



Laurent Tapie

L. Tapie^a, N. Lebon^b, B. Mawussi^c, H. Fron Chabouis^d, F. Duret^e, J-P. Attal^f

Understanding dental CAD/CAM for restorations – the digital workflow from a mechanical engineering viewpoint

Dentale CAD/CAM-Systeme zum Zahnersatz verstehen – der digitale Workflow aus Sicht des Maschinenbaus

Zusammenfassung

Wie in viele Felder der Medizin und des Alltags hält die digitale Technologie auch in der Zahnarztpraxis mehr und mehr Einzug. Für die Herstellung von Inlays, Kronen, Brücken, Implantatabutments und anderem Zahnersatz, sogar chairside, stehen Lösungen mithilfe von computergestütztem Design und computergestützter Herstellung (computer-aided design/computer-aided manufacturing; CAD/CAM) zur Verfügung. CAD/CAM-Lösungen für die Zahnheilkunde können als Kette von digitalen Geräten und Software für eine nahezu automatische Konstruktion und Herstellung von Zahnersatz angesehen werden. Zahnärzte, die mit dieser Technologie arbeiten möchten, verfügen häufig über wenig Wissen im Bereich Informatik oder die Zeit, es sich anzueignen. Grundkenntnisse der digitalen Workflows bei CAD/CAM für den Zahnersatz können aber dabei helfen, mit dieser Technologie erfolgreich zu arbeiten, beziehungsweise das CAD/CAM-System anzuschaffen, das den Erfordernissen der jeweiligen

Abstract

As digital technology infiltrates every area of daily life, including the field of medicine, so it is increasingly being introduced into dental practice. Apart from chairside practice, computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) solutions are available for creating inlays, crowns, fixed partial dentures (FPDs), implant abutments, and other dental prostheses. CAD/CAM dental solutions can be considered a chain of digital devices and software for the almost automatic design and creation of dental restorations. However, dentists who want to use the technology often do not have the time or knowledge to understand it. A basic knowledge of the CAD/CAM digital workflow for dental restorations can help dentists to grasp the technology and purchase a CAM/CAM system that meets the needs of their office. This article provides a computer-science and mechanical-engineering approach to the CAD/CAM digital workflow to help dentists understand the technology.

a Dr. Laurent Tapie, PhD in Mechanical Engineering

b Nicolas Lebon, PhD, Student in Mechanical Engineering

c Prof. Bernardin Mawussi, PhD in Mechanical Engineering

d Dr. Hélène Fron-Chabouis, DDS, PhD in Odontologic Sciences

e Prof. Francois Duret, DDS, PhD in Odontologic Sciences, Château de Tarailhan, 11560 Fleury d'Aude, France

f Dr. Jean-Pierre Attal, DDS, PhD in Odontologic Sciences

a to c Department of Mechanical Engineering, Paris 13 University, Sorbonne Paris Cité, Saint Denis, France

and Department of Biomaterials, URB2i, Faculty of Dental Surgery, Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, EA4462, Montrouge, France

d and f Department of Biomaterials, URB2i, Faculty of Dental Surgery, Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, EA4462, Montrouge, France

and Dental Department, Charles-Foix Hospital, AP-HP, Ivry-sur-Seine, France

Keywords: dental, dental CAD/CAM, dental informatics, digital dentistry, digital workflow, practice management

Praxis entspricht. Dieser Beitrag bietet einen Zugang zu den digitalen Workflows im CAD/CAM-Bereich aus der Sicht von Informatik und Maschinenbau, um Zahnärzten das Verständnis dieser Technologie zu erleichtern.

Schlüsselwörter: dentales CAD/CAM, digitaler Workflow, digitale Zahnheilkunde, Praxismanagement, Zahnheilkunde, Informatik in der Zahnheilkunde

Introduction

As van Noort affirmed, the future of dentistry is digital.¹ In the last decade, computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) has been extensively developed for dentistry. Dental technicians are thus becoming increasingly knowledgeable about this technology.² Thanks to technological advances, chairside CAD/CAM solutions for inlays, crowns, fixed partial dentures (FPDs), and implant abutments have been developed for the practitioner's office.³

Three types of CAD/CAM dental-restoration production procedures are available: 1) For chairside (direct) CAD/CAM, the entire CAD/CAM digital process – intraoral digitization, restoration design, and milling – is performed in the dental office. 2) For indirect CAD/CAM production, the entire CAD/CAM digital process is outsourced to a laboratory and sometimes to a production center. The practitioner sends the prepared tooth impression to the laboratory where a master cast is fabricated for extraoral digitization. The restoration is then designed in the laboratory, with milling also being performed in the laboratory or outsourced to a production center. 3) For semidirect CAD/CAM production, intraoral digitization is performed in the dental office, after which digitized data are sent to a laboratory for designing and milling. Laboratories can outsource milling to a production center.⁴

In this context, several dental CAD/CAM solutions have been commercialized: intraoral camera; extraoral scanner; CAD software; intraoral camera or extraoral scanner and associated software; NC machine tool and associated software; integrated intraoral camera, CAD/CAM software, and NC machine tool; integrated extraoral scanner, CAD/CAM software, and NC machine tool.

CAD/CAM technology is marketed for its "ease of use", "automation", "openness", and "modularity" of dental solutions. Although companies have created fully integrated and automated dental CAD/CAM systems, this

Einleitung

Wie van Noort¹ bekräftigte, ist die Zukunft der Zahnheilkunde digital. In den letzten zehn Jahren gab es erhebliche Weiterentwicklungen im Bereich CAD/CAM für die Zahnheilkunde. Daher kennen sich auch Zahntechniker immer besser mit dieser Technologie aus². Dank technologischer Weiterentwicklungen wurden im CAD/CAM sogenannte „Chairside“-Lösungen für Inlays, Kronen, Brücken und Implantatabutments für die Zahnarztpraxis entwickelt³.

Es stehen drei Herstellungsarten von CAD/CAM-Zahnersatz zur Verfügung: Beim *direkten CAD/CAM* am Patientenstuhl wird das gesamte digitale CAD/CAM-Verfahren – die intraorale Digitalisierung, die Konstruktion der Restauration und das Fräsen – in der Zahnarztpraxis durchgeführt. Beim *indirekten CAD/CAM* wird das gesamte digitale CAD/CAM-Verfahren an das Labor beziehungsweise gelegentlich an ein Fräszentrum ausgelagert. Der Behandler schickt die präparierte Abformung ins Labor und es wird ein Meistermodell zur extraoralen Digitalisierung im Labor erstellt. Anschließend wird die Restauration im Labor konstruiert. Das Fräsen erfolgt im Labor oder in einem speziellen Fräszentrum. Beim *semidirekten CAD/CAM* schließlich erfolgt die intraorale Digitalisierung in der Zahnarztpraxis. Die digitalen Daten werden dann zur Konstruktion und zum Fräsen ans Labor gesendet. Das Labor kann das Fräsen an ein Fräszentrum auslagern⁴. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene dentale CAD/CAM-Lösungen auf den Markt gebracht: Intraoralkameras, extraorale Scanner, CAD-Software, Intraoralkameras oder extraorale Scanner mit passender Software, CNC-Maschine und zugehörige Software, integrierte Systeme mit Intraoralkamera, CAD/CAM-Software und CNC-Maschine, integrierte Systeme mit extraoralem Scanner, CAD/CAM-Software und CNC-Maschine. Die CAD/CAM-Technologie wird als „einfach anzuwenden“, „automatisiert“, „offen“ und „modular“ beworben. Manche Unternehmen haben vollständig

integrierte und automatisierte dentale CAD/CAM-Systeme entwickelt. Dieses hohe Maß an Integration und Automatisierung kann in der Praxis der digitalen Zahnheilkunde ein Nachteil sein. Behandler und Zahntechniker sollten daher die verfügbaren CAD/CAM-Systeme und die in den Werbebrochüren für diese Systeme verwendeten Vokabeln kritisch betrachten.

Trotz der Attraktivität der CAD/CAM-Technologie für die Zahnarztpraxis muss der Zahnarzt die klinische Relevanz dieser Technologie insbesondere im Hinblick auf das gewählte Herstellungsverfahren verstehen und bewerten. Zahnärzte verfügen häufig nicht über das Wissen oder die Zeit, um mit dem stetigen Fortschritt in der Informations-technologie Schritt zu halten. Deshalb werden CAD/CAM-Lösungen für die Zahnheilkunde als „Blackbox“ mit einer Kette von digitalen Geräten und Software für die nahezu automatische Konstruktion und Herstellung von Zahnersatz produziert.

Das Ziel dieses Artikels ist es, Zahnärzten ein besseres Verständnis der Schritte in der CAD/CAM-Prozesskette bei der Herstellung von Zahnersatz aus der Sicht von Informatik und Maschinenbau zu geben. Behandler und Zahntechniker sollten sich CAD/CAM-Systeme als digitale Ketten vorstellen, die aus vier aufeinanderfolgenden Gliedern bestehen, in denen digitale Daten, die in ausgetauschte Dateien eingebettet sind, verarbeitet werden: Aufnahmegerät(e), CAD-Software, CAM-Software und Fertigungsgerät(e). Diese Kette entspricht dem Konzept des digitalen Workflows, der im dentalen CAD/CAM eingesetzt wird. Jedes Kettenglied wird im Detail dargestellt, um zu erläutern, was innerhalb dentaler CAD/CAM-Lösungen digital verarbeitet und ausgetauscht wird.

Vorläufige Definitionen und Konzepte

Manche Definitionen und Konzepte bedürfen vor der Erläuterung des digitalen Workflows im dentalen CAD/CAM der Erklärung.

Die digitale Kette im dentalen CAD-CAM-Verfahren

Das dentale CAD/CAM gehört zu den digitalen Ingenieurwissenschaften und ist definiert als Zusammenstellung digitaler Mittel (Geräte und Software), die der Konstruktion, Analyse, Simulation und Optimierung von Produkten

high level of integration and automation can be a drawback in the digital dentistry practice. Despite the attractions of CAD/CAM technology for the dental office, the dentist still needs to understand and evaluate the clinical relevance of the technology and the type of production chosen. Practitioners and dental technicians need to take a critical look at the CAD/CAM systems provided, as well as the terms used in commercial brochures for CAD/CAM systems. Dentists often do not have the computer-science knowledge or the time to keep up with the continuously evolving technology. Thus, CAD/CAM dental solutions are produced as “closed black-box” chains of digital devices and software for almost automatic design and creation of restorations.

The aim of this article is to give dentists a better understanding from a computer-science and mechanical-engineering viewpoint of the steps involved in the CAD/CAM chain used to create dental restorations. Practitioners and dental technicians should consider CAD/CAM systems as a digital chain composed of four consecutive links processing digital data embedded in exchanged computer files: acquisition equipment, CAD software, CAM software, and production equipment. This chain is conceptualized by the digital workflow used in dental CAD/CAM. Each link in the chain is elaborated on in this article in order to explain what is digitally processed and exchanged in dental CAD/CAM solutions.

Preliminary definitions and concepts

Some definitions and concepts need to be explained before expanding on the digital workflow of dental CAD/CAM.

The dental CAD/CAM digital chain

Dental CAD/CAM is a part of digital engineering science, defined as a set of digital means (devices and software) dedicated to design, analyze, simulate, and optimize products and their behavior through the industrial process.⁵ A digital chain is a set of consecutive digital means dedicated to treat digital data and convert them to a product via an industrial

process.⁶ In the context of dentistry, the CAD/CAM digital chain can be defined as follows: a set of consecutive digital means (devices and software) dedicated to help practitioners and dental technicians design and produce dental prostheses. Each digital means embedded in a digital chain can be considered a chain link.

Chain-link openness

In computer science, the property of "openness" refers to the accessibility to data-processing parameters in a digital chain link. In the context of digital dentistry, digital chain-link openness can be defined as follows: the level of user (practitioner or dental technician) intervention possible in modifying or adjusting data-processing parameters to design and produce dental prostheses.

Classically, in dental CAD/CAM, few parameters of the devices or software are accessible to the user, so that the dental CAD/CAM process is as automated and easy to use as possible.²⁻⁵ As dentists generally lack knowledge of CAD/CAM digital engineering, dental CAD/CAM developers, engineers, and programmers have developed fully integrated and automated dental CAD/CAM solutions.⁷

Digital workflow

Digital chain links involve the processing and conversion of the data associated with the future product. Treated and converted data are exchanged between consecutive digital chain links. These data-processing steps and exchanges represent the core of the digital workflow.⁸ In the context of dentistry, the CAD/CAM digital workflow can be defined as follows: the digital workflow starts with the digital capture of the prepared tooth, continues with the digital processing through consecutive digital chain links, and ends with the prosthesis production.

The digital workflow proceeds with data embedded in computer files. In dental CAD/CAM, different data types are used in the digital workflow: digital, analog, physical, and virtual data.⁹ According to computer science, *digital data* can be defined as follows: data measuring or representing one or more physical properties that can take any value along a sampled or discrete scale. *Analog data* measures or represents one or more physical properties that can take any value along a continuous scale. *Virtual data* is defined as data used in a digital or computing environment as opposed to a physical environment.¹⁰ Figure 1 provides three representations of a tooth with digital data

and their behavior within industrial processes serve⁵. A digital chain is a sequence of digital measures, which serve to process digital data and achieve the goal, using the help of industrial processes to transform a product into a product.⁶ In the context of dentistry, it is possible to define the digital CAD/CAM process as follows: a sequence of digital tools (machines and software), which help dentists and dental technicians to design and manufacture dental prostheses. Every digital tool is part of a chain and can be described as a chain link.

Offenheit von Kettengliedern

In informatics, the term "openness" refers to the accessibility of data processing parameters in a digital chain link. In the context of digital dentistry, the openness of chain links can be defined as follows: the level of user intervention (dentist or dental technician) possible in modifying or adjusting data processing parameters during the design and manufacture of dental prostheses.

Usually, in dental CAD/CAM, only a few parameters of the devices or software are accessible to the user, so that the dental CAD/CAM process is as automated and easy to use as possible.²⁻⁵ As dentists generally lack knowledge of CAD/CAM digital engineering, dental CAD/CAM developers, engineers, and programmers have developed fully integrated and automated dental CAD/CAM solutions.⁷

Digital Workflow

Digital chains require the processing and conversion of data for the final product. Treated and converted data are exchanged between consecutive digital chain links. These data-processing steps and exchanges represent the core of the digital workflow.⁸ In the context of dentistry, the CAD/CAM digital workflow can be defined as follows: the digital workflow begins with the digital capture of the prepared tooth, continues with the digital processing through consecutive digital chain links, and ends with the manufacture of the dental prosthesis.

Der digitale Workflow läuft über Daten ab, die in Computerdateien eingebettet sind. Beim dentalen CAD/CAM werden im Laufe des digitalen Workflows unterschiedliche Arten von Daten verwendet: digitale, analoge, physische und virtuelle Daten⁹. In der Informatik lassen sich *digitale Daten* wie folgt definieren: Daten, die eine oder mehrere physische Eigenschaften messen oder darstellen, welche innerhalb eines abgetasteten oder diskreten Wertebereichs jeden Wert annehmen können¹⁰. Abbildung 1 enthält drei Darstellungen eines Zahns, die mithilfe digitaler Daten erstellt wurden (eine Punktwolke).

Analoge Daten sind Daten, die eine oder mehrere physische Eigenschaften messen oder darstellen, welche innerhalb eines stetigen Wertebereichs jeden Wert annehmen können.

Virtuelle Daten sind definiert als Daten, die in einer digitalen oder Computerumgebung und nicht in einer physischen Umgebung verwendet werden. Abbildung 1 stellt drei unterschiedliche Arten von virtuellen Daten dar.

Eine *Computerdatei* enthält virtuelle digitale Daten, die unter demselben Namen gruppiert sind. Sie zeichnet sich durch drei Eigenschaften aus¹⁰:

1. Die *Art* der Datei bezieht sich auf das damit verknüpfte digitale Modell, das durch mathematische Funktionen repräsentiert wird.
2. Das *Dateiformat* bezieht sich auf die Anordnung der Daten. Internationale Standards und Regelungen sehen eine bestimmte Anordnung der Daten innerhalb bestimmter Dateiformate vor, doch können Unternehmen auch ihre eigenen Formate definieren.
3. Die *Dateinamenerweiterung* ist eine an den Dateinamen angehängte Endung, die das Dateiformat angibt.

Die drei digitalen CAD-Modelle, die in Abbildung 1 dargestellt sind, könnten zum Beispiel in dentalen CAD/CAM-Dateien enthalten sein.

Interoperabilität

Je nach dem Grad der Offenheit der Daten können CAD/CAM-Lösungen als „einfach zu bedienen“ angesehen werden. Tatsächlich ist der Datenaustausch mit anderen Digitalgeräten oder CAD/CAM-Lösungen umso einfacher, je kompatibler oder stärker interoperabel eine CAD/CAM-Lösung ist. Wie Schleyer⁷ betonte, ist die Interoperabilität ein wichtiger Faktor für eine effiziente Zahnarztpraxis.

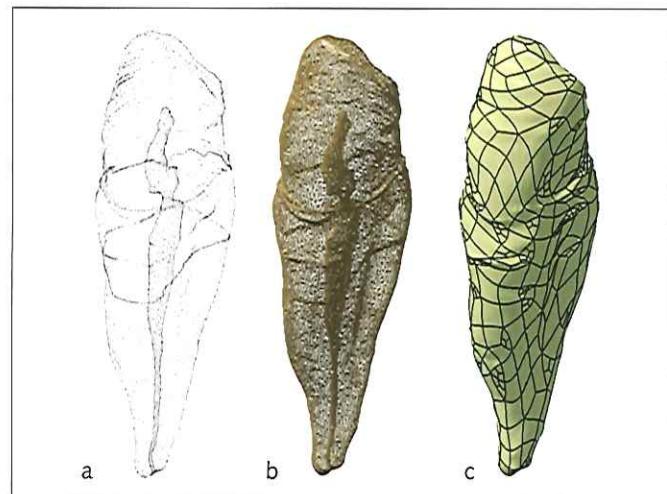


Fig 1 Three types of digital data representation: a. Point cloud data; b. Surface representation data (STL CAD model); c. Surface representation data (Non-Uniform Rational Basis Spline [NURBS] CAD model). Point cloud from Boryor et al¹¹; CAD models obtained with Catia (Dassault Systèmes).

Abb. 1 Drei Arten der Darstellung digitaler Daten: a. Punktwolke, b. Datennetz (STL-CAD-Modell), c. Datennetz (Non-Uniform Rational Basis Spline [NURBS]-CAD-Modell); Punktwolke aus Boryor et al.¹¹) CAD-Modelle in Catia erstellt (Dassault Systèmes).

(a point cloud), and illustrates three different types of virtual data.

A *computer file* contains virtual digital data grouped under the same name. A computer file is characterized by three properties:¹⁰

1. Its *nature* refers to an associated digital model, represented by mathematical functions.
2. Its *format* refers to the data organization. International standards and agreements have set specific organizations for some formats, but companies can also define their own.
3. Its *filename extension* is a suffix attached to the file name that indicates the file format.

The three digital CAD models shown in Figure 1 could be embedded in dental CAD/CAM computer files.

Interoperability

Depending on the data openness, CAD/CAM solutions can be considered “easy to use”. Indeed, the more compatible or interoperable the CAM/CAM solution, the easier the data exchange with other digital devices or CAD/CAM solutions.

As Schleyer points out, interoperability is a key factor for an efficient dental office.⁷

Compatibility is defined as the ability of two given digital systems to exchange data without any alteration in digital information. Compatibility is possible when two digital devices can be integrated in the same data workflow.⁷ For instance, the Sirona-Cerec solution is compatible with other solutions: [Sic] Import of extra-oral 3Shape scan data into the inLab software... Export inEos Blue scan data and digital impression data (Sirona Connect) in 3Shape format... [Sic].¹²

Compatibility is possible when a computer file format can be imported or exported into two different digital systems. Two types of file formats can be exchanged:

- An *open or standard computer file format* is part of the public domain and does not present any access or process restriction.
- A *closed or proprietary computer file format* is part of the private domain and usually presents access or process restrictions.

For instance, in dental CAD/CAM, file formats such as the Sirona .cdt, and .lab or the 3Shape .dcm are proprietary file formats, whereas the .stl file format used in several dental CAD/CAM solutions is an open file format. Proprietary file formats are often encrypted to ensure that the computer file data cannot be read and interpreted by non-compatible systems.

As a result, the use of open file formats, such as .stl, provides a higher level of openness, which is called *interoperability* in computer science, and can be defined as the ability for any two systems to be compatible.¹³

Some companies sell a software module to export or import a proprietary file format to an open file format. For instance, Sirona, a leading provider of complete integrated CAD/CAM solutions, proposes for sale: [Sic] extensive open interfaces of the inLab SW 4.0 that offer additional flexibility with export of InLab model design data in [an] open STL format [Sic].¹²

Sometimes, "modularity" is used to market CAD/CAM systems. Modularity can refer to the ability to interchange a digital chain link. Thus, a solution is modular if digital chain links are compatible or interoperable and can be interchanged with an equivalent solution. For instance, the Lyra Digital Intuitive Solutions (GACD, Paris, France) can be considered modular because of the compatibility of the Lyra CAD software with the 3M ESPE True Definition Scanner and the 3Shape TRIOS camera.

Kompatibilität wird definiert als die Fähigkeit zweier bestimmter digitaler Systeme, Daten auszutauschen, ohne die digitale Information zu verändern. Kompatibilität ist dann gegeben, wenn zwei Digitalgeräte in denselben Daten-Workflow integriert werden können⁷.

Zum Beispiel ist die Sirona-Cerec-Lösung mit anderen Lösungen kompatibel: „Importieren extraoraler 3Shape-Scandaten in die inLab-Software... Exportieren von inEos-Blue-Scandaten und digitalen Abformungsdaten (Sirona Connect) im 3Shape-Format...“¹².

Kompatibilität ist möglich, wenn das Dateiformat in zwei unterschiedliche Digitalsysteme importiert oder exportiert werden kann. Zwei Arten von Dateiformaten können ausgetauscht werden:

- Ein *offenes oder Standarddateiformat* ist lizenfrei zugänglich und unterliegt Einschränkungen im Hinblick auf Zugang oder Verarbeitung.
- Ein *geschlossenes oder proprietäres Dateiformat* ist herstellerspezifisch und unterliegt in der Regel Einschränkungen im Hinblick auf Zugang oder Verarbeitung.

Zum Beispiel sind im Bereich des dentalen CAD/CAM die Dateiformate mit den Endungen .cdt und .lab von Sirona (Wals, Österreich) oder .dcm von 3Shape Dental Systems (Kopenhagen, Dänemark) proprietäre Dateiformate, während es sich beim Dateiformat .stl, das in mehreren dentalen CAD/CAM-Lösungen zum Einsatz kommt, um ein offenes Dateiformat handelt. Proprietäre Dateiformate werden häufig verschlüsselt, um sicherzustellen, dass die Daten aus der Datei nicht von nicht-kompatiblen Systemen ausgelesen und interpretiert werden können.

Daher bietet die Verwendung offener Dateiformate wie .stl ein höheres Maß an Offenheit. Dieses bezeichnet man in der Informatik als *Interoperabilität*, die sich wie folgt definieren lässt: die Fähigkeit zweier beliebiger Systeme, miteinander kompatibel zu sein¹³.

Um von proprietären Formaten in offene Dateiformate exportieren beziehungsweise importieren zu können, treiben manche Unternehmen ein Softwaremodul. Sirona zum Beispiel, wirbt mit folgenden Eigenschaften „die umfangreich offenen Schnittstellen des inLab SW 4.0, die zusätzliche Flexibilität bieten durch den Export von InLab-Modelldaten in einem offenen STL-Format“¹².

Manchmal wird zur Vermarktung von CAD/CAM-Systemen auch der Begriff der „Modularität“ verwendet. Darunter kann man die Fähigkeit zum Austausch eines digitalen Kettenglieds verstehen. Insofern ist eine Lösung modular, wenn die digitalen Kettenglieder kompatibel

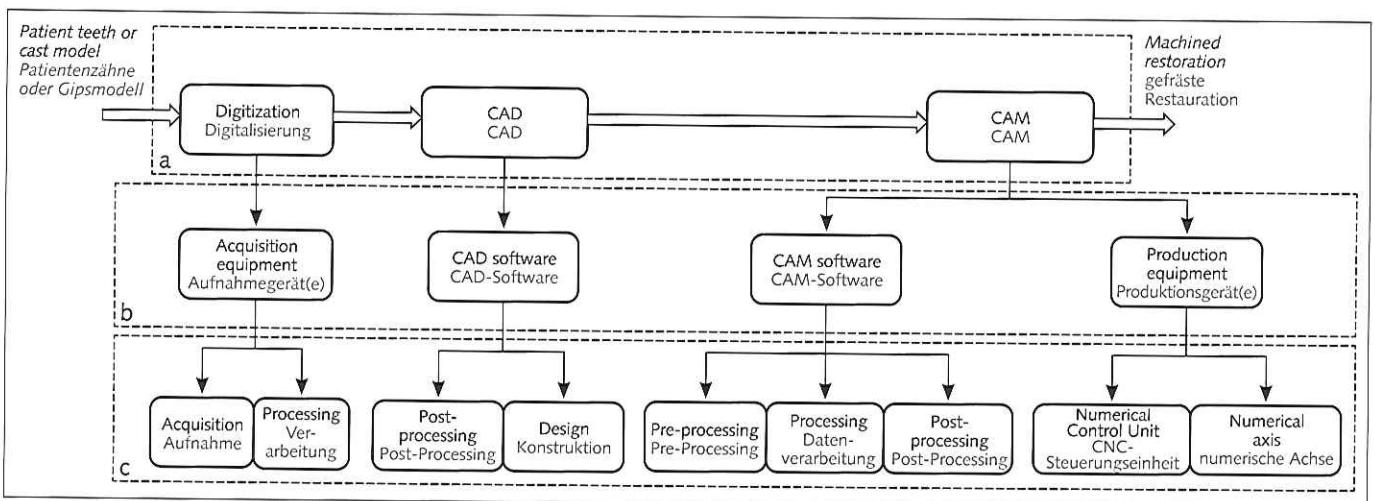


Fig 2a to c Digital chain structure: a. Dental approach; b. Digital chain link approach; c. Digital workflow approach.

Abb. 2a bis c Struktur der digitalen Kette: aus Sicht der Zahnheilkunde (a), als digitale Kettenglieder (b), als digitaler Workflow (c).

bzw. interoperabel sind und durch ein äquivalentes Kettenglied ausgetauscht werden können. So lässt sich die von Lyra Solutions (GACD, Paris, Frankreich) angebotene Lösung beispielsweise als modular ansehen, weil die Lyra CAD-Software mit dem True-Definition-Scanner von 3M Espe (Neuss) und der Trios-Kamera von 3Shape Dental Systems kompatibel ist.

Die Struktur der digitalen Kette im dentalen CAD/CAM

Wir stellen hier die beiden „klassischen“ Strukturen digitaler Ketten vor: Die erste basiert auf den kommerziell angebotenen Paketen von CAD/CAM-Firmen, die zweite basiert auf den vier grundlegenden Kettengliedern, die in dentalen CAD/CAM-Lösungen enthalten sind: Aufnahmegerät(e), CAD- und CAM-Software und Produktionsgerät(e).

Vorgehensweise in der Zahnheilkunde

Die „klassische“ Struktur der digitalen CAD/CAM-Kette in der Zahnheilkunde und in kommerziell vertriebenen dentalen CAD/CAM-Paketen wird in drei Hauptglieder unterteilt: Digitalisierung, CAD und CAM (Abb. 2a)¹⁻⁴.

Das Aufnahmegerät und die CAD-Software können als integrierte Lösung oder separat angeboten werden, wogegen die CAM-Software und die CNC-Maschine häufig als Komplett paket angeboten werden. Eine bei-

Dental CAD/CAM digital chain structure

What follows is a presentation of the two classical digital chain structures. The first is based on the commercial packages provided by CAD/CAM companies; the second is based on the four fundamental chain links comprised in dental CAD/CAM solutions: acquisition equipment, CAD software, CAM software, and production equipment.

Dental approach

The classical CAD/CAM digital chain structure adopted in dentistry and dental CAD/CAM commercial packages is divided into three main links: digitization, CAD, and CAM (Fig 2a).¹⁻⁴

The acquisition device and CAD software can be proposed as an integrated solution or separately, whereas the CAM software and numerical control (NC) machine tool are often proposed as an integrated package. Some examples from a variety of commercially available integrated CAD/CAM systems are presented in Table 1.

For direct (chairside) or indirect CAD/CAM dental production, a fully integrated digital chain package can be proposed; the product comprises the digitization device, CAD software, CAM software, and NC machine tool. Some fully integrated commercial packages include unique CAD/CAM software, featuring integrated CAD restoration-design modules and the CAM restoration-milling module. This type of integrated CAD/CAM software can be

Table 1 Commercial solutions for dental CAD/CAM

Tab. 1 Kommerzielle Lösungen für dentales CAD/CAM.

Chain link type/ Art des Kettenglieds	Chain link component(s)/ Komponente(n) des Kettenglieds	Company: product/ Hersteller: Produkt
Digitization – CAD/ Digitalisierung – CAD	Intraoral camera and associated CAD software/ Intraoralkamera und dazugehörige CAD-Software	3M ESPE: True Definition Scanner
	Extraoral scanner and associated CAD software/ Extraoralscanner und dazugehörige CAD-Software	3M ESPE: Lava Scan ST
Digitization/Digitalisierung	Extraoral scanner/Extraoralscanner	Imetric: IScan D104i
CAD/CAD	Restoration CAD software/ CAD-Software für Restauration	3M ESPE: Lava Design 7
CAM – NC machine tool package/ CAM-Werkzeugmaschinen- Komplett paket	NC machine tool and associated CAM software/ CNC-Maschine und dazugehörige CAM-Software	Planmeca: PlanMill 50
Fully integrated package/ vollständig integriertes Paket	Integrated intraoral camera, CAD/CAM software and NC machine tool/integriertes Paket aus Intraoralkamera, CAD/CAM-Software und CNC-Maschine	Sirona: Cerec
Fully integrated package/ vollständig integriertes Paket	Integrated extraoral scanner, CAD/CAM software and NC machine tool/integriertes Paket aus Extraoralscanner, CAD/CAM-Software und CNC-Maschine	KaVo: Everest

confusing for the dentist. Indeed, some dentists believe that an integrated CAD/CAM software system processes both the restoration design tasks and the milling preparation tasks. In engineering, restoration design tasks are considered CAD tasks and CAD software is developed only for design, whereas milling preparation tasks are considered CAM tasks and CAM software is developed only for milling.

Digital chain link approach

Figure 2b illustrates a digital link CAD/CAM approach. This approach is proposed to detail the consecutive digital means (equipment and software) embedded in dental CAD/CAM solutions for restorations.

Acquisition equipment

The acquisition link in dental CAD/CAM is composed of a digitization device associated with software algorithms for data processing. Several technical solutions are proposed (camera, scanner, coordinates measuring machine) that use different acquisition principles (with contact probe, without

spielhafte Auswahl an kommerziell erhältlichen integrierten CAD/CAM-Systemen ist in Tabelle 1 dargestellt.

Für die direkte und indirekte CAD/CAM-Herstellung von Zahnersatz können auch vollintegrierte digitale Ketten (Komplettlösungen) angeboten werden; diese Produkte umfassen das Digitalisierungsgerät, die CAD- und CAM-Software sowie die CNC-Maschine. Manche vollintegrierten, kommerziell vertriebenen Komplettlösungen enthalten proprietäre CAD/CAM-Software, die über integrierte CAD-Module für das Design von Zahnersatz und das CAM-Modul zum Fräsen der Restaurationen verfügt. Diese Art von integrierter CAD/CAM-Software kann für den Zahnarzt verwirrend sein. Manche glauben deshalb tatsächlich, dass ein integriertes CAD/CAM-Software-System, sowohl die Konstruktion des Zahnersatzes als auch die Aufgaben zur Vorbereitung des Fräsvorgangs übernimmt. Aus Sicht des Ingenieurs ist das Konstruieren von Zahnersatz jedoch ein CAD-Arbeitsschritt (und die CAD-Software wurde nur für die Konstruktion entwickelt), während die Arbeitsschritte zur Vorbereitung des Fräsen CAM-Arbeitsschritte sind (und CAM-Software wird nur für das Fräsen entwickelt).

Darstellung als digitale Kettenglieder

Abbildung 2b stellt die Sicht auf das CAD/CAM-Verfahren als digitale Kettenglieder dar. Auf diese Weise können die aufeinanderfolgenden digitalen Mittel (Geräte und Software), die in die CAD/CAM-Lösungen für Zahnersatz eingebettet sind, im Detail vorgestellt werden.

Aufnahmegeräte

Das Kettenglied der Aufnahme beziehungsweise Datenerfassung im dentalen CAD/CAM besteht aus einem Gerät zur Digitalisierung und den dazugehörigen Softwarealgorithmen zur Verarbeitung der Daten. Es werden verschiedene technische Lösungen angeboten (Kamera, Scanner, Gerät zur Koordinatenmessung), die für die Erfassung der intra- bzw. extraoralen Gewebe unterschiedliche Aufnahmeprinzipien einsetzen (mit Kontaktsonde, ohne Kontakt)¹⁻⁴. Kontaktfreie Geräte sind am weitesten verbreitet. Lee et al.¹⁴ schlugen für die kontaktfreien Digitalisierungsgeräte eine Klassifizierung vor:

- punktartig: Lasertriangulation mit Punktlaser und CCD-Sensor;
- linienartig: eine Linienlaserdiode mit zwei CCD-Sensoren;
- flächenartig: Projektor mit strukturiertem Licht und CCD-Sensor.

Das Maß an Offenheit des Aufnahmekettenglieds kann als niedrig oder gleich null angesehen werden. Behandler oder Zahntechniker können die in die Scanner oder Kameras integrierten Datenverarbeitungsparameter nicht modifizieren oder anpassen. Bei Intraoralscannern sind die Scan-Strategien und die Datenverarbeitung vollautomatisch. Bei extraoralen Kameras werden die Scan-Strategien manuell verarbeitet und die digitale Datenverarbeitung erfolgt automatisch.

CAD-Software

Das CAD-Kettenglied beim dentalen CAD/CAM umfasst Softwaremodule, die dazu gedacht sind, eine virtuelle Restauration auf Basis der digitalen Abformung eines Zahns beziehungsweise Implantats zu erstellen. Die Datenverarbeitung für die Konstruktion der Restauration erfolgt mithilfe einer vordefinierten Restaurationsdatenbank und speziellen Softwaremodulen für die Konstruktion von Restaurierungen (Simulation von Kontakten zu Nachbarzähnen und Antagonisten; Simulation der Okklu-

contact) for intra- or extraoral tissue acquisition.¹⁻⁴ Non-contact devices are the most widely available. Lee et al proposed a classification of noncontact digitizing devices, as follows:¹⁴

- Point-type, point laser triangulation with a CCD sensor.
- Line-type, a line laser diode with two CCD sensors.
- Area-type, a structured light projector with CCD sensor.

The openness level of the acquisition link can be considered low or null. Practitioners or dental technicians cannot modify or adjust data-processing parameters embedded in scanners or cameras. For intraoral scanners, the scanning strategies and data processing are fully automated. For extraoral cameras, scanning strategies are manually processed, and digitized data processing is automated.

CAD software

The CAD link in dental CAD/CAM comprises CAD software modules dedicated to creating a virtual restoration on a digital tooth or implant impression. The restoration design is processed with a predefined restoration database and software modules dedicated to restoration design (adjacent and antagonist contact simulation; occlusion simulation; marginal, occlusal, and axial gaps definitions; cervical limit draw, etc).

The openness level of the highly automated software algorithms in the CAD link can be considered low in terms of data processing. In several CAD software solutions, some design parameters are preset to propose a restoration design. Few such parameters can be manually modified and optimized by dental practitioners or technicians. Also, the restoration databases associated with the CAD software are often locked (ie, the restoration types that can be designed are limited).

CAM software

The CAM link in dental CAD/CAM comprises CAM software modules dedicated to create a virtual machining process for a restoration. The restoration machining process involves a predefined machining-process database and software modules dedicated to machining-process creation.

The software algorithms in the CAM link are automatically processed. Therefore, the openness of this CAM link is null: CAM software machining-process parameters are preset and locked. Therefore, the machining process is locked in CAD/CAM.

As was previously mentioned, the two types of software (CAD and CAM) can be integrated in a fully integrated CAD/CAM software product or separated in several interoperable software solutions.

Production equipment

The production equipment link in dental CAD/CAM is composed of an NC machine tool dedicated to producing a restoration. Several machine tool technical solutions can be classified into three main types.¹⁻²

1. The dental office machine tool type is often used to machine soft dental materials with only one abrasive or cutting bur (Lyra, GACD, Paris, France).
2. The dental laboratory machine tool type is used to machine more dental materials than the dental office type. For this type, several abrasive or cutting burs are used with more advanced machining strategies (DWX-50, Roland, Hamamatsu, Japan).
3. The production center machine tool type can be used to machine all dental materials (including densely sintered zirconia). This type has a more rigid mechanical structure and faster and more powerful spindles than the other two types and is used with several abrasive or cutting tools and advanced machining strategies (Ultrasonic 20 Dental Series, Deckel Maho Gildemeister Mori Seiki, Leonberg, Germany).

The NC machine tool configurations used in the dental office or laboratory are locked. Therefore, the level of openness of the production link is null.

According to this chain link approach, dental CAD/CAM solutions for restorations are always composed of four fundamental links: acquisition equipment, CAD software, CAM software, and production equipment. The level of openness can be considered quasi-null because only a few parameters can be modified or adjusted in CAD software solutions.

The dental CAD/CAM digital workflow

What follows is a presentation of the digital workflow approach shown in Figure 2c to define the data-processing and data-exchange steps involved in each digital chain link of the dental CAD/CAM digital chain.

sion, Definitionen für Randspalt sowie okklusale und axiale Ränder, zervikale Grenzlinie etc.).

Das Maß an Offenheit der hoch automatisierten Softwarealgorithmen des CAD-Kettenglieds kann im Hinblick auf die Datenverarbeitung als niedrig angesehen werden. In einigen CAD-Softwarelösungen sind einige Konstruktionsparameter voreingestellt, um ein Restaurationsdesign vorschlagen zu können. Nur wenige dieser Parameter können vom Zahnarzt oder -techniker manuell modifiziert und optimiert werden. Die mit der CAD-Software verknüpften Restaurationsdatenbanken sind darüber hinaus häufig gesperrt (das heißt, es kann nur eine begrenzte Anzahl an Restaurationsarten konstruiert werden).

CAM-Software

Das CAM-Kettenglied beim dentalen CAD/CAM umfasst CAM-Softwaremodule, die dazu gedacht sind, einen virtuellen Fräsvorgang für eine Restauration zu schaffen. Für den Fräsvorgang der Restauration wird eine vordefinierte Datenbank mit Fräsvorgängen benötigt und Softwaremodule, die zur Berechnung von Fräsvorgängen geeignet sind.

Die Softwarealgorithmen im CAM-Kettenglied werden automatisch verarbeitet. Daher ist die Offenheit dieses Kettenglieds bei null: Die Prozessparameter für den Fräsvorgang sind in der CAM-Software voreingestellt und gesperrt. Somit ist der Fräsvorgang im CAD/CAM gesperrt.

Wie bereits erwähnt, können die beiden Software-Arten (CAD- und CAM-Software) als vollintegriertes CAD/CAM-Softwareprodukt oder in mehreren interoperablen Softwarelösungen getrennt angeboten werden.

Herstellungsgeräte

Das Kettenglied der Herstellungsgeräte im dentalen CAD/CAM besteht aus einer CNC-Maschine, die zur Herstellung einer Restauration dient. Die unterschiedlichen technischen Lösungen bei den CNC-Maschinen können in drei Hauptkategorien unterteilt werden^{1,2}.

1. Der Maschinentyp für die Zahnarztpraxis wird häufig zum Fräsen weicher Zahnersatzmaterialien eingesetzt, mit nur einem schleifenden oder schneidenden Fräser (Lyra, GACD, Paris).
2. Der Maschinentyp für das Dentallabor wird zum Fräsen von mehr Materialien eingesetzt als der Maschinentyp für die Zahnarztpraxis. Bei diesem Typ werden mehrere schleifende oder schneidende Fräser mit

elaborierteren Frästrategien eingesetzt (Roland: DWX 50, Hamamatsu, Japan).

3. Der Maschinentyp für das Fräszentrum kann zum Fräsen aller Zahnersatzmaterialien eingesetzt werden (auch von dicht gesintertem Zirkondioxid). Der letzte Typ hat eine starrere mechanische Struktur und schnellere und kräftigere Spindeln als die beiden anderen Typen. Bei dieser Art von Werkzeugmaschine werden mehrere Schleif- oder Schneidwerkzeuge und elaboriertere Frästrategien eingesetzt (Deckel Maho Gildemeister Mori Seiki – Ultrasonic 20 dental series, Leonberg).

Die in der Zahnarztpraxis oder im Labor eingesetzten Konfigurationen für die CNC-Maschine sind gesperrt. Daher ist das Maß an Offenheit des Herstellungskettenglieds gleich null.

Entsprechend dieser Sicht in Form von Kettengliedern setzen sich die dentalen CAD/CAM-Lösungen für Zahnersatz immer aus vier grundlegenden Kettengliedern zusammen: Aufnahmegerät(e), CAD- und CAM-Software und Herstellungsgerät(e). Das Maß an Offenheit kann als quasi gleich null betrachtet werden, da nur wenige Parameter in den CAD-Softwarelösungen modifiziert oder angepasst werden können.

Der digitale Workflow im dentalen CAD/CAM

Dieser Abschnitt stellt die Sichtweise als digitalen Workflow aus Abbildung 2c dar, um die Datenverarbeitungs- und Datenaustauschschritte innerhalb jedes digitalen Kettenglieds der digitalen Kette des dentalen CAD/CAM zu definieren.

Digitalisierung

Die Digitalisierungsschritte beim dentalen CAD/CAM lassen sich als eine Variante des industriellen „Reverse Engineering“ beschreiben. Wie von Raja et al.¹⁵ definiert, „wird der Prozess des Duplizierens von vorhandenen Teilen, Baugruppen oder Produkten ohne Zeichnungen, Dokumentation oder Computermodelle als Reverse Engineering bezeichnet. Das Reverse Engineering wird auch als der Prozess definiert, mit dem ein geometrisches CAD-Modell aus 3-D-Punkten gewonnen wird, die durch Scannen/Digitalisieren vorhandener Teile/Produkte aufgenommen wurden.“

Digitization

The digitization tasks of dental CAD/CAM can be considered a variant of industrial reverse engineering. As defined by Raja et al, [Sic] *the process of duplicating an existing part, subassembly, or product without drawings, documentation or a computer model is known as reverse engineering. Reverse engineering is also defined as the process of obtaining a geometric CAD model from 3-D points acquired by scanning/digitizing existing parts/products* [Sic].¹⁵

The digitization can be divided into two data computing tasks: data acquisition, and data processing (Figs 2b and 2c).

Acquisition workflow

The aim of acquisition is to convert an analog signal into digital data (Fig 3). The patient's teeth and tissues or cast are the input of acquisition. Such data constitute a physical continuous geometrical surface. Then, a digitization device (scanner or camera) converts these analog data into digital data through image processing.⁹ The converted data constitute a point cloud that is stored in a file. The digital data outputs of acquisition are virtual discrete geometrical data representing the patient's teeth and tissues with several point clouds.¹⁶ The associated file format is very often proprietary (eg, 3Shape Dental System's file format extension .pts). Nevertheless, the file format consists of a point cloud list, and each point cloud can be represented by a list of the space coordinates of all the points in the cloud.

Processing workflow

The aim of the data processing phase is to clean and filter the digital data obtained after acquisition (Fig 4). Actually, the point clouds generally contain aberrant points because of the external environment, as well as excessive point density in some areas. Excessive point density can result from the sample step associated with the use of the digitization device or from multiple acquisition of a same area during scanning manipulation. Software algorithms are used at this stage to process the point cloud. Filtering, alignment, and merging algorithms are usually used to obtain a digital representation of the patient's teeth and tissues with one optimized point cloud.^{9,17,18}

After data processing, one file containing a list of the points' space coordinates is obtained. Associated file formats are open or proprietary (eg, 3Shape Dental System's file

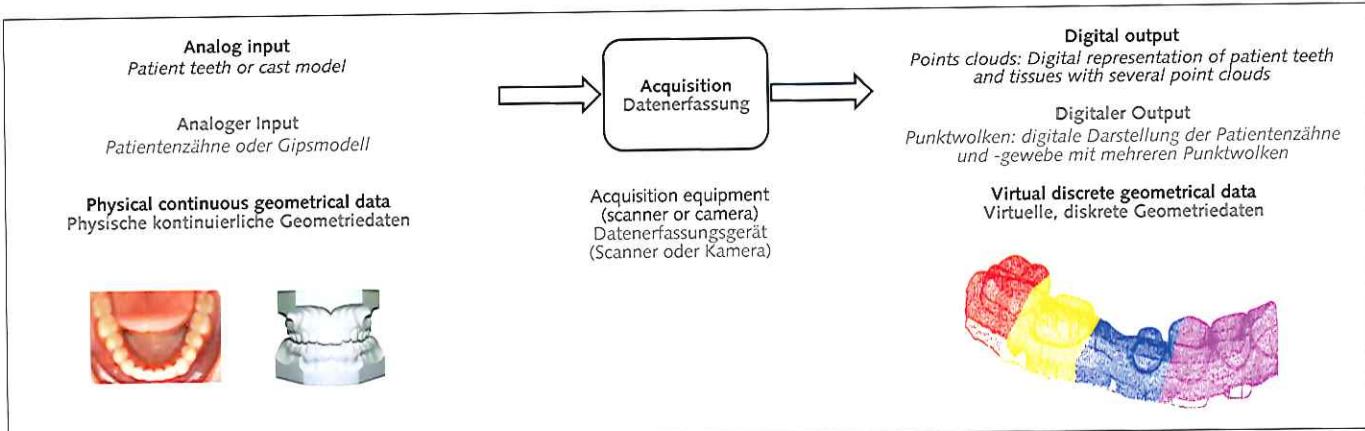


Fig 3 Digitization: acquisition workflow.

Abb. 3 Digitalisierung: Datenerfassungsworkflow.

format extension .pts). Open formats are organized as a three-column list of the points' coordinates with a separator character (space, tabulation or semicolon). Usual associated extensions are .txt (binary text file format encoding) or .asc (ASCII text file format encoding). These are non-encrypted formats that are commonly processed in computer engineering.

Computer-aided design (CAD)

Once the digitized data have been processed, CAD begins with two data-computing tasks: post-processing and design (Figs 2b and 2c).

Post-processing workflow

The aim of post-processing is to convert the digital geometrical data resulting from the digitization into a virtual representation with digital geometrical data (Fig 5). The result of this step is the virtual master "cast" on which the restoration will be designed.

This conversion is performed by associating a digital continuous geometrical model with the points cloud. The most frequent geometrical model used in dental CAD/CAM is the STereoLitography model, also called Standard Tesselation Language (STL). It is a polygonal model structured by a set of triangular planar facets continuously linked to each other (Fig 6a). Two types of standard file formats can be used for encoding the data: the binary STL format and the ASCII STL format.¹⁹ For these two formats, the computer file is organized as an arranged list of facets, with each facet

Die Digitalisierung lässt sich in zwei Datenberechnungsschritte aufteilen: die Erfassung der Daten und die Datenverarbeitung (Abb. 2b und c).

Datenerfassungsworkflow

Das Ziel der Datenerfassung ist es, ein analoges Signal in digitale Daten zu konvertieren (Abb. 3). Die Zähne und Weichgewebe des Patienten (bzw. das Modell) sind der Input für die Datenerfassung. Diese Daten stellen eine physische, kontinuierliche, geometrische Oberfläche dar. Anschließend konvertiert ein Digitalisierungsgerät (Scanner oder Kamera) durch Bildverarbeitung diese analogen Daten in digitale Daten⁹. Diese konvertierten Daten bilden eine Punktwolke, die in einer Datei gespeichert wird. Die digitalen Daten-Outputs dieser Aufnahme sind virtuelle, diskrete Geometriedaten, die die Zähne und Weichgewebe des Patienten in Form mehrerer Punktwolken darstellen¹⁶. Das entsprechende Dateiformat ist häufig proprietär (beispielsweise die Dateinamenerweiterung .pts von 3Shape Dental Systems). Dennoch besteht das Dateiformat aus einer Liste von Punktwolken und jede Punktwolke kann als Liste von Raumkoordinaten aller in der Wolke enthaltenen Punkte dargestellt werden.

Datenverarbeitungsworkflow

Das Ziel der Phase der Datenverarbeitung ist es, die nach der Erfassung erhaltenen digitalen Daten zu säubern und zu filtern (Abb. 4). Zu diesem Zeitpunkt enthalten die

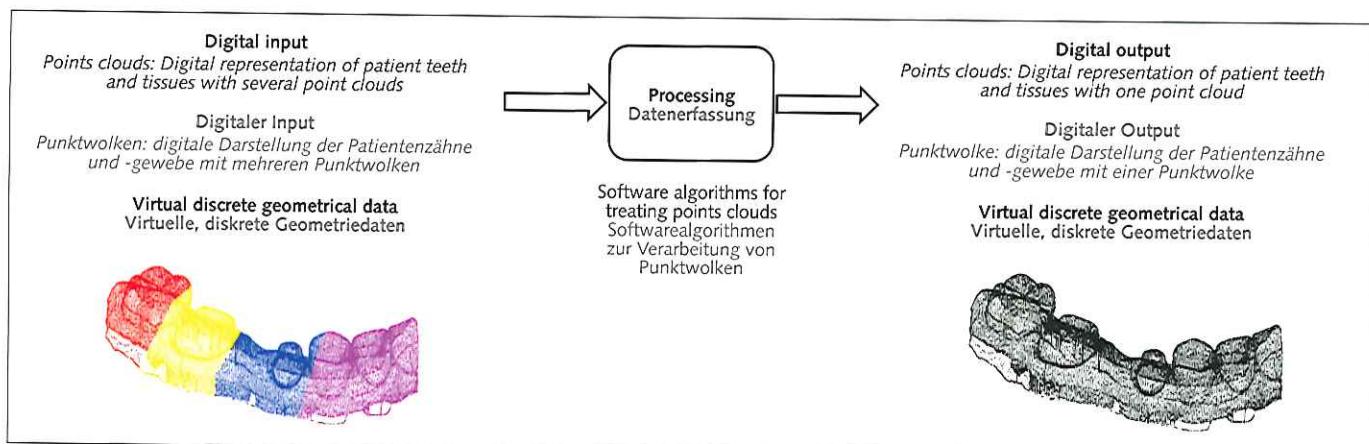


Fig 4 Digitization: data processing workflow.

Abb. 4 Digitalisierung: Datenverarbeitungsworkflow.

Punktwolken im Allgemeinen noch Punktabweichungen aufgrund der äußeren Umgebung und der zu starken Punktdichte in manchen Bereichen. Eine zu starke Punktdichte kann aus dem Abtastungsschritt des jeweiligen Digitalisierungsgeräts resultieren oder durch die Mehrfacherfassung desselben Bereichs während eines manuellen Scans zustande kommen. In diesem Stadium werden Softwarealgorithmen zur Verarbeitung der Punktwolke herangezogen. Algorithmen für Filterung, Alignment und Zusammenführung von Daten werden normalerweise verwendet, um eine digitale Darstellung der Zähne und Weichgewebe des Patienten mit nur einer optimierten Punktwolke zu erhalten^{9,17,18}. Nach der Datenverarbeitung erhält man eine Datei, die eine Liste der Raumkoordinaten der Punkte enthält. Die entsprechenden Dateiformate sind proprietär oder offen. Offene Formate sind als dreispaltige Liste der Punktkoordinaten mit einem Trennzeichen (Leerzeichen, Tabstop-Zeichen oder Semikolon) angeordnet. Übliche Dateinamenerweiterungen hierfür sind .txt (Zeichencodierung als binäre Textdatei) oder .asc (Zeichencodierung als ASCII-Textdatei). Diese Formate sind unverschlüsselt und werden gemeinhin in der technischen Informatik verarbeitet.

Computer-aided Design (computergestützte Konstruktion)

Nachdem die digitalisierten Daten verarbeitet wurden, beginnt die CAD mit zwei Datenberechnungsschritten: dem sogenannten Post-Processing (der Nachbearbeitung) und der Konstruktion (Abb. 2b und c).

represented by its three vertices and its normal. The file-name extension associated with this standard format is .stl. The STL format model can be embedded in proprietary encrypted computer files. For instance, the Sirona Cerec InLab format (extension .lab, .cdt or .rst) or the 3Shape Dental System format (extension .dcm) can be converted to the STL format by purchasing a specific commercial module. Due to the common use of the STL model, meshing algorithms of points clouds constitutes the core of the post-processing step.²⁰

Design workflow

The aim of the design step is to create a CAD restoration associated with the digital master "cast" obtained after post-processing (Fig 7). Positioning, scaling, and morphing of parameterized CAD models are used to design the restoration.²¹ Morphing and alignment algorithms adapt a digital continuous geometrical restoration model to the patient's STL master "cast".^{22,23} Automatic knowledge-based processes using parameterized CAD models such as the biogeneric model can be used to create CAD restorations.^{24,25}

Several types of CAD models can be used in dental CAD/CAM: STL, hierarchical mesh, B-Spline, Hermite, NURBS.²⁶⁻³⁰ The STL model is the same as that used with post-processing (triangular facets). The STL model can be embedded in proprietary or encrypted files, as previously mentioned. The NURBS model is structured around mathematical models representing curves and surfaces.^{30,31} These models correspond to a polynomial-weighted basic

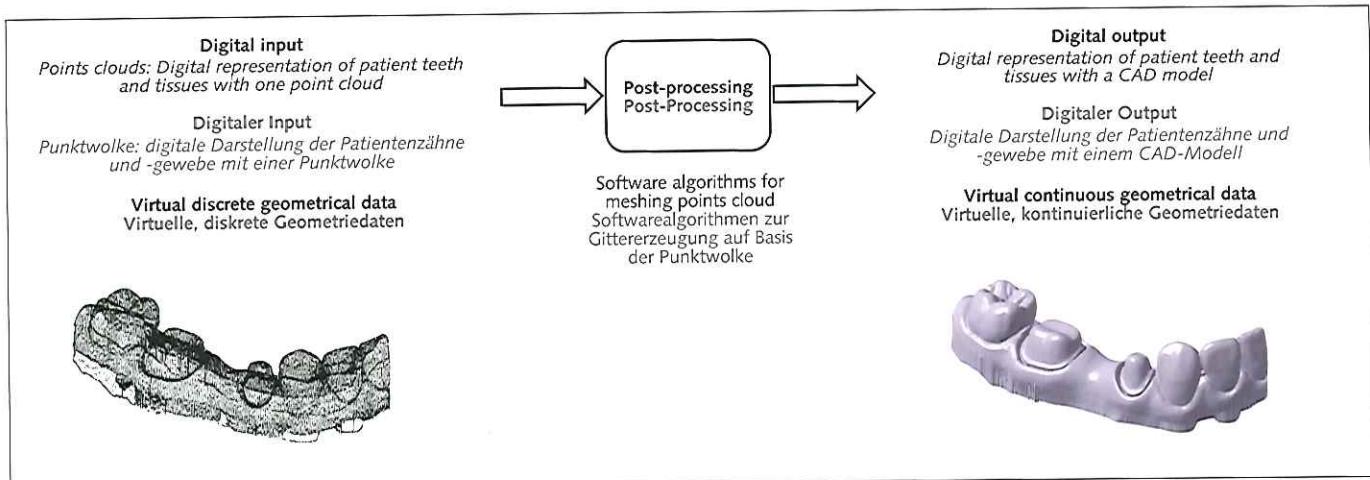


Fig 5 CAD: data post-processing workflow.

Abb. 5 CAD: Workflow für das Post-Processing der Daten.

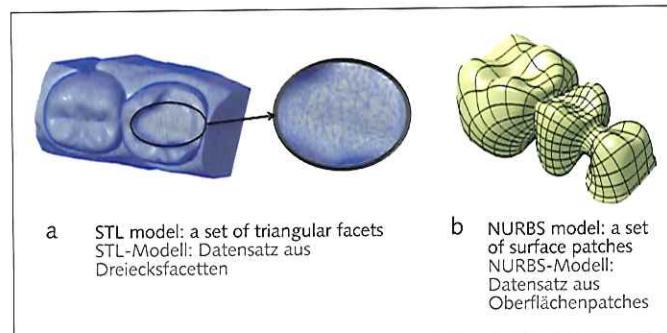


Fig 6 CAD: master “cast” and restoration representation. a. Digital master “cast” of an onlay cavity with an STL model; b. Digital design of a bridge with a NURBS model. Data from 3Shape; CAD models obtained with Catia (Dassault Systèmes).

Abb. 6a und b CAD: „Meistermodell“ und Darstellung der Restauration. Digitales Meistermodell einer Kavität für ein Onlay mit dem STL-Modell (a), digitale Konstruktion einer Brücke mit NURBS-Modell (b). Daten von 3Shape, die CAD-Modelle wurden mit Catia-Dassault Systèmes erstellt.

function that represents a surface patch. The union of several surface patches with curvature continuity results in a complete CAD restoration representation (Fig 6b). Due to its flexibility, the NURBS model is used to design complex shapes because it is easy to manipulate for geometrical operations such as scaling, positioning, and morphing. Two standard computer file formats integrate the NURBS model: the STandard for the Exchange of Product model data (STEP) format (extension .stp or .step), and the Initial

Post-Processing-Workflow

Das Ziel des Post-Processing ist die Konvertierung der durch Digitalisierung gewonnenen digitalen Geometriedaten in eine virtuelle Repräsentation als digitale Geometriedaten (Abb. 5). Das Ergebnis dieses Schritts ist das virtuelle Meistermodell, auf dem die Restauration konstruiert wird.

Diese Konvertierung wird durch die Verknüpfung eines digitalen kontinuierlichen geometrischen Modells mit der Punktwolke durchgeführt. Das im dentalen CAD/CAM am häufigsten eingesetzte geometrische Modell ist das Stereolithographie-Modell, das auch als „Standard Tesselation Language“ bezeichnet wird (STL). Dabei handelt es sich um ein polygonales Modell, das durch Dreiecksfacetten strukturiert ist, die kontinuierlich miteinander verbunden sind (Abb. 6a). Zwei Typen von Standarddateiformaten können zur Codierung der Daten verwendet werden: das binäre STL-Format und das ASCII-STL-Format¹⁹. Für diese beiden Formate wird die Computerdatei als Liste der Facetten angeordnet. Jede Facette wird von drei Eckpunkten und der Flächennormalen charakterisiert. Die Dateinamenerweiterung für dieses Standardformat ist .stl. Das STL-Formatmodell kann in proprietäre, verschlüsselte Dateien eingebettet sein. Zum Beispiel kann das Sirona Cerec Inlab-Format (Erweiterung. lab, .cdt oder .rst) oder das DentalSystem-Format von 3Shape Dental Systems (Erweiterung .dcm) in das STL-Format konvertiert werden, indem man ein bestimmtes Modul hinzukauf. Aufgrund der starken

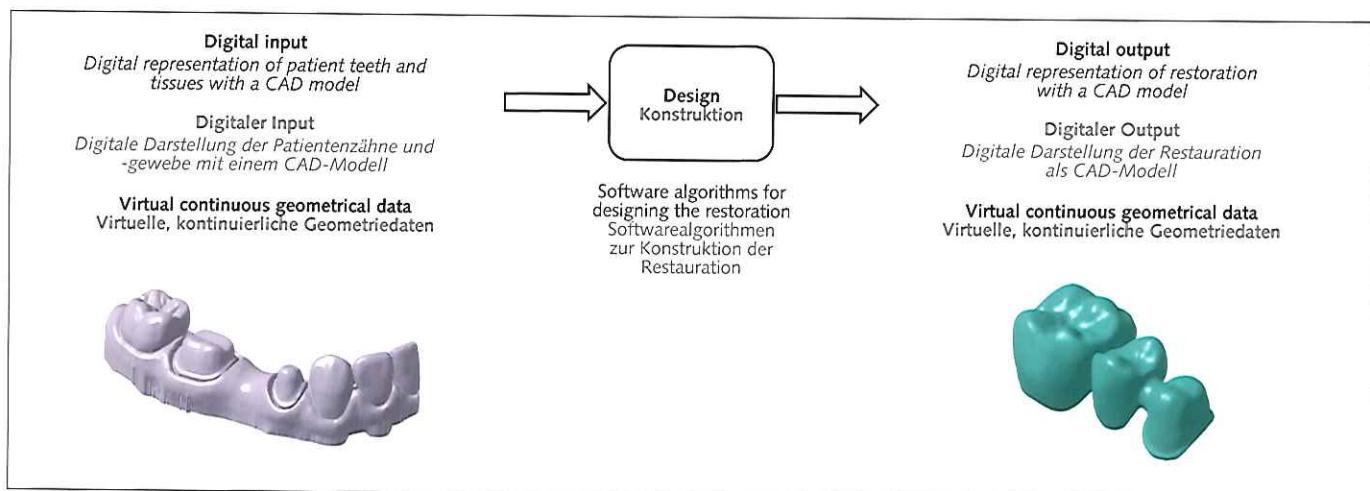


Fig 7 CAD: design workflow.

Abb. 7 CAD: Konstruktionsworkflow.

Verbreitung des STL-Modells stellen Algorithmen zur Gittererzeugung von Punktfolgen das Kernstück des Post-Processing-Schritts dar²⁰.

Konstruktionsworkflow

Das Ziel des Konstruktionsschrittes ist es, mithilfe des digitalen Meistermodells, das beim Post-Processing geschaffen wurde, eine CAD-Restauration zu erstellen (Abb. 7). Die Positionierung, Skalierung und das Morphing parametrisierter CAD-Modelle werden eingesetzt, um die Restauration zu konstruieren²¹. Morphing- und Alignmentalgorithmen adaptieren das digitale, kontinuierliche, geometrische Modell der Restauration an das als STL-Datei vorliegende „Meistermodell“ des Patienten^{22,23}. Automatische, wissensbasierte Verfahren mit parametrisierten CAD-Modellen, wie dem biogenerischen Modell, können eingesetzt werden, um die CAD-Restaurationen zu schaffen^{24,25}.

Im dentalen CAD/CAM können mehrere Arten von CAD-Modellen eingesetzt werden: STL, hierarchisches Netz, B-Spline, Hermite und NURBS²⁶⁻³⁰. Das STL-Modell ist dasselbe wie das beim Post-Processing eingesetzte Modell (Dreiecksfacetten). Das STL-Modell kann, wie bereits erwähnt, in proprietäre oder verschlüsselte Dateien eingebettet sein. Das NURBS-Modell ist um mathematische Modelle strukturiert, die Kurven und Flächen darstellen^{30,31}. Diese Modelle entsprechen einer polynominal gewichteten Basisfunktion, die ein Flächen-Patch darstellt. Die Zusammenfügung mehrerer

Graphics Exchange Specification (IGES) format (extension .igs or .iges).³²⁻³⁵ These organized files describe surfaces and curves according to the degree of their polynomial basic function, a control points' sequence, and a knot vector sequence. The control points determine the shape of the surface, while the knot vector sequence determines the localization and the influence of control points on the surface. Following this, the file of the designed restoration is transferred from CAD software to CAM software to prepare for its production.

Computer-aided manufacturing (CAM)

The CAM software is composed of three data-processing tasks leading to the NC program.

Pre-processing workflow

The pre-processing step aims to associate the CAD model of the restoration with technical data linked to its machining process (Fig 8). In digital dentistry, after design tasks, only the restoration geometrical requirements have been defined. Pre-processing allows for choosing or defining the block or blank specifications (geometry, type of prosthetic material) and the bur specifications (geometry, material, cutting or abrasive speed, cutting or abrasive feed-rate).³⁶

The data organization obtained after pre-processing is specific to the CAM software. Thus, no computer file can be accessed after pre-processing. Each CAM software solution may have its own pre-processing data organization. Due to

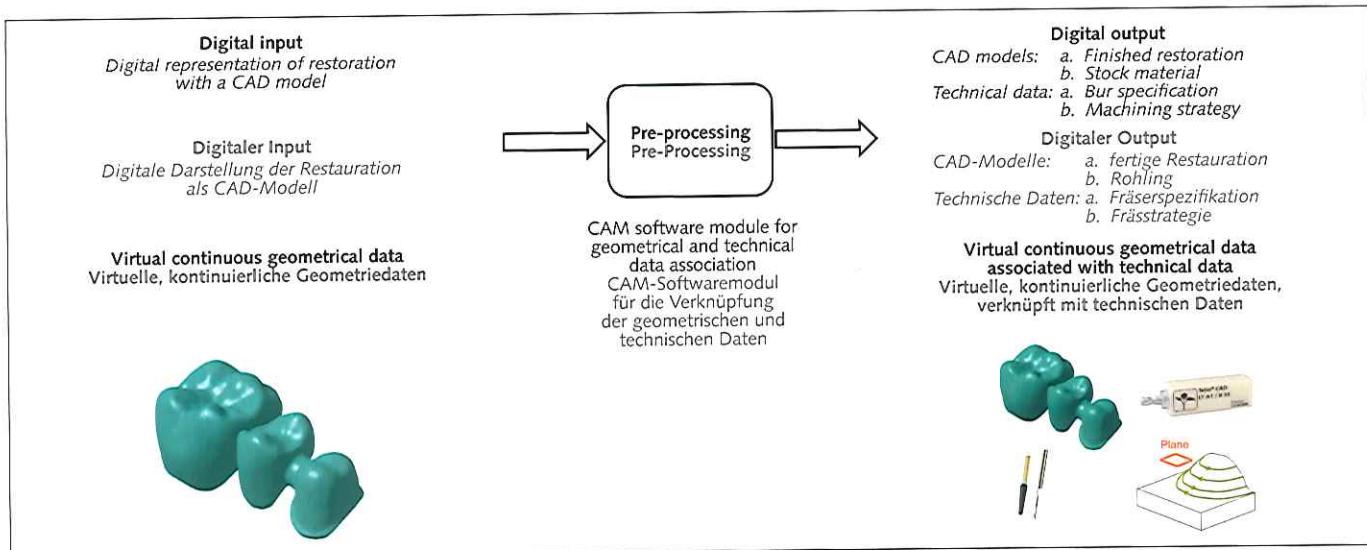


Fig 8 CAM: pre-processing workflow.

Abb. 8 CAM: Pre-Processing-Workflow.

the association of technical data with the restoration CAD model, the tool-path geometry can be calculated by the geometrical processor.

Processing workflow

The processing step aims to generate the machining process according to the pre-processing data (Fig 9). The machining process is composed of several machining sequences. A machining sequence is a group of calculated machining tool-paths, which are automatically calculated with specific machining strategy algorithms.³⁷ The CAM model obtained at the end of this processing step is a list of sequenced 2D or 3D curves. Each curves' sequence is associated with a bur kinematical behavior represented by its cutting or abrasive speed (rotational speed of the bur) and its feed-rate (relative speed of the bur along the part). CAM software providers have developed several proprietary file formats for CAM models. Nevertheless, some file formats that are not encrypted include the Cutter Location file type (CL file). Such a file can be read and treated with a specific module. For instance, the Automatically Programmed Tool format (APT format, extension .apt) is a CL file type currently used in CAM software.³⁸

Non-encrypted CL files such as an APT file cannot be directly interpreted by the Numerical Control Unit (NCU) of the machine tool and must be converted during post-processing.

Flächen-Patches mit Kurvenkontinuität ergibt eine vollständige Darstellung der CAD-Restauration (Abb. 6b). Das NURBS-Modell wird aufgrund seiner Flexibilität zur Konstruktion komplexer Formen eingesetzt, da es für geometrische Operationen wie Skalieren, Positionieren und Morphen leicht manipulierbar ist. Zwei Standard-Dateiformate integrieren das NURBS-Modell: das STEP-Format (Standard for the Exchange of Product Model Data; Erweiterung .stp oder .step) und das IGES-Format (Initial Graphics Exchange Specification; Erweiterung .igs oder .iges)³²⁻³⁵. Diese geordneten Dateien beschreiben Flächen und Kurven entsprechend des Grades ihrer Basispolynome, einer Kontrollpunktsequenz und einer Knotenvektorsequenz. Die Kontrollpunkte bestimmen die Form der Fläche. Die Knotenvektorsequenz definiert die Lage und den Einfluss der Kontrollpunkte auf die Fläche. Dann wird die Datei mit der konstruierten Restauration von der CAD-Software an die CAM-Software übergeben, um die Herstellung vorzubereiten.

Computer-aided Manufacturing (computergestützte Herstellung)

Die CAM-Software setzt sich aus drei Datenverarbeitungsschritten zusammen, die zum CNC-Programm führen.

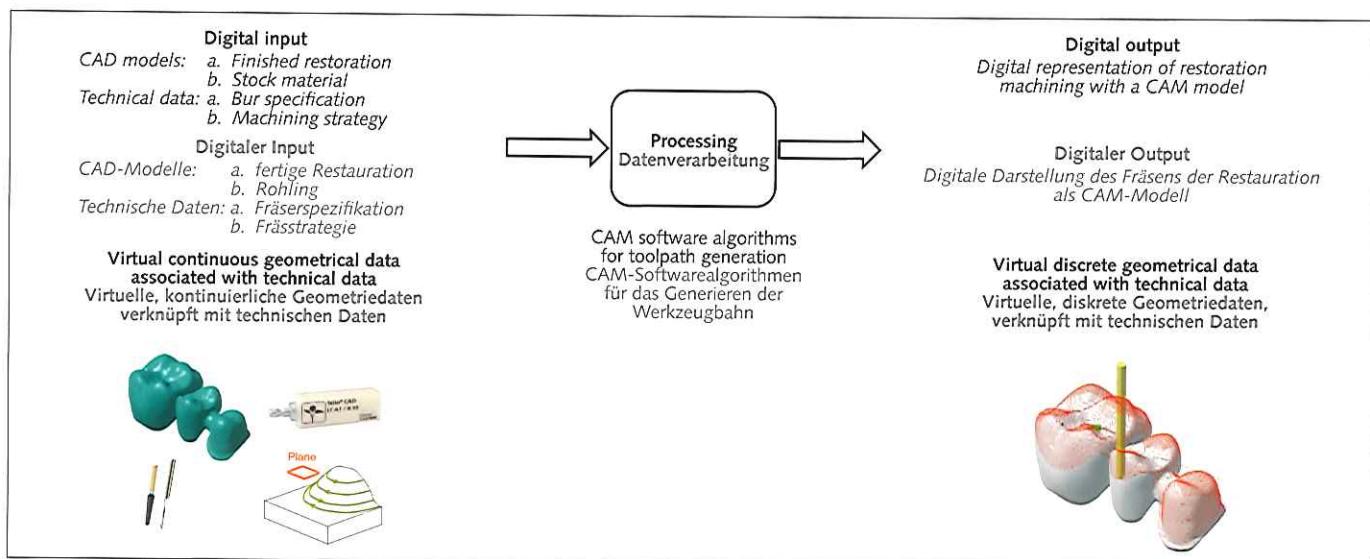


Fig 9 CAM: processing workflow.

Abb. 9 CAM: Datenverarbeitungsworkflow.

Pre-Processing-Workflow

Der Pre-Processing-Schritt zielt darauf ab, das CAD-Modell der Restauration mit den technischen Daten zu verknüpfen, die mit seinem Fräsvorgang verbunden sind (Abb. 8).

In der digitalen Zahnheilkunde wurden nach den Designschritten bisher nur die geometrischen Erfordernisse der Restauration definiert. Das Pre-Processing ermöglicht nun die Auswahl oder Festlegung der Spezifikationen des Blocks oder Rohlings (Geometrie, Materialtyp) und des Fräisers (Geometrie, Material, Schneid- oder Schleifgeschwindigkeit, Schneid- oder Schleifvorschub)³⁶.

Die Datenstruktur, die nach dem Pre-Processing vorliegt, ist für die CAM-Software spezifisch. Somit kann nach dem Pre-Processing nicht auf eine Datei zugegriffen werden. Jede CAM-Softwarelösung kann ihre eigene Struktur der Pre-Processing-Daten haben.

Aufgrund der Verbindung der technischen Daten mit dem CAD-Modell der Restauration kann der Geometrieprozessor die Geometrie des Werkzeugwegs berechnen.

Datenverarbeitungsworkflow

Der Schritt der Datenverarbeitung zielt darauf ab, gemäß den Pre-Processing-Daten den Fräsvorgang zu generieren (Abb. 9). Der Fräsvorgang setzt sich aus mehreren Fräsesequenzen zusammen. Eine Fräsesequenz ist eine Gruppe

Post-processing workflow

The post-processing task aims to generate a program that is interpretable by an NCU (Fig 10). Due to the fact that usual CL files cannot be interpreted by an NCU, an ISO standard format for NC programming called G-code was developed.³⁹ Post-processing can be considered the conversion of a CL file into a G-code file. A G-code file consists of a group of instructions describing the elementary machining tool paths (linear path between several points with a given feed-rate) and further instructions (spindle cutting speed, bur change, coolant starting/ending). These instructions are contained in a binary text file or an ASCII text file with associated extensions such as .txt, .ncprog, .iso or .mpf. These files are open files (ie, non-encrypted files) that are automatically generated by a file format converter, usually called a post-processor. Such a file constitutes the NC program. In digital dentistry, processed and post-processed files are automatically generated.

After the NC program has been generated, the NC program file is transferred to the machine tool's NCU to implement the restoration machining process.

NCU and numerical axis workflows

To machine the restoration, the NC program is transmitted to the NCU (Fig 11). The NCU generates the kinematical axis command: path, speed, and acceleration of each numerical

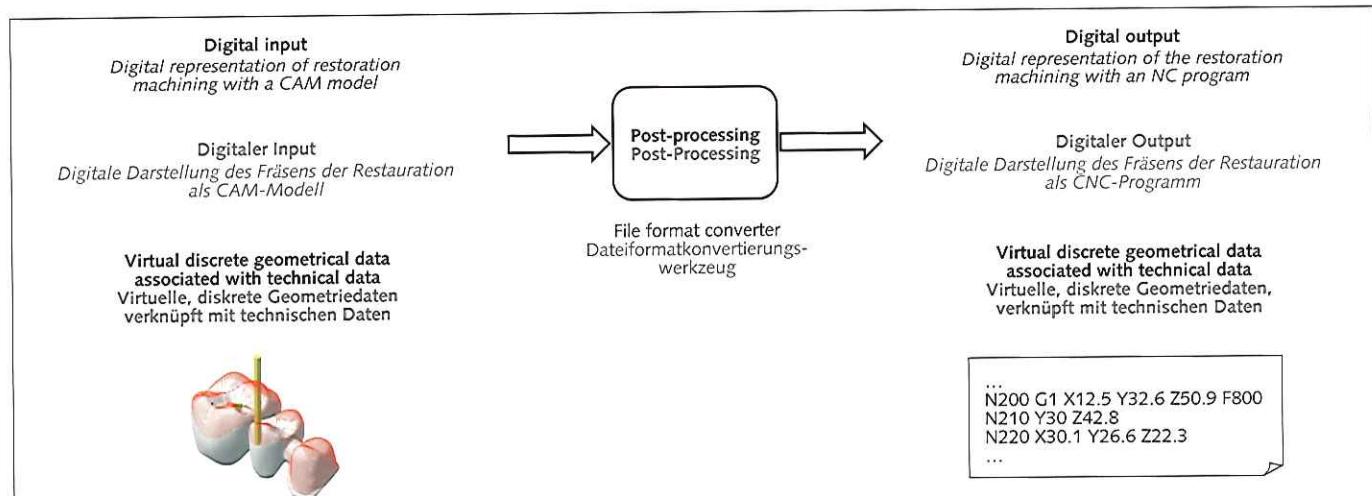


Fig 10 CAM: post-processing workflow.

Abb. 10 CAM: Post-Processing-Workflow.

axis according to the set points (SPs) fixed in the NC program. Then, the axis commands are transmitted to the axis motors, thus implementing the relative path between the tool and the block or blank so as to machine it according to the NC-program tool-path.

According to the ISO 841 standard,⁴⁰ two types of digital axes can be used in an NC machine tool. The first type is an open-loop-controlled digital axis, defined as follows: axis movement wherein an infinite set of positions can be reached according to the positioning resolution. The second type is a closed-loop-controlled digital axis, defined as follows: axis movement wherein position and speed are servo monitored (principle illustrated in Fig 11). For the latter type of digital axis, a sensor and a transmitter measure the path and velocity of the axis so that the axis has a feedback loop. The measured data obtained by the sensor are compared with the SPs defined in the NC program to calculate the interpolator error. This error is permanently transmitted to the NCU to generate a kinematical axis command correction and to reduce path and velocity errors.

Discussion

Practitioners and dental technicians should consider CAD/CAM systems as a digital chain composed of four consecutive links: acquisition equipment, CAD software, CAM software, and production equipment. Due to the specific digital workflow in digital dentistry, the practitioner can be confused

von berechneten Fräswerkzeugwegen. Die Fräswerkzeugwege werden mithilfe spezieller Frästrategiealgorithmen automatisch berechnet³⁷. Das CAM-Modell, das am Ende dieses Datenverarbeitungsschritts steht, ist eine Liste sequenzierter 2-D- oder 3-D-Kurven. Die Sequenz jeder Kurve steht mit einem kinematischen Verhalten des Fräzers in Verbindung, das durch dessen Schneid- oder Schleifgeschwindigkeit (Rotationsgeschwindigkeit des Fräzers) und dessen Vorschub (relative Geschwindigkeit des Fräzers entlang des Werkstücks) repräsentiert wird. Die Hersteller von CAM-Software haben mehrere proprietäre Dateiformate für CAM-Modelle entwickelt. Es gibt jedoch auch einige Dateiformate, die nicht verschlüsselt sind. Hierzu gehört die CL-Datei (Cutter-Location-Datei). Diese Dateien können mit einem speziellen Modul ausgewertet und bearbeitet werden. Das APT-Format (Automatically Programmed Tool Format; Erweiterung .apt) ist zum Beispiel ein Typ von CL-Datei, der aktuell in CAM-Software eingesetzt wird³⁸.

Unverschlüsselte CL-Dateien, wie die APT-Dateien, können von der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine nicht direkt interpretiert werden, sondern müssen während des Post-Processing konvertiert werden.

Post-Processing-Workflow

Der Schritt des Post-Processing zielt darauf ab, ein Programm zu generieren, das von einer CNC-Maschine interpretiert werden kann (Abb. 10). Da die üblichen

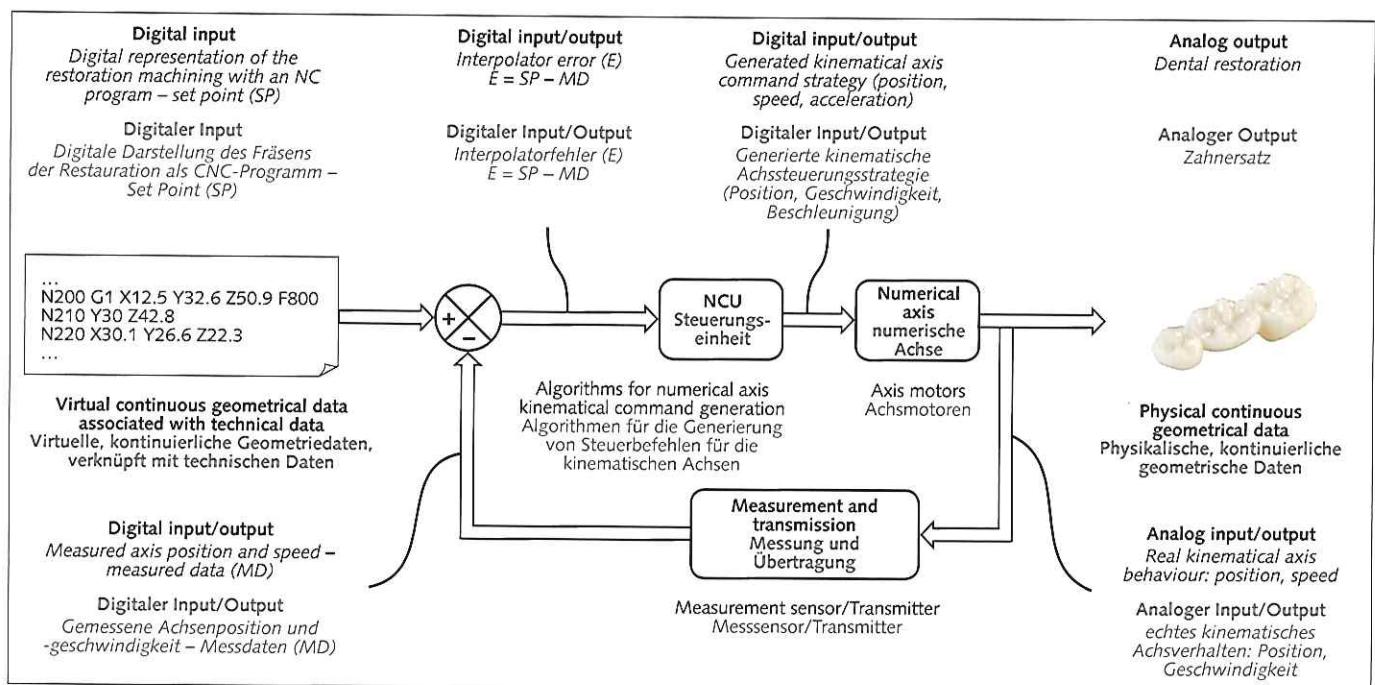


Fig 11 CAM: Numerical Control Unit (NCU) and digital axis workflows.

Abb. 11 CAM: Die Workflows der NCU (Numerical Control Unit) und der digitalen Achsen.

CL-Dateien von CNC-Maschinen nicht interpretiert werden können, wurde eine ISO-Norm für die CNC-Programmierung namens G-Code entwickelt³⁹. Das Post-Processing kann daher als Konvertierung einer CL-Datei in eine G-Code-Datei angesehen werden. Eine G-Code-Datei besteht aus einer Gruppe von Anweisungen, die elementare Fräswerkzeugbahnen beschreiben (lineare Bahn zwischen mehreren Punkten mit einem bestimmten Vorschub), und weiteren Anweisungen (Spindelschnittgeschwindigkeit, Fräserwechsel, Beginn/Ende der Kühlung). Diese Anweisungen sind in einer Binärdatei im Text oder ASCII-Text-Format enthalten; die Dateinamenerweiterungen sind entsprechend .txt, .ncprog, .iso oder .mpf. Bei diesen Dateien handelt es sich um offene Dateien (das heißt unverschlüsselte Dateien), die von einem Dateiformatkonvertierungs werkzeug, das normalerweise als Post-Processor bezeichnet wird, automatisch generiert werden. Diese Datei stellt das CNC-Programm dar. In der digitalen Zahnheilkunde werden die Dateien des Datenverarbeitungs- und Post-Processing-Stadiums automatisch generiert.

Nachdem das CNC-Programm generiert wurde, wird die Datei, welche das Programm enthält an die Steuerungs-

by the distinction between CAD software modules dedicated to designing tasks and CAM software modules dedicated to machining preparation tasks. This confusion can be exacerbated by the fact that dental CAD/CAM software solutions are often provided as one software package embedded in a fully integrated digital chain. Although commercially the CAM software and production equipment are indistinguishable, CAM software should be distinguished from production solutions.

Practitioners and dental technicians should take a critical look at the terms used in commercial brochures for CAD/CAM systems. The “openness” of a dental CAD/CAM system often refers to the use of an open file format, such as STL. The use of such files results in compatibility and interoperability between digital chain links, aspects that are useful for the efficient functioning of the dental office.⁷ The more interoperable the digital chain links, the easier the data exchanges. A high level of interoperability between software and equipment from different providers facilitates data exchanges between practitioners, dental laboratories, and production centers.

Dental CAD/CAM providers generally consider practitioners and dental technicians to be non-experts in CAD/

CAM engineering. Thus, companies have created fully integrated and automated dental CAD/CAM systems. This high level of automation can be a drawback when designing a restoration. In dental CAD software, few restoration design parameters can be modified and optimized. The CAD software often imposes some associated technical parameters; for example, the practitioner cannot specify the required roughness and dimensional tolerance on the various prosthetic areas. As a result of little access to the software or the devices' parameters, the dental CAD/CAM process cannot always meet the clinical requirements (eg, a restoration adaptation) or the practitioner's needs.

The software algorithms integrated in the CAM link are fully automatic: machining process parameters are preset and locked. The automation of the milling strategy in dental CAM software solutions can also be a drawback in producing good restorations. Actually, in mechanical engineering, the milling strategy is well known to have a direct impact on the parts' surface integrity (especially on roughness, residual stress, and cracks).⁴¹⁻⁴⁴

Practitioners and dental technicians should bear in mind that in current dental CAD/CAM software, the databases, restoration types, and material blocks or blanks are locked. The choice of biomaterial or restoration type is thus limited by the choice of a given CAD/CAM solution. The integration of a new biomaterial or restoration type can necessitate the definition of a new machining process (new bur geometry, new bur cutting or abrasive material, new machining strategy). Dental CAD/CAM system developers consider practitioners and dental technicians not to have enough knowledge of machining processes to let them define their own parameters. Therefore, the integration of a new restoration type or biomaterial can necessitate purchasing additional modules.^{2-4,21}

As Schleyer has emphasized, the dental CAD/CAM industry [Sic] *should adopt user-centred design principles and designers should work together to improve [Sic]* data exchange interoperability;⁷ these principles should be extended to data processing in order to better integrate clinical recommendations and practitioners' requirements in each digital chain link.

Conclusions

Dental CAD/CAM is a digital chain of four consecutive links – acquisition equipment, CAD software, CAM software, and production equipment – for digitally creating dental

einheit (Numerical Control Unit, NCU) der Werkzeugmaschine übergeben, die dann den Fräsvorgang der Restauration umsetzt.

CNC und die Workflows der numerischen Achsen

Zum Fräsen der Restauration wird das CNC-Programm an die Steuerungseinheit übergeben (Abb. 11). Diese generiert die kinematischen Achsenbefehle: Bahn, Geschwindigkeit und Beschleunigung jeder numerischen Achse gemäß den im CNC-Programm eingestellten Punkten (Set Points, SPs). Anschließend werden die Achsenbefehle an die Achsenmotoren übertragen, die so die relative Bahn zwischen dem Werkzeug und dem Block oder Rohling umsetzen, um diesen gemäß der im CNC-Programm festgelegten Werkzeugbahn zu fräsen.

Nach der ISO-Norm 841⁴⁰ können in einer CNC-Maschine zwei Arten von digitalen Achsen verwendet werden. Die erste Art ist eine digitale Achse mit offener Steuerung, die wie folgt definiert ist: Achsbewegung, bei der entsprechend der Positionierungsauflösung eine unendliche Anzahl von Positionen erreicht werden kann. Die zweite Art ist eine digitale Achse mit geschlossener Steuerung, die wie folgt definiert ist: Achsbewegung, bei der Position und Geschwindigkeit mit Sensoren überwacht werden (das Prinzip ist in Abbildung 11 veranschaulicht). Beim zweiten Typ digitaler Achsen messen ein Sensor und ein Transmitter die Achsenbahn und -geschwindigkeit, sodass die Achse über eine Feedbackschleife verfügt. Die vom Sensor erfassten Messdaten werden mit den im CNC-Programm definierten SPs verglichen, um den Interpolatorfehler zu berechnen. Dieser Fehler wird permanent an die Steuerungseinheit übertragen, um einen kinematischen Achskorrekturbefehl zu generieren und Fehler bei Bahn und Geschwindigkeit zu reduzieren.

Diskussion

Behandler und Zahntechniker sollten sich CAD/CAM-Syste me als digitale Ketten vorstellen, die aus vier aufeinanderfolgenden Gliedern bestehen: Aufnahmegerät(e), CAD-Software, CAM-Software und Fertigungsgerät(e). Aufgrund des speziellen Workflows in der digitalen Zahnheilkunde kann die Unterscheidung zwischen CAD-Softwaremodulen für die Konstruktionsschritte und CAM-Softwaremodulen für die Vorbereitung der Frässchritte für den Behandler verwirrend sein. Diese Verwirrung kann noch

verstärkt werden durch die Tatsache, dass dentale CAD/CAM-Softwarelösungen häufig als Softwarepakete angeboten werden, die vollständig in die digitale Kette integriert sind. Auch wenn kommerziell zwischen CAM-Software und Herstellungsgeräten nicht unterschieden wird, sollte die CAM-Software von den Produktionsgeräten abgegrenzt werden.

Behandler und Zahntechniker sollten daher die in den Werbebrochüren für CAD/CAM-Systeme verwendeten Vokabeln kritisch betrachten. Die „Offenheit“ eines dentalen CAD/CAM-Systems bezieht sich häufig auf die Verwendung offener Dateiformate wie STL. Die Verwendung solcher Dateien bewirkt eine Kompatibilität und Interoperabilität zwischen digitalen Kettengliedern und dieser Aspekt ist nützlich für die effiziente Funktion in der Zahnarztpraxis⁷. Je höher die Interoperabilität der digitalen Kettenglieder, umso einfacher ist der Datenaustausch. Ein hohes Maß an Interoperabilität zwischen Software und Geräten unterschiedlicher Anbieter erleichtert den Datenaustausch zwischen Behandlern, Dentallaboren und Fräszentren.

Die Anbieter dentaler CAD/CAM-Lösungen gehen generell davon aus, dass Behandler und Zahntechniker keine Experten auf dem Gebiet der CAD/CAM-Technik sind. Deshalb haben die Unternehmen vollständig integrierte und automatisierte dentale CAD/CAM-Systeme entwickelt. Dieses hohe Maß an Automatisierung kann bei der Konstruktion einer Restauration ein Nachteil sein. In dentaler CAD-Software können nur wenige Konstruktionsparameter der Restauration modifiziert und optimiert werden. Die CAD-Software gibt häufig die technischen Parameter vor. So kann der Behandler beispielsweise nicht die erforderliche Rauigkeit und die Größentoleranzen der unterschiedlichen Prothesenbereiche angeben. Aufgrund des beschränkten Zugangs zur Software beziehungsweise den Geräteparametern kann das dentale CAD/CAM-Verfahren nicht immer die klinischen Erfordernisse (beispielsweise im Hinblick auf die genaue Passung der Restauration) oder die Bedürfnisse des Behandlers erfüllen.

Die in das CAM-Kettenglied integrierten Softwarealgorithmen sind vollautomatisch: Die Fräsparameter sind voreingestellt und gesperrt. Die Automatisierung der Frästrategie in dentalen CAM-Softwarelösungen kann auch ein Nachteil bei der Herstellung von gutem Zahnersatz sein. Aus dem Maschinenbau ist eigentlich gut bekannt, dass die Frästrategie einen direkten Einfluss auf die Oberflächenintegrität des Teils hat (insbesondere Rauigkeit, Eigenspannung und Risse)⁴¹⁻⁴⁴.

restorations. Dental CAD/CAM involves a complex digital data workflow, which consists of digital data exchange, conversion, and processing. These data are embedded in several types of digital models associated with computer files.

Interoperability between consecutive digital links is a key factor in a suitable digital workflow and can facilitate exchanges between practitioners and dental laboratories. When marketing CAD/CAM products, manufacturers refer to this fundamental data exchange property as the “openness”, “modularity”, and “flexibility” of their product. In commercialized dental CAD/CAM software solutions, interoperability is possible when standard or open file formats – such as the STL format – are used. With proprietary file formats, interoperability is possible by using the fully integrated dental CAD/CAM digital chain or by purchasing a computer module to convert the proprietary file format into an open file format. Therefore, the “openness” of dental CAD/CAM solutions is a relevant factor in the digital dentistry practice. This property facilitates exchanges between the practitioner and the dental laboratory (eg, of the digital master “cast” or the CAD restoration, which can be easily exchanged in a digital environment).

The current challenge in the development of dental CAD/CAM is to provide an “open”, “flexible”, “automated”, and “easy to use” digital process. CAD/CAM solutions should be “open” and “flexible” enough during data processing, such as restoration design, to better meet clinical requirements. They should also be “automated” and sufficiently “easy to use” during data processing to provide systems that do not require high CAD/CAM skills and do not substantially increase practitioners’ and technicians’ time when it comes to restorations.

Behandler und Zahntechniker sollten wissen, dass die aktuelle dentale CAD/CAM-Software, die Datenbanken, Restaurationsarten und Materialblöcke oder -rohlinge gesperrt sind. Die Auswahl an Biomaterialien oder an Restaurationsarten ist deshalb durch Wahl einer bestimmten CAD/CAM-Lösung eingeschränkt. Die Integration eines neuen Biomaterials oder einer neuen Restaurationsart kann die Definition eines neuen Fräsvorganges notwendig machen (neue Fräsergeometrie, neue Fräser-schneid- oder -schleifmaterialien, neue Frästrategie). Die Entwickler dentaler CAD/CAM-Systeme halten die Kenntnisse der Behandler oder Zahntechniker über den Fräsvorgang für zu schwach, um sie die Parameter selbst festlegen zu lassen. Deshalb kann die Integration einer neuen Restaurationsart oder eines neuen Biomaterials den Kauf zusätzlicher Module notwendig machen^{2-4,21}.

Wie Schleyer betonte, sollte die dentale CAD/CAM-Industrie „anwenderzentrierte Gestaltungsprinzipien übernehmen und die Konstrukteure sollten zusammenarbeiten, um Verbesserungen“ von Interoperabilität und Datenaustausch zu erreichen⁷; diese Prinzipien sollten auf die Datenverarbeitung ausgedehnt werden, damit die klinischen Empfehlungen und die Erfordernisse der Behandler besser in jedes digitale Kettenglied integriert werden können.

Schlussfolgerungen

Das dentale CAD/CAM ist eine digitale Kette aus vier aufeinanderfolgenden Gliedern – Aufnahmegerät(e), CAD-Software, CAM-Software und Fertigungsgerät(e) – zur digitalen Herstellung von Zahnersatz. Das dentale CAD/CAM stellt einen komplexen digitalen Daten-Workflow dar. Dieser digitale Workflow besteht aus dem Austausch, der Konvertierung und der Verarbeitung digitaler Daten. Diese sind eingebettet in unterschiedliche Arten von digitalen Modellen, die mit Computerdateien verknüpft sind.

Die Interoperabilität zwischen aufeinanderfolgenden Kettengliedern ist ein entscheidender Faktor in einem zweckmäßigen digitalen Workflow und kann den Austausch zwischen Behandler und Dentallabor erleichtern. Bei der Vermarktung von CAD/CAM-Produkten wird diese grundlegende Fähigkeit zum Datenaustausch als „Offenheit“, „Modularität“ oder „Flexibilität“ bezeichnet. Bei kommerziellen dentalen CAD/CAM-Softwarelösungen ist Interoperabilität möglich, wenn Standardbeziehungsweise offene Dateiformate wie das STL-Format eingesetzt werden. Bei proprietären Dateiformaten ist Interoperabilität möglich, indem die voll integrierte digitale Kette des dentalen CAD/CAM-Systems verwendet wird oder ein Computermodul hinzugekauft wird, welches das proprietäre Dateiformat in ein offenes Dateiformat konvertiert. Deshalb ist die „Offenheit“ von dentalen CAD/CAM-Lösungen ein relevanter Faktor für die Praxis der digitalen Zahnheilkunde. Diese Eigenschaft erleichtert den Austausch zwischen dem Behandler und dem Dentallabor, zum Beispiel beim digitalen „Meistermodell“ oder der CAD-Restoration, die in einer digitalen Umgebung einfach ausgetauscht werden können.

Die aktuelle Herausforderung bei der Entwicklung des dentalen CAD/CAM ist es, einen digitalen Prozess bereitzustellen, der sowohl „offen“ und „flexibel“ als auch „automatisiert“ und „einfach anzuwenden“ ist. CAD/CAM-Lösungen sollten bei der Datenverarbeitung, beispielsweise bei der Konstruktion der Restauration, „offen“ und „flexibel“ genug sein, um klinischen Erfordernissen besser gerecht zu werden. Sie sollten während der Datenverarbeitung aber auch „automatisiert“ und ausreichend „einfach anzuwenden“ sein, um Systeme bereitzustellen, die kein hohes Niveau an CAD/CAM-Spezialwissen erfordern, und die Zeit des Behandlers und Zahntechnikers für die Restauration nicht erheblich erhöhen.

References

1. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater* 2012;28:3–12.
2. Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki, Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater* 2009;28:44–56.
3. Fasbinder DJ. Computerized technology for restorative dentistry. *Am J Dent* 2013;26:115–120.
4. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J* 2008;204:505–511.
5. Groover M, Zimmers EW. CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing. Upper Saddle River: Pearson Education, 1983.
6. Xu X. Integrating advanced computer-aided design, manufacturing, and digital control: principles and implementations. Hershey: Information Science Reference, 2009.
7. Schleyer TK. Why integration is key for dental office technology. *J Am Dent Assoc* 2004;135(suppl):4S–9S.
8. Radhakrishnan P, Subramanyan S, Raju V. CAD/CAM/CIM, ed 2. New Delhi: New Age International, 2008.
9. Hollenbeck K, Allin T, van der Poel M. 3Shape Technology Research, Copenhagen. Technical report, Dental Lab 3D Scanners – How they work and what works best, 2012.
10. Henderson H. Encyclopedia of computer science and technology, revised ed. New York: Infobase Publishing, 2009.
11. Boryor A, Hohmann A, Geiger M, Wolfram U, Sander C, Sander FG. A downloadable meshed human canine tooth model with PDL and bone for finite element simulations. *Dent Mater* 2009;25:e57–62.
12. www.sirona.com/ecomaXL/files/inLabSW_Featureliste_EN.pdf&download=1
13. Szykman S, Fenves SJ, Keirouz W, Shooter SB. A foundation for interoperability in next-generation product development systems. *Comput Aided Des* 2011;33:545–559.
14. Lee RT, Shiou FJ. Multi-beam laser probe for measuring position and orientation of freeform surface. *Measurement* 2011;44:1–10.
15. Raja V, Fernandes KJ (eds). Reverse engineering: an industrial perspective. London: Springer-Verlag, 2008.
16. Ireland AJ, McNamara C, Clover MJ, et al. 3D surface imaging in dentistry – what we are looking at. *Br Dent J* 2008;205:387–392.
17. Orth U, Wedler V. Method for obtaining a position match of 3D data sets in a dental CAD/CAM system, 2009, US Patent No. 7,796,811. Washington DC: US Patent and Trademark Office.
18. Orth U, Wedler V. Dental CAD/CAM system for obtaining a position match of 3D data sets, 2012, US Patent No. 8,111,909. Washington DC: US Patent and Trademark Office.
19. Specification, StereoLithography Interface. 3D Systems Inc, October 1989.
20. Racasan R, Popescu D, Neamtu C, Dragomir M. Integrating the concept of reverse engineering in medical applications. In: Miclea L, Stoian I (eds). Proceedings of Automation Quality and Testing Robotics. IEEE International Conference, 2010:1–5.
21. Zheng SX, Li J, Sun QF. A novel 3D morphing approach for tooth occlusal surface reconstruction. *Comput Aided Des* 2011;43:293–302.
22. Steinbrecher T, Gerth M. Dental inlay and onlay construction by iterative Laplacian Surface Editing. *Computer Graphics Forum* 2008;27:1441–1447.
23. Solaberrieta E, Barrenetxea L, Bilbao E, et al. Collision free design of dental prosthesis. *Mechanisms and Machine Science* 2014;131–138.
24. Mehl A, Blanz V. New procedure for fully automatic occlusal surface reconstruction by means of a biogeneric tooth model. *Int J Comput Dent* 2005;8:13–25.
25. Mehl A, Blanz V, Hickel R. Biogeneric tooth: a new mathematical representation for tooth morphology in lower first molars. *Eur J Oral Sci* 2005;113:333–340.
26. Williams RJ, Bibb R, Eggbeer D, Collis J. Use of CAD/CAM technology to fabricate a removable partial denture framework. *J Prosthet Dent* 2006;96:96–99.
27. Song YL, Li J, Yin L, Huang T, Gao P. The feature-based posterior crown design in a dental CAD/CAM system. *Int J Adv Manuf Tech* 2007;31:1058–1065.
28. Zhao M, Ma L, Tan W, Nie D. Interactive tooth segmentation of dental models. In: Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE 2005:654–657.
29. Yau HT, Hsu CY, Peng HL, Pai CC. Computer-aided framework design for digital dentistry. *Comput-Aided Des and App* 2008;5:667–675.
30. Wolter FE, Reuter M, Peinecke N. Geometric Modeling for Engineering Applications. In: Encyclopedia of Computational Mechanics, 2007.
31. Piegl LA, Tiller W. The NURBS book. Springer, 1997.
32. Rogers DF. An introduction to NURBS: With Historical Perspective. Morgan Kaufmann, 2001.
33. ISO 10303-1:1994. Industrial automation systems and integration – product data representation and exchange, Part 1. Overview and fundamental principles.
34. ISO 10303-203:1994. Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange, Part 203. Application protocol: Configuration controlled 3D designs of mechanical parts and assemblies.
35. ISO 10303-214:1994. Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange, Part 214. Application protocol: Core data for automotive mechanical design processes.
36. Nagel RN, Braithwaite WW, Kennicott PR. Initial Graphics Exchange Specification IGES, Version 1.0, 1980, Washington DC: National Bureau of Standards, NBSIR 80–1978.

37. Verma AK, Rajotia S. A review of machining feature recognition methodologies. *Int J Comput Integ M* 2010;23:353–368.
38. Lasemi A, Xue D, Gu P. Recent development in CNC machining of free-form surfaces: A state-of-the-art review. *Comput-Aided Des* 2010;42:641–654.
39. Ross DT. Origins of the APT language for automatically programmed tools. In: Wexelblat R (ed). History of programming languages. New York: ACM, 1981:279–338.
40. ISO 6983-1:2009. Automation systems and integration – Digital control of machines – Program format and definition of address words, Part 1. Data format for positioning, line motion and contouring control systems.
41. ISO 841-1:2001. Industrial automation systems and integration – Digital control of machines – Coordinate system and motion nomenclature.
42. Jawahir IS, Brinksmeier E, M'Saoubi R, et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals: Manufacturing Technology* 2011;60:603–626.
43. Gintar TL, Hasan F, Ahmad ARM, Bambang A. Surface integrity and cutting temperature in machining of biomedical magnesium alloys – an overview. *Adv Mater Res* 2013;748:7–10.
44. Vázquez E, Gómez X, Ciurana J. An experimental analysis of process parameters to manufacture by milling micro-channels in biomaterials. *Int J Mechatron Manufac Sys* 2012;5:46–65.

Address/Adresse

Dr. Laurent Tapie

Faculty of Dental Surgery, Paris Descartes University, Sorbonne Paris Cité, Paris, France, E-Mail: laurent.tapie@univ-paris13.fr

Call for Donations

Dear colleagues and Cerec users

Following the intensive efforts of the Academy of Dentistry International (ADI) (www.adint.org) and the special commitment of colleagues Dr Tobias Bauer and Friedrich A. Herbst, member of the International Dental Manufacturers Association (IDM), the University of Technology, the Jamaica School of Oral Health Sciences (www.utech.edu.jm) has recently acquired a Cerec 2 system. With the generous support of Sirona, the device has been updated to the latest available versions of both software and hardware. This allows the students from the Jamaica School of Oral Dental Sciences the possibility of familiarizing themselves with dental CAD/CAM technology. There is still a considerable lack of knowledge and experience as regards the use of the Cerec CAD/CAM system. Therefore, in April 2015, the highly experienced Cerec user, Dr Dusko Gedosev, together with his wife Martina (DH), plan to inspire and educate students and professors alike in the use of the Cerec system to help them familiarize themselves with this technology. The following materials will be required for this project: blocks, screws, drills, discs, floppy disks, books, manuals, Cerec link, Cerec 3 software, as well as any materials or equipment that you think could be of use. The young, aspiring dentists from UTECH School of Oral Health Sciences, Jamaica, the Port au Prince Faculté d' Odontolog, Haiti, Pedro Henriquez Urena, Universidad Nacional, Dominican Republic, will benefit from this course on 13 April 2015, and would welcome and be most grateful for any type of support you can provide. A donation receipt can be issued for your generous support. Please contact:

Dr. Dusko Gedosev • Werderstr. 9 • 68165 Mannheim
Tel. +49 172 742 1677 • E-Mail: duki@dentalcadcam.de

Spendenauftrag

Liebe Kolleginnen und Kollegen, liebe Cerec-Nutzer, nach intensiven Bemühungen der Academy of Dentistry International A D I (www.adint.org) und dem besonderen Einsatz der Kollegen Dr. Tobias Bauer und Friedrich A. Herbst, Mitglieder der International Dental Manufacturers Association, hat die UTECH University of Technology, Jamaica School of Oral Health Sciences (www.utech.edu.jm) seit kurzer Zeit ein Cerec 2-Gerät. Mit großzügiger Unterstützung von Sirona wurde das Gerät auf den neuesten Stand gebracht. Damit können Studenten der Jamaica School of Oral Dental Sciences mit den Möglichkeiten der CAD/CAM-Technologie in der Zahnmedizin vertraut werden. Im Umgang und in der Anwendung von CAD/CAM und Cerec mangelt es noch an Wissen und Erfahrung. Als langjährig erfahrener Cerec-Anwender engagiert sich ebenfalls Dr. Dusko Gedosev gemeinsam mit seiner Frau Martina (ZMF) und wird im April 2015 vor Ort Studenten und Professoren mit den Methoden und Möglichkeiten von Cerec vertraut machen und ausbilden. Für das Vorhaben werden noch dringend benötigt: Blöcke, Schrauben, Bohrer, Discs, Disketten, Bücher, Gebrauchsanweisungen, Cerec-Links, Cerec 3-Software und Materialien, die (noch) in Ihren Schubladen liegen. Die jungen angehenden Zahnärztkollegen der UTECH School of Oral Health Sciences, Jamaica, der Port au Prince Faculté d'Odontologie, Haiti, Universidad Nacional Pedro Henriquez Urena, Dominikanische Republik, die an dem am 13. April 2015 beginnenden einwöchigen Kurs teilnehmen werden, sind für jede Form der Unterstützung mit den erforderlichen Materialien dankbar. Auf Wunsch kann eine Spendenquittung ausgestellt werden.



Laurent Tapie

L. Tapie^a, N. Lebon^b, B. Mawussi^c, H. Fron Chabouis^d, F. Duret^e, J-P. Attal^f

Comprendre la CFAO dentaire pour les restaurations - le workflow numérique du point de vue de l'ingénierie mécanique.

Résumé

À mesure que la technologie numérique s'infiltre dans tous les domaines de la vie quotidienne, y compris la médecine, elle est de plus en plus utilisée par les dentistes. Outre la pratique au fauteuil, des solutions de conception assistée par ordinateur et de fabrication assistée par ordinateur (CAO / FAO = CFAO) sont disponibles pour la création d'inlays, couronnes, prothèses partielles fixes (FPD), piliers d'implants et autres dentiers dentaires. Les solutions dentaires CFAO peuvent être considérées comme une chaîne d'appareils numériques et de logiciels pour la conception et la création quasi automatiques de restaurations dentaires. Cependant, les dentistes qui souhaitent utiliser la technologie n'ont souvent ni le temps ni les connaissances pour la comprendre. Une connaissance de base du workflow numérique de la CFAO pour la restauration dentaire peut aider les dentistes à comprendre la technologie et donc à acheter un système CFAO qui répond aux besoins de leur cabinet. Cet article propose une approche informatique et mécanique du workflow numérique de la CFAO pour aider les dentistes à comprendre la technologie.

Mots clefs : dentaire; CFAO dentaire; informatique dentaire ; dentisterie numérique ; workflow numérique ; gestion de la pratique

Introduction

Comme le disait Van Noort, l'avenir de la dentisterie est numérique¹. Au cours de la dernière décennie, la conception et la fabrication assistées par ordinateur (CAO / FAO) ont été largement développées en dentisterie. Les prothésistes dentaires sont donc de plus en plus informés au sujet de cette technologie². Grâce aux avancées technologiques, des solutions de CFAO au fauteuil pour les inlays, les couronnes, les prothèses partielles fixes (FPD) et les piliers d'implants ont été développées pour le cabinet du praticien³.

Trois types de procédures de production de restauration dentaire par CFAO sont disponibles:

- 1) Pour la CFAO au siège (directe), l'ensemble du processus numérique de CFAO - numérisation intra-orale, conception de la restauration et fraisage - est effectué dans le cabinet dentaire.
- 2) Pour la production CFAO indirecte, l'ensemble du processus numérique CFAO est sous-traité à un laboratoire et parfois à un centre de production. Le praticien envoie l'empreinte dentaire préparée au laboratoire où un maître-modèle est fabriqué pour une numérisation orale supplémentaire. La restauration est ensuite conçue en laboratoire, l'usinage étant également réalisé en laboratoire ou sous-traité à un centre de production.

3) Pour la production CFAO semi-directe, la numérisation intra-orale est effectuée dans le cabinet dentaire, après quoi des données numérisées sont envoyées à un laboratoire pour la conception et l'usinage. Les laboratoires peuvent externaliser l'usinage vers un centre de production⁴.

Dans ce contexte, dans le domaine dentaire, plusieurs solutions CFAO ont été commercialisées: caméra intra-orale, scanner extra-oral; Logiciel de CAO; caméra intraorale ou scanner extra-oral et logiciel associé; Machine-outil à commande numérique et logiciel associé; caméra intra-orale intégrée, logiciel CFAO et machine-outil à commande numérique; scanner extra-oral intégré, logiciel CFAO et machine-outil à commande numérique.

La technologie CFAO est commercialisée pour sa «facilité d'utilisation», son «automatisation», son «ouverture» et sa «modularité» des solutions dentaires. Bien que les entreprises aient créé des systèmes CFAO dentaires entièrement intégrés et automatisés, ce haut niveau d'intégration et d'automatisation peut être un inconvénient pour la pratique de la dentisterie numérique.

Malgré les attraits de la technologie CFAO pour le cabinet dentaire, le dentiste doit encore comprendre et évaluer la pertinence clinique de la technologie et du type de production choisi. Les praticiens et les techniciens dentaires doivent porter un regard critique sur les systèmes CFAO fournis, ainsi que sur les termes utilisés dans les brochures commerciales de ces systèmes CFAO. Les dentistes n'ont souvent ni les connaissances en informatique, ni le temps nécessaires pour suivre l'évolution constante de la technologie. Ainsi, les solutions dentaires CFAO sont produites sous la forme de chaînes «fermées, genre boîtes noires» d'appareils numériques et de logiciels pour la conception et la création quasi automatiques de restaurations.

Le but de cet article est de donner aux dentistes une meilleure compréhension des étapes de la chaîne CFAO utilisées dans la création de restaurations dentaires, du point de vue de l'informatique et de la mécanique. Les praticiens et les techniciens dentaires doivent considérer les systèmes CFAO comme une chaîne numérique composée de quatre liaisons consécutives traitant des données numériques intégrées dans des fichiers informatiques échangés : équipements d'acquisition, logiciels de CAO, logiciels de FAO et équipements de production. Cette chaîne est conceptualisée par le workflow numérique utilisé dans la CFAO dentaire. Chaque module de la chaîne est détaillé dans cet article afin d'expliquer ce qui est traité et échangé numériquement dans les solutions CFAO pour le secteur dentaire.

Définitions préliminaires et concepts

Certaines définitions et concepts doivent être expliqués avant de développer le workflow numérique de la CFAO dentaire.

La chaîne numérique CFAO dentaire

La CFAO dentaire fait partie de la science numérique, définie comme un ensemble de moyens numériques (appareils et logiciels) dédiés à la conception, à l'analyse, à la simulation et à l'optimisation des produits et de leur comportement tout au long du processus industriel⁵. Une chaîne numérique est un ensemble de moyens numériques consécutifs dédiés au traitement des données numériques et à leur conversion en produit via un processus industriel⁶. Dans le contexte de la dentisterie, la chaîne numérique de CFAO peut être définie comme suit: un ensemble de moyens numériques consécutifs (appareils et logiciels) destinés à aider les praticiens et les prothésistes dentaires à concevoir et à produire des prothèses dentaires. Chaque moyen numérique intégré dans une chaîne numérique peut être considéré comme un module de la chaîne.

Des modules 'ouverts'

En informatique, la propriété d'«ouverture» fait référence à l'accessibilité aux paramètres de traitement de données dans une chaîne numérique. Dans le contexte de la dentisterie numérique, l'ouverture d'une chaîne numérique peut être définie comme suit: niveau d'utilisateur (praticien ou prothésiste dentaire) pour modifier ou ajuster les paramètres de traitement des données afin de concevoir et de produire des prothèses dentaires.

Classiquement, dans la CFAO dentaire, peu de paramètres des dispositifs ou logiciels sont accessibles à l'utilisateur,

de sorte que le processus de CFAO dentaire est aussi automatisé et facile à utiliser que possible²⁻⁵.

Comme les dentistes manquent généralement de connaissances en ingénierie numérique, les développeurs, les ingénieurs et les programmeurs de CFAO ont développé des solutions CFAO dentaires entièrement intégrées et automatisées⁷.

Workflow numérique

Les modules numériques impliquent le traitement et la conversion des données associées au futur produit. Les données traitées et converties sont échangées entre des modules de chaîne numériques consécutifs. Ces étapes et échanges informatiques constituent le cœur du workflow numérique⁸. Dans le contexte de la dentisterie, le workflow numérique CFAO peut être défini comme suit : le workflow numérique commence par la capture numérique de la dent préparée, se poursuit par le traitement numérique via des modules de chaîne numériques consécutifs et se termine par la production de la prothèse.

Le workflow numérique se poursuit avec des données incorporées dans des fichiers informatiques. Dans la CFAO dentaire, différents types de données sont utilisés dans le workflow numérique: données numériques, analogiques, physiques et virtuelles⁹. Selon l'informatique, les *données numériques* peuvent être définies comme suit : données mesurant ou représentant une ou plusieurs propriétés physiques qui peut prendre n'importe quelle valeur sur une échelle échantillonnée ou discrète. Les *données analogiques* mesurent ou représentent une ou plusieurs propriétés physiques pouvant prendre n'importe quelle valeur sur une échelle continue. Les données virtuelles sont définies comme des données utilisées dans un environnement numérique ou informatique par opposition à un environnement physique¹⁰. La [figure 1](#) présente trois représentations d'une dent avec des données numériques (un nuage de points) et illustre trois types différents de données virtuelles.

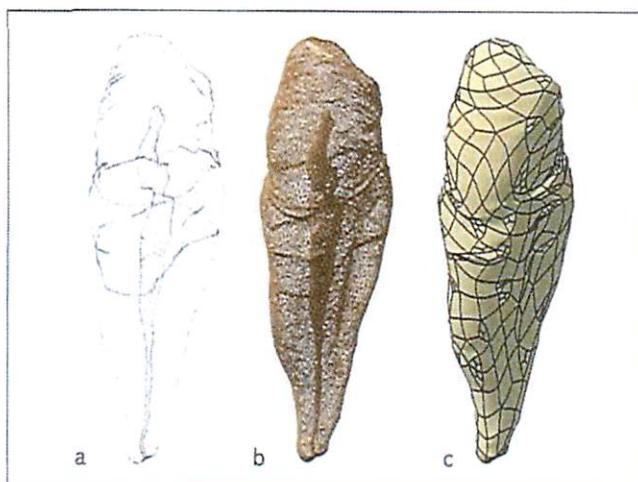


Fig. 1 Trois types de représentation de données numériques: a) les données de nuages de points; b) données de représentation de surface (modèle STL CAD); c) Données de représentation de la surface (modèle CAO NURBS [Non-Uniform Rational Basis Spline]). Nuage de points de Boryor et al¹¹; Modèles CAO obtenus avec Catia (Dassault Systèmes).

Un fichier informatique contient des données numériques virtuelles regroupées sous le même nom. Un fichier informatique est caractérisé par trois propriétés¹⁰:

1. Sa *nature* fait référence à un modèle numérique associé, représenté par des fonctions mathématiques.
2. Son *format* fait référence à l'organisation des données. Les normes et accords internationaux ont défini des organisations spécifiques pour certains formats, mais les entreprises peuvent également définir les leurs.
3. Son *extension de nom de fichier* est un suffixe attaché au nom de fichier qui indique le format de fichier.

Les trois modèles de CAO numériques illustrés à la [figure 1](#) pourraient être intégrés à des fichiers informatiques de CFAO dentaires.

L'interopérabilité

En fonction de l'ouverture des données, les solutions de CFAO peuvent être considérées comme « faciles à utiliser ». En effet, plus la solution CFAO est compatible ou interopérable, plus l'échange de données avec d'autres appareils numériques ou solutions de CFAO est facile.

Comme le souligne Schleyer, l'interopérabilité est un facteur clé pour un cabinet dentaire efficace⁷.

La compatibilité est définie comme la capacité de deux systèmes numériques donnés à échanger des données sans altération des informations numériques. La compatibilité est possible lorsque deux appareils numériques peuvent être intégrés dans le même workflow de données⁷. Par exemple, la solution Sirona-Cerec est compatible avec d'autres solutions: [Sic] Importation de données de numérisation 3Shape extra-orales dans le logiciel inLab .. Exporter des données de numérisation inEos Blue et des données d'empreinte numériques (Sirona Connect) au format 3Shape ... [Sic]¹²

La compatibilité est possible lorsqu'un format de fichier informatique peut être importé ou exporté dans deux systèmes numériques différents. Deux types de formats de fichiers peuvent être échangés :

- Un *fichier informel standard ou ouvert* fait partie du domaine public et ne présente aucune restriction d'accès ou de processus.
- Un *format de fichier informatique fermé ou propriétaire* fait partie du domaine privé et présente généralement des restrictions d'accès ou de processus.

Par exemple, dans la CFAO dentaire, les formats de fichier tels que Sirona .cdt et .lab ou 3Shape .dcm sont des formats de fichier propriétaires, tandis que le format de fichier .stl utilisé dans plusieurs solutions de CFAO dentaires est un format de fichier ouvert. Les formats de fichier propriétaires sont souvent cryptés pour garantir que les données du fichier de l'ordinateur ne peuvent pas être lues et interprétées par des systèmes non compatibles.

Par conséquent, l'utilisation de formats de fichier ouverts, tels que .stl, offre un niveau d'ouverture plus élevé, appelé *interopérabilité* en informatique, et peut être défini comme la capacité de compatibilité de deux systèmes quelconques¹³.

Certaines entreprises vendent un module logiciel pour exporter ou importer un format de fichier propriétaire vers un format de fichier ouvert. Par exemple, Sirona, un fournisseur de premier plan de solutions complètes de CFAO intégrées, propose à la vente: [Sic] des interfaces ouvertes étendues du logiciel inLab 4.0 qui offrent une flexibilité supplémentaire lors de l'exportation des données de conception de modèle InLab au format [un] format STL ouvert [Sic] .¹²

Parfois, la « *modularité* » est utilisée sur le marché des systèmes CFAO. La modularité peut faire référence à la possibilité d'échanger un module numérique. Ainsi, une solution est modulaire si les modules numériques sont compatibles ou interopérables et peuvent être échangés avec une solution équivalente. Par exemple, les solutions intuitives Lyra Digital (GACD, Paris, France) peuvent être considérées comme modulaires en raison de la compatibilité du logiciel de CAO Lyra avec le scanner 3M ESPE True Definition et la caméra 3Shape TRIOS.

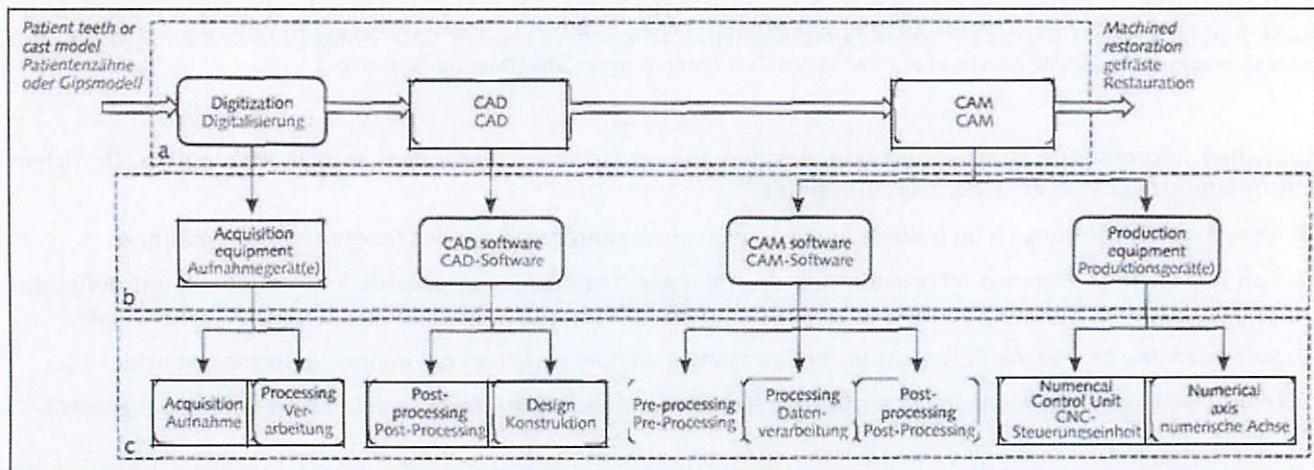


Fig.2 Structure de la chaîne numérique: a) Approche dentaire, b) Approche de la chaîne numérique; c) approche du workflow.

Structure de la chaîne numérique CFAO dentaire

Ce qui suit est une présentation des deux structures classiques de la chaîne numérique. Le premier est basé sur les packages commerciaux fournis par les sociétés de CFAO; le second est basé sur les quatre modules de chaîne fondamentaux composant les solutions de CFAO dentaire: l'équipement d'acquisition, le logiciel de CAO, le logiciel de FAO et l'équipement de production.

Approche dentaire

La structure classique de la chaîne numérique CFAO est adoptée en dentisterie et les packages de CFAO commerciaux sont divisés en trois modules principaux: la numérisation, la CAO et la FAO (Fig. 2a).¹⁻⁴

Le dispositif d'acquisition et le logiciel de CAO peuvent être proposés en tant que solution intégrée ou séparément, alors que le logiciel de FAO et la machine-outil à commande numérique (CN) sont souvent proposés en tant que package intégré. Le Tableau 1 présente quelques exemples de divers systèmes de CFAO intégrés disponibles sur le marché.

Pour la production dentaire directe (au fauteuil) ou indirecte par la CFAO, un ensemble de chaîne numérique entièrement intégré peut être proposé. Le produit comprend le dispositif de numérisation, le logiciel de CAO, le logiciel de FAO et la machine-outil à commande numérique. Certains packages commerciaux entièrement intégrés comprennent un logiciel de CFAO unique, comprenant des modules intégrés de conception-restauration CAO et le module de fraisage-restauration FAO. Ce type de logiciel de CFAO intégré peut être déroutant pour le dentiste. En effet, certains dentistes estiment qu'un système logiciel intégré de CFAO traite à la fois les tâches de conception de la restauration et les tâches de préparation du fraisage. En ingénierie, les tâches de conception de restauration sont considérées comme des tâches de CAO et le logiciel de CAO est développé uniquement pour la conception, tandis que les tâches de préparation d'usinage sont considérées comme des tâches FAO et le logiciel de FAO n'est développé que pour le fraisage.

Type de module de la chaîne	Composant(s) du module de la chaîne	Société: produit
Numérisation - CAO	Caméra intra-orale et logiciel de CAO associé	3M ESPE : True Definition Scanner
	Caméra extra-orale et logiciel de CAO associé	3M ESPE : Lava Scan ST
Numérisation	Caméra extra-orale	Imetric : IScan D104i
CFAO	Logiciel de restauration CAO	3M ESPE : Lava Design 7
FAO Package Machine-outil à commande numérique	Machine-outil CN et logiciel de FAO associé	Planmeca: PlanMill 50
Package entièrement intégré	Caméra intra-orale intégrée, logiciel de CFAO et machine-outil CN	Sirona : Cerec
Package entièrement intégré	Scanner extra-oral intégré, logiciel de CFAO et machine-outil CN	KaVo : Everest

Tableau 1 - Solutions commerciales pour la CFAO dentaire

Approche de la chaîne numérique

La [Figure 2b](#) illustre une approche CFAO par liaison numérique. Cette approche est proposée pour détailler les moyens numériques consécutifs (équipements et logiciels) intégrés dans les solutions de CFAO dentaire pour les restaurations.

Équipement d'acquisition

Le module d'acquisition en CFAO dentaire est composé d'un dispositif de numérisation associé à des algorithmes logiciels de traitement de données. Plusieurs solutions techniques sont proposées (caméra, scanner, appareil de mesure de coordonnées) utilisant différents principes d'acquisition de tissu, intra ou extra-oraux¹⁻⁴ (avec sonde de contact/sans contact). Les dispositifs sans contact sont les plus largement disponibles. Lee et al ont proposé une classification des numériseurs sans contact, tels que¹⁴ :

- de type point, une triangulation laser ponctuelle avec capteur CCD.
- de type ligne, une diode laser en ligne avec deux capteurs CCD.
- de type zone, un projecteur de lumière structuré avec capteur CCD.

Le niveau d'ouverture du module d'acquisition peut être considéré comme faible ou nul. Les dentistes ou les prothésistes ne peuvent pas modifier ou ajuster les paramètres de traitement des données intégrés aux scanners ou aux caméras. Pour les scanners intra-oraux, les stratégies de numérisation et le traitement des données sont entièrement automatisés. Pour les caméras extra-orales, les stratégies de numérisation sont traitées manuellement et le traitement des données numérisées est automatisé.

Logiciel de CAO

Le module CAO en CFAO dentaire comprend des modules logiciels de CAO dédiés à la création d'une restauration virtuelle sur une empreinte de dent ou d'implant numérique. La conception de la restauration est traitée avec une base de données de restauration prédéfinie et des modules logiciels dédiés à la conception (simulation de contacts adjacents et antagonistes; simulation d'occlusion, définitions d'espaces marginaux, occlusaux et axiaux, tracé limite cervicale, etc.).

Le niveau d'ouverture des algorithmes logiciels hautement automatisés dans le module CAO peut être considéré comme faible en termes de traitement de données. Dans plusieurs solutions logicielles de CAO, certains paramètres de conception sont prédéfinis pour proposer une conception de restauration. Peu de paramètres de ce type peuvent être modifiés et optimisés manuellement par les dentistes ou les prothésistes. De plus, les bases de données de restauration associées au logiciel de CAO sont souvent verrouillées (les types de restauration pouvant être conçus sont limités).

Logiciel de FAO

Le module FAO en CFAO dentaire comprend des modules logiciels FAO dédiés à la création d'un processus d'usinage virtuel pour une restauration. Le processus d'usinage de restauration implique une base de données de processus d'usinage prédéfinie et des modules logiciels dédiés à la création de processus d'usinage.

Les algorithmes logiciels du module CAO sont automatiquement traités. Par conséquent, l'ouverture de ce module FAO est nulle: les paramètres de processus d'usinage du logiciel FAO sont prédéfinis et verrouillés. Par conséquent, le processus d'usinage est verrouillé en CFAO.

Comme mentionné précédemment, les deux types de logiciels (CAO et FAO) peuvent être intégrés dans un logiciel de CFAO totalement intégré ou séparés dans plusieurs solutions logicielles interopérables.

Équipement de production

Le module équipement de production en CFAO dentaire est composé d'une machine-outil CN dédiée à la réalisation d'une restauration. Plusieurs solutions techniques de machines-outils peuvent être classées en trois types principaux.¹⁻²

1. Le type machine-outil de cabinet dentaire, souvent utilisé pour usiner des matériaux dentaires mous avec une seule fraise abrasive ou tranchante (Lyra, GACD, Paris, France).
2. Le type machine-outil de laboratoire dentaire, utilisé pour usiner plus de matériaux dentaires que le type précédent. Pour ce type, plusieurs fraises abrasives ou de coupe sont utilisées avec des stratégies d'usinage plus avancées (DWX-50, Roland, Hamamatsu, Japon).
3. Le type de machine-outil de centre de production, utilisé pour usiner tous les matériaux dentaires (y compris la zircone densément frittée). Ce type a une structure mécanique plus rigide et des broches plus rapides et plus puissantes que les deux autres types et est utilisé avec plusieurs outils abrasifs ou de coupe et des stratégies d'usinage avancées (Série Dental Ultrasonic 20, Deckel Maho Gildemeister Mori Seiki, Leonberg, Allemagne).

Les configurations de machines-outils CN utilisées dans les cabinets dentaires ou les laboratoires sont verrouillées. Par conséquent, le niveau d'ouverture du module de production est nul.

Selon cette approche, les solutions de CFAO dentaire pour restaurations sont toujours composées de quatre modules fondamentaux: équipement d'acquisition, logiciel de CAO, logiciel de FAO et équipement de production. Le niveau d'ouverture peut être considéré comme quasi nul, car seuls quelques paramètres peuvent être modifiés ou ajustés dans les solutions logicielles de CAO.

Le workflow numérique CFAO dentaire

Ce qui suit est une présentation de l'approche du workflow numérique illustrée à la [Figure 2c](#) pour définir les étapes de traitement et d'échange de données impliquées dans chaque module de chaîne numérique de la chaîne numérique CFAO dentaire.

Numérisation

Les tâches de numérisation de la CFAO dentaire peuvent être considérées comme une variante de l'ingénierie inverse industrielle. Comme défini par Raja et al. [Sic], *le processus de duplication d'une pièce, d'un sous-assemblage ou d'un produit existant sans dessins, une documentation ou un modèle informatique est appelé ingénierie inversée. L'ingénierie inversée est également définie comme le processus d'obtention d'un modèle CAO géométrique à partir de points 3D acquis par numérisation / numérisation de pièces / produits existants [Sic].*¹⁵

La numérisation peut être divisée en deux tâches de traitement de données: l'acquisition de données et le traitement de données ([Figures 2b et 2c](#)).

Flux d'acquisition

Le but de l'acquisition est de convertir un signal analogique en données numériques ([Fig. 3](#)). Les dents et les tissus ou les plâtres du patient sont l'entrée de l'acquisition. Ces données constituent une surface géométrique continue physique. Ensuite, un dispositif de numérisation (scanner ou appareil photo) convertit ces données analogiques en données numériques par le biais du traitement d'image⁹. Les données converties constituent un nuage de points qui est stocké dans un fichier. Les données de sortie numériques de l'acquisition sont des données géométriques discrètes virtuelles représentant les dents et les tissus du patient avec plusieurs nuages de points.¹⁶

Le format de fichier associé est très souvent fermé/propriétaire (par exemple, l'extension .pts du format de fichier International Journal of Computerized Dentistry 2015; 18(1): 21-44

de 3Shape Dental System). Néanmoins, le format de fichier consiste en une liste de nuages de points et chaque nuage de points peut être représenté par une liste des coordonnées spatiales de tous les points dans le nuage.

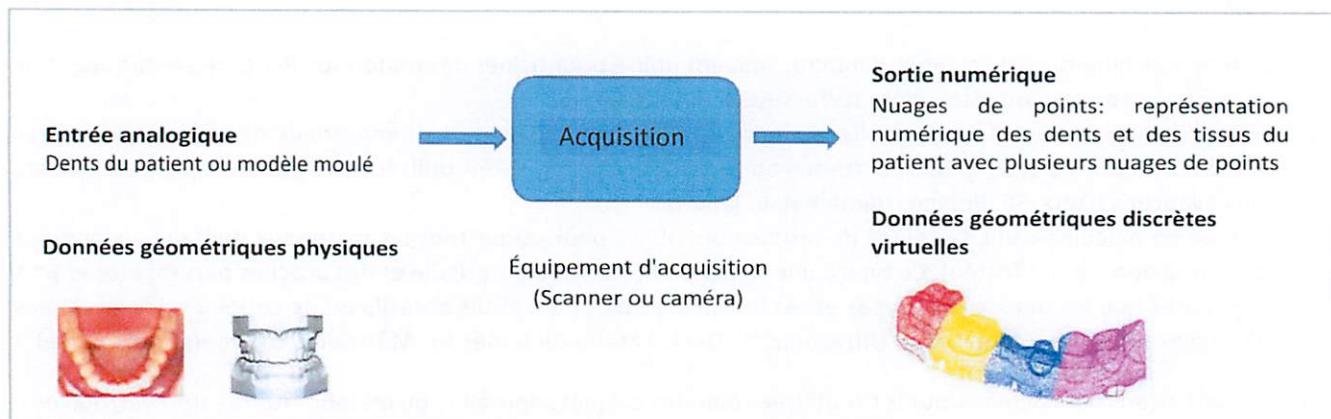


Fig.3 Numérisation: workflow d'acquisition

Processus de traitement

Le but de la phase de traitement des données est de nettoyer et de filtrer les données numériques obtenues après acquisition (Fig. 4). En fait, les nuages de points contiennent généralement des points aberrants en raison de l'environnement externe, ainsi qu'une densité de points excessive dans certaines zones. Une densité de points excessive peut résulter de l'étape d'échantillonnage associée à l'utilisation du dispositif de numérisation ou de l'acquisition multiple d'une même zone lors de la numérisation. Des algorithmes logiciels sont utilisés à cette étape pour traiter le nuage de points. Les algorithmes de filtrage, d'alignement et de fusion sont généralement utilisés pour obtenir une représentation numérique des dents et des tissus du patient avec un nuage de points optimisé^{9, 17, 18}.

Après le traitement des données, un fichier contenant une liste des coordonnées spatiales des points est obtenu. Les formats de fichier associés sont ouverts ou propriétaires (par exemple, l'extension de format du fichier .pts de 3Shape Dental System).

Les formats ouverts sont organisés en une liste à trois colonnes des coordonnées des points avec un caractère séparateur (espace, tabulation ou point-virgule). Les extensions habituellement associées sont .txt (codage au format de fichier texte binaire) ou .asc (codage au format de fichier texte ASCII). Ce sont des formats non chiffrés qui sont couramment traités en génie informatique.

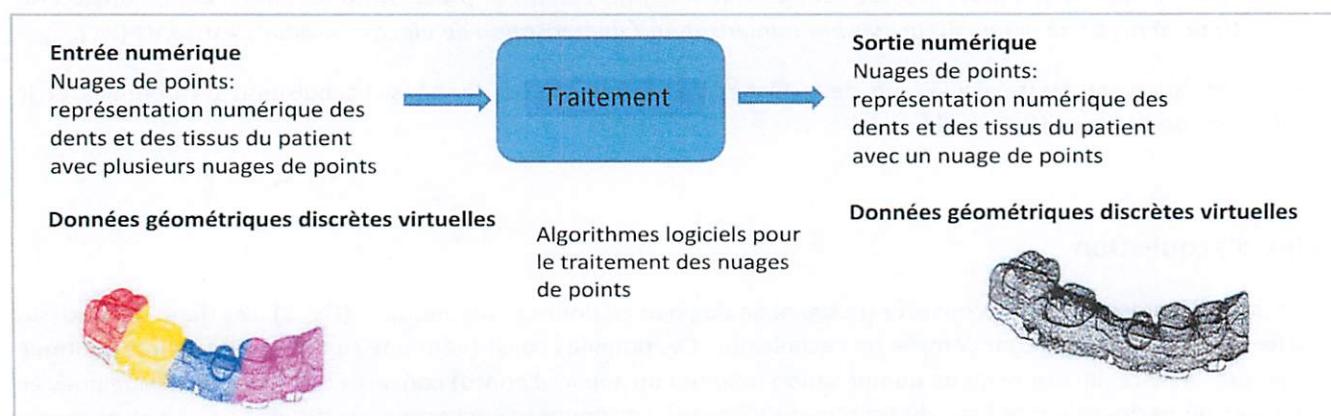


Fig.4 Numérisation: workflow du traitement des données

Conception assistée par ordinateur (CAO)

Une fois que les données numérisées ont été traitées, la CAO commence par deux tâches de traitement de données : post-traitement et conception (Figures 2b et 2c).

Processus de post-traitement

L'objectif du post-traitement est de convertir les données géométriques numériques résultant de la numérisation en une représentation virtuelle des données géométriques numériques (Fig. 5). Le résultat de cette étape est le "moule en plâtre" maître virtuel sur lequel la restauration sera conçue.

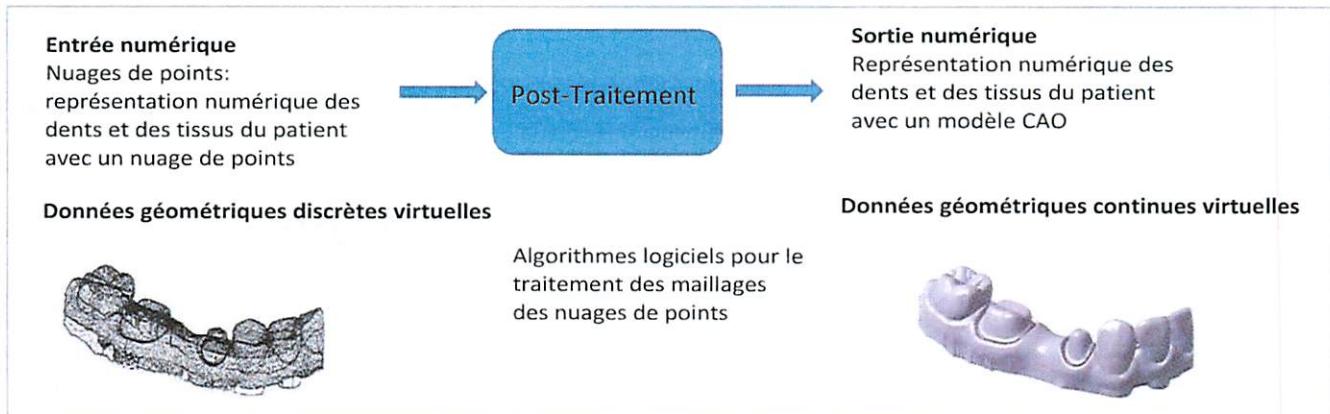
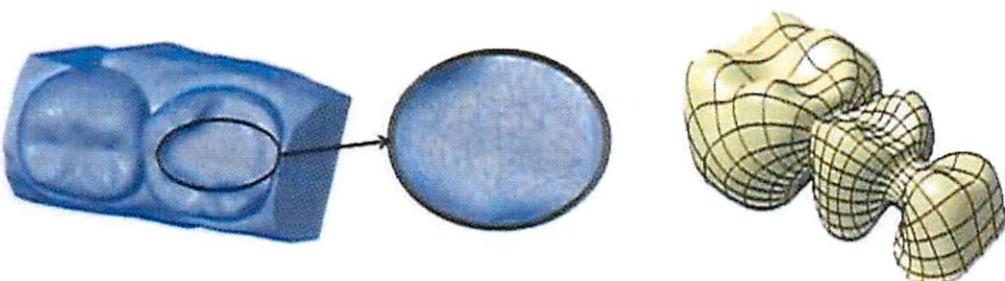


Fig.5 CAO : workflow du post-traitement des données

Cette conversion est effectuée en associant un modèle géométrique continu numérique au nuage de points. Le modèle géométrique le plus fréquemment utilisé en CAO dentaire est le modèle STÉréolithographie, également appelé langage de tessellation standard (STL). C'est un modèle polygonal structuré par un ensemble de facettes planes triangulaires continuellement reliées les unes aux autres (Fig. 6a). Deux types de formats de fichier standard peuvent être utilisés pour encoder les données: le format STL binaire et le format STL ASCII.¹⁹ Pour ces deux formats, le fichier informatique est organisé en une liste ordonnée de facettes, chaque facette étant représentée par ses trois sommets et sa normale. L'extension de nom de fichier associée à ce format standard est .stl. Le modèle au format STL peut être intégré à des fichiers informatiques cryptés propriétaires. Par exemple, le format Sirona Cerec InLab (extension .lab, .cdt ou premier) ou le format 3Shape Dental System (extension .dcm) peut être converti au format STL en achetant un module commercial spécifique. En raison de l'utilisation courante du modèle STL, les algorithmes de maillage des nuages de points constituent le cœur de l'étape de post-traitement.²⁰



a. Modèles STL : un ensemble de facettes triangulaires

b. Modèle NURBS : un ensemble de patchs de surface

Fig.6 CAO: représentation du «moulage plâtre» maître et de la restauration.

a. Crédit du «moulage» numérique d'une cavité avec un modèle STL;

b. Conception numérique d'un bridge avec un modèle NURBS.

Données de 3Shape; modèles CAO obtenus avec Catia (Dassault Systèmes).

Workflow de conception

L'objectif de la phase de conception est de créer une restauration CAO associée au «moulage» numérique obtenu après post-traitement (Fig. 7). Le positionnement, la mise à l'échelle et le morphing des modèles CAO paramétrés sont utilisés pour concevoir la restauration²¹. Morphing et les algorithmes d'alignement adaptent un modèle de restauration géométrique continue numérique au «casting» maître du TSL du patient.²²⁻²³ Des processus basés sur la connaissance automatiques utilisant des modèles de CAO paramétrés tels que le modèle biogénérique peuvent être utilisés pour créer des restaurations de CAO.²⁴⁻²⁵

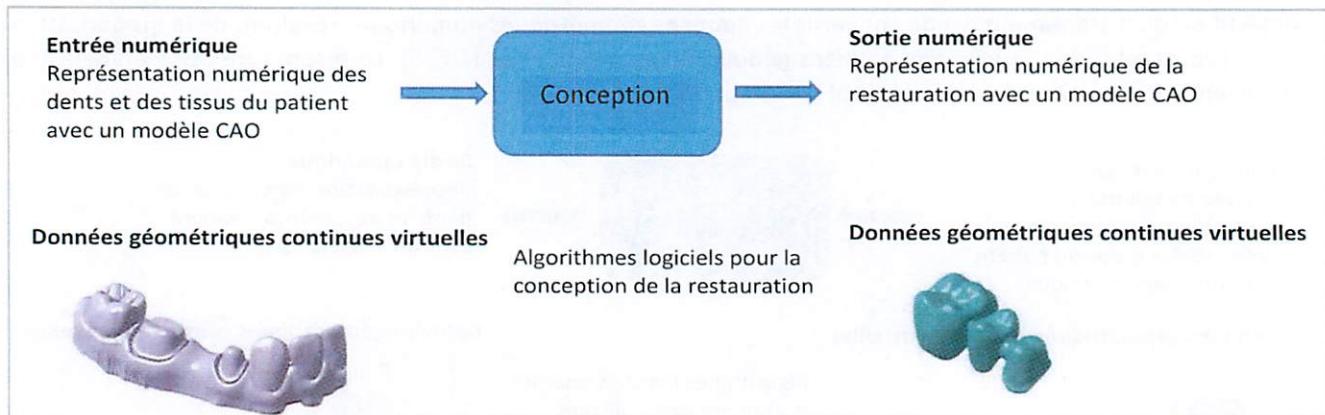


Fig.7 CAO : workflow de conception

Plusieurs types de modèles de CAO peuvent être utilisés en CFAO dentaire : STL, mesh hiérarchique, B-Spline, Hermite, NURBS.²⁶⁻³⁰ Le modèle STL est identique à celui utilisé avec le post-traitement (facettes triangulaires). Le modèle STL peut être intégré à des fichiers propriétaires ou cryptés, comme indiqué précédemment. Le modèle NURBS est structuré selon des modèles mathématiques représentant des courbes et des surfaces.³⁰⁻³¹ Ces modèles correspondent à une fonction de base pondérée en polynômes qui représente un patch de surface. L'union de plusieurs taches superficielles avec une continuité de courbure donne une représentation complète de la restauration CAO (Figure 6b). En raison de sa flexibilité, le modèle NURBS est utilisé pour concevoir des formes complexes car il est facile à manipuler pour des opérations géométriques telles que la mise à l'échelle, le positionnement et le morphing. Deux formats de fichiers informatiques standards intègrent le modèle NURBS : le format STEP (Standard for the Exchange of Product model data) (extension .stp ou .Step) et le format IGES (Initial Graphic Exchange Specification) (extension .igs ou .iges).³²⁻³⁵ Ces fichiers organisés décrivent des surfaces et des courbes en fonction du degré de leur fonction de base polynomiale, d'une séquence de points de contrôle et d'une séquence de nœuds. Les points de contrôle déterminent la forme de la surface, tandis que la séquence du vecteur de nœud détermine la localisation et l'influence des points de contrôle sur la surface. Ensuite, le fichier de la restauration conçue est transféré d'un logiciel de CAO à un logiciel de FAO pour préparer sa production.

Fabrication assistée par ordinateur (FAO)

Le logiciel FAO est composé de trois tâches informatiques menant au programme CN (Commandes Numériques).

Workflow de pré-traitement

La phase de pré-traitement vise à associer le modèle CAO de la restauration aux données techniques liées à son processus d'usinage (figure 8). En dentisterie numérique, après les tâches de conception, seules les exigences géométriques de la restauration ont été définies. Le pré-traitement permet de choisir ou de définir les spécifications du bloc ou du flan (géométrie, type de matériau prothétique) et les spécifications de la fraise (géométrie, matériau, vitesse de coupe ou d'abrasion, vitesse du déplacement de coupe ou d'abrasion).³⁶

L'organisation des données obtenue après le pré-traitement est spécifique au logiciel de FAO. Ainsi, aucun fichier informatique ne peut être consulté après le pré-traitement. Chaque solution logicielle de FAO peut avoir sa propre organisation de données de prétraitemt. En raison de l'association des données techniques avec le modèle CAO de restauration, le processeur géométrique peut calculer la géométrie de la trajectoire de l'outil.

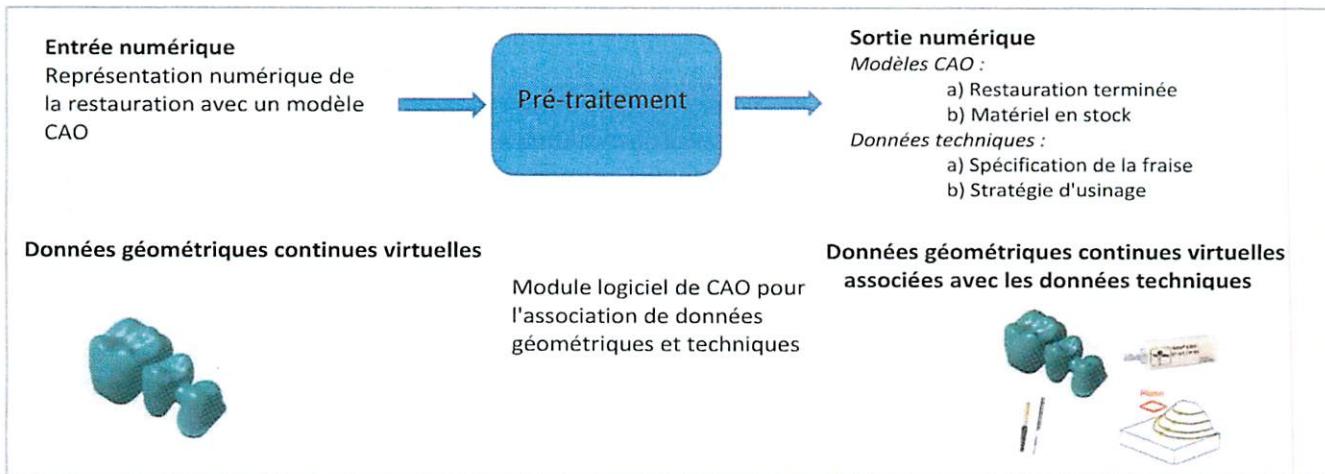


Fig. 8 CAO : workflow de pré-traitement

Workflow de traitement

L'étape de traitement vise à générer le processus d'usinage en fonction des données de pré-traitement (figure 9). Le processus d'usinage est composé de plusieurs séquences d'usinage. Une séquence d'usinage est un groupe de chemins d'outil d'usinage calculés, qui sont calculés automatiquement avec des algorithmes de stratégie d'usinage spécifiques³⁷. Le modèle FAO obtenu à la fin de cette étape de traitement est une liste de courbes 2D ou 3D séquencées. Chaque séquence de courbes est associée à un comportement cinématique de la fraise représenté par sa vitesse de coupe ou d'abrasif (vitesse de rotation de la fraise) et son taux d'avance (vitesse relative de la fraise le long de la pièce). Les fournisseurs de logiciels de FAO ont développé plusieurs formats de fichiers propriétaires pour les modèles de FAO. Néanmoins, certains formats de fichier non chiffrés incluent le type de fichier Cutter Location (fichier CL). Un tel fichier peut être lu et traité avec un module spécifique. Par exemple, le format Outil automatiquement programmé (format APT, extension .apt) est un type de fichier CL actuellement utilisé dans le logiciel de FAO.³⁸

Les fichiers CL non chiffrés, tels que les fichiers APT, ne peuvent pas être interprétés directement par l'unité de commande numérique (NCU) de la machine-outil et doivent être convertis lors du post-traitement.

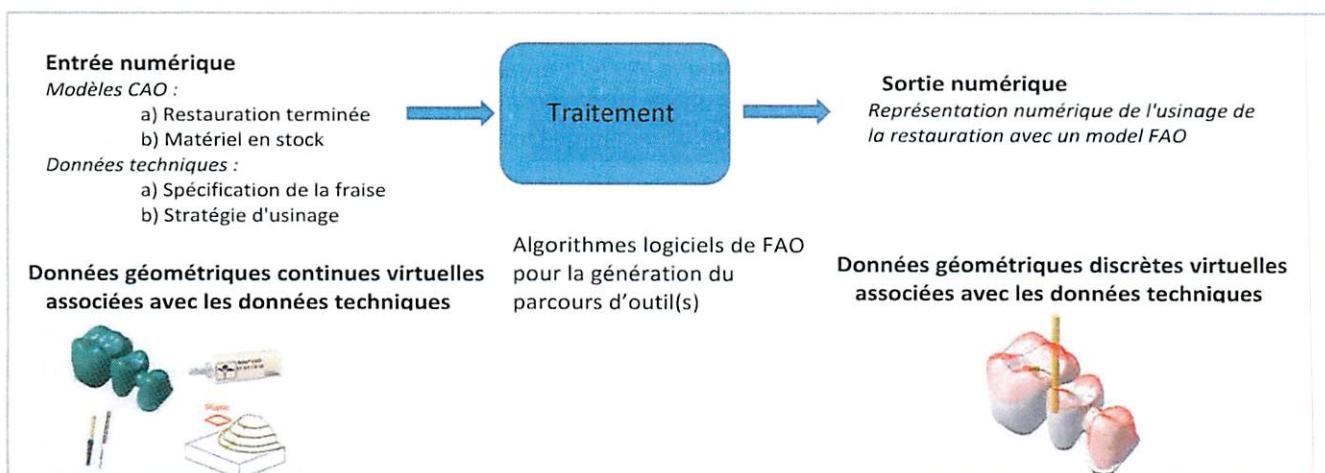


Fig. 9 FAO : workflow de traitement

Workflow de post-traitement

La tâche de post-traitement vise à générer un programme pouvant être interprété par une UCN (figure 10). Du fait que les fichiers CL usuels ne peuvent pas être interprétés par une NCU, un format standard ISO de programmation CN appelé code G a été développé.³⁹ Le post-traitement peut être considéré comme la conversion d'un fichier CL en un fichier de code G. Un fichier de code G consiste en un groupe de structures décrivant les parcours d'outil élémentaires (parcours linéaire entre plusieurs points avec une vitesse d'avance donnée) et d'autres instructions (vitesse de coupe de la broche, changement de fraise, début/fin du réfrigérant). Ces instructions sont contenues dans un fichier texte binaire ou un fichier texte ASCII avec des extensions associées telles que .txt, .ncprog, .iso ou .mpf. Ces fichiers sont des fichiers ouverts (c'est-à-dire des fichiers non cryptés) qui sont générés automatiquement par un convertisseur de format de fichier, généralement appelé post-processeur. Un tel fichier constitue le programme CN. En dentisterie numérique, les fichiers traités et post-traités sont générés automatiquement.

Une fois le programme CN généré, le fichier de programme CN est transféré à la NCU de la machine-outil pour mettre en œuvre le processus d'usinage de la restauration.

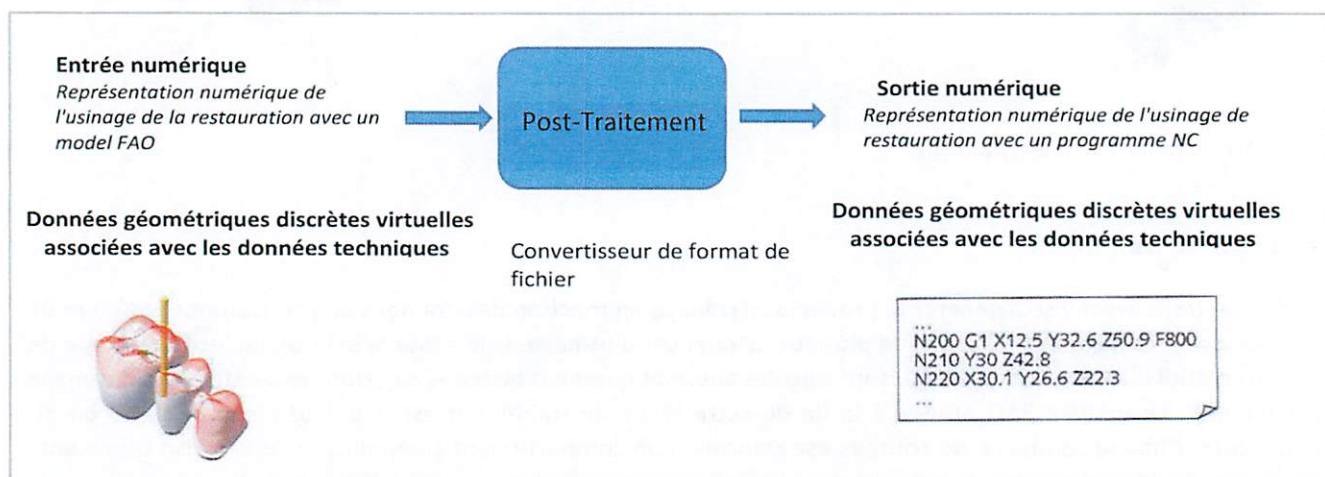


Fig. 10 FAO : workflow de Post-traitement

Flux de travail NCU et axe numérique

Pour usiner la restauration, le programme CN est transmis à la NCU (Fig. 11). La NCU génère la commande d'axe cinématique: trajectoire, vitesse et accélération de chaque axe numérique en fonction des points de consigne (SP) fixés dans le programme CN. Ensuite, les commandes d'axes sont transmises aux moteurs d'axes, mettant ainsi en œuvre le parcours relatif entre l'outil et le bloc ou l'ébauche afin de l'usiner conformément au parcours d'outil du programme-CN.

Conformément à la norme ISO 841,⁴⁰ deux types d'axes numériques peuvent être utilisés dans une machine-outil à commande numérique. Le premier type est un axe numérique à commande en boucle ouverte, défini comme suit: mouvement d'axe dans lequel un ensemble infini de positions peut être atteint en fonction de la résolution de positionnement. Le deuxième type est un axe numérique à commande en boucle fermée, défini comme suit : mouvement des axes dans lequel la position et la vitesse sont asservies (servo-commandées) (principe illustré à la Fig. 11). Pour ce dernier type d'axe numérique, un capteur et un émetteur mesurent le parcours et la vitesse de l'axe, de sorte que l'axe possède une boucle de réaction. Les données mesurées obtenues par le capteur sont comparées aux SP définies dans le programme CN pour calculer l'erreur d'interpolateur. Cette erreur est transmise en permanence à la NCU pour générer une correction de commande d'axe cinématique et réduire les erreurs de trajectoire et de vitesse.

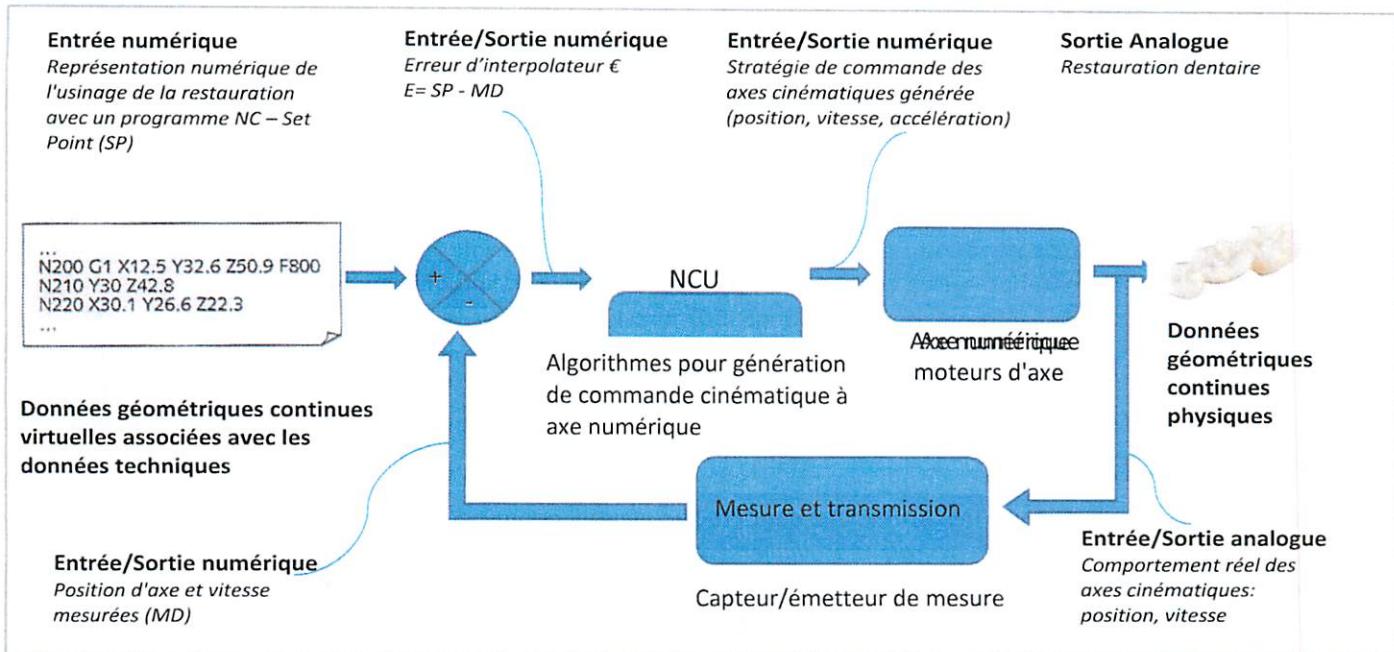


Fig. 11 FAO : Unité de commande numérique (NCU) workflow des axes numériques

Discussion

Les praticiens et les prothésistes doivent considérer les systèmes de CFAO comme une chaîne numérique composée de quatre modules consécutifs : un équipement d'acquisition, un logiciel de CAO, un logiciel de FAO et un équipement de production. En raison du workflow numérique spécifique à la dentisterie numérique, le praticien peut être dérouté par la distinction entre les modules logiciels de CAO dédiés à la conception de tâches et les modules de logiciels de FAO dédiés aux tâches de préparation d'usinage. Cette confusion peut être exacerbée par le fait que les solutions logicielles CFAO pour les soins dentaires sont souvent fournies sous la forme d'un progiciel intégré dans une chaîne numérique entièrement intégrée. Bien que les logiciels de FAO et les équipements de production ne soient pas commercialisables, il convient de distinguer les logiciels de FAO des solutions de production.

Les praticiens et les prothésistes doivent porter un regard critique sur les termes utilisés dans les brochures commerciales des systèmes de CFAO. L'«ouverture» d'un système CFAO dentaire fait souvent référence à l'utilisation d'un format de fichier ouvert, tel que STL. L'utilisation de tels fichiers permet d'assurer la compatibilité et l'interopérabilité entre les modules numériques de la chaîne, aspect utile au bon fonctionnement du cabinet dentaire.⁷ Plus les modules de la chaîne numérique sont interopérables, plus les échanges de données sont facilités. Le niveau élevé d'interopérabilité entre logiciels et équipements de différents fournisseurs facilite les échanges de données entre praticiens, laboratoires dentaires et centres de production.

Les prestataires de CFAO en médecine dentaire considèrent généralement que les praticiens et les techniciens dentaires ne sont pas des experts en ingénierie de CFAO. Ainsi, les entreprises ont créé des systèmes CFAO dentaires entièrement intégrés et automatisés. Ce haut niveau d'automatisation peut être un inconvénient lors de la conception d'une restauration. Dans les logiciels de CAO dentaire, peu de paramètres de conception de restauration peuvent être modifiés et optimisés. Le logiciel de CAO impose souvent certains paramètres techniques associés; Par exemple, le praticien ne peut pas spécifier la rugosité et la tolérance dimensionnelle requises sur les différentes zones prothétiques. En raison du faible accès au logiciel ou aux paramètres des appareils, le processus de CFAO dentaire ne peut pas toujours répondre aux exigences cliniques (par exemple, une adaptation de la restauration) ni aux besoins du praticien.

Les algorithmes logiciels intégrés dans le module FAO sont entièrement automatiques: les paramètres du processus d'usinage sont prédéfinis et verrouillés. L'automatisation de la stratégie de fraisage dans les solutions logicielles de FAO dentaire peut également être un inconvénient pour la production de bonnes restaurations. En fait, en génie mécanique, il est bien connu que la stratégie de fraisage a un impact direct sur l'intégrité de la surface des pièces (en particulier sur la rugosité, les contraintes résiduelles et les fissures).⁴¹⁻⁴⁴

Les praticiens et les prothésistes doivent garder à l'esprit que, dans le logiciel de CFAO dentaire actuel, les bases de données, les types de restauration, ainsi que les blocs de matériau ou les ébauches sont verrouillés. Le choix du type de biomatériau ou de restauration est donc limité par le choix d'une solution CFAO donnée. L'intégration d'un nouveau type de biomatériau ou de restauration peut nécessiter la définition d'un nouveau procédé d'usinage (nouvelle géométrie de la fraise, nouvelle coupe ou abrasion de matière, nouvelle stratégie d'usinage). Les développeurs de systèmes CFAO dentaires considèrent que les praticiens et les prothésistes ne possèdent pas une connaissance suffisante des processus d'usinage leur permettant de définir leurs propres paramètres. Par conséquent, l'intégration d'un nouveau type de restauration ou d'un biomatériau peut nécessiter l'achat de modules supplémentaires.^{2-4, 21}

Comme Schleyer l'a souligné, l'industrie CFAO dentaire [Sic] devrait adopter des principes de conception centrés sur l'utilisateur et les concepteurs devraient travailler ensemble pour améliorer l'interopérabilité des échanges de données⁷ [Sic], ces principes devraient être étendus au traitement des données afin de mieux intégrer les recommandations cliniques et les exigences des praticiens dans chaque module de la chaîne numérique.

Conclusions

La CFAO dentaire est une chaîne numérique composée de quatre modules consécutifs - équipement d'acquisition, logiciel de CAO, logiciel de FAO et équipement de production - pour les restaurations dentaires par création numérique. La CFAO Dentaire implique un workflow de données numériques complexe, qui consiste en un échange, une conversion et un traitement de données numériques. Ces données sont intégrées à plusieurs types de modèles numériques associés à des fichiers informatiques.

L'interopérabilité entre les modules numériques consécutifs est un facteur clé dans un workflow numérique approprié et peut faciliter les échanges entre praticiens et laboratoires dentaires. Lors de la commercialisation des produits CFAO, les fabricants se réfèrent à cette propriété fondamentale d'échange de données comme «l'ouverture», la «modularité» et la «flexibilité» de leur produit. Dans les solutions logicielles CFAO dentaires commercialisées, l'interopérabilité est possible lorsque des formats de fichier standard ou ouverts, tels que le format STL, sont utilisés. Avec les formats de fichiers propriétaires (fermés), l'interopérabilité est possible en utilisant la chaîne numérique CFAO dentaire entièrement intégrée ou en achetant un module informatique pour convertir le format de fichier propriétaire en un format de fichier ouvert. Par conséquent, «l'ouverture» des solutions CFAO dentaires est un facteur important dans la pratique de la dentisterie numérique. Cette propriété facilite les échanges entre le praticien et le laboratoire dentaire (par exemple, du «plâtre» numérique ou de la restauration CAO, qui peuvent être facilement échangés dans un environnement numérique).

Le défi actuel dans le développement de la CFAO dentaire est de fournir un processus numérique «ouvert», «flexible», «automatisé» et «facile à utiliser». Les solutions CFAO doivent être suffisamment «ouvertes» et «souples» lors du traitement des données, telles que la conception de restauration, pour mieux répondre aux exigences cliniques. Elles devraient également être «automatisées» et suffisamment «faciles à utiliser» lors du traitement des données pour fournir des systèmes ne nécessitant pas de compétences élevées en CFAO et n'augmentant pas considérablement le temps nécessaire aux praticiens et aux techniciens pour les restaurations.

- | | | |
|--|----------------------------------|---|
| a. Dr. Laurent Tapie, PhD en l'Ingénierie Mécanique
b. Nicolas Lebon, PhD, Etudiant en Ingénierie Mécanique
c. Prof. Bernardin Mawussi, PhD en Ingénierie Mécanique
d. Dr. Hélène Fron-Chabouis, DDS, PhD en Odontologie
e. Prof. François Duret, DDS, PhD en Odontologie,
Château de Tarailhan, 11560 Fleury d'Aude, France
f. Dr. Jean-Pierre Attal, DDS, PhD en Odontologie | De a à c
Et
De d à f
Et | Département de l'Ingénierie Mécanique, Paris 13 Université de la Sorbonne paris Cité, Saint Denis, France.
Département des biomatériaux, URB2i, Faculté de Chirurgie Dentaire, Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, EA4462, Montrouge, France
Dentaire, Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, EA4462, Montrouge, France
Département Dentaire, Charles-Foix, Hôpital, Ap-HP, Ivry sur Seine, France. |
|--|----------------------------------|---|

Références

1. Van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater* 2012; 28:3–12.
2. Miyazaki T, Hotta Y, Kuniij, Kuriyama S, Tamaki, Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *DentVater* 2009; 28:44-66.
3. Fasbinder DJ. Computerized technology for restorative dentistry. *Am J Dent* 2013; 26:115-120.
4. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J* 2008; 204:505-511.
5. Groover M, Zimmers EW. CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing. Upper Saddle River: Pearson Education, 1983.
6. Xu X, Integrating advanced computer-aided design, manufacturing, and digital control: principles and implementations. Hershey: Information Science Reference, 2009.
7. Schleyer TK. Why integration is key for dental office technology. *J Am Dent Assoc.* 2004; 135(suppl.):4S-9S.
8. Radhakrishnan P, Subramanyan S, Raju V. CAD/CAM/CIM, ed 2. New Delhi. New Age International, 2008.
9. Hollenbeck K, Allin T, van der Poel M. 3Shape Technology Research, Copenhagen. Technical report, Dental Lab 3D Scanners — How they work and what works best, 2012.
10. Henderson H. Encyclopedia of computer science and technology, revised ed. New York: InfoBase Publishing, 2009.
11. Boryor A, Hohmann A, Geiger M, Wolfram U, Sander C, Sander FG. A downloadable meshed human canine tooth model with PDL and bone for finite element simulations. *Dent Mater* 2009; 25:e57—62.
12. www.sirona.com/ecomaXL/files/inLabSW_Featureliste_E_N.pdf&download=1
13. Szykman S, F-enves SJ, Keirouz W, Shooter SB. A foundation for interoperability in next-generation product development systems. *Comput Aided Des* 201; 33:545—559.
14. Lee RT, Shiou FJ. Multi -beam laser probe for measuring position and orientation of freeform surface. *Measurement* 2011;44:1—10
15. Raja V, Fernandes KJ (eds). Reverse engineering: an industrial perspective. London: Springer-Verlag, 2008.
16. Ireland AJ, McNamara C, Clover MJ, et al. 3D surface imaging in dentistry — what we are looking at. *Br Dent J* 2008; 205:387—392.
17. Orth U, Wedler V. Method for obtaining a position match of 3D data sets in a dental CAD/CAM system, 2009, US Patent No. 7,796,811. Washington DC: US Patent and Trademark Office.
18. Orth U, Wedler V. Dental CAD/CAM system for obtaining a position match of 3D data sets, 2012, US Patent No. 8,111,909. Washington DC: US Patent and Trademark Office.
- 19.. Specification, STereoLithography Interface. 3D Systems Inc., October 1989.
20. Racasan R, Popescu D, Neamtu C, Dragomir M. Integrating the concept of reverse engineering in medical applications. In: Miclea L, Stoian I (eds). Proceedings or Automation Quality and Testing Robotics. IEEE International Conference, 2010:1-5.
21. Zheng SX, Li J, Sun QF. A novel 3D morphing approach for tooth occlusal surface reconstruction. *Comput Aided Des* 2011; 43:293-302.
22. Steinbrecher T, Gerth M. Dental inlay and onlay construction by iterative Laplacian Surface Editing. *Computer Graphics Forum* 2008; 27:1441-1447.
23. Solaberrieta E, Barrenetxea L, Bilbao E, et al. Collision free design of dental prosthesis. *Mechanisms and Machine Science* 2014:131-138.
24. Mehl A, Blanz V. New procedure for fully automatic occlusal surface reconstruction by means of a biogeneric tooth model. *Int J Comput Dent* 2005;8:13—25.
25. Mehl A, Blanz V, Hickel R. Biogeneric tooth: a new mathematical representation for tooth morphology in lower first molars. *Eur J Oral Sci* 2005; 113:333—340.
26. Williams RJ, Bibb R, Eggbeer D, Collis J. Use of CAD/CAM technology to fabricate a removable partial denture framework. *J Prosthet Dent* 2006; 96:96-99.
27. Song ML, Li J, Yin L, Huang T, Gao P. The feature-based posterior crown design in a dental CAD/CAD system. *int J Adv Manufac Tech* 2007;34 :1058-1065.
28. Zhao M, Ma L, Tan W, Nie D. Interactive tooth segmentation or dental models. In: Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE 2005; 654-657.
29. Yau HT, Hsu CY, Peng HL, Pai CC, Computer-aided framework design for digital dentistry. *Comput-Aided Des and App* 2008;5; 667-675.
30. Wolter FE, Reuter M, Peinecke N. Geometric Modeling for Engineering Applications. In: Encyclopedia of Computational Mechanics, 2007.
31. Piegl LA, Tiller W. The NURBS book. Springer, 1997.
32. Rogers DF. An introduction to NURBS: With Historical Perspective. Morgan Kaufmann, 2001.
33. ISO 10303-1: 1994. Industrial automation systems and integration - product data representation and exchange, Part 1. Overview and fundamental principles
34. ISO 10303-203:1994. Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange, Part 203. Application protocol: Configuration controlled 3D designs of mechanical parts and assemblies
35. ISO 10303-214:1994. Industrial automation systems and integration— Product data representation and exchange, Part 214. Application Protocol: Core data for automotive mechanical design processes.
36. Nagel RM, Braithwaite WW, Kennicott PR. Initial Graphics Exchange Specification IGES, Version 1.0, 1980, Washington DC: National Bureau of Standards, NBSIR 80-1978.
37. Verma AK, Rajotia S. A review of machining feature recognition methodologies. *Int J Comput Integ M* 2010;23 :353—368.
38. Lasem A, Xue D, Gu P. Recent development in CNC machining of free-form surfaces: A state -of-the art review. *Comput—Aided Des* 2010;42.641--654.

39. Ross DT Origins of the APT language for automatically programmed tools. In: Wexelblat R (ed). History of programming languages. New York: ACM, 1981:279–338.
40. ISO 6983-1:2009. Automation systems and Integration — Digital control of machines — Program format and definition of address words, Part 1. Data format for positioning, line motion and contouring control systems.
41. ISO 841-1:2001. Industrial automation systems and integration — Digital control of machines — Coordinate system and motion nomenclature.
42. Jawahir IS, Brinksmeier E, M'Saoubi R, et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. CIRP Annals: Manufacturing Technology 2011; 60:603-626.
43. Gintar TL, Hasan F, Ahmad ARM, Bambang A. Surface integrity and cutting temperature in machining of biomedical magnesium alloys — an overview. Adv Mater Res 2013; 748:7-10.
44. Vázquez E, Gomez X, Ciurana J. An experimental analysis of process parameters to manufacture by milling micro-channels in biomaterials. Int J Mechatron Manufac Sys 2012; 5:46--65.

Adresses

Dr Laurent Tapie

Faculté de Chirurgie Dentaire, Université Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, Paris, France, E-mail : laurent.tapie@univ-paris13.fr

Appel aux dons

Cher(e)s collègues et utilisateurs de Cerec

Suite aux efforts intensifs de l'Académie internationale de dentisterie internationale (ADI) (www.adint.org) et à l'engagement particulier de ses collègues, les docteurs Tobias Bauer et Friedrich A. Herbst, membre de l'Association internationale des fabricants de produits dentaires (IDM), de l'université technologique Ecole jamaïcaine des sciences de la santé bucco-dentaire (www.utech.edu.jm) a récemment fait l'acquisition d'un système Cerec 2. Avec l'aide généreuse de Sirona, l'appareil a été mis à jour avec les dernières versions disponibles du logiciel et du matériel. Cela permet aux étudiants de l'Ecole jamaïcaine des sciences de la santé bucco-dentaire de se familiariser avec la technologie CFAO dentaire. Il existe encore un manque considérable de connaissances et d'expérience concernant l'utilisation du système CFAO Cerec. C'est pourquoi, en avril 2015, le très expérimenté utilisateur de Cerec, le Dr Dusko Gedosev, et son épouse Martina (DH) prévoient d'encourager et de former les étudiants et les professeurs à l'utilisation du système Cerec pour les aider à se familiariser avec cette technologie. Le matériel suivant sera requis pour ce projet: blocs, vis, perceuses, disques, disquettes, livres, manuels, module Cerec, logiciel Cerec 3, ainsi que tout matériel ou équipement que vous estimez utile. Les jeunes aspirants dentistes de l'École des sciences de la santé bucco-dentaire UTECH, en Jamaïque, de la Faculté d'odontologie de Port-au-Prince, en Haïti : Pedro Henriquez Urena, de l'Université nationale de la République Dominicaine, bénéficieront de ce cours le 13 avril 2015 et se féliciteront et vous seront très reconnaissants pour tout type de soutien que vous pourriez fournir. Un reçu de don pourra être émis pour votre généreux soutien. Veuillez contacter s'il vous plaît : le Dr. Dusko Gedosev • Werderstr. 9 • 68165 Mannheim Tel. +49 172 742 1677 • E-Mail: duki@dentalcadcam.de