

Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils aus einem Rohling unter Verwendung eines CAD/CAM-Systems

Die Publikation betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils aus einem Rohling unter Verwendung
5 eines CAD/CAM-Systems.

Aus dem Stand der Technik sind mehrere Verfahren zur Herstellung von Zahnersatzteilen unter Verwendung eines CAD/CAM-Systems bekannt.

10 Aus der DE 10 2005 039 010 A1 ist eine Bearbeitungsmaschine mit einer Vermessungseinrichtung bekannt, bei welcher mittels eines Bearbeitungswerkzeugs eine Kontur an einer Referenzfläche des Werkstücks herstellbar ist und diese Kontur mittels der Vermessungseinrichtung nach der
15 Bearbeitung erfassbar ist. Der Bearbeitungsplan wird unter Berücksichtigung der ermittelten Werkzeuggeometrie und des Verhaltens des Bearbeitungswerkzeugs angepasst. Anhand der Vermessung der durch die Bearbeitung erzeugten Kontur kann die Biegung des Werkzeugs ermittelt und der
20 Bearbeitungsplan unter Berücksichtigung der Biegung angepasst werden.

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Kalibrierung vor jedem Herstellungsprozess durchgeführt werden muss, indem die Kontur mittels des Bearbeitungswerkzeugs an der
25 Referenzfläche hergestellt wird und aufgrund der Vermessung der Kontur eine Verbiegung und/oder Formveränderung des Werkzeugs geschätzt wird. Beim Einbringen der Kontur wird eine typische Belastung während des Bearbeitungsvorgangs erprobt. Damit wird die Biegung nur für eine bestimmte
30 Belastung und eine bestimmte Anordnung des Werkzeugs relativ zum Rohling ermittelt. Diese Schätzung der

Verbiegung und/oder Formveränderung ist daher für eine Simulation der Verbiegung und/oder Formveränderung des gesamten Bearbeitungsprozesses unzureichend und führt nicht zu einer ausreichenden Minimierung des durch die Verbiegung
5 und/oder Formveränderung auftretenden Fehlers.

Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die eine präzisere Herstellung des Zahnersatzes die Bearbeitungsgeschwindigkeit gering gehalten wird, um eine Verbiegung des Werkzeugs möglichst zu verhindern. Dadurch
10 wird die gesamte Herstellungsdauer verlängert.

Die Aufgabe der vorliegenden Überlegung besteht daher darin, ein Verfahren zur Herstellung bereitzustellen, das eine schnelle, zuverlässige und genaue Herstellung trotz einer Verbiegung und/oder Formveränderung des Werkzeugs
15 ermöglicht.

Das Projekt betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils aus einem Rohling unter Verwendung eines CAD/CAM-Systems, wobei der Herstellungsprozess des
20 Zahnersatzteiles eine erste Herstellungsstufe und mindestens eine zweite Herstellungsstufe umfasst, wobei in der ersten Herstellungsstufe mittels des CAD-CAM-Systems eine erste Kontur aus dem Rohling herausgearbeitet wird, die im Vergleich zu den Abmessungen des geplanten
25 Zahnersatzteils ein Aufmass aufweist. In der zweiten Herstellungsstufe wird eine zweite Kontur herausgearbeitet, die in ihren Abmessungen dem geplanten Zahnersatzteil entspricht. In der ersten Herstellungsstufe und in der zweiten Herstellungsstufe erfolgt die Abtragung des
30 Materials ohne Werkzeugwechsel mittels desselben Werkzeugs, wobei die Abtragung des Materials mittels eines Werkzeugs von einer Seite des Rohlings und gleichzeitig mittels eines

zweiten Werkzeugs von einer gegenüberliegenden zweiten Seite des Rohlings erfolgt, wobei das erste Werkzeug und das zweite Werkzeug das abzutragende Material gleichzeitig abtragen.

5 Bei dem Herstellungsverfahren mittels des CAD/CAM-Systems kann im ersten Schritt mittels einer CAD-Einheit des CAD/CAM-Systems ein 3D-Modell des Zahnersatzteils geplant werden. Im weiteren Schritt kann das 3D-Modell in einen Bearbeitungsplan übersetzt werden, der an die CAM-Einheit
10 des CAD/CAM-Systems übermittelt wird. Anschließend wird das geplante Zahnersatzteil mittels der CAM-Einheit nach dem Bearbeitungsplan aus einem Rohling herausgearbeitet.

Der Unterschied zu herkömmlichen Verfahren besteht darin, dass der Herstellungsprozess in einem zweistufigen
15 Verfahren erfolgt, wobei in der ersten Herstellungsstufe das abzutragende Material bis zur ersten Kontur möglichst schnell abgetragen wird. Dabei kann das Werkzeug mit einer maximalen Abtragungsgeschwindigkeit bei einer maximalen Abtragungsschichtdicke betrieben werden. Erst in der
20 zweiten Herstellungsstufe wird die zweite Kontur, die den Abmessungen des geplanten Zahnersatzteils entspricht, herausgearbeitet, wobei das restliche Material mit einer geringen Abtragungsgeschwindigkeit abgetragen wird, so dass das verwendete Werkzeug sich kaum verbiegt und dadurch der
25 durch die Verbiegung verursachte Herstellungsfehler vermieden wird.

Das herzustellende Zahnersatzteil kann beispielsweise eine Zahnkrone, ein Inlay, eine Teilkrone oder eine Brücke sein. Der Rohling kann beliebig geformt sein und beispielsweise
30 aus Keramik bestehen. Das CAD/CAM-System kann eine CAD-Einheit zur Planung des Zahnersatzteils und eine CAM-Einheit zum Herausschleifen des Zahnersatzteils umfassen.

Die CAM-Einheit kann beispielsweise eine Schleifmaschine mit zwei Schleifwerkzeugen sein, die den Rohling von zwei gegenüberliegenden Seiten bearbeiten. Die Schleifmaschine kann beispielsweise drei, vier oder fünf Bearbeitungsachsen
5 aufweisen. Das Aufmass kann beliebig gestaltet sein und beispielsweise durch eine virtuelle Dilatation der zweiten Kontur erzeugt werden. Das Aufmass kann jedoch auch manuell durch den Benutzer beliebig um die zweite Kontur geplant werden, wobei ein Mindestaufmass nicht unterschritten
10 werden darf. Eine maximale Werkzeugabdrängung kann mittels einer Referenzmessung experimentell gemessen werden oder auch unter Verwendung einer Simulation des Bearbeitungsprozesses computergestützt simuliert werden. Eine solche Simulation berücksichtigt die
15 Materialeigenschaften sowie die Abmessungen des Werkzeugs und des Rohlings sowie die während der Bearbeitung auf das Werkzeug wirkenden Prozesskräfte. Das Aufmass kann dann entsprechend so geplant werden, dass es die ermittelte Werkzeugabdrängung berücksichtigt.

20 Ein Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass durch den zweistufigen Herstellungsprozess in der ersten Stufe der größte Anteil des abzutragenden Materials mit der maximalen Abtragungsgeschwindigkeit schnell abgetragen wird und erst in der zweiten Herstellungsstufe zwecks Präzision die
25 zweite Kontur mit nur geringen Prozesskräften herausgearbeitet wird. Dadurch kann das Zahnersatzteil schneller und präziser als bei herkömmlichen Verfahren herausgearbeitet werden.

Die Abtragung des Materials erfolgt in der ersten
30 Herstellungsstufe und in der zweiten Herstellungsstufe ohne Werkzeugwechsel mittels desselben Werkzeugs.

Dadurch kann ein herkömmliches CAD/CAM-System ohne die Möglichkeit eines automatischen Werkzeugswechsels verwendet werden. In der ersten Herstellungsstufe wird das verwendete Werkzeug durch die hohe Abtragungsgeschwindigkeit und die
5 maximale Abtragungsschichtdicke stark verbogen. In der zweiten Herstellungsstufe wird dasselbe Werkzeug jedoch kaum verbogen, da die Abtragungsgeschwindigkeit und die Abtragungsschichtdicke deutlich geringer als in der ersten Herstellungsstufe sind.

10 Die Abtragung des Materials erfolgt mittels des ersten Werkzeugs von der ersten Seite des Rohlings und gleichzeitig mittels des zweiten Werkzeugs von der gegenüberliegenden zweiten Seite des Rohlings.

Bei dieser Art der Abtragung des Materials handelt es sich
15 um die sogenannte Parallelbearbeitung. Die beiden Werkzeuge bearbeiten den Rohling simultan von beiden Seiten des Rohlings Schicht für Schicht und Lage für Lage zur Mitte des Rohlings hin. Dadurch wirken die Prozesskräfte von beiden Werkzeugen aus auf den Rohling ein und gleichen sich
20 teilweise aus.

Vorteilhafterweise kann die Bearbeitung in der ersten Herstellungsstufe und in der zweiten Herstellungsstufe jeweils mit einer für beide Werkzeuge gleichen vorgegebenen Abtragungsschichtdicke erfolgen.

25 Dadurch wird das Material scanartig Schicht für Schicht vom oberen freiem Ende zum unteren Ende hin abgetragen. Auf diese Weise werden mehrere Lagen des Rohlings bearbeitet, bis das Zahnersatzteil vollständig hergestellt wird.

Die Abtragungsschichtdicke kann konstant definiert sein
30 oder auch von Schicht zu Schicht variieren.

Vorteilhafterweise kann die Bearbeitung ausgehend von einem freien Ende des Rohlings zu einem unteren Ende des Rohlings am Rohlingshalter hin erfolgen.

Dadurch wird das Ersatzteil Schicht für Schicht und Lage
5 für Lage simultan von beiden Seiten aus dem Rohling herausgearbeitet.

Vorteilhafterweise kann in der ersten Herstellungsstufe das Material mit einer ersten Abtragungsschichtdicke zwischen 100 μm und 20 μm abgetragen werden und in der zweiten
10 Herstellungsstufe das Material mit einer zweiten Abtragungsschichtdicke zwischen 20 μm und 5 μm abgetragen werden.

Dadurch sind die auf die Werkzeuge einwirkende Prozesskräfte in der ersten Herstellungsstufe deutlich
15 größer als in der zweiten Herstellungsstufe, so dass in der zweiten Herstellungsstufe das Werkzeug deutlich weniger verbogen wird. Die Abtragungsschichtdicke in der ersten Herstellungsstufe kann insbesondere 40 μm und in der zweiten Herstellungsstufe 20 μm betragen.

Vorteilhafterweise können eine variable Abtragungsschichtdicke und/oder eine variable Abtragungsgeschwindigkeit so geregelt werden, dass in der ersten Herstellungsstufe ein erster Grenzwert eines Prozessstroms und/oder einer auf das Werkzeug wirkenden
25 Prozesskraft nicht überschritten wird und in der zweiten Herstellungsstufe ein zweiter Grenzwert des Prozessstroms und/oder der Prozesskraft nicht überschritten werden.

Der Prozessstrom kann an den Kontakten eines Antriebs, wie eines Schrittmotors, des verwendeten Schleifwerkzeugs
30 gemessen werden. Bei steigenden Prozesskräften, die auf das Werkzeug einwirken steigt auch der Prozessstrom, so dass

eine Abhängigkeit zwischen dem Prozessstrom und der wirkenden Prozesskraft besteht. Der erste Grenzwert des Prozessstroms kann auf einen hohen Wert gesetzt werden, um eine schnelle Bearbeitung mit hohen Prozesskräften zu ermöglichen. Der zweite Grenzwert kann auf einen niedrigen Wert gesetzt werden, um in der zweiten Herstellungsstufe eine präzise Bearbeitung des Restmaterials zu ermöglichen. Alternativ zur Überwachung der Prozesskräfte über den Benutzerstrom können die Prozesskräfte direkt am Werkzeug gemessen werden. Die Vermessung der Prozesskraft kann beispielsweise mittels eines Dehnungsstreifens erfolgen, der direkt am verwendeten Werkzeug angebracht ist. Eine Verbiegung des Werkzeugs wird der Dehnungsstreifen gedehnt und gibt ein elektrisches Signal ab, das beispielsweise mittels eines Mikrocontrollers ausgewertet werden kann. Der erste Grenzwert der Prozesskraft wird auf einen hohen Wert und der zweite Grenzwert auf entsprechend niedrigen Wert für eine präzise Bearbeitung gesetzt.

Zur Regelung der wirkenden Prozesskraft kann die Abtragungsgeschwindigkeit bei einer konstanten Abtragungsschichtdicke oder die Abtragungsschicht bei einer konstanten Abtragungsgeschwindigkeit variiert werden.

Vorteilhafterweise kann der zweite Grenzwert maximal 50 % des ersten Grenzwerts betragen.

Dadurch betragen die in der zweiten Herstellungsstufe herrschenden Prozesskräfte nur die Hälfte der Prozesskräfte aus der ersten Herstellungsstufe.

Vorteilhafterweise kann die erste Kontur durch eine virtuelle Dilatation der zweiten Kontur erzeugt werden.

Bei der virtuellen Dilatation handelt es sich um ein virtuelles Aufblasen der zweiten Kontur in alle Richtungen

um den gleichen Betrag, so dass dadurch die erste Kontur mit dem definierten Aufmass erzeugt wird.

Vorteilhafterweise kann die erste Kontur geplant werden, indem die zweite Kontur, die dem geplanten Zahnersatzteil
5 entspricht, um einen Versatz entgegengesetzt zu einer Hauptabdrängungsrichtung verschoben wird, wobei der Versatz mindestens einem Viertel und maximal drei Vierteln der maximal zu erwartenden Werkzeugabdrängung entspricht. Anschließend kann die zweite verschobene Kontur um einen
10 Abstand virtuell in alle Richtungen durch Dilatation vergrößert werden, wobei der Abstand mindestens einem Viertel und maximal drei Viertel einer maximal zu erwartenden Werkzeugabdrängung entspricht.

Zur Kompensation der zu erwartenden Werkzeugabdrängung bzw.
15 Werkzeugverbiegung kann alternativ auch die zweite Kontur im ersten Schritt um die Hälfte der maximal zu erwartenden Werkzeugabdrängung, die experimentell gemessen werden kann, durch Dilatation vergrößert werden und im zweiten Schritt kann das vergrößerte 3D-Modell um den Versatz
20 entgegengesetzt zu der Hauptabdrängungsrichtung verschoben werden. Eine mögliche Werkzeugabdrängung während der Bearbeitung kann die maximale Werkzeugabdrängung nicht überschreiten, so dass dadurch eine fehlerhafte Beschädigung der zweiten Kontur des herzustellenden
25 Zahnersatzteils ausgeschlossen wird. Durch diese Art der Planung des Aufmasses ist die Abtragungsschichtdicke des Restmaterials in der zweiten Herstellungsstufe gering, so dass auch bei geringen Prozesskräften die zweite Kontur mit einer hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit herausgearbeitet
30 werden kann. Die Hauptabdrängungsrichtung verläuft entgegengesetzt zu einer Zustellungsrichtung der verwendeten Werkzeuge. Bei einer parallelen Bearbeitung vom

freien Ende zum unteren Ende des Rohlings hin verläuft
somit die Hauptabdrängungsrichtung parallel zu einer Achse
des Rohlings.

Vorteilhafterweise kann die maximal zu erwartende
5 Werkzeugabdrängung experimentell durch eine Referenzmessung
bestimmt werden. In einem ersten Verfahrensschritt kann ein
Abdrängungsprofil erzeugt werden, indem das Material des
Rohlings mittels eines Werkzeugs bei einer maximalen
Werkzeugauflage, bei einer maximalen Abtragungsschichtdicke
10 und einer maximalen Abtragungsgeschwindigkeit abgetragen
wird. Anschließend kann in einem zweiten Verfahrensschritt
mittels desselben Werkzeugs eine Referenzfläche erzeugt
werden, indem dieselbe Bahnbewegung so lange wiederholt
wird, bis keine Prozesskräfte mehr auftreten. Im weiteren
15 Verfahrensschritt kann ein maximaler Abstand zwischen dem
Abdrängungsprofil und der Referenzfläche bestimmt werden,
der die maximal zu erwartende Werkzeugabdrängung darstellt.
Dadurch kann die maximale zu erwartende Werkzeugabdrängung
auf einfache Art und Weise experimentell für das zu
20 verwendende Werkzeug bestimmt werden.

Das Projekt wird anhand der Zeichnungen erläutert. Es
zeigt, die

Fig. 1 ein herkömmliches CAD/CAM-System, das eine
25 handgehaltene 3D-Kamera 2, eine CAD-Einheit 3
und eine CAM-Einheit 4 umfasst; die

Fig. 2 einen eingespannte Rohling in der
Seitenansicht; die

Fig. 3 den Rohling aus Fig. 2 in der Frontansicht;
30 die

- Fig. 4 eine Skizze zur Verdeutlichung der Steuerung über die Prozesskraft; die
- Fig. 5 eine Skizze zur Verdeutlichung der Regelung anhand des Prozessstroms; die
- 5 Fig. 6 eine Skizze zur Verdeutlichung der Planung des Aufmasses; die
- Fig. 7 eine Skizze zur Erläuterung der Referenzmessung.

10 Die Fig. 1 zeigt ein herkömmliches CAD/CAM-System, das eine handgehaltene 3D-Kamera 2, eine CAD-Einheit 3 und eine CAM-Einheit 4 umfasst. Die 3D-Kamera 2 kann beispielsweise auf einem trigonometrischen Streifenprojektionsverfahren beruhen. Im ersten Schritt wird mittels der 3D-Kamera 2

15 eine dreidimensionale Aufnahme eines Präparationsgebietes 5 mit einer Präparation 6 vermessen. Die Vermessungsdaten werden an die CAD-Einheit übermittelt. Die CAD-Einheit umfasst einen Computer 7 mit der entsprechenden Software, Eingabemittel, wie eine Tastatur 8 und eine Maus 9, sowie

20 eine Anzeigevorrichtung 10, wie einen Monitor. Im zweiten Schritt wird aus den Messdaten der 3D-Kamera 2 eine dreidimensionale Aufnahme 11 berechnet, die im vorliegenden Fall die Nachbarzähne 12 und 13 umfasst. Im dritten Schritt wird ein 3D-Modell eines einzusetzenden Zahnersatzteils

25 geplant, das zu den Nachbarzähnen 12 und 13 und zum Gegengebiss passt. Im vierten Schritt wird mittels der CAD-Einheit 3 das 3D-Modell 14 in einen Bearbeitungsplan für die CAM-Einheit 4 übersetzt. Der Bearbeitungsplan enthält die Maschinenbefehle für die beiden Schleifwerkzeuge 15 und

30 16, wobei die Maschinenbefehle die Verfahrrichtung und die Verfahrgeschwindigkeit der Werkzeuge 15 und 16 relativ zu

einem in die Bearbeitungsmaschine eingespannten Rohling 17 vorgeben. Auf diese Weise wird nach dem Bearbeitungsplan das Zahnersatzteil 14 aus dem Rohling 17 herausgeschliffen. Dabei wird die äußere Oberfläche 18 und ein Lumen 19 des
5 geplanten Zahnersatzteils 14 herausgearbeitet, das passend zur Präparation 6 gestaltet ist. Beim Herausschleifen des Zahnersatzteils 14 aus dem Rohling 17 werden die Schleifwerkzeuge 15 und 16 entlang der x-Achse, der y-Achse und der z-Achse verfahren, die durch das Koordinatenkreuz
10 20 dargestellt sind. Das vorliegende Verfahren kann auch für andere Schleifmaschinen mit mehr als drei Verfahrachsen verwendet werden. Das herzustellende Zahnersatzteil kann auch einen Teil eines Zahns oder mehrere Zähne umfassen.

Die Herstellung des Zahnersatzteils 14 erfolgt in einem
15 zweistufigen Herstellungsprozess, wobei in einer ersten Herstellungsstufe eine erste Kontur 21 aus dem Rohling 17 herausgearbeitet, die im Vergleich zum geplanten Zahnersatzteil 14 ein Aufmass 22 aufweist. Anschließend wird in einer zweiten Herstellungsstufe mit geringeren
20 Prozesskräften bei einer geringen Abtragungsgeschwindigkeit eine zweite Kontur 23 herausgearbeitet, die in den Abmessungen dem geplanten Zahnersatzteil 14 entspricht. Dadurch wird in der ersten Herstellungsstufe eine schnelle Abtragung des Materials bei einer hohen Werkzeugverbiegung
25 und in der zweiten Herstellungsstufe eine präzise Abtragung des Materials bei einer sehr geringen Werkzeugverbiegung ermöglicht.

In der Fig. 2 ist der in die CAM-Einheit 4 aus Fig. 1 eingespannte Rohling 17 in der Seitenansicht dargestellt.
30 Zur Verdeutlichung ist im Inneren des Rohlings 17 das geplante 3D-Modell 14 des herzustellenden Zahnersatzteils dargestellt. Das Material des Rohlings 17 wird in mehreren

Schichten Schicht für Schicht von einem oberen freien Ende 30 zu einem unteren Ende 31 an einem Rohlingshalter 32 abgetragen. Zunächst wird also eine erste Schicht 33 dann eine zweite Schicht 34 und die weiteren Schichten

5 abgearbeitet bis eine erste Lage 35 vollständig abgetragen wird. Auf diese Weise wird auch eine zweite Lage 36 und eine dritte Lage 37 um die weiteren Lagen bis zur Mitte des Rohlings 17 bearbeitet. Eine Abtragungsschichtdicke 38 für die einzelnen Schichten der ersten Lage 35 ist im

10 vorliegenden Fall konstant. Die Bearbeitung mittels des ersten Werkzeugs 15 erfolgt von einer ersten Seite 39 und die Bearbeitung mittels des zweiten Werkzeugs 16 erfolgt von einer gegenüberliegenden zweiten Seite 40. Das zweite Werkzeug 16 wird simultan zum ersten Werkzeug 15

15 angesteuert und trägt das Material des Rohlings ebenfalls Schicht für Schicht und Lage für Lage ab. In der ersten Herstellungsstufe wird die erste Kontur 21 und in der zweiten Herstellungsstufe die zweite Kontur 23, die dem Zahnersatzteil 14 entspricht, herausgearbeitet. In der Fig.

20 3 ist der Rohling 17 aus Fig. 2 in der Frontansicht dargestellt, wobei das erste Bearbeitungswerkzeug 15 das Material nach einem Bearbeitungspfad 41 beispielhaft in Form einer schlangenförmigen Linie die erste Schritt 33 die zweite Schicht 34 und die weiteren Schichten bis zum

25 unteren Ende am Rohlingshalter abträgt.

In der Fig. 4 ist eine Skizze zur Verdeutlichung der Steuerung über die Prozesskraft dargestellt. In der ersten Herstellungsstufe, dem sogenannten Schruppen, wird unter Billigung hoher Prozesskräfte das Material möglichst

30 schnell abgetragen. Das erste Werkzeug 15 wird dadurch in einer Hauptabdrängungsrichtung 50 entgegengesetzt zu einer Hauptbearbeitungsrichtung 51 verbogen bzw. abgedrängt. Die Abtragungsschichtdicke 38 und/oder eine

Abtragungsgeschwindigkeit des Werkzeugs 15 sind variabel und können mittels einer Regelungseinheit 52 geregelt werden. Die Regelungseinheit 52 vermisst ein elektrisches Signal eines Dehnungssensors 53, der direkt in das Werkzeug 5 15 integriert ist. Das dargestellte Diagramm 54 stellt die Abhängigkeit zwischen dem elektrischen Signal, der auf der x-Achse 55 aufgetragen ist, und der auf das Werkzeug wirkende Prozesskraft 56, die an der y-Achse 57 aufgetragen wird. In der ersten Herstellungsstufe wird die 10 Abtragungsschichtdicke 38 und/oder die Abtragungsgeschwindigkeit so geregelt, dass ein erster Grenzwert 58 und in der zweiten Herstellungsstufe ein zweiter Grenzwert 59 der Prozesskraft 56 nicht überschritten wird. Die Regelungseinheit 52 gibt dazu ein 15 Regelungssignal 60 an die CAM-Einheit 4 aus Fig. 1 aus. Im vorliegenden Fall ist der erste Grenzwert 6 Mal größer als der zweite Grenzwert, so dass in der ersten Herstellungsstufe das Werkzeug 15 nahezu maximal verbogen wird und in der zweiten Herstellungsstufe des Werkzeugs 15 20 kaum verbogen wird.

In der Fig. 5 ist eine Skizze zur Verdeutlichung der Regelung anhand des Prozessstroms dargestellt. Das erste Werkzeug 15 wird mittels eines Antriebs 61, der beispielsweise ein Schüttmotor sein kann, angetrieben. Der 25 Prozessstrom wird direkt an den Kontakten des Antriebs 61 gemessen und weist, wie im Diagramm 62 dargestellt, eine Abhängigkeit von der auf das Werkzeug einwirkenden Prozesskraft 56 auf. Das Signal des Prozessstroms ist an der x-Achse 63 aufgetragen, wobei die Prozesskraft 56 an 30 der y-Achse 64 aufgetragen ist. Die Abtragungsschichtdicke und/oder die Abtragungsgeschwindigkeit werden mittels der Regelungseinheit 52 dabei so geregelt, dass in der ersten Herstellungsstufe der erste Grenzwert 58 der Prozesskraft

und in der zweiten Herstellungsstufe der zweite Grenzwert 59 der Prozesskraft nicht überschritten werden.

In der Fig. 6 ist eine Skizze zur Verdeutlichung der Planung des Aufmasses dargestellt. Die Werkzeuge 15, 16 werden entgegengesetzt zu einer Hauptabtragungsrichtung 51 zum Rohlingshalter 32 hin in eine Hauptabdrängungsrichtung 50 abgedrängt. Dadurch wird die zweite Kontur 23, die dem geplanten Zahnersatzteil 14 entspricht, um einen Versatz 70 in die Hauptabdrängungsrichtung 50 verschoben. Das verschobene Zahnersatzteil 71 ist durch eine gestrichelte Linie dargestellt. Um diesen Versatz zu kompensieren wird nun das Aufmass 22 zwischen der zweiten Kontur 23, die dem Zahnersatzteil 14 entspricht, und der ersten Kontur 21, die durch eine Strich-Punkt-Punkt-Linie dargestellt ist, festgelegt. In einem ersten Schritt wird zunächst die verschobene zweite Kontur 71 entgegengesetzt zur der Hauptabdrängungsrichtung 50 um einen Versatz 72 verschoben. Dadurch ergibt sich eine Zwischenkontur 73, die durch eine Strich-Punkt-Linie dargestellt ist. Im zweiten Verfahrensschritt wird diese Zwischenkontur 73 in alle Richtungen um einen Abstand 74 aufgeblasen. Dies entspricht einer virtuellen Dilatation der Zwischenkontur 73. Durch das Aufblasen der Zwischenkontur 73 ergibt sich dann die erste Kontur 21. Bei der Planung des Aufmasses 22 kann auch im ersten Schritt die verschobene zweite Kontur zunächst aufgeblasen und erst danach um der Versatz 72 versetzt werden. Der Versatz 72 entspricht dabei mindestens der Hälfte einer maximal zu erwartenden Werkzeugabdrängung, die experimentell gemessen werden kann. Der Abstand 74 entspricht ebenfalls mindestens der Hälfte der maximal zu erwartenden Werkzeugabdrängung. Dadurch wird sichergestellt, dass die erste Kontur 21 die zweite Kontur 23 vollständig in sich aufnimmt, so dass während der ersten

Herstellungsstufe die zweite Kontur 23 des herzustellenden Zahnersatzteils 14 nicht verletzt wird.

In der Fig. 7 ist eine Skizze zur Erläuterung der Referenzmessung bei der Bestimmung der maximalen
5 Werkzeugabdrängung dargestellt. Bei der Referenzmessung wird zunächst im ersten Verfahrensschritt ein Abdrängungsprofil 80 mittels des Werkzeugs 15 erzeugt, in dem das Material des Rohlings 17 bei einer maximalen Werkzeugauflage 81, bei einer maximalen
10 Abtragungsschichtdicke 38, die dem Durchmesser der Werkzeugs entspricht, und bei einer maximalen Abtragungsgeschwindigkeit abgetragen wird. Anschließend wird im zweiten Verfahrensschritt der Rohling 17 um 180 Grad gedreht und mittels des Werkzeugs 15 eine
15 Referenzfläche 82 herausgearbeitet, in dem dieselbe Bahnbewegung solange wiederholt wird, bis keine Prozesskraft 56 mehr auf das Werkzeug 15 wirkt. Anschließend wird ein maximaler Abstand 83 zwischen dem Abdrängungsprofil 80 und der Referenzfläche 82 bestimmt, der der maximal zu
20 erwartenden Werkzeugabdrängung entspricht.

Bezugszeichen

	1	Halterung
	2	3D-Kamera
	3	CAD-Einheit
5	4	CAM-Einheit
	5	Präparationsgebiet
	6	Präparation
	7	Computer
	8	Tastatur
10	9	Maus
	10	Anzeigevorrichtung
	11	dreidimensionale Aufnahme
	12	Nachbarzähne
	13	Nachbarzähne
15	14	3D-Modell/ geplantes Zahnersatzteil
	15	erstes Werkzeug
	16	zweites Werkzeug
	17	Rohling
	18	Oberfläche
20	19	Lumen
	20	Koordinatenkreuz
	21	erste Kontur
	22	Aufmass 22
	23	zweite Kontur
25	30	oberen Ende

	31	unteren Ende
	32	Rohlingshalter
	33	erste Schicht
	34	zweite Schicht
5	35	erste Lage
	36	zweite Lage
	37	dritte Lage
	38	Abtragungsschichtdicke
	39	erste Seite
10	40	zweite Seite
	41	Bearbeitungspfad
	50	Hauptabdrängungsrichtung
	51	Hauptbearbeitungsrichtung
	52	Regelungseinheit
15	53	Dehnungssensor
	54	Diagramm
	55	x-Achse
	56	Prozesskraft
	57	y-Achse
20	58	erster Grenzwert
	59	zweiter Grenzwert
	60	Regelungssignal
	61	Antrieb
	62	Diagramm
25	63	x-Achse

	64	y-Achse
	70	Versatz
	71	verschobene zweite Kontur
	72	Versatz
5	73	Zwischenkontur
	74	Abstand
	80	Abdrängungsprofil
	83	Abstand/ maximale Werkzeugabdrängung

10 Verfahren zur Herstellung eines Zahnersatzteils (14) aus
einem Rohling (17) unter Verwendung eines CAD/CAM-Systems
(3, 4), wobei der Herstellungsprozess des Zahnersatzteiles
(14) eine erste Herstellungsstufe und mindestens eine
zweite Herstellungsstufe umfasst, wobei in der ersten
15 Herstellungsstufe mittels des CAD-CAM-Systems (3, 4) eine
erste Kontur (21) aus dem Rohling (17) herausgearbeitet
wird, die im Vergleich zu den Abmessungen des geplanten
Zahnersatzteils (14) ein Aufmass (22) aufweist, wobei in
der zweiten Herstellungsstufe eine zweite Kontur (23)
20 herausgearbeitet wird, die in ihren Abmessungen dem
geplanten Zahnersatzteil (14) entspricht, wobei in der
ersten Herstellungsstufe und in der zweiten
Herstellungsstufe die Abtragung des Materials ohne
Werkzeugwechsel mittels desselben Werkzeugs (15, 16)
25 erfolgt, wobei die Abtragung des Materials mittels eines
Werkzeugs (15) von einer Seite (39) des Rohlings (17) und
gleichzeitig mittels eines zweiten Werkzeugs (16) von einer
gegenüberliegenden zweiten Seite (40) des Rohlings (17)
erfolgt, wobei das erste Werkzeug (15) und das zweite

Werkzeug (16) das abzutragende Material gleichzeitig abtragen.

Verfahren, wobei die Bearbeitung in der ersten
Herstellungsstufe und in der zweiten Herstellungsstufe
5 jeweils mit einer für beide Werkzeuge gleichen vorgegebenen
Abtragungsschichtdicke erfolgt.

Verfahren, wobei die Bearbeitung ausgehend von einem freien
Ende (30) des Rohlings (17) zu einem unteren Ende (31) des
Rohlings (17) am Rohlingshalter (32) hin erfolgt.

10 Verfahren, wobei in der ersten Herstellungsstufe das
Material mit einer ersten Abtragungsschichtdicke (38)
zwischen 100 µm und 20 µm abgetragen wird und in der
zweiten Herstellungsstufe das Material mit einer zweiten
Abtragungsschichtdicke zwischen 20 µm und 5 µm abgetragen
15 wird.

Verfahren, wobei eine variable Abtragungsschichtdicke (38)
und/oder eine variable Abtragungsgeschwindigkeit so
geregelt werden, dass in der ersten Herstellungsstufe ein
erster Grenzwert (58) eines Prozessstroms und/oder einer
20 auf das Werkzeug (15, 16) wirkenden Prozesskraft (56) nicht
überschritten wird und in der zweiten Herstellungsstufe ein
zweiter Grenzwert (59) des Prozessstroms und/oder der
Prozesskraft (56) nicht überschritten wird.

Verfahren, wobei der zweite Grenzwert (59) maximal 50 % des
25 ersten Grenzwerts (58) beträgt.

Verfahren, wobei die erste Kontur (21) durch eine virtuelle
Dilatation der zweiten Kontur (23) erzeugt wird.

Verfahren, wobei die erste Kontur (21) geplant wird, indem
die zweite Kontur (23), die dem geplanten Zahnersatzteil
30 (14) entspricht, um einen Versatz (72) entgegengesetzt zu
einer Hauptabdrängungsrichtung (50) des Werkzeugs (15, 16)

verschoben wird, wobei der Versatz (72) mindestens einem Viertel und maximal drei Vierteln der maximal zu erwartenden Werkzeugabdrängung (83) entspricht, wobei die verschobene zweite Kontur (71) um einen Abstand (74) 5 virtuell in alle Richtungen durch Dilatation vergrößert wird, wobei der Abstand (74) mindestens einem Viertel und maximal drei Vierteln einer maximal zu erwartenden Werkzeugabdrängung (83) entspricht.

Verfahren, wobei die maximal zu erwartende 10 Werkzeugabdrängung experimentell durch eine Referenzmessung bestimmt wird, wobei in einem ersten Verfahrensschritt ein Abdrängungsprofil (80) erzeugt wird, indem das Material des Rohlings (17) mittels eines Werkzeugs bei einer maximalen Werkzeugauflage, bei einer maximalen Abtragungsschichtdicke 15 (38) und einer maximalen Abtragungsgeschwindigkeit abgetragen wird, wobei anschließend in einem zweiten Verfahrensschritt mittels desselben Werkzeugs eine Referenzfläche erzeugt wird, indem dieselbe Bahnbewegung so lange wiederholt wird, bis keine Prozesskraft (56) mehr 20 auftritt, wobei im weiteren Verfahrensschritt ein maximaler Abstand (74, 83) zwischen dem Abdrängungsprofil (80) und der Referenzfläche bestimmt wird, der die maximal zu erwartende Werkzeugabdrängung darstellt.