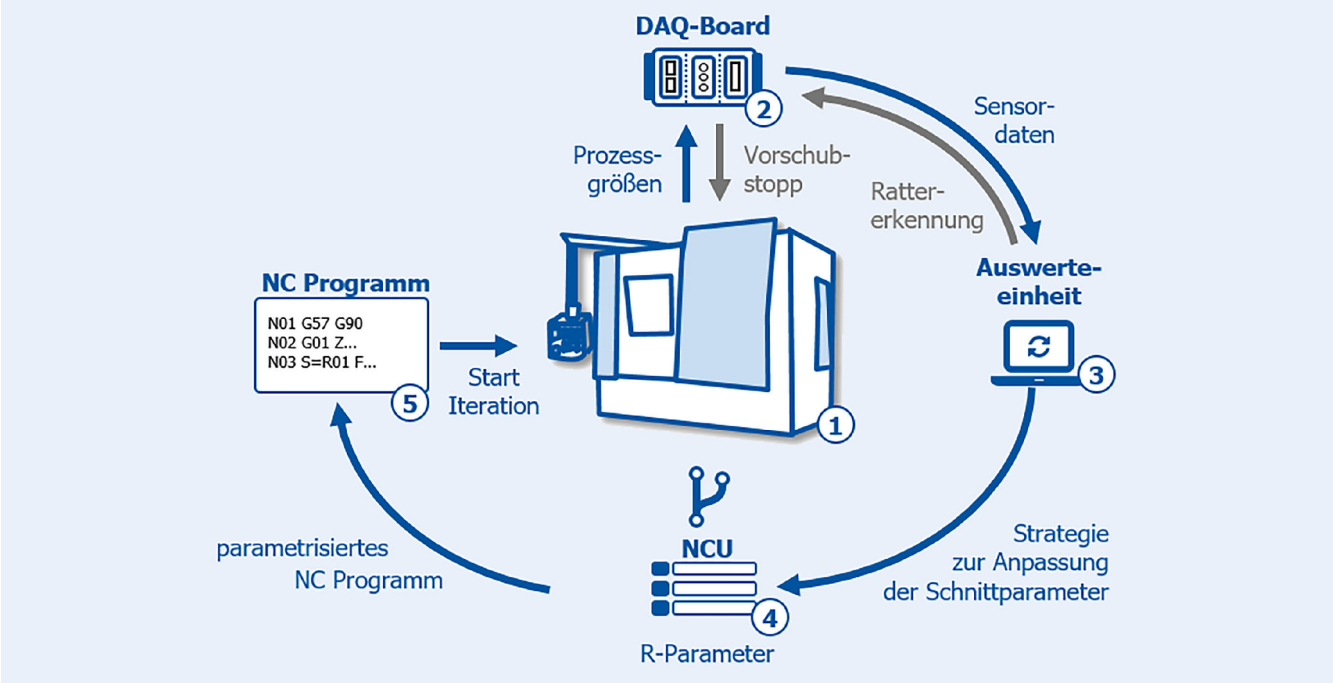

Bild 2. Wirkkreis der automatisierten Stabilitätskartenermittlung. *Foto: WZL*

Nut nach einem gefundenen Stabilitätsübergang geplant. Da die vorgestellte Methode darauf basiert, dass zu Beginn keinerlei Stabilitätsinformationen vorliegen und die resultierenden Schnitte dadurch hochgradig variabel sind, wird ein digitaler Schatten des Werkstücks eingebunden, um den momentanen Bearbeitungszustand abzufragen. Im Sinne einer selbstoptimierenden Maschine werden für die Planschnitte auch die bis dahin ermittelten sicherstabilen aber produktivsten Bereiche ausgenutzt. Sofern nach Detektion eines Stabilitätsübergangs noch ausreichend Werkstücklänge in der Nut vorhanden ist, erfolgt der Planvorgang nur bis zu diesem Punkt, damit die restliche Nut für einen weiteren Schnitt genutzt werden kann. Dieses Vorgehen dient der zusätzlichen Materialreduktion im Versuchsablauf.

3 Erweiterung zeitbereichsbasierter Rattererkennungsalgorithmen

Grundlage für die automatisierte Versuchsmethodik ist ein sensorbasierter und robuster Rattererkennungsalgorithmus. Das Poincaré-Schnittverfahren bewertet die Wiederholbarkeit von Verlagerungstrajektorien während einer Fräserumdrehung mithilfe von Bisektionspunkten. Ein auf dem Spindelgehäuse platzierter, gekapselter Beschleunigungssensor nimmt Schwingungssignale prozessparallel auf. Um aussagekräftige Eingangssignale für die Rattererkennung zu erzeugen, werden die Rohsignale gemäß [9] und [10] vorverarbeitet. Verlagerungen liefern danach robustere Ergebnisse als Beschleunigungen, weshalb das Rohsignal doppelt integriert und 50 Hz hochpassgefiltert wird.

Zudem findet nach der ersten Integration eine lineare und nach der zweiten Integration eine periodische Regression statt, wodurch das Signal von Offsets und Trends bereinigt wird. Durch das abgegriffene Encoder-Signal der Spindel werden Winkellagen gemessen, an denen die Bisektionspunkte, also die momentane X- und Y-Verlagerung, nach der jeweiligen Spindelumdrehung bestimmt werden. Die Streuung dieser Punkte relativ zur Gesamttrajektorie definiert den verwendeten Bisektionsindikator (BI). Dieser wird alle 0,1 s berechnet und anhand verschiedenen Kriterien (zum Beispiel sprung- oder trendhafter Anstieg) hinsichtlich Rattern bewertet.

Für niederfrequente Ratterfrequenzen infolge von Strukturmoden lieferte dieser Indikator zuverlässige Ergebnisse [11]. Für hochfrequente Ratterschwingungen traten jedoch Abweichungen auf. Dies wird in **Bild 3** beispielhaft demonstriert an einem Schnitt mit steigender Drehzahl von 3030 – 3130 min^{-1} sowie einer Schnitttiefe von 1,7 mm. Als Werkzeug wurden ein dreischneidiger Messerkopf mit 25 mm Durchmessung, als Werkstück ein C45-Stahlblock und als Versuchsmaschine eine doppelspindlige Vertikal-Fahrständermaschine mit fünf Achsen verwendet.

Nach initialem Anstieg, bedingt durch den Eintritt in das Werkstück, zeigte der blau dargestellte BI keine Änderung zwischen stabiler und instabiler Bearbeitung, wobei letztere ab circa t = 14,4 s eintrat. Die prozesskraftbedingt vorherrschende Grundschwingung blieb an der Messposition auf dem Spindelgehäuse aufgrund der geringen Amplitude der überlagerten hochfrequenten Werkzeugschwingung folglich wiederholbar. Dies lässt sich auf das Übertragungsverhalten zwischen Tool Center Point (TCP) und Messstelle zurückführen. **Bild 4** zeigt das Frequenzspektrum des stabilen (1) und instabilen (2) Bereichs.

Während das Spektrum der stabilen Bearbeitung vor allem durch die Zahneingriffsfrequenz sowie deren Harmonische bestimmt wird, stieg die Beschleunigungsamplitude gemäß der Charakteristik selbsterregter Schwingungen mit dem Eintritt in den instabilen Bereich sprunghaft an. Die Ratterfrequenz lag bei 1367 Hz. Zudem waren Rattermarken infolge der hochfrequenten Prozessinstabilität visuell erkennbar (Bild 4, rechts).

Im Bereich der Ratterfrequenz besitzt das untersuchte System eine dominante Eigenfrequenz. Die größte Amplitude erfährt das System bei dieser Frequenz in Y-Richtung, was sich mit dem Beschleunigungssignal aus Bild 3 deckt. Die relevante Schwin-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

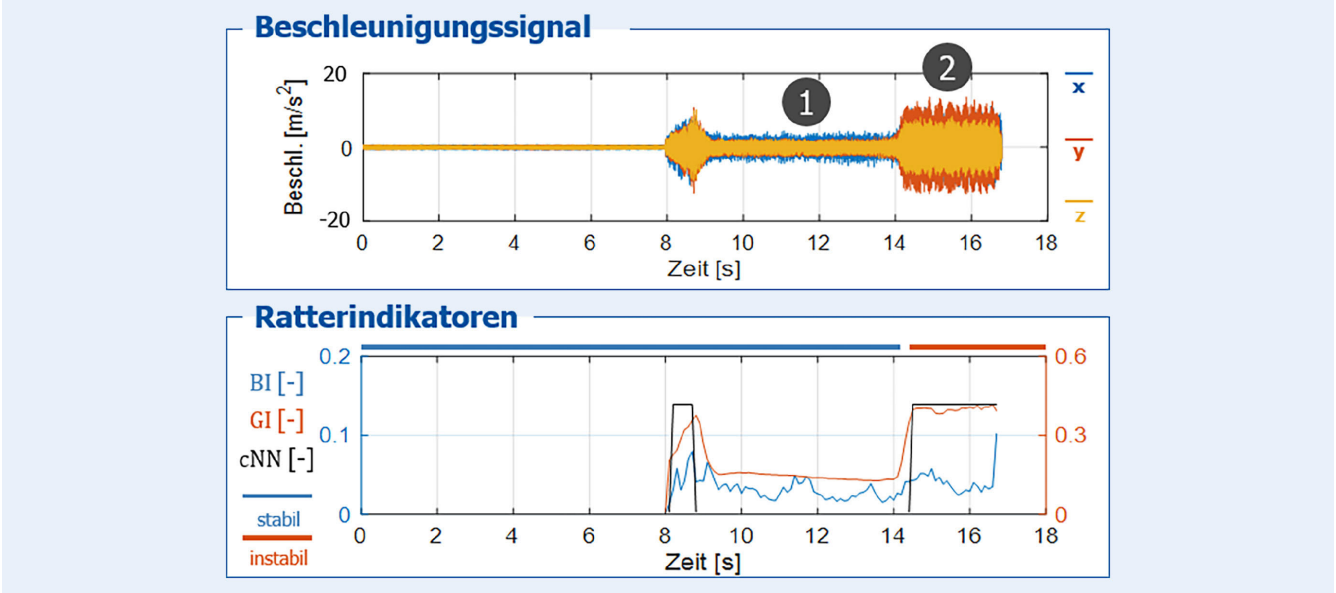

Bild 3. Rattererkennung bei hochfrequenten Schwingungen. *Grafik: WZL*

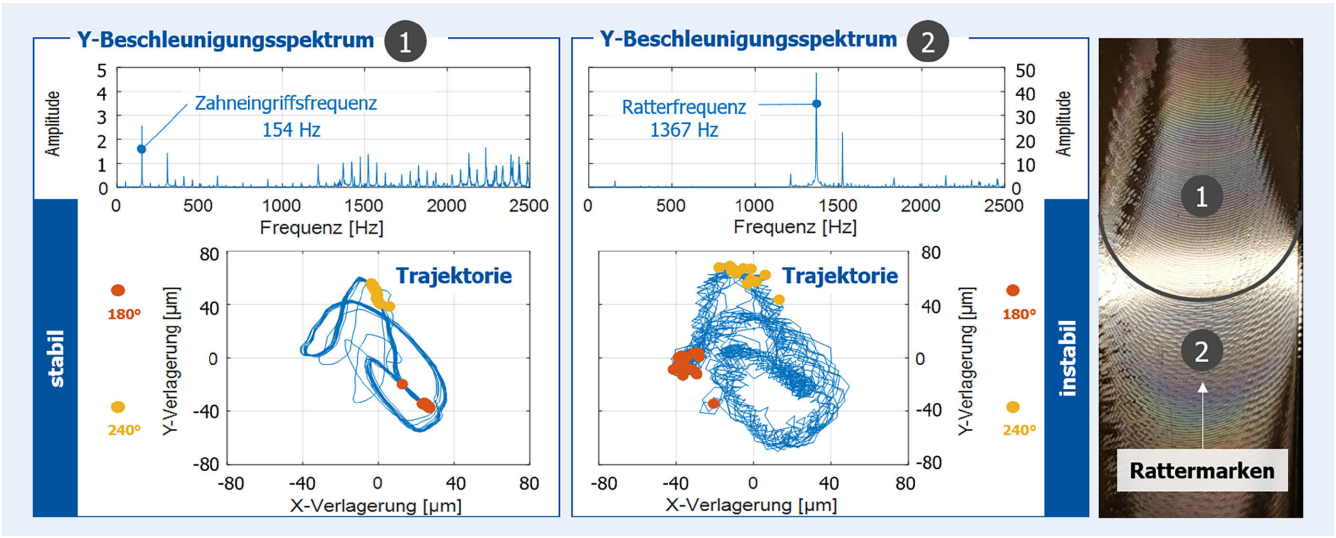

Bild 4. Fast-Fourier-Transformation zur Ermittlung der Ratterfrequenz. *Grafik: WZL*

gungsmode besitzt geringe Schwingungsanteile der Spindel und signifikante Werkzeuganteile.

Ein neu entwickelter Ratterindikator ermöglicht es auch hochfrequentes werkzeugseitiges Rattern zu detektieren. Die Logik des Glattheitsindikators (*GI*) orientiert sich an einem Rundheitsmessschrieb. Gemäß **Bild 5** wird zunächst der Mittelpunkt der Trajektorie bestimmt und im Anschluss der euklidische Abstand zwischen Mittelpunkt und Messpunkt auf der Trajektorie berechnet. Ein gleitender Durchschnitt aller fünf Messpunkte, analog zu einem Tiefpassfilter im Frequenzbereich, reduziert die Messung um den hochfrequenten Schwingungsanteil. Das Verhältnis der Standardabweichung von ursprünglichen und geglätteten Verlauf definiert den *GI*. In Bild 3 ist der Glattheitsindikator für den eingangs diskutierten Prozess rot dargestellt. Eine Sensitivität beim Eintritt in den instabilen Bereich ist deutlich erkennbar, wodurch der *GI* eine sinnvolle Ergänzung zum Bisektionsindikator ist.

Für beide Ratterindikatoren verbleibt allerdings die Herausforderung der Parametrierung, also die Ermittlung der Schwellwerte, welche beim Eintritt in instabiles Verhalten überschritten werden müssen. Um dieser Herausforderung zu begegnen und eine feature-basierte Rattererkennung anhand Ähnlichkeitsmerkmalen zu ermöglichen, wird ein faltendes neuronales Netz (englisch: convolutional neuronal network, cNN) als alternative Stabilitätsbewertung vorgestellt. Die Klassifizierung erfolgt mithilfe von Bilderkennungsalgorithmik. Dafür werden die abgetasteten Stützpunkte der Trajektorie auf einem Feld der Größe 150 x 150 Pixel als Heatmap abgebildet. Die Felddimension wird aufgrund eines guten Kompromisses aus Auflösung, Rechenzeit und Speicherverbrauch gewählt. Die Gesamtauslenkung der Trajektorie wird auf die Feldgröße normiert, damit die absolute Grundschwingungsamplitude keinen Einfluss nimmt. Für einen kontinuierlichen Verlauf wird zwischen zwei Feldtreffern linear interpoliert. Eine Berücksichtigung von Bisektionspunkten ist im ersten Schritt nicht vorgesehen. Zur Stabilitätsbewertung werden die jeweils fünf letzten Trajektorien bewertet. Die Architektur des

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

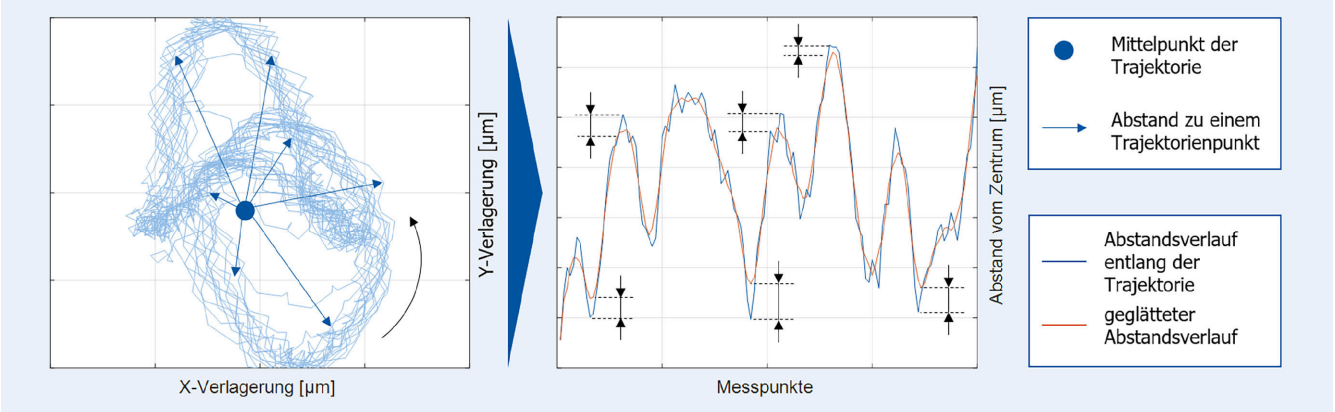

Bild 5. Vorgehen zur Bestimmung des Glattheitsindikators (GI). *Grafik: WZL*

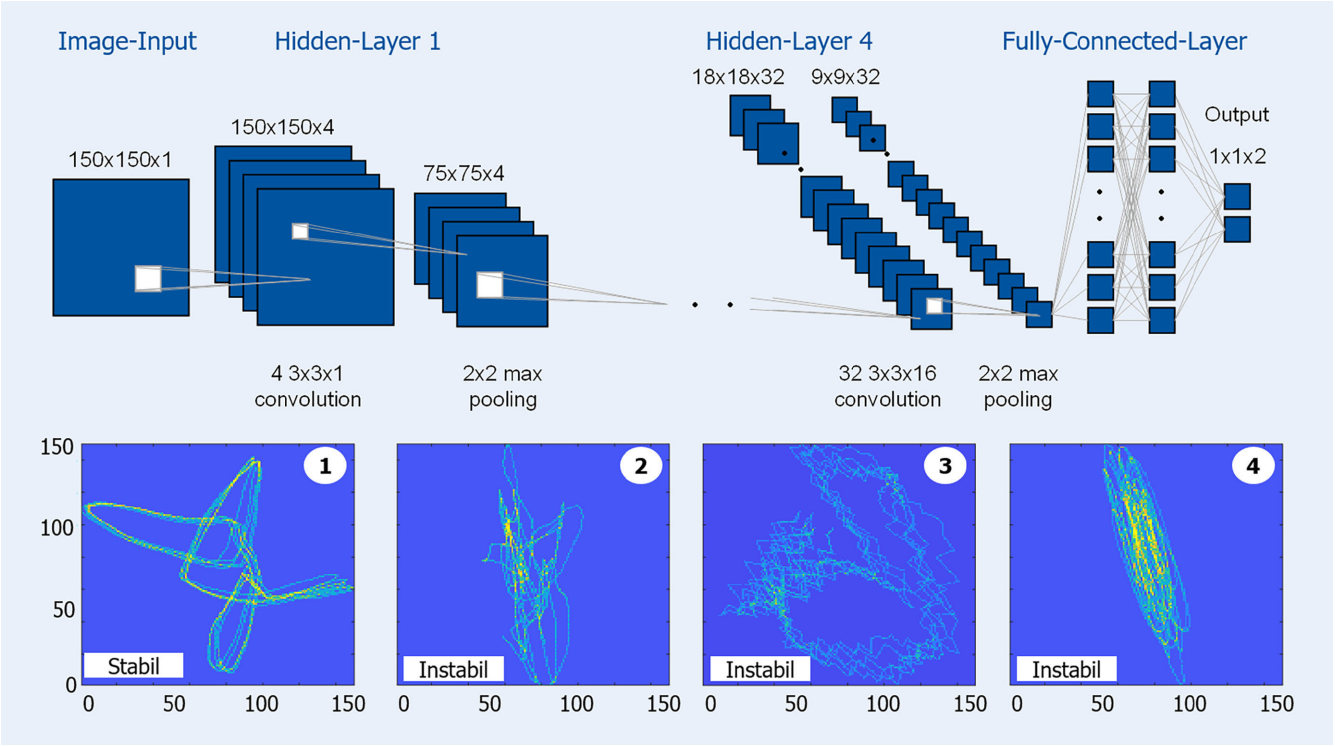

Bild 6. Rattererkennung mithilfe von neuronalen Netzen. *Grafik: WZL*

cNN orientiert sich am VGG16-Netz aus [12] und ist im oberen Bereich von **Bild 6** schematisch dargestellt.

Insgesamt besteht das Netz aus vier Hidden-Layern mit jeweils einem Convolutional-Layer mit Filtergröße 4, 8, 16 beziehungsweise 32, einem Batch-Normalization-Layer, einer Aktivierungsfunktion (ReLu) und einem Max-Pooling-Layer. Zwei Fully-Connected-Layer mit 64 Neuronen führen in zwei Neuronen, deren Status durch ein Softmax-Layer und einem Classification-Output-Layer in stabile beziehungsweise instabile Bearbeitung eingeteilt wird.

Zur Erzeugung von Trainingsdaten werden neben experimentell gemessenen Trajektorien Simulationen verwendet. Dafür wird der Trajektorienverlauf auf Grundlage von in Versuchsreihen beobachteten Features geometrisch simuliert. Beispielhafte Verläufe sind dem unteren Bereich von Bild 6 zu entnehmen. Zunächst werden Punkte auf einem Kreis gleichmäßig verteilt und ihr Abstand zum Mittelpunkt im Anschluss zufällig verändert. Pixel zwischen zwei Stützstellen werden mittels randomisierten Pfad hinzugefügt. Die für einen stabilen Prozess charakteristische Wiederholbarkeit der Trajektorie wird durch das Hinzufügen von weiteren Trajektorien mit geringer Standardabweichung berücksichtigt (Bild 6 ①). Ein chaotischer, instabiler Trajektorienverlauf ist in Bild 6 ② ersichtlich. Der bereits beschriebene Fall hochfrequenter Ratterschwingungen wird durch eine alternierende Anordnung der Stützstellen abgebildet (Bild 6③). Eine beobachtete Schwingungsmode, die sich durch das Nicken der Spindel in Y-Richtung manifestiert, zeigt Bild 6 ④.

Das Ergebnis der cNN-basierten Rattererkennung ist Bild 3 zu entnehmen. Für den dargestellten Prozess konnte eine gute Übereinstimmung mit dem *GI* festgestellt werden. Im Vergleich zum *BI* und *GI* wird hingegen nur zwischen zwei Zuständen (stabil, instabil) unterschieden. Die durchschnittliche Dauer zur Klassifizierung durch das trainierte Netz lag im Bereich von 10 ms, was einen prozessparallelen Einsatz ermöglicht. Die Prog-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

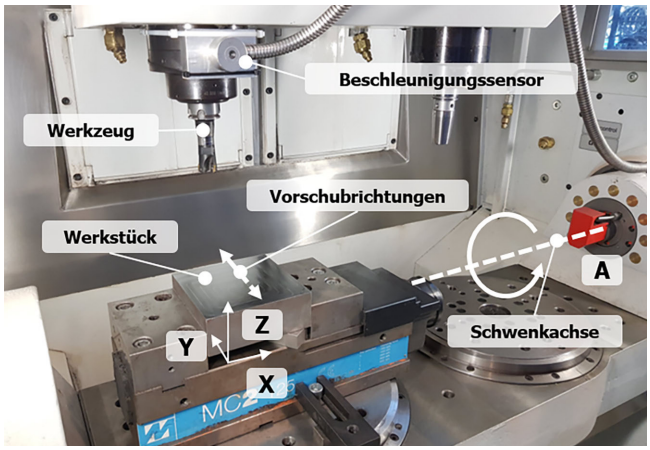

Bild 7. Versuchsaufbau an einer Vertikalfräsmaschine. *Foto: WZL*

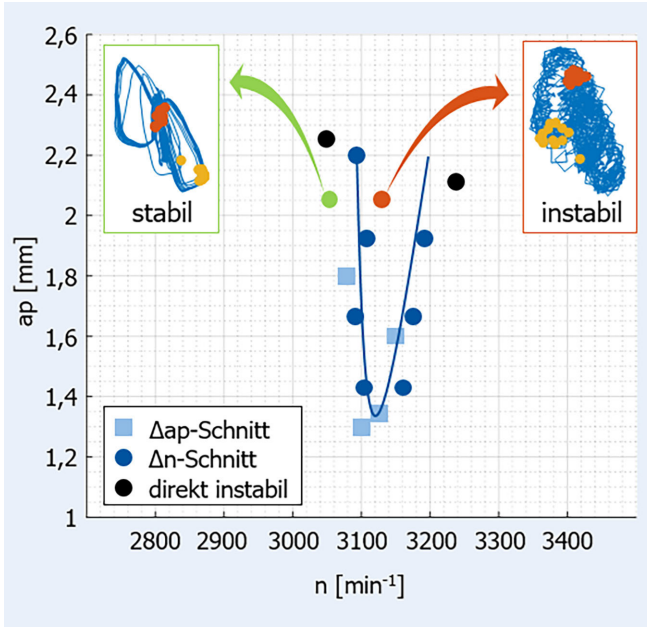

Bild 8. Effizient ermittelter Stabilitätskartenausschnitt. *Grafik: WZL*

nosegenauigkeit der ersten Version des Netzes anhand einer Versuchsreihe von 50 Validierungsschnitten (25 stabil, 25 instabil) lag bei 88 % korrekt als instabil klassifizierter Prozesse. Alle stabilen Prozesse wurden richtigerweise als stabil klassifiziert.

4 Validierungsergebnisse

In **Bild 7** wird der Versuchsaufbau an der bereits erwähnten Doppelspindel-Vertikalfräsmaschine dargestellt. Es wurden ein dreischneidiger Messerkopf mit 25 mm Durchmesser und ein C45-Stahlblock verwendet. Der Vorschub pro Zahn wurde konstant bei 0,1 mm gehalten. Für die Schnitttiefenvariation diente ein Anstellwinkel von 0,5° und der effektive Bereich der Drehzahlvariation lag bei 100 min^{-1}. Die gewählten Werte basieren auf vorangegangenen Sensitivitätsanalysen zum Einfluss des Anstellwinkels [6] sowie der Drehzahlbeschleunigung [13], wonach größere Werte für beide Faktoren zu stärkeren Abweichungen von konventionell ermittelten Stabilitätsgrenzen führten.

Der mit der effizienten Methode ermittelte Stabilitätskartenbereich ist **Bild 8** zu entnehmen.

Der dargestellte Rattersack wurde anhand von elf Stabilitätsübergängen charakterisiert, vier mithilfe von Schnitten steigender Schnitttiefe und sieben mit Drehzahlvariation. Es liegt ein vergleichsweise schmaler Rattersack mit circa 100 min^{-1} Breite vor. Dies ist Folge einer hohen Ordnungszahl m der zugrundeliegenden Ratterfrequenz von über 1300 Hz für den betrachteten Drehzahlbereich. Dies bedeutet, dass nach einer Fräserumdrehung bei instabilen Bedingungen eine erhöhte Zahl an Welligkeiten hinterlassen wird, was mit schmaler werdenden Stabilitätstälern einhergeht.

Eine Herausforderung für die Versuchsmethodik besteht also darin, dass Drehzahlvariationsschnitte im nächstgelegenen Rattersack starten. Dies wird durch einen implementierten Kontrollzyklus berücksichtigt, der nach direkter Instabilität, einen neuen Schnitt näher am Stabilitätsrand veranlasst. Erst bei mehrfacher direkter Instabilität wird eine Flanke des Rattersacks als vollständig bestimmt markiert. Trotz dieser Herausforderung kann die Versuchsmethodik auch für den Extremfall schmaler Rattersäcke erfolgreich eingesetzt werden. Zwei konventionelle Schnitte ohne Parametervariation bestätigen den gefundenen Stabilitätsverlauf (Bild 8).

Die Zeiteffizienz der Methodik zeigt **Bild 9**. Zur Bewertung wurde die effiziente Methode mit einem konventionellen Einfahrprozess der Auflösung n = 50 min^{-1} und ap = 0,2 mm sowie einer Startschnitttiefe von 1 mm verglichen. Für jede sich daraus ergebende Kombination aus Drehzahl und Schnitttiefe wurde für die Referenz ein vollständiger Schnitt berücksichtigt. Wegen der reduzierten Anzahl an Schnitten durch das vorgestellte effiziente Anfahren an die Stabilitätsgrenzen, konnte die Werkzeugeingriffszeit während der Stabilitätskartenermittlung um 60 % gesenkt werden. Die Werkzeugeingriffszeit wurde weiter in Messschnitte zur eigentlichen Ermittlung des Stabilitätsübergangs sowie Nutvorbereitungsschnitte unterteilt. Die Automatisierung der Stabilitätskartenermittlung durch den geschlossenen Wirkkreis führte zu einer Nebenzeitreduktion um 89 %. Zusätzlich wurde durch die verringerte Anzahl an notwendigen Schnitten das verbrauchte Materialvolumen um 80 % gesenkt. Anwendungsfälle mit hohen Zustellungen profitieren hiervon besonders aufgrund einer minimierten Anzahl notwendiger Werkstückwechsel.

Neben der Werkstückwechselzeit (10 min) war die Nebenzeit in die Schnittparameteranpassung und die Verfahrzeit ohne Werkzeugeingriff unterteilt. Für die Stabilitätsbewertung, die Auswahl und den Transfer neuer Schnittparameter wurden 90 s für die konventionelle und 7 s für die neue Methode angenommen. Ähnliche Einsparungen konnten ebenso für eine Horizontalfräsmaschine mit vier Achsen erzielt werden. Dadurch wird eine praktische und wirtschaftliche Verwertbarkeit der effizienten Stabilitätskartenermittlung aufgezeigt [4].

5 Untersuchung statistischer und deterministischer Einflussfaktoren

Zur Bewertung der Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der ermittelten Stabilitätsgrenzen wurden stochastische sowie deterministische Einflüsse untersucht. Zur Berechnung eines statistischen Konfidenzintervalls wurden die in Kapitel 4 ermittelten Stabilitätsübergänge auf der linken (L) und rechten Flanke (R) des Rattersacks mit insgesamt 33 Drehzahlvariationsschnitten wiederholt angefahren. Im oberen Bereich von **Bild 10** sind die

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

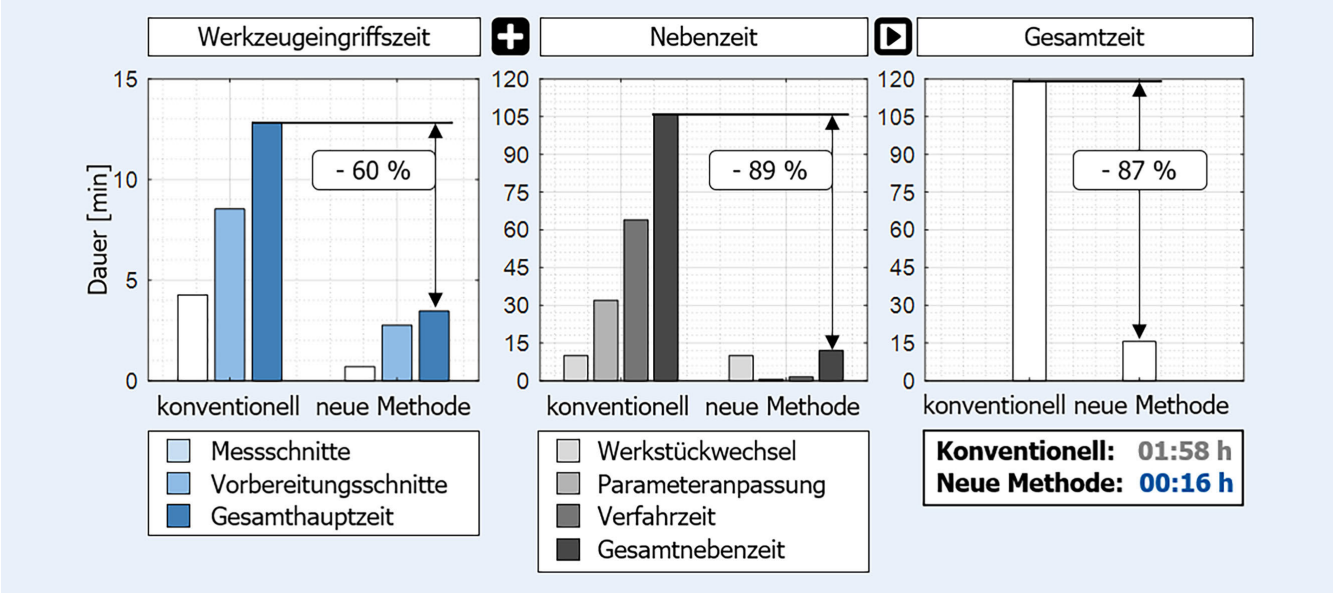

Bild 9. Zeitersparnis in der Stabilitätskartenermittlung durch die effiziente Versuchsmethodik. *Grafik: WZL*

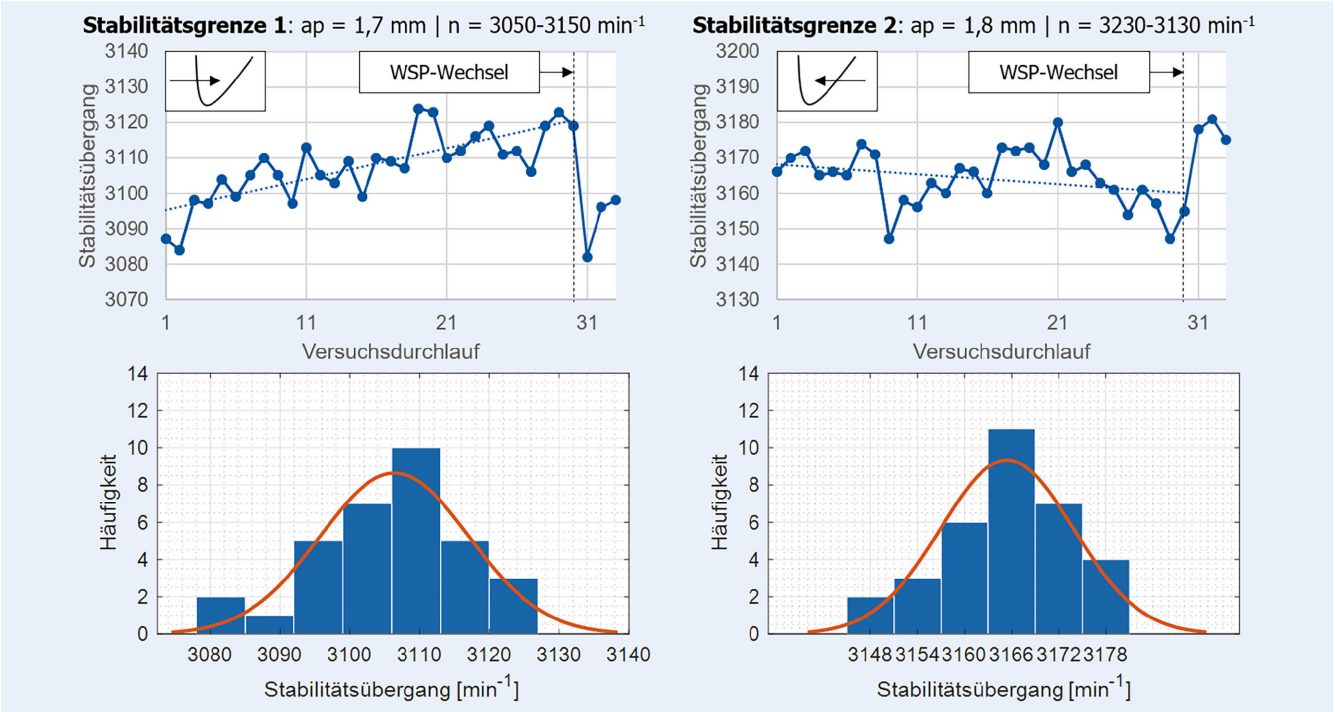

Bild 10. Statistische Untersuchung der Reproduzierbarkeit von Stabilitätsgrenzen. *Grafik: WZL*

detektierten Stabilitätsübergänge über den Versuchsdurchläufen aufgetragen.

Das Ergebnis stützt die These einer Abstinenz scharfer Stabilitätsgrenzen in der Realität. Stabilitätsgrenze 1 (Bild 10 links), die auf der linken Flanke des Rattersacks liegt und mit steigender Drehzahl ermittelt wurde, verschob sich mit steigender Anzahl an Versuchsläufen hin zu höheren Drehzahlen. Stabilitätsgrenze 2 (Bild 10 rechts), die auf der rechten Flanke des Rattersacks liegt und mit sinkender Drehzahl ermittelt wurde, verschob sich in der Tendenz in den niedrigeren Drehzahlbereich. Folglich vergrößerte sich mit steigender Anzahl der Versuchsdurchläufe der Bereich stabiler Zerspanung, da der Rattersack schmaler wird. Mögliche Ursachen für die beobachteten Abweichungen entstammen Messungenauigkeiten, der veränderten Arbeitsraumposition des Werkzeugs in Z-Richtung von Schnitt zu Schnitt, einer inhomogenen Werkstoffqualität oder einem ungleichmäßigen Spanbruch. Ein weiterer Einfluss ist der Werkzeugverschleiß. Wie in [14] und [15] beschrieben, bedingt Nebenkantenverschleiß eine erhöhte Prozessdämpfung und führt daher zu einer tendenziell erhöhten Prozessstabilität.

Für die letzten drei Schnitte (31, 32 und 33) wurden neue Wendeschneidplatten (WSP) verwendet. Die letzten drei Stabilitätsgrenzen lagen wieder auf anfänglichem Niveau. Dieser systematische Effekt trat vor allem bei den ersten Schnitten mit neuen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

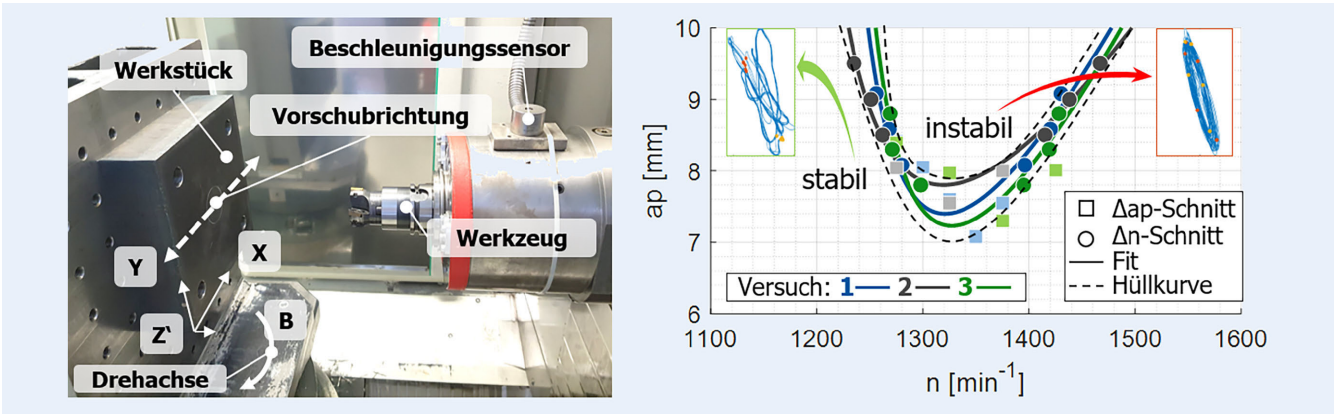

Bild 11. Wiederholversuche an einem Stabilitätskartenbereich einer Horizontal-Fräsmaschine. *Foto: WZL*

WSP auf, also dem Übergang des Werkzeug-Einlaufbereichs in den stationären Bereich der Verschleißkurve. Auch verblieben statistische Schwankungen im Verlauf enthalten, deren Verteilung im unteren Bereich von Bild 10 anhand der Häufigkeitsverteilung dargestellt ist.

Wird die Stabilitätsgrenze als statistisch unabhängige Zufallsvariable X interpretiert und eine Normalverteilung $X_1, \ldots, A_n \overset{\text{i.i.d.}}{\sim} N(\mu, \sigma^2)$ angenommen, kann für den Erwartungswert μ gemäß folgenden Ausdrucks ein Konfidenzintervall berechnet werden [16]:

$$\left[\bar{X} - t(n-1)_{1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \; , \; \bar{X} + t(n-1)_{1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \right]$$

Konfidenzintervall für μ (2)

Ein analoges Konfidenzintervall für die Standardabweichung σ ergibt sich mit folgendem Ausdruck:

$$\left[\sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(n-1)_{1-\alpha/2}} \hat{\sigma}^2} \; , \; \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(n-1)_{\alpha/2}} \hat{\sigma}^2} \right]$$

Konfidenzintervall für σ (3)

Hierbei sind $\bar{X}$ der Stichprobenmittelwert (L: 3106 | R: 3165 min^{-1}), S die Stichprobenstandardabweichung (L: 10,7 | R: 8,5 min^{-1}) und n die Stichprobengröße. L und R bezeichnen die linke beziehungsweise rechte Seite des Rattersacks.

Zur Anwendung von Formel (2) wird die t–Verteilung verwendet, da nicht die Varianz der Grundgesamtheit, sondern nur der Stichprobe bekannt ist. Grundlage für die Berechnung des Konfidenzintervalls der Standardabweichung in Formel (3) ist der Varianz-Schätzer $\hat{\sigma}^2$, welcher der Stichprobenvarianz entspricht. Es wird die χ^2–Verteilung genutzt. Für eine fünfprozentige Restfehlerwahrscheinlichkeit (α = 0,05) folgt ein Konfidenzintervall von L: [3102; 3110] beziehungsweise R: [3162; 3168]. Mit einer statistischen Wahrscheinlichkeit von 95 % liegt also der ermittelte Erwartungswert der Stabilitätsgrenze innerhalb des jeweiligen Intervalls. Das Konfidenzintervall der Standardabweichung berechnet sich zu L: [8,6; 14,2] beziehungsweise R: [6,8; 11,2], wonach die Stabilitätsgrenzen nur in 5 % der Fälle mehr als die obere beziehungsweise geringer als die untere Intervallgrenze vom Erwartungswert abweichen.

Auf dieser Rechenbasis ist es möglich, einen konservativen Ansatz für die statistische Konfidenz der ermittelten Stabilitätsgrenzen zu bestimmen. Werden die Grenzen des Erwartungswert-Intervalls herangezogen und mit der oberen Grenze der Standardabweichung beaufschlagt, lassen sich praktische Intervalle für die Lage des Stabilitätsübergangs (L: [3087,8; 3124,2] beziehungsweise R: [3150,8; 3179,2]) berechnen und für die Prozessauslegung einsetzen. Danach liegt die Stabilitätsgrenze auf der rechten Seite bei 1,8 mm zu mindestens 95 % Wahrscheinlichkeit zwischen 3150 und 3180 min^{-1}.

Das Ergebnis wiederholt ermittelter vollständiger Stabilitätskartenbereiche ist für einen zweiten Anwendungsfall an der Horizontalfräsmaschine aus [4] in **Bild 11** dargestellt.

Den Versuchen lag ebenfalls ein Stahlwerkstück (C45) zugrunde. Als Werkzeug wurde hingegen ein Messerkopf mit 50 mm Durchmesser und vier Schneiden verwendet. Vor jeder der drei Stabilitätskartenermittlungen wurden die Wendeschneidplatten des Werkzeugs gewechselt und innerhalb eines Planvorgangs eingefahren. Die Streuung der gefundenen Übergänge wurde mithilfe einer Hüllkurve berücksichtigt. Während die Schnitte, die mit steigender Schnitttiefe ermittelt wurden, um bis zu 0,8 mm streuen, wiesen die mit Drehzahlvariationsschnitten ermittelten Flanken eine geringe Streuung auf.

Da die Bereiche hoher Schnitttiefe beziehungsweise hohen Zeitspanvolumens von besonderem Interesse sind, lieferte die entwickelte Versuchsmethodik für den vorgestellten zweiten Anwendungsfall eine robuste Reproduzierbarkeit für gleichbleibende Randbedingungen.

Um den Einfluss einer Reihe veränderter Randbedingungen auf die Lage der Stabilitätsgrenzen mithilfe der aufwandsmindernden Versuchsmethodik zu bewerten, wurde der Stabilitätskartenbereich aus Bild 11 mit folgenden fünf veränderten Faktoren erneut ermittelt.

- Werkzeugbeschichtung
- Kühlschmierstoff
- Werkzeugteilung
- Werkzeughalterlänge
- Anzahl Werkzeugschneiden

In **Bild 12** sind die Ergebnisse der Stufenvariationen zusammengefasst. Die Referenzkarte ist grau hinterlegt.

Bei gleichbleibender Schneidengeometrie wurde im ersten Versuch die Werkzeugbeschichtung von CVD TiCN+Al203+TiN auf PVD AlTiCrN verändert. Wie aus dem ersten Diagramm ersichtlich, konnte der Stabilitätskartenbereich praktisch reproduziert werden. CVD-beschichtete WSP eignen sich aufgrund ihrer erhöhten Schichtzahl und der thermisch widerstandsfähigen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -

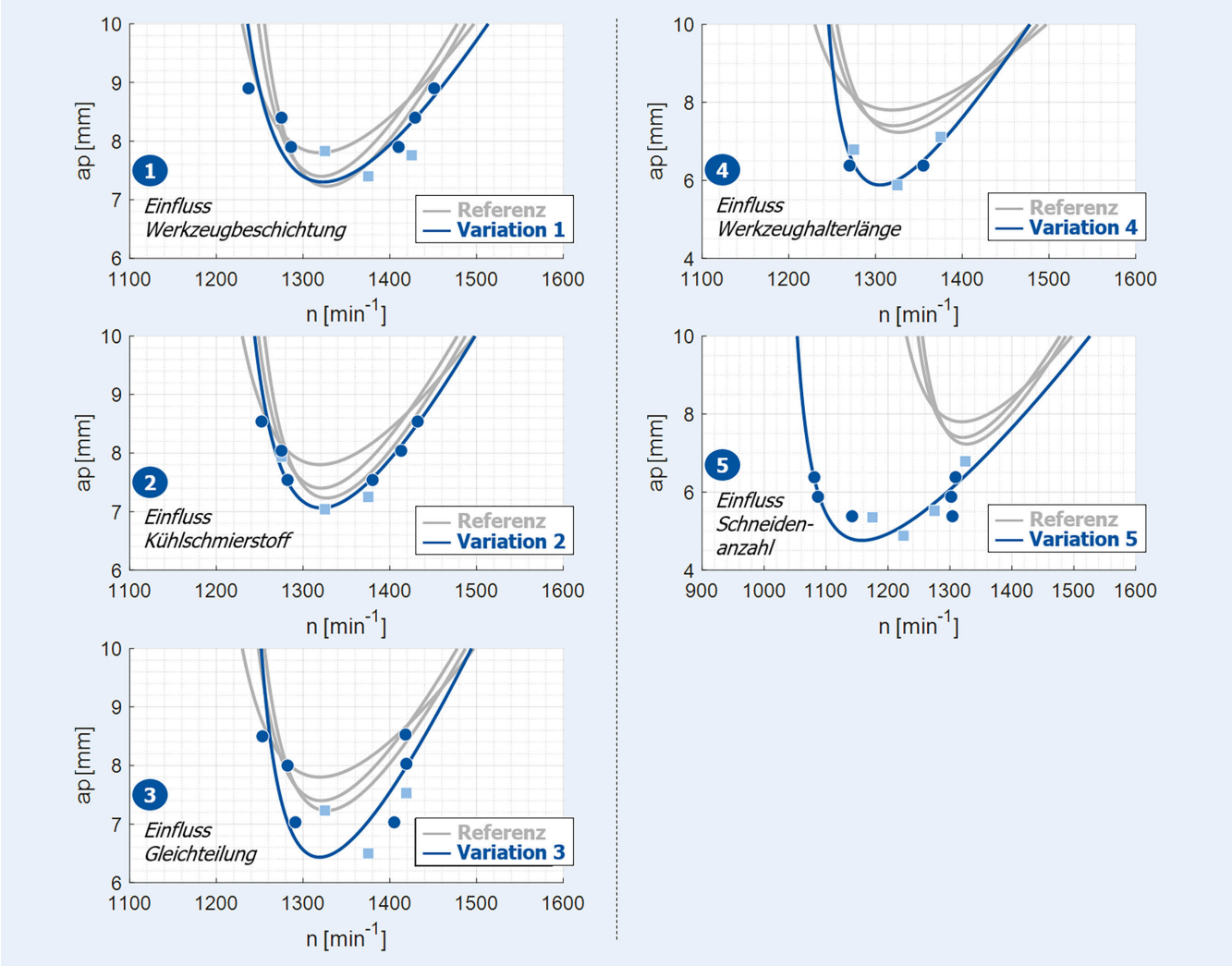

Bild 12. Einflussfaktoren auf die Lage von Stabilitätsgrenzen. *Grafik: WZL*

Al2O3-Sicht tendenziell eher für Schruppprozesse, wohingegen PVD-beschichtete Werkzeuge wegen ihrer prozessbedingten dünneren Schicht und schärferen Schneiden eher für Schlichtprozesse eingesetzt werden [17]. Eine erhöhte Ratterneigung aufgrund einer potenziell verringerten Prozessdämpfung durch die schärferen Schneiden zeigte sich allerdings nicht. Ebenso wenig beeinflusste der Einsatz von Kühlschmierstoff die Stabilitätsgrenze für den beschriebenen Anwendungsfall (Bild 12 ❷).

Ein Einfluss einer erhöhten spezifischen Schnittsteifigkeit in der Zerspanstelle aufgrund verringerter Temperatur beziehungsweise die verringerte Adhäsionsneigung konnte für einen einzigen Rattersack nicht beobachtet werden. Bestätigt wurde dagegen die erhöhte Ratterneigung gleichgeteilter Werkzeuge. In Bild 12 ❸ wird deutlich, dass der instabile Bereich bei 7 mm Schnitttiefe mit 100 min^{-1} vergleichsweise breit ist, wohingegen die kritische Schnitttiefe erst bei 7,2 mm liegt. Darüber hinaus verringerte ein 40 mm längerer Werkzeughalter (Bild 12 ❹) die erreichbare Schnitttiefe. Dies ist durch eine veränderte Schwingungsmode bedingt. Die zuvor dominante Ratterfrequenz von 150 Hz entstammte einer Nickbewegung des Spindelkastens um Ankopplung an den Y-Schlitten der Maschine. Durch die verlängerte und damit nachgiebigere Werkzeugaufnahme war werkzeugseitiges Rattern mit über 1500 Hz ursächlich für die Instabilität. Die Stabilitätsgrenzen konnten durch den Einsatz der auf hochfrequente Schwingungen erweiterte Rattererkennung erfolgreich bestimmt werden. In Bild 12 ❺ ist das Ergebnis für einen Messerkopf gleichen Durchmessers, aber mit fünf statt vier Schneiden dargestellt. Erneut ist eine veränderte Schwingungsmode ratterbestimmend. Die erreichten Schnitttiefen liegen circa 30 % unter der Referenz.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ratterschwingungen limitieren nach wie vor wesentlich die Ausnutzung zur Verfügung stehender Fertigungskapazitäten in der zerspanenden Industrie. Dieser Beitrag stellt Ergebnisse aus dem Bereich der effizienten A-priori-Ermittlung dynamischer Prozessgrenzen vor. Eine automatisierte Versuchsmethodik reduziert den benötigten Zeitaufwand zur Ermittlung eines Rattersacks um circa 85 %. Mithilfe der effizienten Methode wurde der Einfluss stochastischer und deterministischer Einflüsse auf die Lage der Stabilitätsgrenze untersucht und Konfidenzintervalle berechnet. Während die Werkzeugbeschichtung und der Einsatz von Kühlschmierstoff für den beschriebenen Anwendungsfall keinen Einfluss zeigten, veränderten eine Gleichteilung, die

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Werkzeughalterlänge und die Anzahl der Schneiden die Lage der Grenzen signifikant.

In weitergehenden Versuchsläufen zukünftiger Forschungsprojekte kann der Verschleiß- und Thermik-Einfluss auf die Prozessstabilität unter verringertem Aufwand tiefergehend empirisch untersucht werden. Zudem kann eine zeitbereichsbasierte Ratterkennung auf die Berücksichtigung hochfrequenter Werkzeugschwingungen erweitert und ein Ansatz zur Nutzung von neuronalen Netzen für die Stabilitätsklassifikation beschrieben werden.

Potenzial für zukünftige Forschungsarbeiten liegt in der Untersuchung des Einflusses der Messposition für die Schwingungsmessung. Beispielsweise kann in der Spindel integrierte Kraftsensorik [18] näher betrachtet werden. Zur Erzeugung von Trainingsdaten für das vorgestellte neuronale Netz bietet eine umfängliche Prozesssimulation im Zeitbereich die Möglichkeit, unterschiedliche Randbedingungen zu berücksichtigen. Dadurch kann zukünftig die Übertragbarkeit des Netzes auf variable Werkzeug-Werkstück-Maschine-Kombinationen gesteigert werden. Außerdem können Untersuchungen zur Netz-Architektur wie etwa der Einbindung einer Long-Short-Term-Memory-Architektur und eine vergleichende Analyse alternativer Eingangssignale wie etwa das Motorstromsignal neue Erkenntnisse liefern.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts „Effiziente Ermittlung von Stabilitätskarten“ (GZ: BR 2905/73–1, Projektnummer 312052494).

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für ihre finanzielle und technische Unterstützung im Rahmen des Projekts.

Literatur

[1] Altintas, Y.; Brecher, C.; Weck, M. et al.: Virtual Machine Tool. CIRP Annals 54 (2005) 2, pp. 115–138

[2] Quintana, G.; Ciurana, J.: Chatter in machining processes: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture 51 (2011) 5, pp. 363–376

[3] Altintas, Y.; Stepan, G.; Budak, E. et al.: Chatter Stability of Machining Operations. Journal of Manufacturing Science and Engineering 142 (2020) 11, #110801

[4] Brecher, C.; Klimaschka, R.; Steinert, A. et al.: Efficient Determination of Stability Lobe Diagrams Deploying an Automated, Data-Based Online NC Program Adaption. MM Science Journal 2021 (2021) 4, pp. 4830–4835

[5] Quintana, G.; Ciurana, J.; Teixidor, D.: A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations. International Journal of Machine Tools and Manufacture 48 (2008) 15, pp. 1637–1645

[6] Brecher, C.; Chavan, P.; Epple, A.: Investigations on the limitations of rapid experimental determination of stability boundaries during milling. Mechanics & Industry 18 (2018) 6, #608

[7] Grossi, N.; Scippa, A.; Sallese, L. et al.: Spindle speed ramp-up test: A novel experimental approach for chatter stability detection. International Journal of Machine Tools and Manufacture 89 (2015), pp. 221–230

[8] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2. Heidelberg: Springer 2017

[9] Brecher, C.; Kiesewetter, C.; Epple, A. et al.: Automatisierte Erstellung von Stabilitätskarten für Fräsbearbeitungen. zwf Zeitschrift für wissenschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 4, S. 191–195

[10] Brecher, C.: Realisierung effizienter Zerspanprozesse. Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojekts ReffiZ. Aachen: Shaker 2015

[11] Brecher, C.; Chavan, P.; Epple, A.: Efficient determination of stability lobe diagrams by in-process varying of spindle speed and cutting depth. Advances in Manufacturing 6 (2018) 3, pp. 272–279

[12] Simonyan, K.; Zisserman, A.: Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. Stand: 2014. Internet: arxiv.org/abs/1409.1556. Zugriff am 03.04.2024

[13] Brecher, C.; Chavan, P.; Epple, A.: Effiziente Ermittlung von Stabilitätsgrenzen. wt Werkstattstechnik Online 107 (2017) 5, S. 313–317

[14] Taylor, C. M.; Sims, N. D.; Turner, S.: Process Damping and Cutting Tool Geometry in Machining. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 26 (2011), #12009

[15] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren. Heidelberg: Springer-Verlag 2008

[16] Steland, A.: Basiswissen Statistik. Heidelberg: Springer 2016

[17] Martinho, R. P.; Silva, F. J. G.; Martins, C. et al.: Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102 (2019) 5–8, pp. 2423–2439

[18] Brecher, C.; Eckel, H.-M.; Fey, M. et al.: Prozesskraftmessung mit spindelintegrierter Sensorik. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 10, S. 660–663

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Foto: WZL

Ralph Klimaschka, M.Sc.
r.klimaschka@wzl.rwth-aachen.de
Tel. +49 241 / 80-27930

Dipl.-Ing. Stephan Neus

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Steinbachstr. 19, 52074 Aachen
www.wzl.rwth-aachen.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-56 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY