



(12) **Patentschrift**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2015 004 939.8**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/CH2015/000158**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2016/065491**
(86) PCT-Anmeldetag: **30.10.2015**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **06.05.2016**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **31.08.2017**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **14.01.2021**

(51) Int Cl.: **G05B 19/416 (2006.01)**
G05B 19/4069 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:

62/073,398	31.10.2014	US
62/073,350	31.10.2014	US
62/073,461	31.10.2014	US
62/073,381	31.10.2014	US
62/073,435	31.10.2014	US

(73) Patentinhaber:

**Big Data in Manufacturing GmbH, 72379
Hechingen, DE**

(74) Vertreter:

**LS-MP von Puttkamer Berngruber Loth Spuhler
Partnerschaft von Patent- und Rechtsanwälten
mbB, 81373 München, DE**

(72) Erfinder:

Kreidler, Volker, Dr., 72379 Hechingen, DE

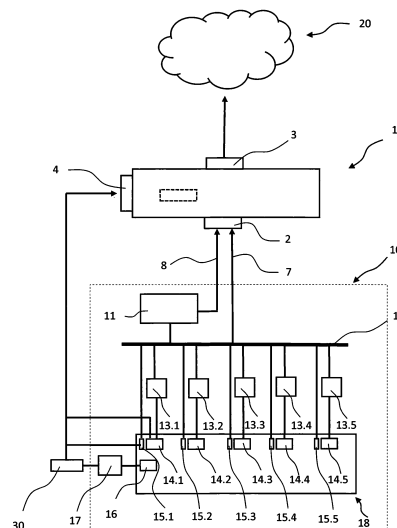
(56) Ermittelter Stand der Technik:

siehe Folgeseiten

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Optimieren der Produktivität eines Bearbeitungsprozesses einer CNC-Maschine**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Optimieren der Produktivität eines Bearbeitungsprozesses mindestens einer CNC (Computer Numerical Control)-Maschine, wobei die CNC-Maschine mindestens ein Bearbeitungswerkzeug umfasst, das durch eine oder eine Vielzahl von Antriebsachsen bewegbar ist, wobei der Bearbeitungsprozess durch ein gegebenes NC (Numerical Control)-Programm gesteuert wird, das mindestens eine Werkzeugbahn für das mindestens eine Bearbeitungswerkzeug und ein Bahngeschwindigkeitsprofil entlang der Werkzeugbahn definiert, wobei das Verfahren Folgendes umfasst
- iteratives Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn im Vergleich zu dem Bahngeschwindigkeitsprofil, wobei das iterative Erhöhen ein Maximieren der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn aufweist, bis das jeweilige dynamische Limit der einen oder mindestens einer der Vielzahl von Achsen erreicht wird, oder bis mindestens eines der Verarbeitungslimits erreicht wird, und das iterative Erhöhen von dem gegebenen NC-Programm definiert wird, wobei das iterative Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn unter angemessener Berücksichtigung des jeweiligen dynamischen Limits jeder der einen oder der Vielzahl von Antriebsachsen ausgeführt wird, unter angemessener Berücksichtigung der maximalen Achsgeschwindigkeit und maximalen Achsenbeschleunigung jeder der einen oder Vielzahl von An-

triebsachsen und unter angemessener Berücksichtigung der Verarbeitungslimits, die sich auf die Bahngeschwindigkeit ...



(56) Ermittelter Stand der Technik:

US **2014 / 0 277 686** **A1**

WECK, M. ; BRECHER, Ch.:
Werkzeugmaschinen. Bd. 4. Automatisierung
von Maschinen und Anlagen. 6., neu bearb. Aufl.
Berlin [u. a.] : Springer, 2006. S. 303, 327, 328. -
ISBN 978-3-540-22507-2

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Optimieren der Produktivität eines Bearbeitungsprozesses mindestens einer CNC (Computer Numerical Control)-Maschine im Hinblick auf ein gegebenes NC (Numerical Control)-Programm.

[0002] Aus der US 2014/ 277 686 A1 ist ein Verfahren zum Durchführen einer Fräsbearbeitung bekannt, welches das Bereitstellen eines Fräasers und eines Werkstücks mit einer nicht bearbeiteten Werkstückoberfläche umfasst. Das Verfahren umfasst weiter das Empfangen eines Satzes von Fräser-Geometrieparametern; das Erzeugen eines krummlinigen Profils aus der Werkstückoberfläche sowie das Extrahieren eines Radiusparameters aus dem krummlinigen Profil. Darüber hinaus ist das Bestimmen eines anfänglichen Überschreitungswertes als Reaktion auf den Satz von Fräser-Geometrieparametern umfasst. Zusätzlich sieht das Verfahren das Bestimmen eines Oberflächenrauheitswertes in Reaktion auf den Satz von Fräser-Geometrieparametern und in Reaktion auf das krummlinige Profil der Werkstückoberfläche, den Radiusparameter und in Reaktion auf einen anfänglichen Werkzeugneigungswinkel vor. Das Verfahren sieht weiter das Bestimmen eines minimalen Oberflächenrauheitswertes in Reaktion auf den Wert des Fräser-Neigungswinkels vor. Ebenso ist das Einstellen eines berechneten Überschreitungswertes in Reaktion auf den minimalen Oberflächenrauheitswert vorgesehen. Hierbei wird der berechnete Überschreitungswert und der berechnete Neigungswinkelwert auf den Betrieb des Fräasers angewendet.

[0003] Aus Weck, M.; Brecher, Ch.: Werkzeugmaschinen. Bd 4. Automatisierung von Maschinen und Anlagen; 6., neu bearb. Aufl.; Berlin (u.a.): Springer, 2006. S.303, 327-328. ISBN 978-3-540-22507-2 sind Verfahren zur Interpolation einfacher Bahnen bekannt. Hierbei werden bei der Interpolation die Positionswerte für die einzelnen Maschinenachsen so berechnet, dass durch ihre Überlagerung die gewünschte Bahn entsteht. Zur Bestimmung der einzelnen, achsabhängigen Lageführungsgrößen wird z.B. die maximale Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und -beschleunigungsänderung ermittelt.

[0004] CNC-Maschinen, auf die in der vorliegenden Erfindung verwiesen wird, umfassen typischerweise mindestens ein Bearbeitungswerkzeug, das von einer oder einer Vielzahl von Antriebsachsen bewegbar ist. Der Bearbeitungsprozess selbst wird von einem gegebenen NC (Numerical Control)-Programm gesteuert, das mindestens eine Werkzeugbahn für das mindestens ein Bearbeitungswerkzeug sowie eine Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn definiert.

[0005] Im Hinblick auf den Prozess der NC-Programmierung, konzentrieren sich die Hauptzielsetzungen darauf sicherzustellen, dass die Maschine die erforderliche Teilgeometrie und Teiloberflächenqualität erzeugt. Für Werkzeugmaschinen, die Schneidprozesse ausführen, wie zum Beispiel Fräsen, Schleifen und Drehen, werden die Schneidparameter derart programmiert, dass die erste und führende Schneidgeschwindigkeit (Geschwindigkeit zwischen der Werkzeugkante und dem Material) den Materialeigenschaften und den Fähigkeiten der CNC-Maschine entspricht. Heute nutzt jedoch die NC-Programmierung meistens nicht das volle Verarbeitungspotenzial der Maschine, weil ihre dynamischen Eigenschaften nicht vollständig verstanden oder nicht vollständig berücksichtigt werden, wie nun unter Bezugnahme auf einen Fräsprozess beschrieben wird. Daraus resultiert, dass die tatsächliche Produktivität von CNC-Maschinen die theoretische maximale Produktivität oft weit verfehlt.

[0006] Bei genauerer Betrachtung eines Fräsprozesses, verwendet der NC-Programmierer ein CAM (Computer Aided Manufacturing-System), das das NC-Programm für die CNC-Maschine erzeugt. Die Produktivität des Fräsprozesses hängt weitgehend von Parametern ab, die von dem CAM-System eingestellt werden, wie zum Beispiel Achsenbeschleunigung, Achsenbeschleunigung, Spindeldrehzahl, Schneidgeschwindigkeit und Schneidvolumen des Fräswerkzeugs. Heute werden diese Parameter typischerweise wie folgt bestimmt.

[0007] Die maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung jeder Antriebsachse werden von dem Maschinenhersteller geliefert. Diese Zahlen werden von dem NC-Programmierer beim Programmieren der Parameter der Werkzeugbahn, entlang der die Werkzeugmaschine während des Fräsprozesses läuft, berücksichtigt. Um irgendwelche Qualitätsprobleme zu vermeiden, wählt der NC-Programmierer gewöhnlich die Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte aus, die viel niedriger sind als die spezifizierten maximalen Werte, um die geforderte Teilqualität sicherzustellen.

[0008] Die Schneidgeschwindigkeit, nämlich die Geschwindigkeit zwischen der Schneidkante des Schneidelements und dem Material, resultiert aus der Bahngeschwindigkeit des Fräswerkzeugs entlang der Werkzeugbahn (Vorschubrate), der Spindeldrehzahl (Umdrehung) des Spindeltriebs, der verwendet wird, um das Fräswerkzeug zu drehen, und dem geometrischen Design der Fräse, an der die Spindeldrehzahl der ausschlaggebende Parameter ist. Die bevorzugte sowie die maximale Schneidgeschwindigkeit werden von dem Fräswerkzeuglieferanten, der ein anderer ist als für die anderen Materialien, definiert. Während des NC-Programmierungsprozesses wird die tatsächliche Schneidgeschwindigkeit

keit typischerweise niedriger ausgewählt als die von dem Fräswerkzeuglieferanten definierte Geschwindigkeit, da der NC-Programmierer die Gefahr vermeiden will, dass die Maschine überlastet wird, dass das Fräswerkzeug sehr schnell altert, und dass der Prozess in schlechten Teiloberflächen resultiert.

[0009] Die volumetrische Schnittstelle zwischen dem Fräswerkzeug und dem Material sowie der Lauf des Fräswerkzeugs entlang der Werkzeugbahn definieren das Volumen, das während des Fräsens abgehoben wird. Je höher das Schneidvolumen, desto höher ist die erforderliche Schneidkraft, und desto höher ist die erforderliche Schneidleistung für das Abheben des Materials. Hinsichtlich der erforderlichen Schneidkräfte und Schneidleistungen werden beschränkende Faktoren von dem Fräswerkzeug selbst, der maximalen Leistung der Spindel sowie der dynamischen Steifigkeit der Struktur der CNC-Maschine vorgegeben. Die heutigen CAM-Systeme stellen bislang keine Intelligenz oder Algorithmen bereit, um diese Beschränkungen für den NC-Programmierungsprozess zu berücksichtigen, zumindest nicht für fünfachsiges Fräsvorgänge. Das NC-Programm verwendet daher wieder einen sehr konservativen Ansatz im Hinblick auf das maximale Schneidvolumen und die maximale Schneidlast.

[0010] Das NC-Programm, das von dem CAM-System erzeugt wird, wird ferner von einem Postprozessor verarbeitet, der das NC-Programm an die spezifische CNC-Steuervorrichtung und Fähigkeiten der Zielmaschine anpasst. Aufgrund der Nachverarbeitung wird die Produktivität weiter verringert. Schließlich, falls ein neues NC-Programm in eine CNC-Steuervorrichtung zum ersten Mal einzugeben ist, erfolgen die Umsetzung und das Einrichten des neuen Fertigungsprozesses durch Maschinenbediener oder NC-Programmierer, die typischerweise die Vorschubraten und Geschwindigkeiten der Maschine vor und während des Bearbeitungsprozesses aus Sicherheitsgründen wieder verringern.

[0011] Der Bearbeitungsprozess resultiert folglich in guten Teilen, die allen Qualitätsforderungen entsprechen. Was die Produktivität in Produktionszeit pro Teilausdrücke betrifft, verfehlt der Prozess jedoch das mögliche Maximum bei weitem. Dieselbe Situation trifft man zum Beispiel bei Bohr-, Dreh-, Laserschneid-, Wasserstrahlschneid- und Schweißprozessen an.

[0012] Zusammenfassend kann man sagen, dass die realistische maximale Produktivität eines Bearbeitungsprozesses weit ab von der Produktivität liegt, die derzeit verwendet wird, und zwar aus folgenden Gründen:

- auf Sicherheit und konservativ ausgerichtetes Denken des NC-Programmierers,
- CAM-Systeme verwenden vereinfachte, nicht realistische Maschinenmodelle,
- CAM-Systeme berücksichtigen das Schneidvolumen für Vorgänge mit 5 Achsen nicht,
- es fehlt an analytischen IT-Tools zur Produktivitätsanalyse und Optimierung,
- Defizite des Postprozessorvorgangs,
- auf Sicherheit und konservativ ausgerichtetes Denken der Maschinenbediener,

so dass die heutigen CNC-Bearbeitungsprozesse ihr Produktivitätspotenzial aufgrund unzureichender Berücksichtigung der dynamischen Limits der Antriebsachsen, unzureichender Berücksichtigung der maximalen Schneidgeschwindigkeit des Werkzeugs, unzureichender Berücksichtigung des Schneidvolumens nicht voll nutzen.

[0013] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zum Optimieren der Produktivität eines gegebenen Bearbeitungsprozesses mindestens einer CNC (Computer Numerical Control)-Maschine, die durch ein gegebenes NC-Programm definiert ist, bereitzustellen.

[0014] Erfindungsgemäß wird dieser Aufgabe durch das Verfahren nach Anspruch 1 verwirklicht.

[0015] Das erfindungsgemäße Verfahren weist Folgendes auf:

- iteratives Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn im Vergleich zu dem Bahngeschwindigkeitsprofil, das von dem gegebenen NC-Programm definiert wird, wobei das Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn unter angemessener Berücksichtigung des jeweiligen dynamischen Limits jeder der einen oder der Vielzahl von Antriebsachsen ausgeführt wird, insbesondere unter angemessener Berücksichtigung der maximalen Achsengeschwindigkeit und maximalen Achsenbeschleunigung jeder der einen oder Vielzahl von Antriebsachsen und unter angemessener Berücksichtigung der Verarbeitungslimits, die sich auf die Bahngeschwindigkeit aufgrund der Bearbeitungskapazität der CNC-Maschine, insbesondere des Bearbeitungswerkzeugs auswirken, und
- Anpassen des gegebenen NC-Programms mit der erhöhten Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn.

[0016] Gemäß der Erfindung wurde festgestellt, dass übliche Sicherheitsüberlegungen bei der NC-Programmierung außer Acht lassen, dass die maxi-

malen Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte, die von dem Maschinenhersteller definiert werden, eigentlich keinen einschränkenden Wert im Hinblick auf eine richtige Werkstückqualität wiedergeben, sondern vielmehr einen maximal zulässigen Wert im Hinblick auf den Schadensschwellenwert der CNC-Maschine und ihre dynamischen Kapazität. Auf dieselbe Art wurde festgestellt, dass bisher extreme Vorsicht im Hinblick auf Verarbeitungsparameter angewandt wurde, die sich auf die Bahngeschwindigkeit auswirken, wie zum Beispiel Verarbeitungslimit, und sich daher auf die Produktivität des Bearbeitungsprozesses auswirken.

[0017] Die Drehung eines Fräswerkzeugs wird zum Beispiel sehr oft niedriger ausgewählt als die eigentlich zulässige maximale Schneiddrehzahl des Werkzeugs, da der NC-Programmierer die Gefahr von Maschinenüberlasten, Werkzeugalterung und schlechten Teilerflächen vermeiden möchte. Das Verringern der Drehung ist jedoch typischerweise von einer Verringerung der Bahngeschwindigkeit begleitet, da ein fixes Verhältnis zwischen Spindeldrehzahl (Umdrehung) und Bahngeschwindigkeit aus anderen Gründen eingehalten werden muss. Da die Werkzeugbahngeschwindigkeit direkt zu der Produktivität eines gegebenen Prozesses proportional ist, bedingt unnötige Verringerung der Bahngeschwindigkeit automatisch einen Verlust an Produktivität.

[0018] In einem ersten Stadium lehrt die vorliegende Erfindung daher das iterative Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn im Vergleich zu dem Bahngeschwindigkeitsprofil, das durch das gegebene NC-Programm festgelegt wird, unter angemessener Berücksichtigung des jeweiligen dynamischen Limits jeder der einen oder der Vielzahl von Antriebsachsen, insbesondere angemessener Berücksichtigung der maximalen Achsengeschwindigkeit und der maximalen Achsenbeschleunigung jeder der einen oder der Vielzahl von Antriebsachsen, sowie unter angemessener Berücksichtigung der eigentlichen Verarbeitungslimits, die sich auf die Bahngeschwindigkeit aufgrund der Bearbeitungskapazität der CNC-Maschine auswirken. Dadurch kann das gegebene NC-Programm dann an die erhöhte Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn (Bahngeschwindigkeitsprofil) angepasst werden.

[0019] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung, weist das Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn das Maximieren der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn auf, bis das jeweilige dynamische Limit der einen oder mindestens einer der Vielzahl von Achsen erreicht wird, oder bis mindestens eines der Verarbeitungslimits erreicht wird.

[0020] Das Erhöhen oder Maximieren der Bahngeschwindigkeit wird vorzugsweise blockweise über

das gesamte NC-Programm ausgeführt, das typischerweise eine Vielzahl von NC-Blöcken aufweist, das heißt für jeden Block des NC-Programms. Jeder NC-Block definiert einen spezifischen Subprozess, der eine jeweilige Subwerkzeugbahn, eine jeweilige Subbahngeschwindigkeit und andere Verarbeitungsparameter umfasst, zum Beispiel die Spindeldrehzahl (Umdrehung) zum Antreiben des Fräswerkzeugs in dem Fall eines Fräsprozesses. Jeder NC-Block kann einen einzelnen Wert der (Sub)-Bahngeschwindigkeit für die jeweilige Werkzeugbahn definieren, der die Geometrie der jeweiligen Werkzeugbahn berücksichtigt. Falls eine Werkzeugbahn zum Beispiel stark gebogen ist, ist die Werkzeugbahngeschwindigkeit typischerweise viel kleiner als bei einer geraden Werkzeugbahn.

[0021] Die Bahngeschwindigkeit kann natürlich nicht willkürlich erhöht werden. Das Gesamtlimit wird von der vorbestimmten Werkstückqualität, die zu erreichen ist, bestimmt. Die einfachste Art, die absolute maximale Bahngeschwindigkeit im Hinblick auf die vordefinierte Werkstückqualität zu bestimmen, wären ein Versuchs-und-Irrtum-Ansatz, nämlich das iterative Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn in dem NC-Programm und das Bearbeiten eines Werkstücks für jede Iteration eines Werkstücks, dessen Qualität zu messen ist. Dieser Iterationsprozess ist zu wiederholen, bis das bearbeitete Werkstück außerhalb des vorbestimmten Maßes für die Qualität des Werkstücks liegt, oder bis das jeweilige dynamische Limit der einen oder mindestens einen der Vielzahl von Antriebsachsen erreicht ist, oder bis mindestens eines der Verarbeitungslimits erreicht wird.

[0022] Das Bestimmen der Werkstückqualität unter Verwenden von Messsystemen ist heute jedoch sehr zeitaufwändig, da man vor der nächsten Iteration jeweils auf das Resultat der Messung warten muss. Falls das bearbeitete Werkstück sehr komplex ist, könnte es Tage oder sogar Wochen dauern, um die Qualität des Werkstücks zu bestimmen. Heute besteht die gebräuchlichste Art, die Teilmessung auszuführen, im Transfer des fertigen Teils zu einer Messvorrichtung. Der Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass Herstellen und Messen zwei ziemlich separate Prozesse sind. Gewöhnlich erfolgt keine Messung innerhalb der Maschine, mit Ausnahme einiger Fälle von Messungen während des Prozesses, die jedoch nur einfache Messungen erlauben, wie zum Beispiel das Messen der Position einer Bohrung.

[0023] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, kann das Optimieren der Produktivität unter Verwenden eines, auf Simulation basierenden Verfahrens zur „Online“-Qualitätsanalyse eines CNC-Bearbeitungsprozesses verwirklicht werden.

[0024] Die grundlegende Idee besteht darin, den jeweiligen betreffenden Bearbeitungsprozess mittels eines digitalen Maschinenmodells der CNC-Maschine, das mit Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten versehen ist, die während des Bearbeitungsprozesses aufgezeichnet werden, zu simulieren. Die Simulation ergibt ein virtuell überarbeitetes Modell des tatsächlich bearbeiteten Werkstücks, das leicht mit einem idealen CAD-Modell des Werkstücks verglichen werden kann. Basierend auf diesem Vergleich, kann die Qualität des Werkstücks direkt bestimmt werden. Das digitale Maschinenmodell kann ein Mehrkörper-Simulationsmodell, ein FEM-Modell oder ein rein geometrisches kinematisches Modell der CNC-Maschine sein.

[0025] Das Verfahren kann als eine Serveranwendung auf einer Cloud-basierten Plattform, auf die die aufgezeichneten Daten übertragen werden, umgesetzt werden. Die Datenaufzeichnung von der CNC-Maschine und der Datentransfer zu der Cloud-Plattform können durch eine Client-Vorrichtung verwirklicht werden.

[0026] Da das oben stehende Verfahren auf der „Online“-Aufzeichnung der Prozessdaten parallel zum Bearbeiten basiert, und da das Verfahren bevorzugt auf einem Cloud-basierten Server umgesetzt wird, kann das Resultat der oben beschriebenen Qualitätsanalyseanwendung so gut wie sofort oder kurz nach dem Beenden des Bearbeitungsprozesses verfügbar sein. Informationen über die geometrischen Formen und Oberflächen oder die Oberflächenrauigkeit des Werkstücks können daher jeweils während des Prozesses oder unmittelbar nach dem Bearbeitungsprozess verfügbar sein, was nahezu sofortige Informationen zur Qualität des Werkstücks ergibt. Aus diesem Grund erlaubt es dieses Analyseverfahren, die Zeit zur Optimierung der Bahngeschwindigkeit unter Verwenden des Versuch-und-Irrtum-Ansatzes, wie oben beschrieben, enorm zu verringern.

[0027] Gemäß einer anderen bevorzugten Ausführungsform der Erfindung, weist das Maximieren der Bahngeschwindigkeit daher Folgendes auf

- a) Bearbeiten eines Werkstücks basierend auf dem tatsächlichen NC-Programm und Aufzeichnen von Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten während des betreffenden Bearbeitungsprozesses,
- b) Simulieren des betreffenden Bearbeitungsprozesses mittels eines digitalen Maschinenmodells, das mit den aufgezeichneten Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten versehen wird, um das Werkstück, das während der betreffenden aufgezeichneten Bearbeitung bearbeitet wird, virtuell zu überarbeiten,
- c) Bestimmen der Qualität des bearbeiteten Werkstücks im Hinblick auf eine vordefinierte

Qualitätsmessung durch Vergleichen des virtuell überarbeiteten Werkstücks mit einem Modell aus computergestütztem Design (CAD) des Werkstücks,

d) Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn in dem NC-Programm,

e) Wiederholen der Schritte a) bis d), bis das virtuell überarbeitete Werkstück außerhalb des vordefinierten Maßes für die Qualität des Werkstücks liegt, oder bis das jeweilige dynamische Limit der einen oder mindestens einen der Mehrzahl von Antriebsachsen erreicht wird, oder bis mindestens eines der Verarbeitungslimits erreicht wird.

[0028] Was die Daten, die aufzuzeichnen sind, betrifft, können die aufgezeichneten Echtzeit-Prozessdaten in der Hauptsache Werkzeugbahnparameter aufweisen, insbesondere eine Sollposition und/oder tatsächliche Position, eine Sollgeschwindigkeit und/oder tatsächliche Geschwindigkeit, eine Sollbeschleunigung und/oder tatsächliche Beschleunigung, ein Sollruck und/oder tatsächlicher Ruck, ein Soll Drehmoment und/oder tatsächliches Drehmoment, eine Sollantriebskraft und/oder tatsächliche Antriebskraft, einen Sollantriebsstrom und/oder tatsächlichen Antriebsstrom bezüglich der Antriebsachsen der CNC-Maschine. Zusätzlich können die Echtzeitdaten Daten aus externen Messvorrichtungen, die an der CNC-Maschine angebracht sind, umfassen. Die aufgezeichneten Nicht-Echtzeit-Prozessdaten können den NC-Programmcode, Maschinenkonfigurationsdaten, Steuervorrichtungskonfigurationsdaten, Antriebskonfigurationsdaten, Materialeigenschaften des Werkstücks, Benutzeraktionen während des Bearbeitungsprozesses und/oder Konfigurationsdaten des Verarbeitungswerkzeugs, insbesondere Werkzeuggeometrie und/oder Werkzeugmerkmale aufweisen.

[0029] Gemäß einer anderen bevorzugten Ausführungsform der Erfindung weist das Verfahren als eine Art zweiten Stadiums zum Optimieren der Produktivität, das Erhöhen der Verarbeitungslimits, die sich auf die Bahngeschwindigkeit auswirken, auf, um die Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn weiter zu erhöhen, was wiederum unter angemessener Berücksichtigung des jeweiligen dynamischen Limits jeder der einen oder der Vielzahl von Antriebsachsen sowie unter angemessener Berücksichtigung der jetzt erhöhten Verarbeitungslimits auszuführen ist.

[0030] Bevorzugt kann das Erhöhen der Verarbeitungslimits zum weiteren Erhöhen der Bahngeschwindigkeit durch Erhöhen der Bearbeitungskapazität verwirklicht werden, was wiederum durch Erhöhen mindestens eines Bearbeitungsparameters, der in der Lage ist, die Bearbeitungskapazität zu erhö-

hen, verwirklicht wird. Im Hinblick auf eine Maximierung der Bahngeschwindigkeit und der Produktivität, wird der mindestens eine Bearbeitungsparameter bevorzugt erhöht, bis ein Limit des jeweiligen Bearbeitungsparameters erreicht wird.

[0031] Erfindungsgemäß wurde festgestellt, dass, mit Ausnahme der dynamischen Limits, der CNC-Maschine die Verarbeitungslimits aufgrund der begrenzten Bearbeitungskapazität der CNC-Maschine, die die Bahngeschwindigkeit beeinflussen, oft das vorherrschende Limit für die Gesamtproduktivität sind. Eine Laserschneidmaschine erlaubt zum Beispiel eine maximale Geschwindigkeit von 100 m/Min. und eine Beschleunigung von 1 g. Die Laserstrahlenergie beträgt zum Beispiel 1 kW. Angenommen, das Material ist eine Stahlplatte mit 10 mm Stärke, wäre die maximale Lasergeschwindigkeit, die während des Prozesses angewandt werden kann, nur in dem Bereich einiger weniger m/Min., denn wenn die Maschine schneller arbeitet, wäre die Laserstrahlenergie nicht hoch genug, um Stahl mit 10 mm Stärke zu schneiden. In diesem Fall sind die Maschinenachsen nicht der beschränkende Faktor des Laserschneidprozesses. Umgekehrt, falls dieselbe Laserschneidmaschine (maximale Geschwindigkeit 100 m/Min., maximale Beschleunigung 1 g, maximale Laserleistung 1 kW) sehr dünne Bleche mit einer Stärke von 0,1 mm schneiden soll, ist die Laserleistung hoch genug, um dieses dünne Material sogar mit einer Geschwindigkeit von mehr als 100 m/Min. zu schneiden. In diesem Fall sind die maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung der Maschinenachsen der beschränkende Faktor.

[0032] Im Allgemeinen kann der mindestens eine Bearbeitungsparameter, der fähig ist, die Bearbeitungskapazität zu erhöhen, einer der folgenden sein:

- in dem Fall einer Fräs- oder Bohrmaschine: Spindeldrehzahl und Spindelleistung der Spindel zum Antreiben des Fräs- oder Bohrwerkzeugs,
- in dem Fall einer Drehmaschine: Spindeldrehzahl und Spindelleistung der Spindel zum Antreiben des Werkstücks,
- in dem Fall einer Laserschneidmaschine: Leistung des Laserstrahls, Energiedichte des Laserstrahls und Spotgröße des Laserstrahls,
- in dem Fall einer Wasserstrahl-Schneidmaschine: Druck des Wasserstrahls, Spotgröße des Wasserstrahls, Menge an hinzugefügtem Scheuermittel.

[0033] Im Hinblick auf das Limit des jeweiligen Bearbeitungsparameters kann das bestimmt werden durch

- in dem Fall einer Fräs- oder Bohrmaschine: die maximale Spindeldrehzahl und/oder die maximale Spindelleistung der Spindel zum Antreiben des Fräs- oder Bohrwerkzeugs und/oder die maximale Schneidgeschwindigkeit des Fräs- oder Bohrwerkzeugs und/oder das maximale Schneidvolumen pro Zeit des Fräs- oder Bohrwerkzeugs und/oder die maximale Schneidlast,

- in dem Fall einer Drehmaschine: die maximale Spindeldrehzahl und/oder die maximale Spindelleistung der Spindel zum Antreiben des Werkstücks und/oder die maximale Schneidgeschwindigkeit des Drehwerkzeugs und/oder das maximale Schneidvolumen pro Zeit des Drehwerkzeugs und/oder die maximale Schneidlast,

- in dem Fall einer Laserschneidmaschine: die maximale Leistung des Laserstrahls und/oder die maximale Energiedichte des Laserstrahls und/oder die minimale Spotgröße des Laserstrahls,

- in dem Fall einer Wasserstrahl-Schneidmaschine: der maximale Druck des Wasserstrahls, die minimale Spotgröße des Wasserstrahls, die maximale Menge an hinzugefügtem Scheuermittel.

[0034] Unter erneuter Bezugnahme auf das oben stehende Beispiel des Laserschneidens, falls die tatsächliche Laserleistung, wie sie derzeit in dem gegebenen NC-Programm eingestellt ist, das vorherrschende Limit der Bahngeschwindigkeit ist, und falls die maximale Laserleistung eine weitere Erhöhung der Maschinenkapazität erlaubt, kann die tatsächliche Laserleistung erhöht werden, um dieses Verarbeitungslimit zu erhöhen und weiteres Erhöhen der Bahngeschwindigkeit zu erlauben.

[0035] Um das erhöhte Verarbeitungslimit zu berücksichtigen, kann das Verfahren ferner das Anpassen des gegebenen NC-Programms mit dem mindestens einen erhöhten Bearbeitungsparameter, der fähig ist, die Bearbeitungskapazität zu erhöhen, umfassen.

[0036] Wenn die maximale Schneidlast oder das maximale Schneidvolumen pro Zeit die Verarbeitungslimits sind, kann das Verfahren ferner das Bestimmen des maximalen und/oder tatsächlichen Schneidvolumens des Bohr-, Fräs- oder Fräswerkzeugs und/oder die maximale und/oder die tatsächliche Schneidlast für das gegebene NC-Programm, ferner das Verwenden einer Materialabhebungssimulation umfassen. Eine solche Materialabhebungssimulation, insbesondere für fünffachsiges Maschinen, kann durch ein CAM-System bereitgestellt werden, das es erlaubt, das Materialvolumen zu bestimmen, das von der Schnittstelle zwischen dem Mantelkörper des drehenden Schneidelements entlang seiner Bahn und Materials sowie des Verlaufs der Maschine entfernt wird.

[0037] Alternativ oder zusätzlich können das maximale und/oder tatsächliche Schneidvolumen des Bohr-, Fräs- oder Fräswerkzeugs und/oder die maximale und/oder die tatsächliche Schneidlast für das gegebene NC-Programm in Echtzeit während eines laufenden Bearbeitungsprozesses gemessen/aufgezeichnet werden. Für Schruppenwendungen ist die Schneidkraft proportional zu dem Strom, der von dem Spielmotor verbraucht wird. Durch Aufzeichnen des Spindelmotorstroms können daher die Schneidkraft und damit die Schneidlast berechnet werden. Alternativ kann die Frässpindel mit einem Dynamometersensor ausgestattet sein, der es erlaubt, die Fräskräfte während des Bearbeitungsprozesses zu messen. Ferner können neue, sogenannte „Smart Tools“ verwendet werden, die integrierte Sensoren umfassen, um Abweichungen, Beschleunigungen, Schneidkräfte, Temperaturen und Drehmomente zu messen.

[0038] Gemäß einer anderen Ausführungsform der Erfindung, kann das Verfahren ferner eine Messung für oder Informationen über das ungenutzte Produktivitätspotenzial des gegebenen NC-Programms liefern. Dafür kann das Verfahren ferner das Bestimmen des ungenutzten Produktivitätspotenzials des gegebenen NC-Programms durch Bestimmen des Unterschieds zwischen der Verarbeitungszeit des gegebenen NC-Programms, das zu optimieren ist, und der Verarbeitungszeit des angepassten NC-Programms umfassen. Die Verarbeitungszeit des gegebenen NC-Programms sowie des optimierten Programms kann durch Ausführen einer Simulation des NC-Programms bestimmt werden, wodurch die Verarbeitungszeit gemessen wird. Alternativ kann die Verarbeitungszeit direkt in Echtzeit während des Bearbeitungsprozesses gemessen werden.

[0039] Gemäß einer anderen Ausführungsform der Erfindung, können Bearbeitungslimits, die sich auf die Bahngeschwindigkeit auswirken, in dem Fall einer Fräsmaschine weiter erhöht werden, indem die Bearbeitungsstrategie angepasst wird durch

- Erhöhen der Schneidtiefe, und/oder
- Verwenden einer größeren Fräse, und/oder
- Verwenden einer Fräse mit einer unterschiedlichen Geometrie, und/oder
- Anpassen der Befestigung des Werkstücks, das zu fräsen ist.

[0040] Weitere Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich bei Verwendung der beispielhaften Ausführungsform, die in dem folgenden Text veranschaulicht ist, und in Verbindung mit der Figur.

Fig. 1 veranschaulicht ein Beispiel einer Systemarchitektur, die von dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Optimieren der Produktivität eines Bearbeitungsprozesses einer CNC-Maschine verwendet werden kann.

[0041] Um Einzelheiten des erfindungsgemäßen Verfahrens zu veranschaulichen, wird ein Fräsprozess, der eine fünfachsige CNC-Fräsmaschine verwendet, der durch ein gegebenes NC-Programm definiert ist, herangezogen. Gemäß der vorliegenden Erfindung, soll das NC-Programm durch Erhöhen, bevorzugt Maximieren der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn im Vergleich zu dem Bahngeschwindigkeitsprofil, wie es von dem gegebenen NC-Programm definiert ist, optimiert werden. Dazu muss das Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn unter angemessener Berücksichtigung des jeweiligen dynamischen Limits jeder der fünf Achsen erfolgen, insbesondere unter angemessener Berücksichtigung der maximalen Achsgeschwindigkeit und der maximalen Achsenbeschleunigung jeder Antriebsachse.

[0042] Allerdings muss das Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn auch unter angemessener Berücksichtigung von Bearbeitungslimits ausgeführt werden, die sich auf die Bahngeschwindigkeit aufgrund der Bearbeitungskapazität der CNC-Maschine auswirken, insbesondere des Fräswerkzeugs. Bei dem vorliegenden Beispiel sind die Verarbeitungslimits, die sich auf die Bahngeschwindigkeit auswirken, jeweils die maximale Schneidgeschwindigkeit sowie die maximale Schneidlast oder das maximale Schneidvolumen. Die maximale Schneidgeschwindigkeit wiederum wird durch die Schneidelementtechnologie und das Schneidelementmaterial eingeschränkt. Die maximale Schneidlast/das maximale Schneidvolumen, das zu der Schneidkraft proportional ist, stellt eine statische und dynamische Last auf dem Schneidelement dar. Das Schneidelement, der Schneidelementhalter, die Spindel und schlussendlich die gesamte Maschinenstruktur können nur begrenzte statische und dynamische Kräfte bewältigen. Falls die Kräfte die Strukturkapazitäten der gesamten Maschine überschreiten, kann das zu Bahnabweichungen führen, die durch Ablenken und Verdrehen der Maschinenstruktur verursacht werden, zu Oberflächenqualitätsproblemen aufgrund falscher Winkel und Abstände zwischen dem Schneidelement und dem Material, zu Oberflächenrauigkeitsproblemen aufgrund von Schwingungen, sowie zu schneller Werkzeugabnutzung. Da das Gesamtbenchmark zum Erhöhen der Produktivität von der Werkstückqualität, die immer noch zu verwirklichen ist, bestimmt wird, lehrt eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Optimierungsverfahrens das Maximieren der Bahngeschwindigkeit durch

- a) Bearbeiten eines Werkstücks basierend auf dem tatsächlichen NC-Programm und Aufzeichnen von Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten während des betreffenden Bearbeitungsprozesses,

b) Simulieren des betreffenden Bearbeitungsprozesses mittels eines digitalen Maschinenmodells, das mit den aufgezeichneten Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten versehen wird, um das Werkstück, das während der betreffenden aufgezeichneten Bearbeitung bearbeitet wird, virtuell zu überarbeiten,

c) Bestimmen der Qualität des bearbeiteten Werkstücks im Hinblick auf eine vordefinierte Qualitätsmessung durch Vergleichen des virtuell überarbeiteten Werkstücks mit einem Modell aus computergestütztem Design (CAD) des Werkstücks,

d) Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn in dem NC-Programm,

e) Wiederholen der Schritte a) bis d), bis das virtuell überarbeitete Werkstück außerhalb des vordefinierten Maßes für die Qualität des Werkstücks liegt, oder bis das jeweilige dynamische Limit der einen oder mindestens einen der Mehrzahl von Antriebsachsen erreicht wird, oder bis mindestens eines der Verarbeitungslimits erreicht wird.

[0043] Fig. 1 veranschaulicht schematisch eine Systemarchitektur zum sofortigen Analysieren der Qualität eines Werkstücks, wie von den Schritten b) und c) gefordert. Dieses System erlaubt das Aufzeichnen der Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten einer CNC-Maschine 10 zum Übertragen der Daten zu einer Cloud-Plattform 20, auf der ein Qualitätsanalytikverfahren umgesetzt werden kann.

[0044] Die CNC-Maschine 10 wird von einer CNC-Steuervorrichtung 11 betrieben und umfasst elektrische Antriebe 13.1-13.5 für jeden Aktuator 15.1-15.5 der jeweiligen Maschinenachsen. Das Bearbeiten eines spezifischen Werkstücks durch die CNC-Maschine basiert auf Bearbeitungsbefehlen aufgrund eines gegebenen NC-Programms, die von der CNC-Maschine 10 in Bearbeitungsaktionen umgewandelt werden, das heißt in Bewegungen der Aktuatoren 14.1-14.5 der unterschiedlichen Maschinenachsen, und in eine Drehbewegung eines Spindelaktuators 16 des Fräswerkzeugs. Diese Aktuatoren gehören zu dem mechanischen/Bearbeitungsteil 18 der CNC-Maschine 10. Dazu erzeugt die CNC-Steuervorrichtung 11 entsprechende Sollwerte für jede Achse und das Fräswerkzeug, die über einen lokalen Feldbus 12 zu den elektrischen Antrieben 13.1-13.5 aller Achsen und dem elektrischen Spindeltrieb 17 des Spindelaktuators 16 übertragen werden. Der Feldbus 12 ist ein Echtzeit-Kommunikationsfeldbus, der für die interne Kommunikation der CNC-Maschine 10 zwischen der CNC-Steuervorrichtung 11 und den elektrischen Antrieben 13.1-13.5, 17 verwendet wird. Die in die Maschine eingebetteten Messvorrichtungen/Sensoren 15.1-15.5, die zum Messen der tatsächlichen Positionen jeder Achse verwendet werden, können

ebenfalls mit dem Feldbus 12 verbunden sein. Um die Bewegung entlang jeder Achse zu steuern, messen die in der Maschine eingebetteten Messvorrichtungen 15.1-15.5, zum Beispiel lineare Hochauflösungswaagen, kontinuierlich die aktuelle Position für Feedback über den Feldbus 12 zu der CNC-Steuervorrichtung 11.

[0045] Unter weiterer Bezugnahme auf Fig. 1, ist die CNC-Maschine 10 mit der Client-Vorrichtung 1 verbunden.

[0046] Die Client-Vorrichtung 1 ist zum Aufzeichnen und zur Vorverarbeitung von Prozessmassendaten von der CNC-Maschine 10 sowie zum Übertragen der prozessbezogenen Massendaten der Prozessmassendaten zu der Cloud-Plattform 20 konfiguriert. Dazu umfasst die Client-Vorrichtung eine erste Datenbankschnittstelle 2 mit der CNC-Steuervorrichtung 11 der CNC-Maschine 10 zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Echtzeitprozessdaten über einen Echtzeitdatenkanal 7, und zum Aufzeichnen der Nicht-Echtzeit-Prozessdaten über mindestens einen Nicht-Echtzeit-Datenkanal 8. Zum Zweck der Qualitätsprüfung, können die aufgezeichneten Echtzeitprozessdaten in der Hauptsache Werkzeugbahnparameter, insbesondere Sollpositionen und/oder tatsächliche Positionen aufweisen, und außerdem die oben erwähnten Daten. Zusätzlich ist ein Kraftsensor 30 in dem Spindelaktuator 17 des Fräswerkzeugs 16 installiert, der direkt mit der Client-Vorrichtung 1 über die weitere Datenschnittstelle 4 verbunden ist. Der Zugang zu diesen Fräskraftdaten kann es ermöglichen, die Schneidlast zu bestimmen, die ein Verarbeitungslimit ist, das sich auf die Produktivität des Fräsprozesses, wie oben erklärt, auswirkt. Im Hinblick auf die Qualitätsanalyse, können die aufgezeichneten Nicht-Echtzeit-Prozessdaten in der Hauptsache Konfigurationsdaten des Verarbeitungswerkzeugs aufweisen, insbesondere Werkzeuggeometrie und/oder Werkzeugmerkmale, sowie den NC-Programmcode, Maschinenkonfigurationsdaten, Steuervorrichtungskonfigurationsdaten, Antriebskonfigurationsdaten, Materialeigenschaften des Werkstücks.

[0047] Die Client-Vorrichtung 1 umfasst ferner eine zweite Datenkommunikationsschnittstelle 3 zum Übertragen der aufgezeichneten Prozessdaten zu der Cloud-Plattform 20. Die Client-Vorrichtung ist auch konfiguriert, um die aufgezeichneten Daten vor der Übertragung zu dem Server 20 vorzuverarbeiten, insbesondere die aufgezeichneten Nicht-Echtzeit-Daten mit den aufgezeichneten Echtzeitdaten wie oben beschrieben zu kontextualisieren.

[0048] Unter Bezugnahme auf die Schritte b) und c) der vorliegenden beispielhaften Ausführungsform des Verfahrens, kann das Überarbeiten des Werkstücks, das von der Fräsmaschine 10 bearbeitet

wird, zuerst durch Berechnen der Werkzeugbahn des Fräswerkzeugs basierend auf einem digitalen Maschinenmodell, das mit Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten, die während des Bearbeitungsprozesses aufgezeichnet werden, versehen wird, ausgeführt werden. Am einfachsten kann die aktuelle Werkzeugbahn durch Versehen eines kinematischen Modells der CNC-Maschine **10** mit den aktuellen Positionen der Antriebsachsen, die verwendet werden, um das Fräswerkzeug bewegen, die während jedes Bearbeitungsprozesses aufgezeichnet wurden, berechnet werden. Anschließend werden die Geometrie und die Fräsmerkmale des Fräswerkzeugs betrachtet, um die Werkstückoberflächen entlang der simulierten Werkzeugbahnen zu überarbeiten. Dieses virtuelle Überarbeiten kann einfach durch eine Materialabhebungssimulation, wie allgemein gemäß dem Stand der Technik bekannt, ausgeführt werden. Für jede Iteration ergibt diese Überarbeitung eine virtuelle Oberfläche des tatsächlich bearbeiteten Werkstücks und, wichtiger noch, fast sofort am Ende des Fräsprozesses.

[0049] Aufgrund dieser schnellen Reaktionszeit des beschriebenen Qualitätsanalyseverfahrens, kann das Maximieren der Bahngeschwindigkeit im Hinblick auf die vordefinierte Werkstückqualität effizient vorgenommen werden, indem der beschriebene Versuch-und-Irrtum-Ansatz verwendet wird, nämlich die iterative Erhöhung der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn in dem NC-Programm, und Bearbeiten für jede Iteration eines Werkstücks, dessen Qualität von dem Qualitätsanalyseverfahren bestimmt wird, bis das bearbeitete Werkstück außerhalb des vordefinierten Maßes für die Qualität des Werkstücks liegt, oder bis das jeweilige dynamische Limit der einen oder mindestens einer der Vielzahl von Antriebsachsen erreicht wird, oder bis mindestens eines der Verarbeitungslimits erreicht wird. Insbesondere kann ein Versuch-und-Irrtum-Ansatz für Serienfertigung angesichts der Komplexität der auf Vorwärtssimulation basierenden Optimierungsverfahren vernünftig sein.

[0050] Zusätzlich enthalten die aufgezeichneten Echtzeit- und Nicht-Echtzeitdaten automatisch die Verarbeitungszeit zum Bearbeiten des jeweiligen Werkstücks für jede Iteration. Das beschriebene Verfahren stellt daher ferner automatisch Informationen über das ungenutzte Produktivitätspotenzial des gegebenen NC-Programms bereit, nämlich den Unterschied zwischen der Verarbeitungszeit des gegebenen (Start) NC-Programms, das zu optimieren ist, und die Verarbeitungszeit des angepassten NC-Programms.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Optimieren der Produktivität eines Bearbeitungsprozesses mindestens einer CNC

(Computer Numerical Control)-Maschine, wobei die CNC-Maschine mindestens ein Bearbeitungswerkzeug umfasst, das durch eine oder eine Vielzahl von Antriebsachsen bewegbar ist, wobei der Bearbeitungsprozess durch ein gegebenes NC (Numerical Control)-Programm gesteuert wird, das mindestens eine Werkzeugbahn für das mindestens eine Bearbeitungswerkzeug und ein Bahngeschwindigkeitsprofil entlang der Werkzeugbahn definiert, wobei das Verfahren Folgendes umfasst

- iteratives Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn im Vergleich zu dem Bahngeschwindigkeitsprofil, wobei

das iterative Erhöhen ein Maximieren der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn aufweist, bis das jeweilige dynamische Limit der einen oder mindestens einer der Vielzahl von Achsen erreicht wird, oder bis mindestens eines der Verarbeitungslimits erreicht wird, und

das iterative Erhöhen von dem gegebenen NC-Programm definiert wird, wobei das iterative Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn unter angemessener Berücksichtigung des jeweiligen dynamischen Limits jeder der einen oder der Vielzahl von Antriebsachsen ausgeführt wird, unter angemessener Berücksichtigung der maximalen Achsen-geschwindigkeit und maximalen Achsenbeschleunigung jeder der einen oder Vielzahl von Antriebsachsen und unter angemessener Berücksichtigung der Verarbeitungslimits, die sich auf die Bahngeschwindigkeit aufgrund der Bearbeitungskapazität der CNC-Maschine auswirken,

- Anpassen des gegebenen NC-Programms mit der erhöhten Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn, und

- Maximieren der Bahngeschwindigkeit, aufweisend:

a) Bearbeiten eines Werkstücks basierend auf dem aktuellen NC-Programm und Aufzeichnen von Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten während des betreffenden Bearbeitungsprozesses,

b) Simulieren des betreffenden Bearbeitungsprozesses mittels eines digitalen Maschinenmodells, das mit den aufgezeichneten Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten versehen ist, um das Werkstück, das während der betreffenden aufgezeichneten Bearbeitung bearbeitet wird, virtuell zu überarbeiten,

c) Bestimmen der Qualität des bearbeiteten Werkstücks im Hinblick auf eine vordefinierte Qualitätsmessung durch Vergleichen des virtuell überarbeiteten Werkstücks mit einem Modell aus computergestütztem Design (CAD) des Werkstücks,

d) Erhöhen der Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn in dem NC-Programm,

e) Wiederholen der Schritte a) bis d), bis das virtuell überarbeitete Werkstück außerhalb des vordefinierten Maßes für die Qualität des Werkstücks liegt, oder bis das jeweilige dynamische Limit der einen oder mindestens einen der Mehrzahl von Antriebsachsen erreicht wird, oder bis mindestens eines der Verarbeitungslimits erreicht wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die aufgezeichneten Echtzeit-Prozessdaten

- Werkzeugbahnparameter mindestens eines Verarbeitungswerkzeugs, insbesondere mindestens einer Sollposition und/oder tatsächlichen Position und/oder einer Sollgeschwindigkeit und/oder tatsächlichen Geschwindigkeit und/oder einer Sollbeschleunigung und/oder tatsächlichen Beschleunigung und/oder eines Sollrucks und/oder tatsächlichen Rucks und/oder eines Sollandmoments und/oder tatsächlichen Drehmoments und/oder einer Sollantriebskraft und/oder tatsächlichen Antriebskraft und/oder eines Sollantriebsstroms und/oder tatsächlichen Antriebsstroms bezüglich der mindestens einen linearen oder drehenden Antriebsachse aufweisen, und/oder
- eine mit dem Prozess zusammenhängende Kraft, ein Drehmoment, einen Druck, eine Torsion, eine Biegung, eine Belastung, eine Schwingung, eine Temperatur und/oder Energieverbrauch mindestens eines Teils der CNC-Maschine, und wobei die aufgezeichneten Nicht-Echtzeit-Prozessdaten Folgendes aufweisen
- einen NC (Numerical Control)-Programmcode und/oder NC-Programmkonfigurationsdaten aufweisen, insbesondere eine jeweils aktive NC-Programmzeile oder einen jeweils aktiven NC-Block, und/oder
- Maschinenkonfigurationsdaten, Antriebskonfigurationsdaten und/oder Steuervorrichtungskonfigurationsdaten, und/oder
- Materialeigenschaften des Werkstücks, und/oder
- Benutzeraktionen während des Bearbeitungsprozesses, und/oder
- Konfigurationsdaten eines Bearbeitungswerkzeugs, insbesondere Werkzeuggeometrie und/oder Werkzeugmerkmale, zum Beispiel Materialabhebung.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Maschinenmodell ein kinematisches Modell, ein Mehrkörper-Simulationsmodell oder ein Finite-Elemente-Verfahren (FEM)-Modell der CNC-Maschine ist.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren das Erhöhen der Verarbeitungslimits, die sich auf die Bahngeschwindigkeit auswirken, aufweist, um die Bahngeschwindigkeit entlang der Werkzeugbahn weiter zu erhöhen, unter angemessener Berücksichtigung des jeweiligen dynamischen Limits jeder der einen oder der Vielzahl von Antriebsachsen und unter angemessener Berücksichtigung der erhöhten Verarbeitungslimits.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei das Erhöhen der Verarbeitungslimits der Bahngeschwindigkeit das Erhöhen der Bearbeitungskapazität durch Erhöhen mindestens eines Bearbeitungsparameters, der fähig ist, die Bearbeitungskapazität zu erhöhen, aufweist, bevorzugt bis ein Limit des jeweiligen Bearbeitungsparameters erreicht ist.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei der mindestens eine Bearbeitungsparameter, der fähig ist, die Bearbeitungskapazität zu erhöhen, einer der folgenden ist:

- in dem Fall einer Fräs- oder Bohrmaschine: Spindeldrehzahl und Spindelleistung der Spindel zum Antreiben des Fräs- oder Bohrwerkzeugs,
- in dem Fall einer Drehmaschine: Spindeldrehzahl und Spindelleistung der Spindel zum Antreiben des Werkstücks,
- in dem Fall einer Laserschneidmaschine: Leistung des Laserstrahls, Energiedichte des Laserstrahls und Spotgröße des Laserstrahls,
- in dem Fall einer Wasserstrahlschneidmaschine: Druck des Wasserstrahls, Spotgröße des Wasserstrahls, Menge an hinzugefügtem Scheuermittel.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei das Limit des jeweiligen Bearbeitungsparameters bestimmt wird durch

- in dem Fall einer Fräs- oder Bohrmaschine: die maximale Spindeldrehzahl und/oder die maximale Spindelleistung der Spindel zum Antreiben des Fräs- oder Bohrwerkzeugs und/oder die maximale Schneidgeschwindigkeit des Fräs- oder Bohrwerkzeugs und/oder das maximale Schneidvolumen pro Zeit des Fräs- oder Bohrwerkzeugs und/oder die maximale Schneidlast,
- in dem Fall einer Drehmaschine: die maximale Spindeldrehzahl und/oder die maximale Spindelleistung der Spindel zum Antreiben des Werkstücks und/oder die maximale Schneidgeschwindigkeit des Drehwerkzeugs und/oder das maximale Schneidvolumen pro Zeit des Drehwerkzeugs und/oder die maximale Schneidlast,
- in dem Fall einer Laserschneidmaschine: die maximale Leistung des Laserstrahls und/oder die maximale Energiedichte des Laserstrahls und/oder die minimale Spotgröße des Laserstrahls,
- in dem Fall einer Wasserstrahlschneidmaschine: Druck des Wasserstrahls, Spotgröße des Wasserstrahls, Menge an hinzugefügtem Scheuermittel.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, wobei das Verfahren ferner das Bestimmen des maximalen Schneidvolumens des Bohr-, Fräs- oder Fräswerkzeugs und/oder die maximale Schneidlast unter Verwenden einer Materialabhebungssimulation umfasst.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, wobei das Verfahren ferner das Anpassen des gegebenen NC-Programms mit dem mindestens einen erhöhten Bearbeitungsparameter, der fähig ist, die Bearbeitungskapazität zu erhöhen, umfasst.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren ferner das Bestimmen des ungenutzten Produktivitätspotenzials des gegebenen NC-Programms durch Bestimmen des Unter-

schieds zwischen der Verarbeitungszeit des gegebenen NC-Programms, das zu optimieren ist, und der Verarbeitungszeit des angepassten NC-Programms umfasst.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die virtuelle Überarbeitung als eine Serveranwendung auf mindestens einem Server eines internen Netzwerks oder eines offenen Netzwerks, zum Beispiel Internet, als ein Cloud-basierter Service oder eine Cloud-basierte Anwendung, die sich auf einer Cloud-Plattform befindet, den aufgezeichneten Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten, bevorzugt nach der Vorverarbeitung umgesetzt wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei die virtuelle Überarbeitung des Werkstücks das Berechnen der Werkzeugbahn eines Bearbeitungswerkzeugs der CNC-Maschine mittels des digitalen Maschinenmodells, das mindestens teilweise auf den aufgezeichneten Echtzeit- und Nicht-Echtzeit-Prozessdaten basiert, und Anwenden einer Materialabhebungssimulation oder einer Materialhinzu-fügungssimulation aufweist.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 12, wobei, in dem Fall einer Fräsmaschine, das Erhöhen der Bearbeitungslimits der Bahngeschwindigkeit das Anpassen der Maschinenstrategie wie folgt umfasst

- durch Erhöhen der Schneidtiefe,
- Verwenden einer größeren Fräse,
- Verwenden einer Fräse mit einer unterschiedlichen Geometrie,
- Anpassen der Befestigung des Werkstücks, das zu fräsen ist.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

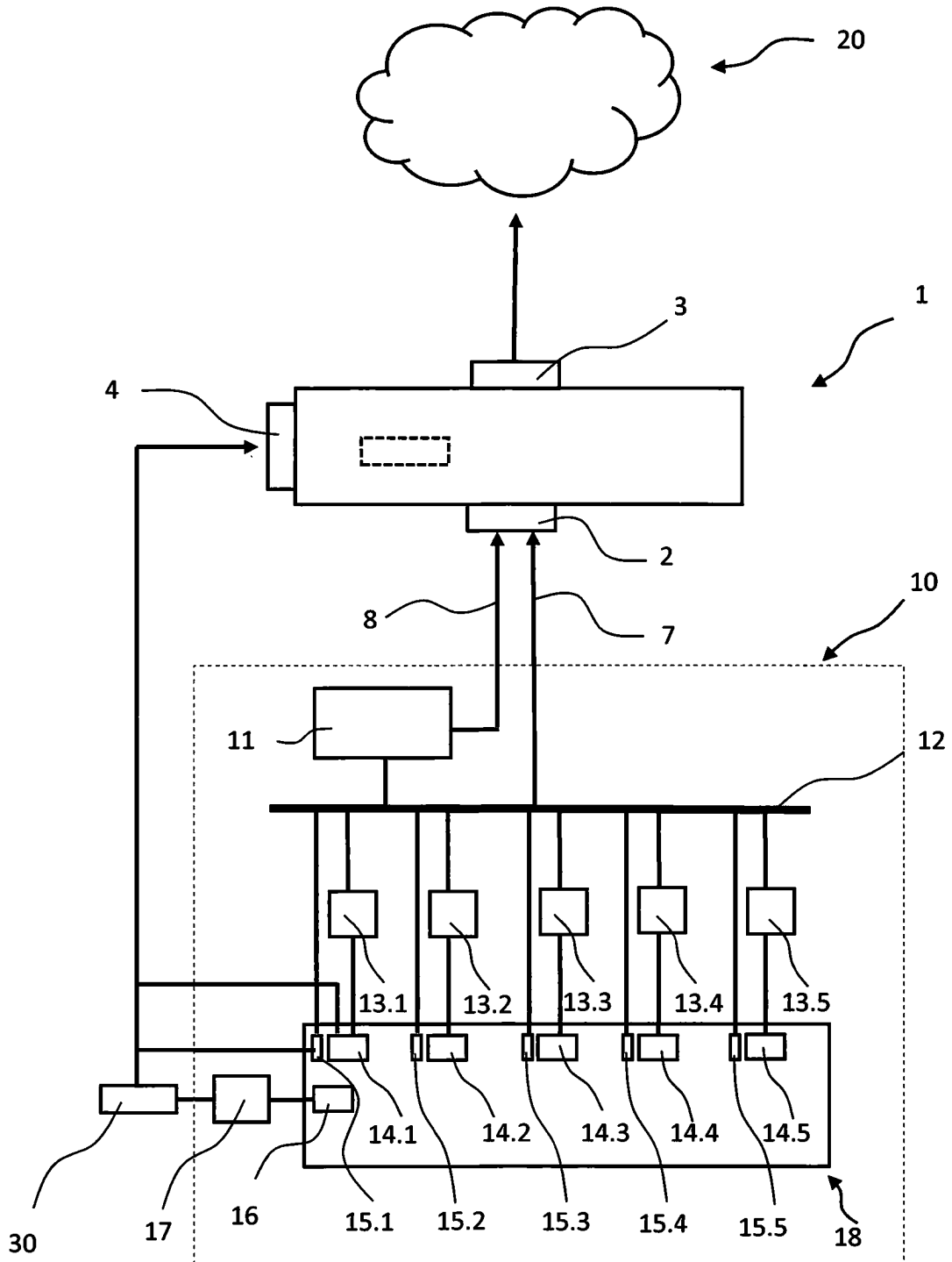


FIG. 1