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

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–05–41

Steigerung von Produktivität und Bauteilqualität

Online-Frühwarnsystem: Ratterfrei Fräsen

C. Brecher, M. Fey, M. Wittmann

ZUSAMMENFASSUNG Dieser Beitrag stellt eine innovative Methodik für ein Frühwarnsystem vor, das vor Rattern warnt und es gleichzeitig erlaubt, simulierte Stabilitätsgrenzen im laufenden Prozess zu nutzen. Schlüsselelemente sind die prozessparallele Identifikation der Schnittsteifigkeit zur Verbesserung der Modellgenauigkeit und die bedarfsgerechte Bewertung der Stabilität, wobei die im Prozess relevanten Arbeitspunkte ausgewertet werden. Die Wirksamkeit dieser Methode wurde durch erste Bearbeitungsversuche nachgewiesen, die zeigten, dass innerhalb weniger Sekunden eine zuverlässige Bewertung der Stabilität des Bearbeitungsprozesses möglich ist.

STICHWÖRTER

Werkzeugmaschinen, Fräsen, Simulation

Online Alert System: Chatter-free milling

ABSTRACT This paper introduces an innovative methodology for a chatter alert system that also enables the real-time utilization of simulated stability boundaries. Key components include the concurrent identification of cutting stiffness to enhance model accuracy and the demand-driven evaluation of stability, focusing on the relevant working points in the process. The effectiveness of this method has been demonstrated through initial machining experiments, indicating that a reliable assessment of machining process stability can be made within seconds.

1 Einleitung

Von spanenden Werkzeugmaschinen wird ein Höchstmaß an Produktivität gefordert. Um dies zu erreichen, wird für eine wirtschaftliche Auslegung spanender Fertigungsprozesse versucht, die Leistungsfähigkeit des Fertigungssystems unter Einhaltung der geforderten Toleranzen und Oberflächenqualitäten des Werkstücks in vollem Umfang auszunutzen [1]. Die Vermeidung von Rattern ist nach wie vor eine zentrale Herausforderung, um Präzision und Produktivität bei Bearbeitungs- und Schleifvorgängen zu erreichen. Als Rattern werden selbsterregte und sich regenerativ selbstverstärkende Schwingungen bezeichnet, die aus Wechselwirkungen zwischen den dynamischen Struktureigenschaften der Werkzeugmaschine und dem dynamischen Prozessverhalten resultieren [2]. Die mit den Ratterschwingungen verknüpften Prozessinstabilitäten haben eine Vielzahl von negativen Auswirkungen auf den Bearbeitungsprozess, wie etwa eine verringerte Oberflächengüte, erhöhter Werkzeugverschleiß, eine Beeinträchtigung der Maßhaltigkeit und eine starke Lärmentwicklung [3]. Die Vorhersage ratterfreier Schneidbedingungen hängt hauptsächlich von der Identifizierung der strukturellen Dynamik der Maschine, der Schnittkraft- und Prozessdämpfungskoeffizienten sowie den Bedingungen der Werkzeug-Werkstück-Interaktion ab [4]. Jedes dieser Themen weist eigene Nichtlinearitäten und Unsicherheiten auf. Konservative Prozessstellgrößen beugen dem vor, kosten aber Produktivität.

Für die optimale Wahl der Prozessparameter sind „Stabilitätskarten“, welche die Stabilitätsgrenzen in Abhängigkeit von Schnitttiefe und Drehzahl darstellen, ein wichtiges Hilfsmittel [5]. Die Effizienz experimentell ermittelter Stabilitätskarten wurde in den letzten Jahren zwar gesteigert [6], ist für eine Anwendung in der Kleinserienfertigung dennoch zu aufwendig und nicht wirtschaftlich, da für jede Kombination aus Werkzeug, Werkstück und Maschine eine neue Stabilitätskarte in Vorversuchen experimentell ermittelt werden muss. Dies ist mit dem Trend einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Produktion nicht vereinbar.

Alternativ können Ratterschwingungen und die damit verbundenen Stabilitätsgrenzen modellbasiert ermittelt werden. Die simulative Ermittlung von Stabilitätsgrenzen erfolgt auf Basis eines analytischen Modells, welches die Wechselwirkung zwischen Maschine und Prozess beschreibt [7]. Obwohl das Verständnis für die Stabilität der dynamischen Bearbeitung in den letzten sechs Jahrzehnten erheblich zugenommen hat, leidet die Genauigkeit der Stabilitätsvorhersagen weiterhin aufgrund von Messunsicherheiten, Nichtlinearitäten in der Maschinenstruktur und im Prozess, zeitlich variierenden Dynamiken von Werkzeugmaschinen und Teilen sowie dem Materialabtrag durch ein abgenutztes Werkzeug oder eine gefaste Schneidkante [4].

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde in [8] bereits die grundlegende Methodik des Ratter-Frühwarnsystems vorgestellt, welche die modellbasierte Stabilitätsanalyse eines

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

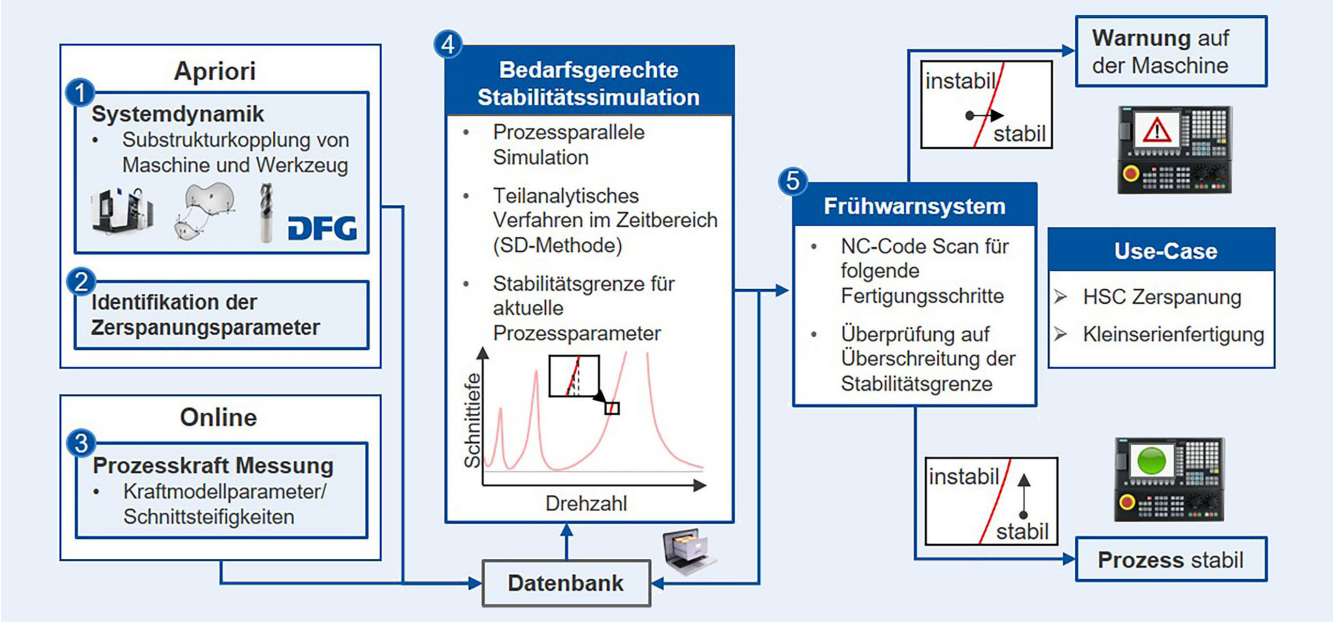

Bild 1. Methodik des Ratter-Frühwarnsystems. *Grafik: WZL*

Fräsprozesses mit Live-Maschinendaten kombiniert. Die ermittelten Stabilitätsgrenzen können prozessparallel für die online Identifikation und Frühwarnung vor Prozessinstabilitäten nutzbar gemacht werden. Mit der Implementierung eines modellbasierten Ratter-Frühwarnsystems kann die Produktivität und die Qualität gesteigert sowie der Ausschuss reduziert werden. Die prozessparallele Bestimmung der Stabilitätsgrenze unterstützt vor allem „First-Part-Right"-Ansätze zur Fertigung aufwendiger und teurer Einzelteile oder Kleinserien.

Dieser Beitrag vertieft die Methodik des Frühwarnsystems und legt den Schwerpunkt besonders auf den Kernbaustein, die bedarfsgerechte Stabilitätssimulation. Die erforderliche Rechenzeit und Prognosegenauigkeit der Simulation ist für die Effektivität der Methodik von entscheidender Bedeutung und wird in diesem Beitrag auf Basis von Zerspanversuchen thematisiert. Um ein kohärentes Verständnis zu gewährleisten, wird zunächst die Methodik des Ratter-Frühwarnsystems nach [8] aufgegriffen (Kapitel 2), bevor in Kapitel 3 genauer auf das zugrunde liegende Modell zur Stabilitätsanalyse eingegangen wird. Anschließend werden in Kapitel 4 Versuchsergebnisse präsentiert. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse und einen Ausblick auf noch ausstehende Herausforderungen liefert Kapitel 5.

2 Methodik

Die Methodik zur Online-Identifikation und Frühwarnung vor Prozessinstabilitäten aufgrund regenerativer Ratterschwingungen umfasst fünf Schritte und wird in **Bild 1** veranschaulicht.

Da der Schwerpunkt dieses Beitrags auf der modellbasierten Stabilitätsanalyse liegt, werden die einzelnen Schritte aufgrund des begrenzten Umfangs nur kurz erläutert, für tiefer gehende Informationen wird auf die jeweiligen Quellen verwiesen.

1. Identifikation der Systemdynamik
   Das dynamische Verhalten des Gesamtsystems wird durch die Kombination der dynamischen Eigenschaften der Maschine und des jeweiligen Werkzeugs a priori bestimmt. Der erste Schritt der vorgestellten Methodik umfasst die effiziente Bestimmung des Nachgiebigkeitsfrequenzgangs, der sich auf den Tool Center Point der Maschine bezieht, unter Berücksichtigung verschiedener Werkzeuge. Die Ermittlung der Systemdynamik von Werkzeugmaschine und Werkzeug erfolgt dabei auf Grundlage der Substrukturkopplung für analytische und experimentelle Komponentenmodelle, wie in [9, 10] beschrieben. Dabei wird der Nachgiebigkeitsfrequenzgang der Maschine einmalig gemessen und repräsentiert die experimentell erfasste Komponente. Die häufig wechselnden Werkzeuge werden daraufhin analytisch modelliert und mit der Maschine gekoppelt.
2. Identifikation der Zerspanungsparameter
   Im zweiten Schritt erfolgt eine Durchdringungssimulation basierend auf einem 3D-Modell des Rohteils und dem NC-Code. Diese Simulation ermöglicht die Extraktion der für die Stabilitätssimulation notwendigen Prozessgrößen, wie etwa der Schnitttiefe und des radialen Schnitttiefenverhältnisses, bezogen auf die unterschiedlichen Bearbeitungsschritte. Der Bearbeitungsprozess wird dabei segmentiert und tabellarisch aufbereitet, indem verschiedene Werkzeuge und vorhandene Prozessparameter berücksichtigt werden. Diese Segmentierung dient als Grundlage für die in Schritt 4 durchzuführenden Stabilitätssimulationen.
3. Prozesskraftmessung und Kraftmodellparametrierung
   Zur Berechnung der Prozessstabilitätsgrenzen ist die Kenntnis der Schnittsteifigkeiten erforderlich. Diese sind sowohl vom Werkstoff, als auch vom verwendeten Werkzeug und den Prozessparametern abhängig. Ändern sich die Prozessbedingungen, beispielsweise aufgrund thermischer Einflüsse, Werkzeugverschleiß oder Inhomogenität im Werkstoff, hat dies einen Einfluss auf die Stabilitätsgrenze des Prozesses. Durch eine prozessparallele Identifikation der Schnittsteifigkeiten können die für die Stabilitätssimulation erforderlichen Eingangsgrößen anhand der reellen Randbedingungen des laufenden Prozesses ermittelt werden. Dies bietet einen Vorteil gegenüber konventionellen modellbasierten Ansätzen, die die Stabilitätsgrenze a priori simulieren und deren Datengrundlage sich auf Vorver-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

suche oder tabellierte Werte stützt.
Die prozessparallele Bestimmung der Schnittsteifigkeiten erfolgt auf Basis eines Vergleichs von gemessener und simulierter Prozesskraft anhand des Ensemble-Kalman-Filters, der bereits für die Anwendung einer kontinuierlichen Parameteridentifikation analytischer Kraftmodelle im Fräsprozess etabliert wurde [11]. Die Messung der Prozesskräfte erfolgt mittels spindelintegrierter Sensorik nach [12].

4. Bedarfsgerechte Stabilitätssimulation
Die Stabilitätsgrenzen werden prozessparallel innerhalb einer bedarfsgerechten Simulation ermittelt. Bedarfsgerecht bedeutet, dass die Stabilität nur um den aktuell relevanten Arbeitspunkt, also auf Basis der aktuellen Prozessparameter ausgewertet wird. Mit der vorgestellten Methodik wird demnach keine vollständige Stabilitätskarte ermittelt, sondern nur für den Prozess relevante Ausschnitte derselben. Neben dem Einsatz eines geeigneten numerischen Verfahrens, das näher in Abschnitt 3 erläutert wird, liefert dieser Ansatz die Voraussetzung dafür, dass der online simulierte Ausschnitt der Stabilitätskarte bereits prozessparallel genutzt werden kann.
5. Frühwarnsystem
Anhand der berechneten Stabilitätsgrenze in Schritt 4 können ebenfalls zukünftige Bearbeitungsschritte in einer Art „Look-Ahead-Funktion“ auf eine Überschreitung der Grenze geprüft werden. Dies erlaubt eine A-priori-Aussage zum Auftreten von Prozessinstabilitäten auf der Maschine. Diese Aussage besitzt solange Gültigkeit, bis das Werkzeug gewechselt wird. Im Fall eines Werkzeugwechsels wird zunächst das Kraftmodell aus Schritt 3 neu parametriert, da sich die Schnittsteifigkeiten signifikant ändern können.
Werden neben der aktuellen Drehzahl weitere Stützstellen zur Berechnung der Stabilitätsgrenze hinzugezogen, kann eine Aussage über den Verlauf der Stabilitätskarte im aktuellen Prozessbereich erfolgen. Dies erlaubt eine zielgerichtete Anpassung der Parameter und kann als Grundlage für eine adaptive Prozessanpassung genutzt werden. Das Frühwarnsystem kann auf dieser Basis um eine Empfehlung zur Anpassung beispielsweise der Drehzahl ergänzt werden. Voraussetzung ist, dass ein Parameterset im ausgewählten Prozessbereich existiert, für welches die Stabilitätsgrenze überschritten wird.

3 Stabilitätsmodell

Bearbeitungsoperationen wie das Fräsen werden unter Verwendung von Werkzeugen mit mehreren Zähnen durchgeführt, welche das Material in periodischen Intervallen schneiden. Die schematische Darstellung eines Fräsprozesses mit zwei Freiheitsgraden zeigt **Bild 2**.

Zur Analyse der Prozessstabilität von Werkzeugmaschinen wird häufig auf die Berücksichtigung der Nachgiebigkeit in Z-Richtung, also entlang der axialen Spindelrichtung, verzichtet, da diese im Vergleich zu den Richtungen in der Schnittebene erheblich steifer ist.

Ein Werkzeug mit einer Anzahl von N gleichgeteilten Zähnen rotiert mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit Ω. Dann variiert die radiale Position der Werkzeugschneide j mit der Zeit wie folgt [13]:

$$\varphi j\,(t) = \Omega t + 2\pi\,(j\text{-}1)/N \qquad (1)$$

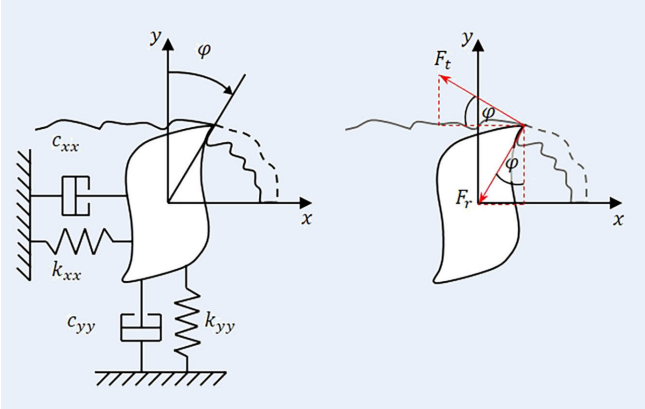

Bild 2. Mechanisches Werkzeugmodell des Werkzeug-Werkstück-Systems im Falle eines nachgiebigen Werkzeugs mit zwei Freiheitsgraden.
Grafik: WZL

Im Bearbeitungsprozess wird eine nachgiebige Werkzeugmaschinenstruktur durch Schnittkräfte an der Werkzeugspitze angeregt, was eine dynamische Reaktion der Struktur gemäß folgender Gleichung zur Folge hat:

$M\ddot{U}(t)+C\dot{U}(t)+KU(t)=F(t)$ mit

$$C=\begin{pmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{pmatrix},\ K=\begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{pmatrix},\ U(t)=\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix},\ F(t)=\begin{pmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{pmatrix} \qquad (2)$$

Hierbei repräsentiert U den Vektor für die Verschiebung des Werkzeugs und F den Vektor der Schnittkraft, während M, C und K die Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrizen darstellen. Die auf den Zahn j wirkenden Komponenten der Schnittkraft im Maschinenkoordinatensystem sind gegeben durch [14]:

$$\begin{aligned} F_{x,j} &= g_j\,(t)\,(\text{-}F_{t,j}\,(t)\,\cos\varphi_j(t) - F_{r,j}\,(t)\,\sin\varphi_j(t)) \\ F_{y,j} &= g_j\,(t)\,(\text{+}F_{t,j}\,(t)\,\sin\varphi_j(t) - F_{r,j}\,(t)\,\cos\varphi_j(t)) \end{aligned} \qquad (3)$$

Die Funktion $g_j(t)$ ist eine Einheitssprungfunktion, die bestimmt, ob der Zahn j im Eingriff mit dem Werkstück ist $(g_j(t) = 1)$ oder nicht $(g_j(t) = 0))$. Die Anteile der Schnittkraft in x- beziehungsweise y-Richtung werden in einen tangentialen oder „schneidenden“ Kraftanteil F_t und einen radialen oder „Schub“-Kraftanteil F_r aufgeteilt.

In Abhängigkeit vom gewählten Kraftmodell wird der Bezug zwischen der Schnittkraft und dem Spanungsquerschnitt der Bearbeitung hergestellt. In der vorgestellten Methodik wird der lineare Zusammenhang nach *Altintas* verwendet [15]:

$$\begin{aligned} F_t &= b\,(K_{tc}\,h(t) + K_{te}) \\ F_r &= b\,(K_{rc}\,h(t) + K_{re}) \end{aligned} \qquad (4)$$

Gemäß diesem Modell setzt sich die Schnittkraft aus werkstoffspezifischen Konstanten, den Schnittsteifigkeiten zusammen. Die Koeffizienten K_{te} und K_{re} beschreiben den Reibkraftanteil an der Schneidkante und sind proportional zur Länge der Schneidkante b, aber unabhängig von der Spandicke h. Die Koeffizienten K_{tc} und K_{rc} stehen mit dem Materialabscheren in Verbindung und sind proportional zum Zerspanungsquerschnitt bh.

Die Spandicke $h_{(t)}$ setzt sich aus einem statischen Teil h_0 aufgrund des Vorschubs und einem dynamischen Anteil $h_d(t)$, der Spandickenmodulation, zusammen:

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

$$h(t) = h_0 + h_d(t) = h_0 + [x(t) - x(t\text{-}T)] \sin \varphi_j(t) + [y(t) - y(t\text{-}T)] \cos \varphi_j(t) \quad (5)$$

Die Spandickenmodulation entsteht durch eine relative Verschiebung zwischen Werkstück und Werkzeug, bedingt durch die aktuelle Werkzeugauslenkung $U(t)$ (innere Modulation) und der Werkzeugauslenkung zum Zeitpunkt des letzten Zahneingriffs $U(t\text{-}T)$, die eine Oberflächenwelligkeit auf dem Werkstück hinterlassen hat (äußere Modulation) [7].

Die Stabilität des Bearbeitungsprozesses für das Auftreten von regenerativem Rattern wird ausschließlich vom dynamischen Anteil der Spandicke $h_d(t)$ beeinflusst. Als Konsequenz sind die Schnittkraftkoeffizienten K_{te} und K_{re} für das Stabilitätsmodell irrelevant, da diese unabhängig von der Spandicke sind [16].

Unter Berücksichtigung der Spandickenmodulation kann die mathematische Beschreibung der zeitperiodischen Dynamik des Fräsprozesses in Form einer periodisch retardierten Differenzialgleichung (DDE) beschrieben werden [14]:

$$M\ddot{U}(t)+C\dot{U}(t)+KU(t)=bA(t)(U(t)-U(t\text{-}T)) \quad (6)$$

Dabei enthält die zeitperiodische Matrix $A(t) = A(t+T)$ die dynamischen Kraftrichtungsfaktoren:

$$\begin{aligned}
A_{xx}(t) &= \sum_{j=1}^{N} g_j(t) \sin \varphi_j(t) [-K_{tc} \cos \varphi_j(t) - K_{rc}(t) \sin \varphi_j(t)] \\
A_{xy}(t) &= \sum_{j=1}^{N} g_j(t) \cos \varphi_j(t) [-K_{tc} \cos \varphi_j(t) - K_{rc}(t) \sin \varphi_j(t)] \\
A_{yx}(t) &= \sum_{j=1}^{N} g_j(t) \sin \varphi_j(t) [K_{tc} \cos \varphi_j(t) - K_{rc}(t) \sin \varphi_j(t)] \\
A_{yy}(t) &= \sum_{j=1}^{N} g_j(t) \cos \varphi_j(t) [K_{tc} \cos \varphi_j(t) - K_{rc}(t) \sin \varphi_j(t)]
\end{aligned} \quad (7)$$

Der zeitlich verzögerte Term $U(t\text{-}T)$ in der Bewegungsdifferenzialgleichung (6) ist charakteristisch für den Regenerativeffekt. Der Zeitversatz T entspricht reziprok bei der Fräsbearbeitung der Zahneingriffsfrequenz.

Zielführend für die Umsetzung einer prozessparallelen Ermittlung von Stabilitätsgrenzen ist der Einsatz eines numerischen Verfahrens, welches in der Lage ist, das Stabilitätsverhalten der systembeschreibenden retardierten Differenzialgleichung (6) effizient zu analysieren.

Für die vorgestellte Methodik wird die Semi-Diskretisierung (SD), die von *Insperger et al.* zur Vorhersage der Prozessstabilität beim Fräsen etabliert wurde [13, 17] gewählt.

Die grundlegende Idee der SD-Methode besteht darin, die verzögerten Terme der Differenzialgleichung (DDE) durch eine stückweise konstante Funktion zu approximieren, während die aktuellen Zeitterme unverändert bleiben. Auf diese Weise wird die DDE durch eine Reihe von gewöhnlichen Differenzialgleichungen (ODEs) approximiert, für die die Lösungen in geschlossener Form angegeben werden können. Unter Anwendung der Floquet-Theorie wird die Stabilitätsberechnung des Systems auf ein Eigenwertproblem reduziert. Für eine detaillierte mathematische Beschreibung der SD-Methode wird auf [13] verwiesen.

Die erforderlichen Eingangsgrößen für die Stabilitätssimulation können im Rahmen der Methodik des Frühwarnsystems zum Großteil a priori in einer Datenbank bereitgestellt werden. Zu den a priori bestimmbaren Eingangsgrößen zählen die Zerspanungsparameter, die Werkzeug Geometrien sowie die Maschinendynamik, die mittels modaler Parameter für die im Prozess genutzten Werkzeuge charakterisiert wird. Bevor die Simulation gestartet werden kann, sind jedoch die spezifischen Schnittsteifigkeiten erforderlich. Wie in Kapitel 2.3 erläutert, werden die Schnittsteifigkeiten im laufenden Prozess durch einen Abgleich von simulierter und gemessener Prozesskraft parametriert. Sobald die parametrierten Schnittsteifigkeiten vorliegen (in der Regel in unter einer Sekunde), wird die Simulation prozessparallel gestartet. Nun können alle a priori definierten Arbeitspunkte, die auf Grundlage des NC-Codes und einer Durchdringungssimulation ermittelt werden, für das im Eingriff befindliche Werkzeug simuliert werden. Dies schließt insbesondere auch Arbeitspunkte ein, die im laufenden Prozess noch nicht bearbeitet wurden.

Durch die Überprüfung der Stabilität zukünftiger Arbeitspunkte ist eine Frühwarnung möglich. Findet im Prozess ein Werkzeugwechsel statt, startet die Parametrierungsphase für die Schnittsteifigkeiten erneut, bevor danach eine neue Simulation gestartet wird. Für die Effektivität des Frühwarnsystems ist die erforderliche Rechenzeit der Stabilitätssimulation entscheidend. Maßgebliche Einflussfaktoren für die erforderliche Rechenzeit des Stabilitätsmodells sind die Anzahl der berücksichtigen Moden des dynamischen Systems sowie die Vorgabe des simulierten Parameterbereichs. Der Parameterbereich wird definiert über die Drehzahl und Schnitttiefe und die Anzahl an Stützstellen innerhalb der vorgegebenen Grenzen. Die Simulation unterliegt dabei einem zentralen Zielkonflikt aus Rechengeschwindigkeit und Aussagekraft. Für die maximale Rechengeschwindigkeit kann die Stabilität für exakt einen Arbeitspunkt simuliert werden. Unter diesen Randbedingungen kann lediglich die Aussage getroffen werden, ob der Arbeitspunkt im stabilen oder instabilen Bereich liegt. Wird ein Parameterbereich um den Arbeitspunkt aufgespannt, also ein kleiner Ausschnitt der Stabilitätskarte simuliert, ist es auf Kosten der Rechengeschwindigkeit eventuell möglich, eine Empfehlung zur adaptiven Prozessanpassung bereitzustellen.

Ein Bedienereingriff im laufenden Prozess ist üblicherweise durch ein Potentiometer an der Steuerung, zur prozentualen Anpassung der Spindeldrehzahl, möglich. Häufig liegt die maximal einstellbare Grenze der Drehzahl bei 120 % des im NC-Programm hinterlegten Wertes. Auf dieser Basis kann ein sinnvoller Parameterbereich um den Arbeitspunkt definiert werden, indem ein Drehzahlbereich von ±20 % vom aktuellen Arbeitspunkt simuliert wird. Komplexer ist die Vorgabe der Stützstellenanzahl, die innerhalb des Drehzahlintervalls simuliert werden soll. Da die Rechengeschwindigkeit ebenfalls von der eingesetzten Hardware, insbesondere dem CPU (Central Processing Unit) abhängig ist, kann ein „Hardware Benchmark“ erfolgen, um die Anzahl der Stützstellen festzustellen, die unter der Vorgabe einer maximalen Simulationsdauer von beispielsweise 2 s simuliert werden kann.

Anhand der Simulation eines Fräsversuchs, dessen Ergebnisse im nächsten Kapitel aufgeführt sind, können die aufgeführten Einflussgrößen quantifiziert werden. Im zugrunde liegenden DFG-Forschungsantrag wurde definiert, dass die Zeit bis das Frühwarnsystem eine Aussage auf der Maschinensteuerung bereitstellen kann, fünf Sekunden nicht überschreiten soll. Da die Parametrierung der Schnittsteifigkeiten und die anschließende Auswertung der simulierten Stabilitätsgrenzen ebenso Zeit beansprucht, wird in diesem Beitrag eine realistische maximale Simulationsdauer von 2 s angenommen.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

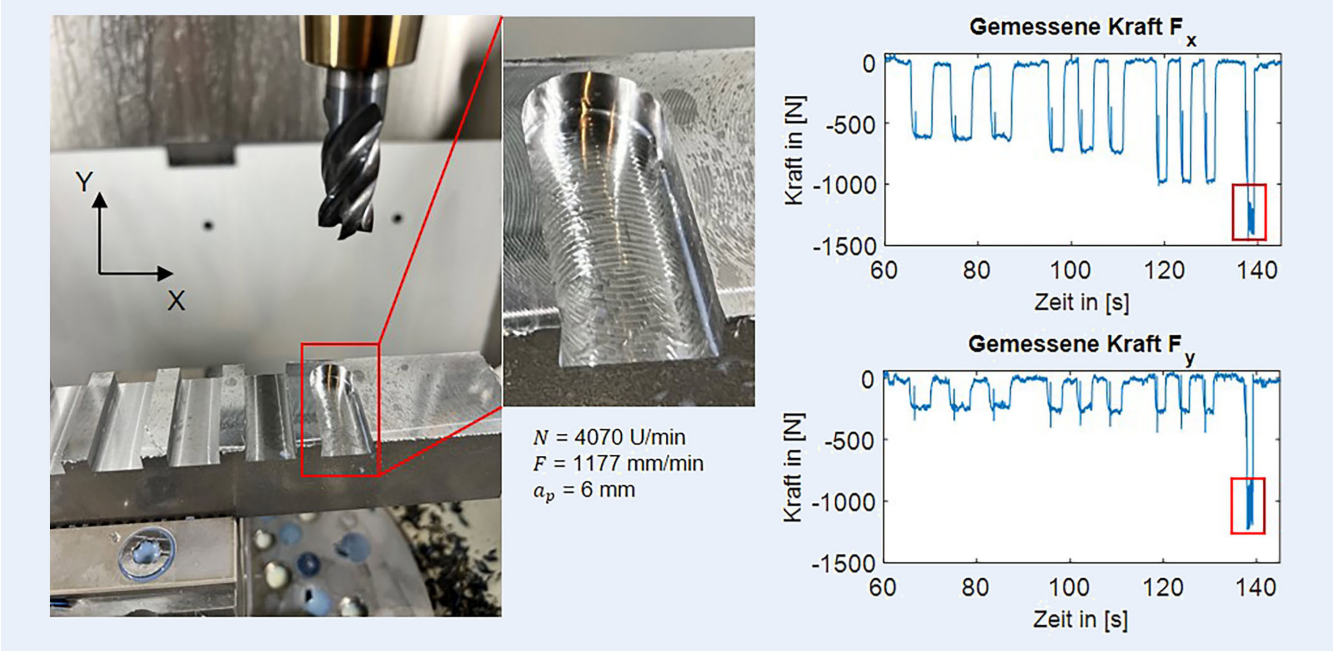

Bild 3. Versuchsaufbau und Rattermarken am Werkstück mit gemessenen Fräskräften. *Foto: WZL*

Tabelle 1. Modale Systemparameter

Richtung	Mode	Frequenz (Hz)	Dämpfung (%)	Masse (kg)
X	1	1230,22	1,8852	1,3573
Y	1	1250,10	4,1036	1,3832

4 Versuchsergebnisse

Die Fräsversuche wurden auf einem 5-Achs-Fräszentrum „Chiron FZ-12“ durchgeführt. Als Werkzeug wurde ein Sandvik „CoroMill Dura“-Vollhartmetall-Schaftfräser mit einem Durchmesser von 16 mm und 4 Zähnen in Kombination mit einem Haimer „HSK-A63“-Halter eingesetzt. Für die Bearbeitungsversuche wurden C45-Stahlblöcke mit den Maßen (300 mm x 40 mm x 30 mm) verwendet. Die experimentelle Anordnung zeigt **Bild 3**.

Zur Validierung der Stabilitätssimulation wurden die modalen Parameter durch Impulshammermessungen unter Verwendung der kommerziellen Modalsoftware „LMS“ ermittelt. Als Basis für die Stabilitätssimulation wurde die nachgiebigste Eigenmode gewählt. Die Modalen-Parameter sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

Die Messung der Prozesskräfte zur prozessparallelen Identifikation der Schnittkraftkoeffizienten erfolgt mittels einer spindelintegrierten Sensorik. Die Koeffizienten wurden im Fräsversuch zu K_{tc} = 1100 Mpa und K_{rc} = 300 Mpa bestimmt.

In die Werkstücke wurden Vollnuten mit einem radialen Eingriffsverhältnis von Eingriffsbreite zu Werkzeugdurchmesser von 1 gefräst. Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit wurden jeweils drei Nuten unter identischen Schnittbedingungen erstellt. Über die Länge eines Werkstücks wurden vier verschiedene Schnittbedingungen bei gleicher Schnitttiefe a_p gefräst, was zu insgesamt 12 Vollnuten pro Werkstück führte. Für die verschiedenen Schnittbedingungen wurde die Drehzahl verändert und danach der Vorschub so gewählt, dass für alle Schnitte mit einem konstanten Vorschub pro Zahn von 0,072 mm gefräst wurde. Die verschiedenen Schnittbedingungen können in der Stabilitätssimulation als vier verschiedene Arbeitspunkte simuliert werden.

Die Schnitttiefe wurde sukzessive für jedes neue Werkstück erhöht, bis erstmalig Rattern identifiziert werden konnte. Im linken Teil von Bild 3 ist das Werkstück dargestellt, bei dem zum ersten Mal Rattern auftrat. Der rechte Teil von Bild 3 zeigt die gemessenen Fräskräfte während der Bearbeitung des Werkstücks. Jeder Kraftausschlag repräsentiert die Bearbeitung einer Vollnut, wobei immer drei aufeinanderfolgende Vollnuten unter den gleichen Schnittbedingungen gefräst wurden, was am Kraftniveau erkennbar ist. Bei den Schnittbedingungen mit einer Schnitttiefe von 6 mm, einer Drehzahl von 4070 U/min und einer Vorschubgeschwindigkeit von 1177 mm/min konnten deutliche Rattermarken am Werkstück festgestellt werden. Aufgrund einer maschinenintegrierten Sicherheitsfunktion wurde die zehnte Nut nicht fertig gefräst, da eine spindelseitige Vibrationswarnung die Bearbeitung stoppte. Neben den Rattermarken auf dem Werkstück liefert auch der schlagartige Anstieg der Kraftamplitude (rot markierter Bereich) und deren Schwankung für F_x und F_y Merkmale für den instabilen Schnitt (Bild 3 rechts).

Zur Validierung der Stabilitätssimulation wurde ein weiteres Werkstück mit a_p = 6 mm gefräst, wobei die Drehzahl in einer Umgebung um den instabilen Arbeitspunkt variiert wurde. **Bild 4** zeigt das gefräste Werkstück sowie die unterschiedlichen Schnittbedingungen. Die grün markierten Nuten repräsentieren einen stabilen Schnitt, die rot markierten Nuten instabile Schnittbedingungen. Die Stabilitätssimulation kann anhand der identifizierten stabilen und instabilen Arbeitspunkte validiert werden.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

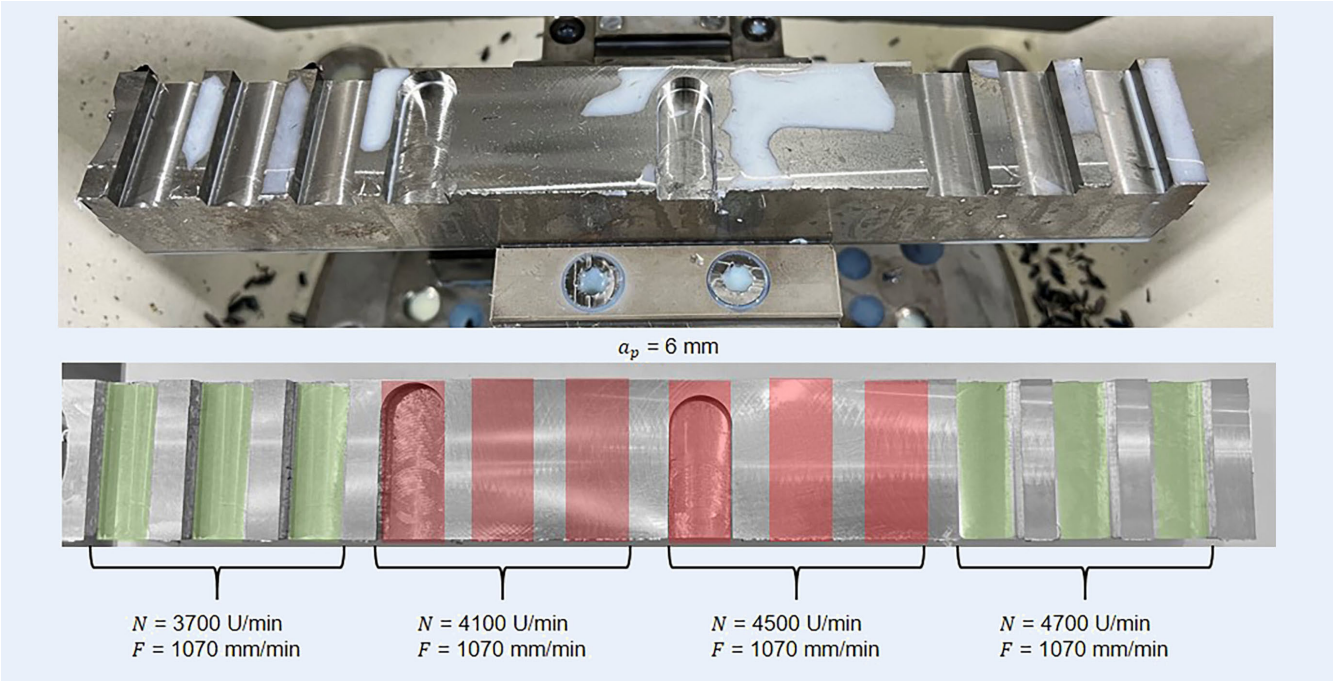

Bild 4. Gefrästes Versuchsteil mit unterschiedlichen Schnittbedingungen. *Foto: WZL*

Tabelle 2. Simulation der Arbeitspunkte

Arbeitspunkt	Drehzahl U/ min	Schnitttiefe mm	Eigenwert	Stabilität	Rechenzeit s
1	3700	6	0,945	stabil	0,094
2	4100	6	2,139	instabil	0,094
3	4500	6	1,228	instabil	0,095
4	4700	6	0,961	stabil	0,093

Tabelle 3. Simulation eines Drehzahlintervalls um den Arbeitspunkt.

Drehzahl U/ min	Schnitttiefe mm	Stützstellen Drehzahl	Stützstellen Schnitttiefe	Rechenzeit s
[3280; 4920]	[2;8]	19	14	1,995

Das vorrangige Ziel besteht darin, die Leistungsfähigkeit der Stabilitätssimulation für den prozessparallelen Einsatz zu bewerten. Dazu wurde die Simulation hinsichtlich unterschiedlicher Szenarien untersucht:

1. Simulation von einem einzelnen Arbeitspunkt, mit dem Ziel einer minimalen Rechengeschwindigkeit.
2. Simulation von einem Drehzahlintervall um den relevanten Arbeitspunkt, mit dem Ziel einen Ausschnitt der Stabilitätskarte unter Vorgabe einer maximal zulässigen Rechenzeit zu ermitteln.

Die Ergebnisse für die Simulation der einzelnen Arbeitspunkte sind in **Tabelle 2** aufgelistet. Als Hardware zur Berechnung wurde ein Lenovo-Notebook mit Intel Core „i7–8565U“ CPU @ 1.80 GHz genutzt.

Unter Anwendung der Floquet-Theorie liegt ein instabiles Systemverhalten vor, wenn der Eigenwert der systembeschreibenden Monodromy-Matrix den Wert eins überschreitet. Die Simulation konnte das Stabilitätsverhalten für alle Arbeitspunkte korrekt prognostizieren. Wird lediglich ein einzelner Arbeitspunkt simuliert, kann das Ergebnis in einem Bruchteil einer Sekunde berechnet werden. Dies bestätigt insbesondere die Eignung der SD-Methode für eine prozessparallele Anwendung.

Für das zweite Szenario wurde Arbeitspunkt 3 untersucht. Wie in Kapitel 3 beschrieben, wird ein Drehzahlbereich von ± 20 % um Arbeitspunkt 3 simuliert. Unter der Vorgabe, dass die maximale Rechendauer der Simulation 2 s nicht überschreiten darf, wurden die Anzahl der Stützstellen mittels eines Hardware-Benchmarks parametriert. Die ermittelten Werte für die Simulation sind in **Tabelle 3** aufgeführt.

Den simulierten Ausschnitt der Stabilitätskarte für Arbeitspunkt 3 zeigt **Bild 5**. Trotz einer Simulationszeit von nur zwei Sekunden können bereits eindeutige Rattersäcke identifiziert werden.

Im Vergleich zur Einzelpunktauswertung nach Szenario 1 bietet der simulierte Drehzahlbereich einen hohen Mehrwert zur Einordnung der aktuellen Prozessführung. Hiermit wird die Voraussetzung geschaffen, den Prozess adaptiv anzupassen und gezielt in ein stabiles Prozessniveau zu lenken.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

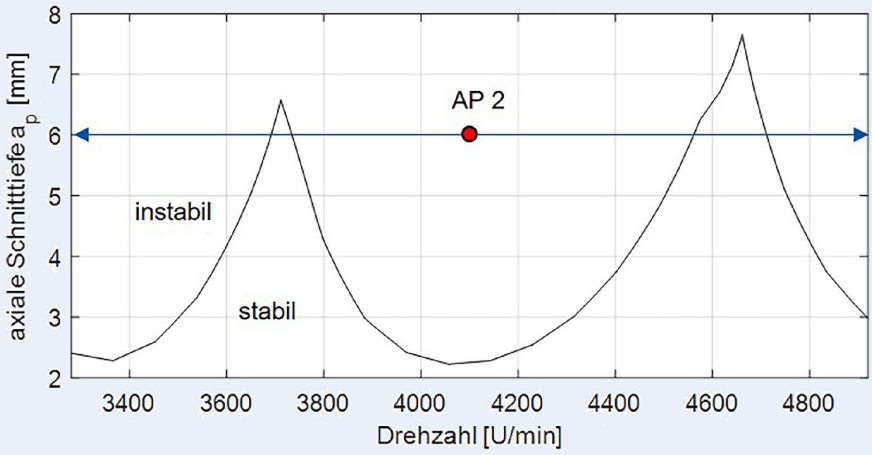

Bild 5. Simulierter Ausschnitt der Stabilitätskarte um Arbeitspunkt 2. *Grafik: WZL*

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine innovative Methodik für ein Ratter-Frühwarnsystem vorgestellt, die es ermöglicht, simulierte Stabilitätsgrenzen prozessparallel zu nutzen. Als Schlüsselelemente sind die prozessparallele Identifikation der Schnittsteifigkeiten zur Steigerung der Modellgenauigkeit und die bedarfsgerechte Auswertung der Stabilität um die im Prozess relevanten Arbeitspunkte hervorzuheben. Die Effektivität der SD-Methode wurde durch erste Bearbeitungsversuche nachgewiesen, wobei sich zeigte, dass innerhalb weniger Sekunden eine zuverlässige Aussage über die Stabilität des Bearbeitungsprozesses getroffen werden kann.

Um die Genauigkeit des Systems weiter zu validieren, sind zusätzliche Versuche geplant, die verschiedene Aspekte einschließlich komplexerer Bauteile mit unterschiedlichen Eingriffsbedingungen und anderen Werkstoffen berücksichtigen. Die Untersuchung und Validierung wird dabei erweitert, indem Fragen zu Modellkomplexität, vor allem in Bezug auf die Berücksichtigung von mehreren Schwingungsmoden näher betrachtet werden.

Ein weiterer Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten liegt auf der direkten Verknüpfung des Frühwarnsystems mit der Maschinensteuerung, um eine schnelle und präzise Reaktion auf auftretende Instabilitäten zu ermöglichen.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 467600151.

Literatur

[1] Brecher, C.; Esser, M.: Prozessstabilität in der Hochgeschwindigkeitszerspanung. Tagungsband 10. Dresdner WZM-Fachseminar: Neue Aspekte zur Stabilitätsanalyse der Zerspanung, TU Dresden, 17.06.2005
[2] Brecher, C.: Realisierung efizienter Zerspanprozesse. Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojekts ReffiZ. Aachen: Shaker Verlag 2015
[3] Altintas, Y.; Weck, M.: Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding. CIRP Annals 53 (2004) 2, pp. 619–642
[4] Altintas, Y.; Stepan, G.; Budak, E. et al.: Chatter Stability of Machining Operations. Journal of Manufacturing Science and Engineering 142 (2020) 11, # 110801, doi.org/10.1115/1.4047391
[5] Großmann, K. (Hrsg.): Neue Anforderungen und Möglichkeiten der Stabilitätsanalyse. Tagungsband 10. Dresdner WZM-Fachseminar: Neue Aspekte zur Stabilitätsanalyse der Zerspanung, TU Dresden, 17.06.2005
[6] Brecher, C.; Chavan, P.; Epple, A.: Effiziente Ermittlung von Stabilitätskarten beim Fräsen. Fräsen und Bohren (2018) 5, S. 56–57
[7] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme. Heidelberg: Springer 2017
[8] Brecher, C.; Fey, M.; Wittmann, M.: Onlinefähiges Ratter-Frühwarnsystem. Modellbasierte Identifikation von Prozessinstabilitäten mit prozessparalleler Datengrundlage. VDI-Z 165 (2023) 07–08, S. 15–17
[9] Brecher, C.; Chavan, P.; Fey, M.: Efficient joint identification and fluted segment modelling of shrink-fit tool assemblies by updating extended tool models. Production Engineering 15 (2021) 1, pp. 21–33
[10] Chavan, P. (Hrsg.): Substructuring Methods for Efficient Prediction of Spindle-Holder-Tool Assembly Dynamics. Aachen: Apprimus-Verlag 2023
[11] Schwenzer, M.; Stemmler, S.; Ay, M. et al.: Continuous identification for mechanistic force models in milling. IFAC-PapersOnLine 52 (2019) 13, pp. 1791–1796
[12] Brecher, C.; Eckel, H.-M.; Fey, M. et al.: Prozesskraftmessung mit spindelintegrierter Sensorik. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 10, S. 660–663
[13] Insperger, T.; Stépán, G.: Semi-Discretization for Time-Delay Systems. New York: Springer 2011
[14] Gradišek, J.; Govekar, E.; Grabec, I. et al.: On Stability Prediction For Low Radial Immersion Milling. Machining Science and Technology 9 (2005) 1, pp. 117–130
[15] Altintas, Y.; Kilic, Z. M.: Generalized dynamic model of metal cutting operations. CIRP Annals 62 (2013) 1, pp. 47–50
[16] Niegulska-Grdzka, D.; Nejman, M.; Jemielniak, K.: Relation between Power and Linear Model of Dynamic Cutting Coefficients. Procedia CIRP 67 (2018), pp. 274–277
[17] Insperger, T.; Stépán, G.: Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay. International Journal for Numerical Methods in Engineering 61 (2004) 1, pp. 117–141

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-05-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

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

Dr.-Ing. Marcel Fey

Marcel Wittmann, M.Sc.
m.wittmann@wzl.rwth-aachen.de
Tel. +49 241 / 80 22965

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
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/10.37544/1436-4980-2024-05-41 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -