

Der vollständige digitale Workflow in der modernen Zahnmedizin

Ein Beitrag von Dr. Karsten Kamm, Dr. Cyrus Alamouti und Dr. Dr. Stephan Weihe

DIGITALER WORKFLOW /// Während Intraoralscanner, digitale Volumentomografie (DVT) und CAD/CAM-Systeme über Jahre als getrennte Insellösungen existierten, verschiebt sich der Fokus heute auf die multimodale Zusammenführung sämtlicher diagnostischer Datensätze in einem gemeinsamen Koordinatensystem.^{1,4} Der entscheidende Paradigmenwechsel besteht darin, dass Daten nicht mehr nur digitalisiert, sondern zunehmend semantisch ausgewertet, funktionell referenziert und zu einem konsistenten digitalen Patientenmodell zusammengeführt werden. Aus zahn-technischer Perspektive ist dieser Wandel besonders bedeutsam, da die Qualität des Zahnersatzes unmittelbar von der Vollständigkeit und funktionellen Zuordnung der übermittelten Daten abhängt. Der vorliegende Beitrag beschreibt den durchgängigen digitalen Prozess mit besonderem Schwerpunkt auf der Schnittstelle zwischen Behandler und Zahntechniker sowie dem konkreten laborseitigen Vorgehen bei der prothetischen Rehabilitation.

Literatur

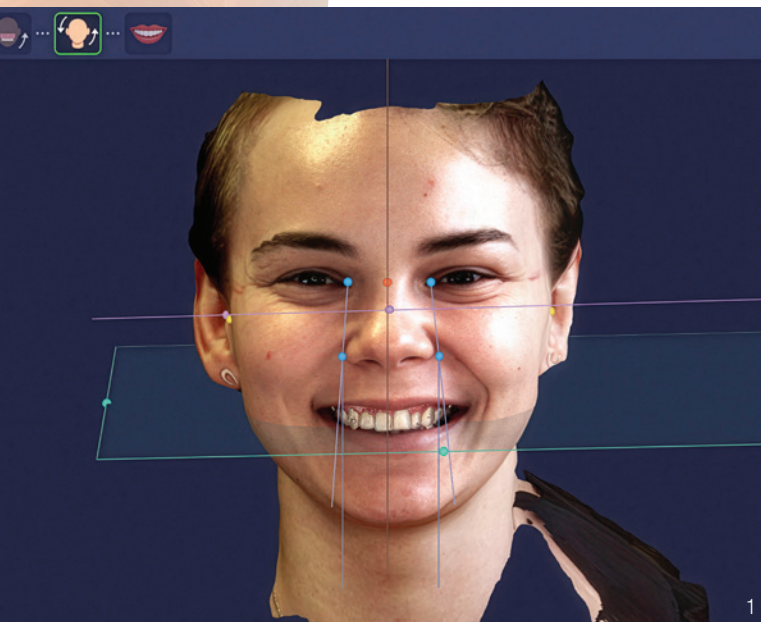


Abb. 1: Fotorealistischer Gesichtsscan (RAYFace) in Natural Head Position, One-Shot-Aufnahme in 0,5 Sekunden.

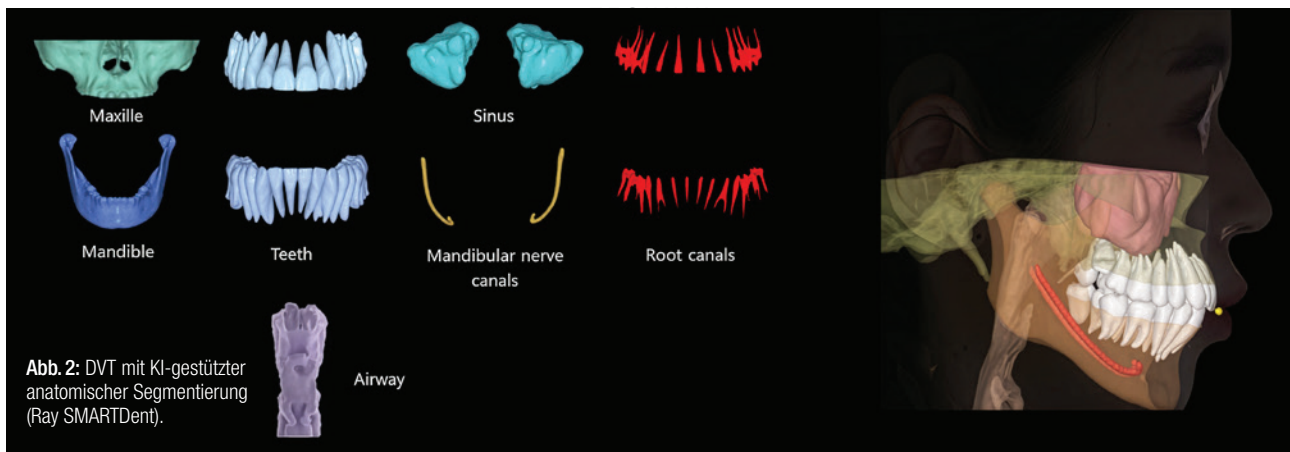
Die klinische Datenbasis

Am Anfang der Prozesskette steht die Erfassung dreier komplementärer Datenebenen. Der Intraoralscan liefert die präzise Oberflächengeometrie von Ober- und Unterkiefer als STL-

Datensatz. Klinisch bewährt hat sich eine standardisierte Scan-Sequenz – Referenzbogen, Gegenbogen, Okklusionsregistrator –, um Verzerrungen zu minimieren und dem Labor eine belastbare Kieferrelation zu übermitteln.

Der Gesichtsscan (z. B. RAYFace, Ray Europe) erweitert die intraorale Information um das ästhetische und funktionelle Weichgewebsprofil. Das stationäre, kalibrierte System erfasst mittels sechs unterschiedlich positionierter Kameras einen fotorealistischen One-Shot-Scan in 0,5 Sekunden, wodurch Bewegungsartefakte weitgehend vermieden werden.^{1,6} Durch die Verspiegelung des Scannerkopfes lässt sich die Natural Head Position (NHP) reproduzierbar einstellen – eine zentrale Voraussetzung für die spätere funktionelle Zuordnung.

Ergänzend liefert das DVT bzw. das RAY-5D-System die dreidimensionale anatomische Grundstruktur. Eine KI-gestützte Segmentierung (z. B. Ray SMARTDent-Software) unterstützt die Trennung von Zähnen, Wurzeln, Maxilla, Mandibula, Sinus, Atemwegen und Nervenkanal in separate, exportierbare Modelle (DICOM→STL); die vorgeschlagene Segmentierung wird anschließend fachlich überprüft und bei Bedarf korrigiert.⁴ Bei implantatprothetischen Fragestellungen mit mehreren Pfeilern ergänzt



die Photogrammetrie die intraorale Erfassung: Über fest verschraubte Scanmarker werden die Implantatpositionen simultan und verzerrungsarm registriert, was insbesondere bei Full-Arch-Versorgungen eine hohe Positionsgenauigkeit unterstützt.

Funktionelle Analyse und Übertragung in den virtuellen Artikulator

Für den Zahntechniker ist die funktionelle Zuordnung der eigentliche Schlüssel zu einem präzisen, kaufunktionell korrekten Zahnersatz. Das Kauorgan ist in einen kybernetischen Regelkreis eingebettet. Benötigt werden daher die Lage des Oberkiefers in der NHP, die Gesichtsmittellinie, das Kauzentrum sowie die Okklusionsebene. Der Gesichtsscanner registriert die wahre Horizontal- und Vertikalebene in Bezug zur natürlichen Kopfposition.^{2,14} Da das Gerät auf einer horizontalen Fläche steht,



verläuft die y-Achse stets parallel zur Schwerkraftebene. Eine KI-gestützte Anwendung unterstützt die Erkennung der Bipupillarlinie, der Gesichtsmittellinie sowie der Ala-Tragus-Ebene (Camper'sche Ebene), die häufig als Referenz für die Okklusionsebene herangezogen wird, und schlägt die Ausrichtung von Ober- und Unterkieferscan vor, die vom Behandler überprüft wird.³ Auf diese Weise lässt sich das Oberkiefermodell in der Regel ohne zusätzliche Hilfsmittel wie extraorale Scankörper oder Referenzbögen in den virtuellen Artikulator übertragen.

Für die dynamische Funktionsanalyse lassen sich Bewegungssysteme integrieren, etwa Freecorder next (orangedental), JMA-Optic (zebris Medical) oder der Modjaw Funktionsscanner (MODJAW). Sie erfassen Bewegungsbahnen, Gelenkachsen und dynamische Okklusionskontakte und überführen sie in das digitale Modell. Die daraus resultierende Artikulationssimulation bildet die Grundlage funktionsorientierter prothetischer Konzepte.¹⁰ Bei größerer Differenz zwischen habitueller und therapeutischer Position empfehlen wir als Zwischenschritt grundsätzlich eine Positionierungsschiene: Sie führt den Unterkiefer schrittweise in die angestrebte Gelenkposition und sichert deren Reproduzierbarkeit, bevor die definitive prothetische Versorgung im virtuellen Artikulator konstruiert wird.

Digitaler Patientenavatar

Die Fusion von Intraoralscan, Gesichtsscan und DVT resultiert in einem digitalen Patientenavatar – einem funktionell, ästhetisch und

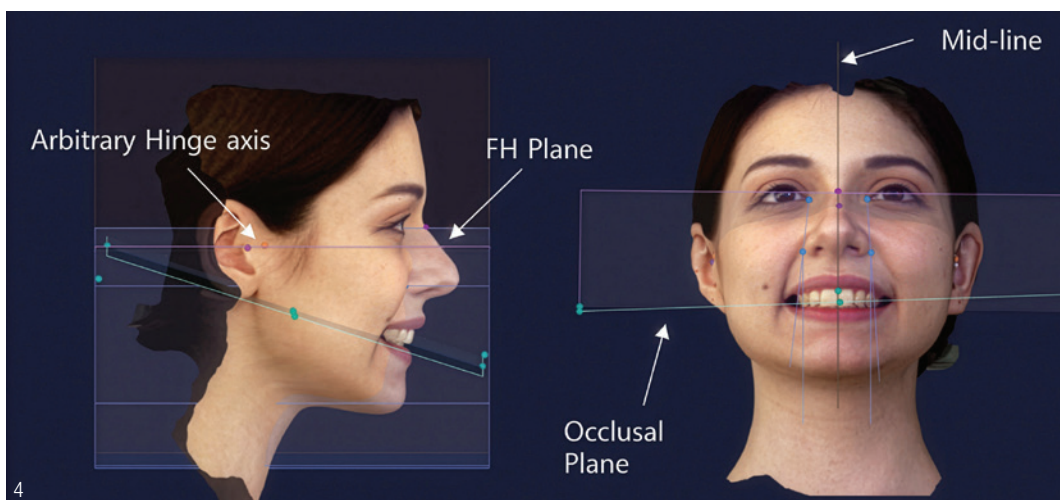


Abb. 3: Photogrammetrische Erfassung multipler Implantatpositionen bei einer Full-Arch-Versorgung. – **Abb. 4:** Automatisch vorgeschlagene Referenzebenen: Bipupillarlinie, Gesichtsmittellinie sowie Ala-Tragus-Ebene (Referenz für die Okklusionsebene).

anatomisch referenzierten Abbild des Patienten.^{9,12} Dieser lässt sich in wenigen Minuten erzeugen und kann die früher übliche Kombination mehrerer Softwarelösungen mit manuellen Registrierungsprozessen und Bearbeitungszeiten von bis zu 60 Minuten weitgehend ablösen. Entscheidend für die Zusammenarbeit ist, dass Behandler und Zahntechniker denselben präzisen Datensatz nutzen. Der Patientenavatar wird zugleich zu einem wirkungsvollen Kommunikationsmittel gegenüber dem Patienten.

Die Schnittstelle Behandler–Zahntechniker

Für einen reibungslosen Datenaustausch ist das Verständnis der Datenformate essenziell: Der Rohscan wird als STL-Oberfläche (Dreiecksmesh) übergeben, die CAD-Konstruktion erfolgt anschließend im volumetrischen STEP-Format, während der CAM-Export das maschinenspezifische Fertigungsformat erzeugt. Die

Übergabe aus dem Gesichtsscanner an gängige CAD-Systeme (z.B. exocad) erfolgt weitgehend verlustfrei, da alle Datensätze im identischen Koordinatensystem exportiert werden.¹¹ Sämtliche Zuordnungen – NHP, Referenzebenen, Okklusionsebene, Smile-Design-Vorschlag – bleiben erhalten und müssen laborseitig in der Regel nicht neu definiert werden. Somit hat der Zahntechniker den vollständigen virtuellen Patienten unmittelbar in seinem CAD-System vor sich. Der digitale Auftrag umfasst damit nicht nur Geometrie, sondern die vollständige funktionelle und ästhetische Planungsinformation.

Grundlage einer reibungslosen Zusammenarbeit sind offene, herstellerübergreifende Datenstandards. Oberflächendaten werden üblicherweise als STL oder PLY, Volumendaten als DICOM und Konstruktionsdaten als STEP ausgetauscht; für die Anbindung an Praxis- und Laborverwaltungssysteme sowie an die elektronische Patientenakte gewinnen Kommunikationsstandards

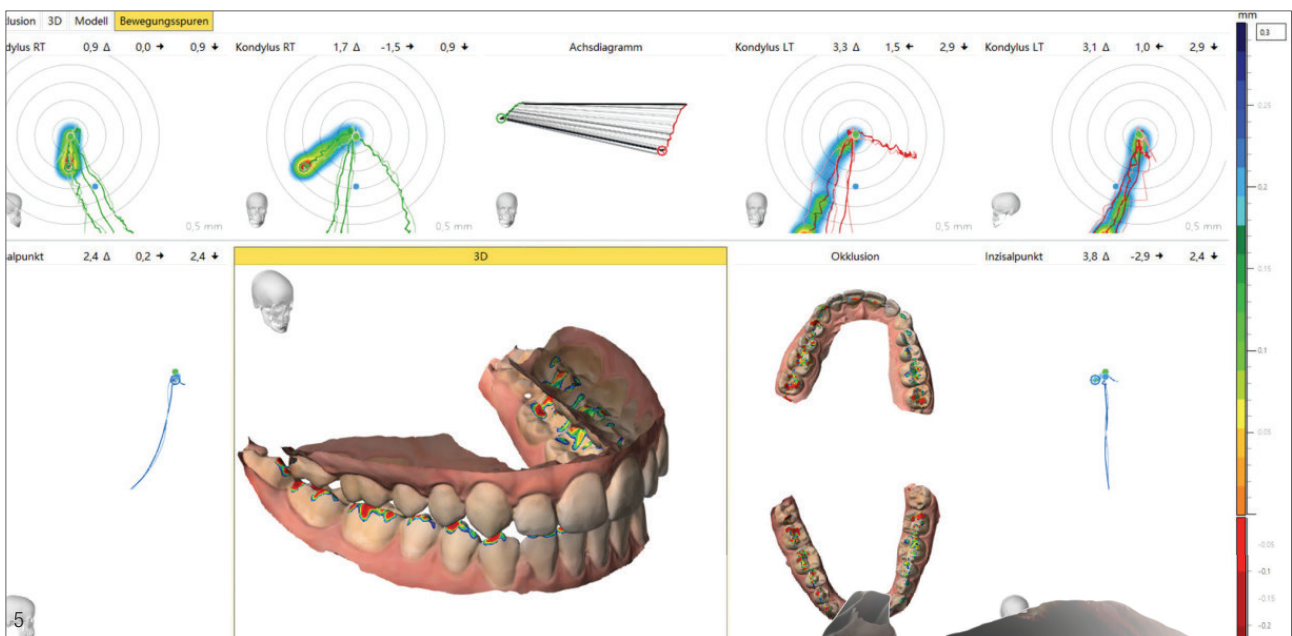


Abb. 5: Übertragung der Funktions- und Bewegungsdaten in den virtuellen Artikulator.

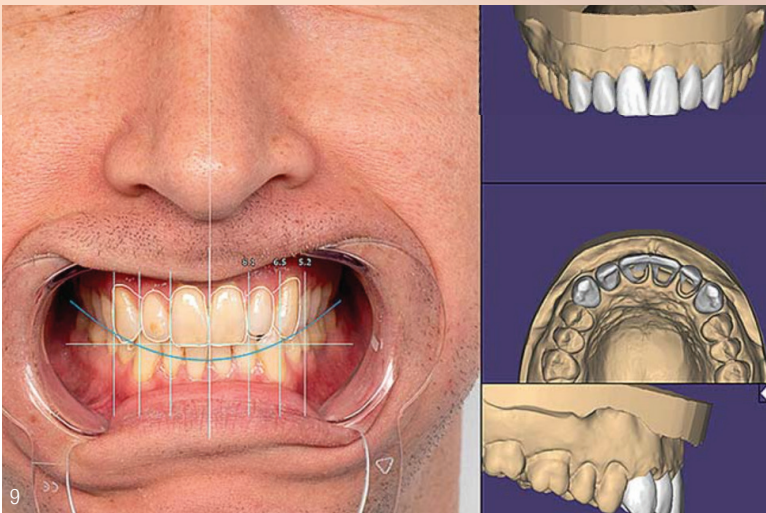


Abb. 6: Positionierungsschiene als Zwischenschritt zur Überführung der pathologischen in die ideale Kondylenposition. – Abb. 7: Digitaler Patientenavatar aus der Fusion von Intraoralscan, Gesichtsscanner und DVT.





Abb. 8: Gesichtsgeführtes Smile Design mit KI-gestütztem Vorschlag der Zahnkomposition. – **Abb. 9:** CAD-Konstruktion der Restauration auf Basis eines Patientenavatars.



trifft der Behandler.⁸ Für die bibliotheksgestützte Zahnauswahl und die Abstimmung mit dem Patienten kann ergänzend eine spezialisierte Plattform wie Smilecloud (Straumann) herangezogen werden, die anhand definierter dentaler und facialer Parameter passende Zahnkompositionen vorschlägt. Das Ergebnis dient als visuelle Referenz für die spätere Konstruktion, als Grundlage eines Mock-ups sowie – bei minimalinvasivem Vorgehen – als Leitlinie für das Präparationsdesign. Da die Simulation CAD-kompatibel und

wie FHIR zunehmend an Bedeutung. Offene Schnittstellen erleichtern die Verbindung von Systemen unterschiedlicher Anbieter, tragen dazu bei, Datenverluste zu vermeiden, und sichern die Langzeitverfügbarkeit der Daten.

im selben Koordinatensystem verankert ist, kann sie direkt in das CAD-System übernommen werden.

Prothetische Rehabilitation im Labor

Schritt 1: Datenimport und Plausibilitätsprüfung

Der Zahntechniker importiert den fusionierten Datensatz in die CAD-Software. Mit der Übergabe des digitalen Patientenavatars können viele konventionelle Übertragungsschritte entfallen: Gesichtsbogen, Bissregistratur, klassische Kieferrelationsbestimmungen sowie Wachsenproben lassen sich häufig vermeiden, da wesentliche funktionelle und räumliche Informationen bereits digital hinterlegt sind.^{12,13} Zunächst werden Vollständigkeit und Qualität der Scans geprüft. Bei Implantatfällen unterstützt ein KI-gestütztes Scanbody-Matching die Zuordnung, bei dem das Bibliotheksmodell des jeweiligen Implantatsystems auf die gescannte Scanbody-Geometrie gelegt und anschließend kontrolliert wird.

Schritt 2: Smile Design als ästhetische Leitplanke

Auf Basis des Gesichtsscans wird das Smile Design erstellt – dreidimensional, anatomisch referenziert und gesichtsgeführt. Die KI-gestützte Anwendung schlägt Zahnformen und -proportionen unter Berücksichtigung des Goldenen Schnitts vor und richtet sie an Mittellinie und Okklusionsebene aus; die endgültige Gestaltung

Schritt 3: CAD-Konstruktion in exocad

Innerhalb des CAD-Systems wird die Restauration auf Grundlage des Patientenavatars und des Smile-Design-Vorschlags konstruiert. Der Techniker definiert Präparationsgrenzen und Einschubrichtung, gestaltet Kronen-, Brücken- oder Abutmentgeometrien und überprüft die statische wie dynamische Okklusion gegen die im virtuellen Artikulator hinterlegten Bewegungsbahnen. Bei implantatprothetischen Arbeiten kommen individuelle Abutments hinzu; über ein Photogrammetrie-Modul lassen sich Mehrfachimplantatpositionen präzise einbinden. Für die Modellfertigung stehen digitale Implantatanalogue zur Verfügung (z. B. DIM-ANALOG®, NT-Trading; 3D Analog, IPD Germany), die eine exakte, reponierbare Positionierung im gedruckten Modell gewährleisten.

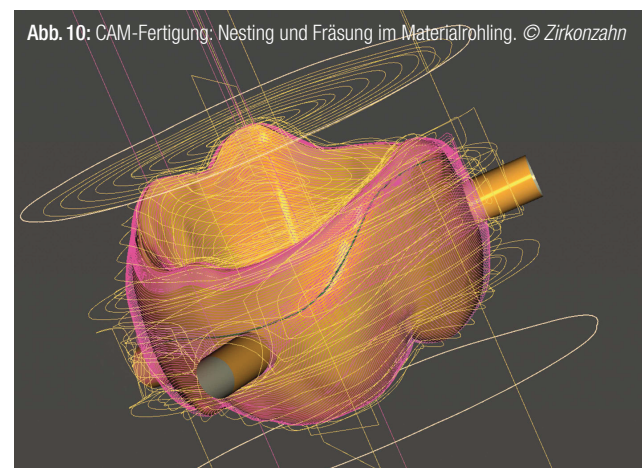


Abb. 10: CAM-Fertigung: Nesting und Fräsung im Materialrohling. © Zirkonzahn

TECHNIK



11a

Abb. 11a+b: Additive Fertigung und fertiggestellte vollkeramische Restauration. Sofern nicht anders angegeben, alle Abbildungen: © Dr. Karsten Kamm



11b

Schritt 4: CAM-Fertigung – Fräsung und 3D-Druck

Der finalisierte Konstruktionsdatensatz wird an die CAM-Fertigung übergeben. Die Materialwahl orientiert sich an Indikation und Anspruch: subtraktiv gefräst werden vollkeramische Versorgungen aus Zirkonoxid oder Lithiumdisilikat sowie provisorische Arbeiten aus PMMA; hierfür kommen Fräs- und Schleifeinheiten von Herstellern wie vhf camfacture oder Amann Girschbach zum Einsatz. Beim Nesting werden die Objekte im Materialrohling

digital hinterlegt ist, lässt sich der manuelle Einschleifaufwand in vielen Fällen deutlich reduzieren. Vor der Eingliederung kann der Behandler die Passung digital verifizieren; bei komplexen Rehabilitationen erlaubt die Überlagerung mehrerer Gesichtsscans zudem eine visuelle Verlaufs- und Ergebniskontrolle.

Fazit

Der durchgängige digitale Workflow verbindet Intraoralscan, Gesichtsscan, funktionelle Analyse und DVT zu einem digitalen Patientenavatar, der von Behandler und Zahntechniker gemeinsam genutzt wird. Der eigentliche Fortschritt liegt dabei nicht in einzelnen Geräten, sondern in der konsequenten Integration aller Daten in einem gemeinsamen Koordinatensystem: Erst wenn Ästhetik, Funktion und Anatomie nicht mehr getrennt, sondern als interdependente Einheiten eines Patientenmodells betrachtet werden, entsteht der eigentliche klinische und zahntechnische Mehrwert. Für das Labor bedeutet dies einen planbaren, reproduzierbaren Prozess von der CAD-Konstruktion über das Smile Design bis zur Fräsung oder zum 3D-Druck – mit reduziertem Nacharbeitungsaufwand, höherer Erstpassung und einer präziseren Kommunikation zwischen Praxis, Labor und Patient.

Schon heute markiert die integrierte, in einem gemeinsamen Koordinatensystem referenzierte Datenbasis den **Übergang von fragmentierten digitalen Einzelprozessen hin zu einer patientenzentrierten, gesichtsgeführten Zahnmedizin.**

positioniert, Fräsbahnen berechnet und Haltestege gesetzt. Additiv werden über SLA-/DLP-Drucker (z. B. SprintRay, NextDent) Arbeitsmodelle, Bohrschablonen, Schienen, provisorische Restaurationen und Try-ins gefertigt. Nach dem Slicing folgen Druck, Reinigung und Nachpolymerisation. Bei Zirkonoxid schließt sich der Sinterprozess an, bei Lithiumdisilikat die Kristallisationsbrand-Führung im Ofen.

Schritt 5: Nachbearbeitung, Finalisierung und Rückkopplung

Abschließend werden die Restaurationen ausgearbeitet, individualisiert, glasiert bzw. poliert und auf dem gedruckten Modell im Artikulator kontrolliert. Da die funktionelle Information bereits

INFORMATION ///

Dr. Karsten Kamm

Zahngesundheit Baden-Baden

An-Institut für digitale Kompetenz in der Zahnmedizin an der Universität Witten/Herdecke gGmbH

www.z-b-b.de / www.aninstitut-witten.de

Infos zum Autor
Dr. Karsten Kamm



Infos zum Autor
Dr. Dr. Stephan Weihe





Maximale Festigkeit. Kompromisslose Stabilität.

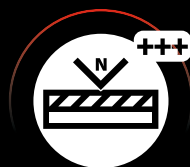
Smart in der Anwendung, überzeugend in der Wirtschaftlichkeit.

DIE BASIS
FÜR SICHERHEIT,
VERTRAUEN
UND EFFIZIENZ.



**SPEED-
SINTERZEITEN**

Restorationen
innerhalb eines Tages



**EXTREM
BELASTBAR**

in jedem
Anwendungsfall



**MULTIGRAIDENT-
TECHNOLGIE**

für natürliche,
stufenlose Farbverläufe