

# Künstliche Intelligenz zur Bildanalyse in der Zahnmedizin

Ein Beitrag von Prof. Dr. Falk Schwendicke und Dr. Joachim Krois

**FACHBEITRAG** /// Bildgebende Diagnostik ist aus der Zahnmedizin nicht wegzudenken: Allein in Deutschland werden jedes Jahr circa 55 Millionen zahnärztliche Röntgenbilder angefertigt; die Zahnmedizin fertigt mehr Röntgenbilder an als fast alle anderen medizinischen Disziplinen zusammen.<sup>12,2</sup> Dazu kommen weitere Bildgebungsverfahren wie Fotografie, intraorale Kameras oder dreidimensionale Scanner. In der Karies- und Parodontitisdiagnostik, der Endodontie, der Herstellung vor allem von keramischen Restaurationen und Zahnersatz, der chirurgischen Diagnostik und Therapieplanung sowie der kieferorthopädischen Planung und Verlaufskontrolle sind bildgebende Verfahren allgegenwärtiger Bestandteil der täglichen Praxis.

Gerade die Diagnostik in der Zahnmedizin setzt stark auf Bildgebung; approximale Karies, parodontaler Knochenabbau, apikale Läsionen und anatomische Strukturen werden oft bildgebend, vor allem röntgenologisch, detektiert und/oder beurteilt. Allerdings leiden diese Diagnostikverfahren (wie auch andere, nicht bildgebende Verfahren, zum Beispiel die visuell-taktile Kariesdetektion oder die parodontale Sondierung) an einer bedingten Validität; sie unter- oder überschätzen oft das Vorhandensein oder den Schweregrad einer Erkrankung (einer kariösen Läsion, eines parodontalen Knochenabbaus etc.). Oftmals ist die Diagnostik zudem erfahrungsabhängig; erfahrene Untersucher

Die maschinell detektierten Befunde können vom Zahnarzt bei Bedarf ergänzt oder korrigiert werden. Der diagnostische Befund wird automatisch auf eine Zahnkarte übertragen und kann danach gespeichert oder ausgedruckt werden.



zeigen bessere diagnostische Ergebnisse. Zwischen verschiedenen Untersuchern kommt es regelmäßig zu einer diagnostischen Abweichung; die Reliabilität röntgenologischer Diagnostiken ist begrenzt. Im Ergebnis kommen verschiedene Untersucher zu verschiedenen Diagnosen und Therapien.

Weiterhin ist die Befundung von Bildmaterial aufwendig. Die vollständige Beurteilung einer Panoramaschichtaufnahme ist zeitintensiv, müssen doch eine große Zahl anatomischer Strukturen (Kieferknochen, Kiefergelenke, Kieferhöhlen) beurteilt, die Zahl und der Zustand der Zähne untersucht und etwaige pathologische Auffälligkeiten (Karies, Knochenabbau, apikale Läsionen) bzw. ihre röntgenologischen Zeichen (überwiegend Aufhellungen, bei Speichelsteinen oder odontogenen Tumoren etc., aber auch Verschattungen) detektiert und bewertet werden. Die Dokumentation dieser Befunde sollte zudem systematisch und detailliert sein, um Verlaufskontrollen zu ermöglichen, eine Therapieplanung darauf aufzubauen und um forensisch abgesichert zu sein. Gerade die Verlaufskontrolle ist oftmals nicht einfach, denn viele Bilder werden nicht standardisiert angefertigt und können demnach zum Beispiel nur bedingt verglichen werden.

Zusammenfassend sind bildgebende Verfahren in der Zahnmedizin unverzichtbar, diese leiden aber an teils stark begrenzter Validität und Reliabilität. Zudem ist für eine evidenzgestützte, individualisierte und risikoadjustierte Therapie eine ausgiebige systematische Befundung und Dokumentation und die Verknüpfung dieser Befunde mit anderen Daten, zum Beispiel aus dem klinischen Befund, nötig. Hier kann der Einsatz von Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI, engl. Artificial Intelligence: AI) zukünftig Unterstützung leisten.

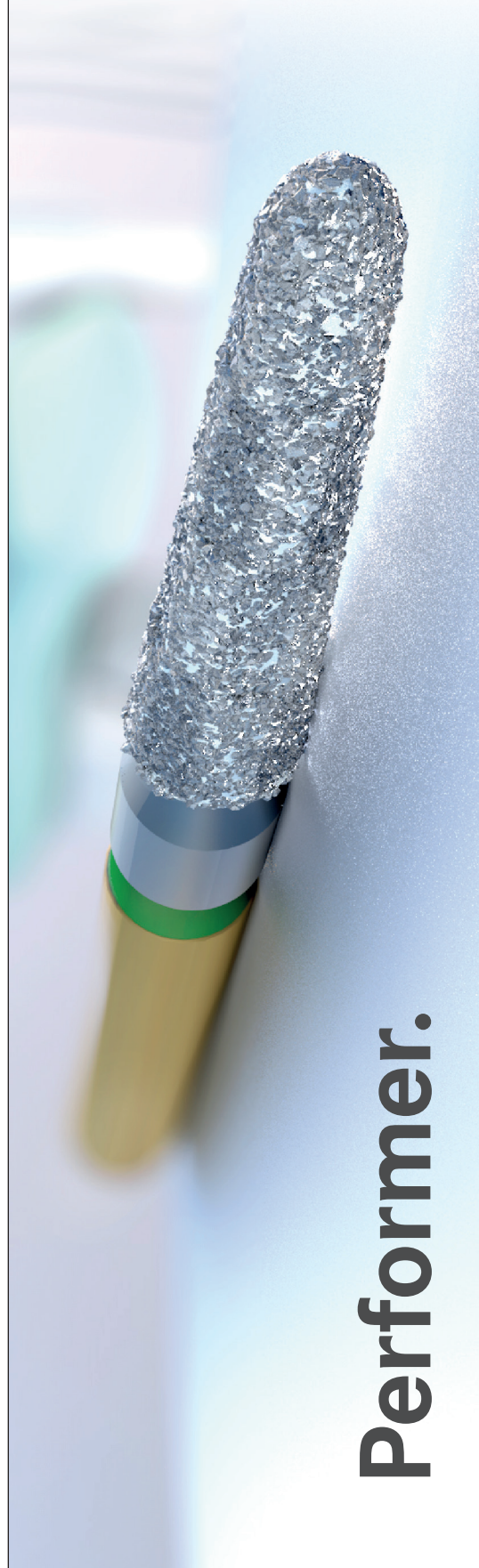
### Künstliche Intelligenz: Was ist das?

Der Begriff *künstliche Intelligenz* kam erstmals in den 50er-Jahren des letzten Jahrhunderts auf. Schon damals erzeugte die Idee, Maschinen zu ent-

wickeln, die in der Lage sind, Aufgaben zu übernehmen, die normalerweise nur von Menschen zu bewerkstelligen sind, Begeisterung – aber auch Abwehr. Grundlage ist die Entwicklung eines mathematischen Modells, die neuronale Einheit (Neural Unit), das inspiriert vom menschlichen Gehirn die Funktionsweise einer Nervenzelle nachahmt.<sup>17</sup> Kurz darauf erfolgte die Weiterentwicklung dieses Modells, indem einzelne neuronale Einheiten kombiniert wurden, um ein künstliches neuronales Netzwerk (Artificial Neural Network: ANN oder kurz NN) zu schaffen. Seit diesem Meilenstein in der KI-Forschung kam es immer wieder, auch getrieben durch überzogene Erwartungen und technische Limitationen (z.B. die Rechenleistung von Computern), zu Rückschlägen und einem Vertrauensverlust in die Leistungsfähigkeit neuronaler Netzwerke (sog. *AI Winter*). Aktuell befinden wir uns in einer Phase der KI-Forschung, in der die Erwartungen enorm hoch und die Verheißungen vielversprechend sind. Das gilt insbesondere deshalb, da aktuell drei Trends zu einer Gemengelage führen, die bessere Bedingungen als jemals zuvor in der Geschichte der KI-Forschung schafft.

- Die Datenexplosion im digitalen Zeitalter: Allein im Gesundheitssektor nimmt die erzeugte Datenmenge jährlich um 48 Prozent zu. Im Jahr 2020 sollen in etwa 2.300 Exabytes (eine Zahl mit 18 Nullen!) an gesundheitsbezogenen Daten existieren.<sup>21</sup>
- Die enorme Steigerung der Rechenkapazitäten durch Anwendung spezialisierter Chips (in der Regel Grafikkartenchips oder Weiterentwicklungen davon).
- Die Verbesserung von Algorithmen, die es ermöglichen, immer komplexere und tiefere Netzwerkarchitekturen – daher der Begriff *Deep Learning* – zu trainieren.<sup>13</sup>

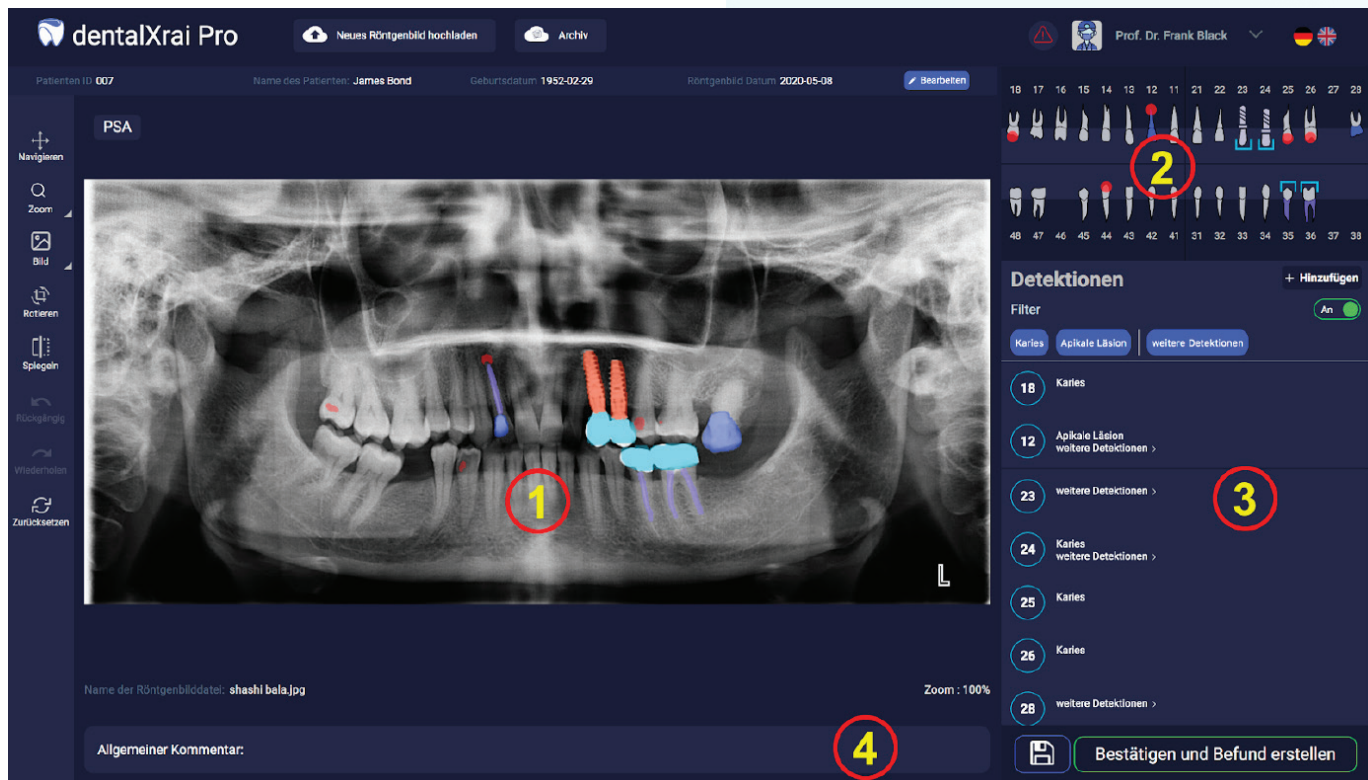
Um neuronale Netzwerke in nützliche Werkzeuge zu überführen, müssen diese mit Daten trainiert werden. Hierfür wird das neuronale Netzwerk wiederholt sowohl mit Daten als auch dem zu er-



# Performer.

64% unserer Diamant-Kunden setzen auf diese Spezialkräfte: Komet S-Diamanten. **Jetzt kennenlernen!**

[diamant-ist-komet.de](http://diamant-ist-komet.de)



**Abbildung 1:** Die Software dentalXrai Pro ist ein KI-basiertes Diagnoseunterstützungssystem für dentale Röntgenbilddaten. Die Analyseansicht der Software erweitert die Funktionen eines klassischen Bildbetrachtungssystems, indem automatisch erkannte Strukturen und Pathologien auf dem ① Röntgenbild, in einem ② Zahnschema und ③ in der Liste der Detektionen angezeigt werden. Das Speichern des Befundes ④ dient Archivierungszwecken und erlaubt den Austausch mit Patienten und Kollegen. Foto: © Dr. Krois

die zur Verfügung stehenden Eingangsdaten zu repräsentieren, um bestmögliche Vorhersagen für bisher nicht gesehene Daten zu treffen.

Eine besondere Form neuronaler Netzwerke findet Anwendung im maschinellen Sehen (*Computer Vision*). Aufgaben in diesem Feld sind unter anderem, Bilddaten zu klassifizieren oder Objekte in einem Bilddatensatz zu detektieren, um sie daraufhin zu klassifizieren. Für diese Aufgabe kommen sogenannte konvolutionäre neuronale Netzwerke (*Convolutional Neuronal Networks*) zur Anwendung. Sie besitzen eine besondere Eigenschaft, nämlich, dass die Netzwerkgewichte im Wesentlichen Bildfilter darstellen, die in der Lage sind, Farben, Kanten, Ecken, Rundungen, Strukturen und komplexere Formen zu erlernen. Kombiniert man diese Bildfilter mit Elementen eines klassischen neuronalen Netzwerks, ist es möglich, u. a. Bilder zu klassifizieren sowie Objekte wie zum Beispiel menschliche Gesichter auf Bildern oder in Videos zu erkennen sowie deren empathischen Ausdruck zu kategorisieren.<sup>13</sup>

## KI in der (Zahn-)Medizin

Techniken des maschinellen Lernens und im Speziellen des maschinellen Sehens wurden bisher erfolgreich in der Medizin, zum Beispiel der Ophthalmolo-

wartenden Ergebnis gefüttert. Das Ziel dieser speziellen Form des Lernens, dem sogenannten überwachten Lernen (*Supervised Learning*), ist es, über Iteration und Wiederholung das neuronale Netzwerk dazu zu bringen, (statistische) Muster und Strukturen in den Daten zu erkennen. Ist dieser Lernprozess erfolgreich, ist das neuronale Netzwerk in der Lage, für bisher nicht gesehene Daten Vorhersagen zu treffen.

### Neuronale Einheit

Um den Prozess des Trainings zu verstehen, muss man den grundlegenden Baustein des neuronalen Netzwerks, die neuronale Einheit, verstehen. Die neuronale Einheit ist ein mathematisches Modell, welches eine lineare Funktion mit einer nichtlinearen Funktion kombiniert. Die lineare Funktion besteht aus einer bestimmten Anzahl von Eingangswerten und entsprechenden Gewichten (in der klassischen Statistik würde man von Koeffizienten sprechen), die multi-

pliziert und dann aufsummiert werden. Das biologische Pendant hierzu sind der neuronale Zellkörper und die Dendriten (Zellfortsätze). Das Ergebnis dieser an sich sehr einfachen Berechnung wird daraufhin an eine nichtlineare Funktion weitergegeben, die diesen Wert transformiert. Hierzu eignet sich eine ganze Reihe von Funktionen, wie zum Beispiel eine Sigmoid-Funktion oder die ReLU-Funktion (Rectified Linear Unit). Das biologische Pendant hierzu sind das Axon und die Synapsen, die ein Signal in seiner Stärke modulieren oder es nur unter bestimmten Bedingungen weiterleiten. Die Besonderheit ist nun, dass eine ausreichend große Anzahl an neuronalen Einheiten, kombiniert in Form eines Netzwerks (meist in Form vieler Schichten), jeden noch so komplexen Zusammenhang von Eingangswerten abbilden kann.<sup>22</sup> Die Aufgabe des Trainingsprozesses ist, die freien Parameter und die Gewichte so lange iterativ anzupassen, bis das neuronale Netzwerk bestmöglich in die Lage versetzt wurde,

gie und Dermatologie, eingesetzt.<sup>1,5,6,16</sup> In diesen Fachgebieten konnten diese Techniken teilweise gleich gute oder sogar bessere Genauigkeiten realisieren als Experten des jeweiligen Faches. Die eingesetzten neuronale Netzwerke wurden teils auf mehreren Zehntausend Bildern trainiert; dabei wurden mitunter Zehn- oder Hunderttausende von Bildbewertungen vorgenommen (weil ein Bild durch mehrere Untersucher befundet wurde). Auch in der Radiologie, zum Beispiel zur Befundung von Lungenröntgenaufnahmen, werden diese Techniken mittlerweile angewandt. Neuronale Netzwerke sind besonders geeignet für eng definierte Spezialaufgaben. Das heißt umgekehrt, dass für jede Aufgabe ein spezialisiertes neuronales Netzwerk entwickelt werden muss. Um wirklich umfangreich Bildmaterial auf verschiedenste Pathologien hin

befunden zu können, sind daher verschiedenste neuronale Netzwerke und ein großer Befundungsaufwand notwendig. Sind diese neuronalen Netzwerke jedoch einmal trainiert, können schnell auch große Bilddatensätze analysiert werden.

Auch in der Zahnmedizin sind diese Techniken bereits Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen. Studien zeigen, dass neuronale Netzwerke in der Lage sind, bestimmte Pathologien zu erkennen. So konnten auf Einzelbildern und auch auf Panoramaschichtaufnahmen parodontaler Knochenabbau sowie auf letzteren Bildmaterialien auch apikale Läsionen mit relativ hoher Genauigkeit detektiert werden.<sup>3,10,11,15</sup> Auch wurden neuronale Netzwerke für die Detektion von Karies auf Bissflügelaufnahmen genutzt.<sup>14</sup> Die entwickelten neuronalen Netzwerke sind ungefähr ebenso genau

wie erfahrene Vergleichszahnärzte. Allerdings sind sie selten deutlich besser, und sicherlich sind zahnärztliche Spezialisten momentan mindestens genauso exakt oder sogar genauer als neuronale Netzwerke, wenn sie ausreichend Zeit für die Befundung haben und eine entsprechende Systematik an den Tag legen. Gerade die Zeitdauer, die zur Befundung zur Verfügung steht, hat einen dramatischen Einfluss auf die Genauigkeit; ebenso hat die Erfahrung eines Zahnarztes einen relevanten Einfluss hierauf.

Aufbauend auf diese vielversprechenden Forschungsergebnisse werden zunehmend KI-basierte Anwendungen für den Praktiker und die klinische Anwendungen verfügbar sein. So wurde an der Charité – Universitätsmedizin Berlin beispielsweise eine Software (dentalXrai Pro) entwickelt, die die De-

ANZEIGE



# Haben Sie gut geschlafen?

## Narval CC™

Die professionelle Lösung gegen Schnarchen und Atemaussetzer

- Zahnärztliche Unterkieferprotrusionsschiene
- Exakte Passgenauigkeit mit bestem Tragekomfort
- Sehr hohe Wirksamkeit
- Gefertigt mit modernster CAD/CAM Technologie



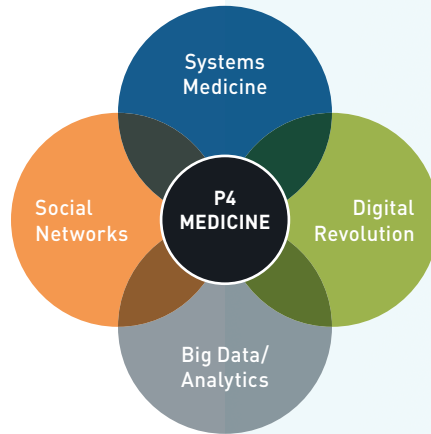
Jetzt informieren  
[L.ead.me/Narval](https://L.ead.me/Narval)

tektion und Klassifikation von Zähnen auf zahnmedizinischen Röntgenbildern, unter anderem Panoramaschichtaufnahmen, übernimmt.<sup>10,11</sup> Hierbei detektieren neuronale Netzwerke Zähne auf solchen Bildern und ordnen diesem mit hoher Genauigkeit den korrekten Zahnnamen zu. Eine solche Klassifikation ist Grundlage für die anschließende zahnbezogene Befundung und Dokumentation – und technisch nicht unbedingt weniger anspruchsvoll als die Detektion und Klassifikation von Pathologien (was die Unterschiede zwischen menschlichem und maschinellern Lernen und Erkennen verdeutlicht – Zahnärzte sehen die Zahnerkennung auf solchen Bildern sicher nur selten als Schwierigkeit an!). Auch Restaurationen und weitere – nicht natürliche – Strukturen können durch neuronale Netzwerke detektiert werden (Abb. 1). Die maschinell detektierten Befunde können vom Zahnarzt bei Bedarf ergänzt oder korrigiert werden. Der diagnostische Befund wird automatisch auf eine Zahnkarte übertragen und kann danach gespeichert oder ausgedruckt werden. Vorhandene Schnittstellen ermöglichen es, die Software mit anderen Softwaresystemen zu verbinden (z. B. Patientenverwaltungssystemen) und den Befund innerhalb der IT-Infrastruktur weiterzuverarbeiten. Insgesamt spart die Software dem Zahnarzt Zeit, sichert einen Qualitätsstandard und stellt Arzt und Patient ein farblich augmentiertes Röntgenbild als Gesprächsgrundlage zur Verfügung steht.

Zusammenfassend sind diese Techniken in der Zahnmedizin Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen. Erste Softwarelösungen für den klinischen Einsatz stehen kurz vor der Marktreife.

### Zukünftige Entwicklungen

Auch wenn sich momentan zahlreiche Fragen hinsichtlich der Robustheit und Generalisierbarkeit von KI-Modellen in der Medizin und Zahnmedizin stellen, und auch wenn die meisten Modelle bisher nicht besser, aber ähnlich genau wie menschliche Experten sind, lassen die Entwicklungen der letzten Jahre viel Potenzial erwarten. Insgesamt kumulie-



**Abbildung 2:** In der sogenannten „P4-Medizin“ kommen Daten aus sozialen Netzwerken, der Systemmedizin/-biologie sowie weitere große Datenquellen (Versicherungsdaten etc.; „Big Data“) zusammen und werden durch die explodierenden Möglichkeiten der Digitalisierung verstärkt.<sup>8</sup> Das Ergebnis ist eine präzisere und personalisierte Medizin, die sich der Prävention verstärkt widmet und dabei den Patienten miteinbezieht [Partizipation].<sup>9</sup>

Grafik: © Dr. Krois

ren zurzeit drei Trends, die die Medizin und Zahnmedizin womöglich verändern, wenn nicht sogar revolutionieren könnten (bei Letzterem ist allerdings Vorsicht angezeigt: Übertriebene Hoffnungen sind in der Vergangenheit nicht mit zeitnahen klinischen Verbesserungen belohnt worden; so sind in der Zahnmedizin die Früchte der „Omics“-Technologien bisher in der Routineversorgung nicht greifbar geworden).

Die drei Trends sind:

- Massiv gesteigerte technische Möglichkeiten, unter anderem durch den Einsatz immer leistungsfähiger werdender Prozessoren oder auch der Übertragung von Erkenntnissen aus anderen Bereichen der KI-Forschung (Techniken, Modellen und Algorithmen) in die Zahnmedizin.
- Umfänglichere Befunddaten: Große Datensätze, die verschiedene Diagnoseverfahren im selben Patienten

vereinen (z.B. Anamnesedaten, klinische Befunde, klassische Röntgenbilder, DVT-Bilder, Scans oder Fotos) und Patienten über längere Zeiträume nachverfolgen, erlauben ein bisher nicht mögliches „tiefes“ Verständnis des einzelnen Patienten; auch die genannten „Omics“-Technologien (Genomanalysen, Speichelproteomanalysen, Mikrobiomanalysen) werden zunehmend eine Rolle spielen, um ein besseres „Systemverständnis“ zu erlangen (Systembiologie).

- Explodierende Daten, die Patienten selbst generieren und für ihre Gesundheitsfürsorge zur Verfügung stellen (z. B. über „Wearables“, also tragbare Sensoren, oder routinemäßig aufgezeichnete Gesundheitsdaten, wie sie viele Telefone heute sammeln).<sup>9</sup>

Die Kombination dieser drei Trends soll helfen, das Zeitalter der sogenannten stratifizierten Medizin, in der Patienten in Risikogruppen wie hohes oder niedriges Kariesrisiko eingruppiert werden, zu überwinden. Stattdessen sollen Patientenprofile durch die Erfassung der genannten diversen Daten deutlich genauer werden und jeder einzelne Patient eine für ihn individualisierte Diagnostik und Therapie erfahren. Dies soll ermöglichen, Patienten sicherer, risikoärmer und erfolgreicher behandeln zu können (personalisierte bzw. Präzisionsmedizin) (Abb. 2). Ebenso wird es dem individuellen Patienten zukünftig vermehrt möglich sein, seinen Gesundheitszustand zu „erleben“ und zu steuern: Patienten werden zunehmend Teil der medizinischen Versorgung, statt diese rein passiv zu „empfangen“ (partizipatorische Medizin). Die neuen Technologien sollen zudem ermöglichen, Erkrankungen früher, teilweise vor ihrem „Ausbruch“, zu erkennen und zu verhindern – Präventive statt vor allem kurative Medizin: Die Zahnmedizin ist hier bereits Vorreiter!<sup>8,9</sup> KI wird zudem die Medizin dorthin bringen können, wo sie bisher nicht möglich ist. Durch Kostenreduktion sowie der Befähigung zur „Selbstdiagnose“ (mit allen Risiken!) oder der Diagnose durch Hilfspersonal wird eine basale medizinische Versorgung möglicher-

weise in ländlichen Arealen großer Flächenstaaten oder generell in unterversorgten Regionen gesichert werden können. Gerade dort, wo auf absehbare Zeit der Bedarf an Medizinern nicht gedeckt werden kann, könnten Techniken der KI Entlastung bringen und breiten Bevölkerungsschichten, die bisher gar nicht versorgt werden, einen initialen Zugang zu Versorgung ermöglichen. Bis dahin ist es allerdings noch ein weiter Weg – wie beschrieben, müssen die neuronalen Netzwerke besser, sicherer und generalisierbarer werden. Die Studien zu KI in der Medizin und Zahnmedizin sollten den Regeln der evidenzbasierten Medizin entsprechen.

### Zusammenfassung

Bildgebung ist aus der zahnmedizinischen Diagnostik nicht wegzudenken. Die Möglichkeiten, die sich aus der Digitalisierung und *künstlicher Intelligenz*

ergeben, werden auch in der Zahnmedizin Diagnoseassistenzsysteme entstehen lassen; diese werden zunehmend auch Therapieentscheidungen unterstützen. Die Zahnärztin bzw. der Zahnarzt werden jedoch weiterhin die Verantwortung tragen und demnach auch schlussendlich gemeinsam mit dem Patienten und Unterstützung durch KI diese Entscheidungen treffen müssen. Bei aller Begeisterung sind jedoch zurzeit noch viele Unwägbarkeiten und Unsicherheiten vorhanden, die überwunden werden müssen, bevor künstliche Intelligenz in die Routineversorgung einzieht. Langfristig können die besseren Möglichkeiten, zunehmend große Datenmengen sinnvoll zu verarbeiten, diagnostische und therapeutische Entscheidungen sicherer, zuverlässiger und wirksamer machen. Hierbei werden Techniken der KI (z. B. neuronale Netzwerke in der Bildanalytik) eine große Rolle spielen.

*Der vorliegende Beitrag ist eine eingekürzte und zugleich aktualisierte Version des Artikels „Künstliche Intelligenz zur Bildanalyse in der Zahnmedizin – Wunsch oder Wirklichkeit?“, der 2019 auf [www.zmk-aktuell.de](http://www.zmk-aktuell.de) erstveröffentlicht wurde.*

### INFORMATION ///

#### Prof. Dr. Falk Schwendicke, MDPH

Direktor, Abteilung für Orale Diagnostik, Digitale Zahnheilkunde und Versorgungsforschung  
DGZ-Spezialist für präventive und restaurative Zahnerhaltung  
CharitéCentrum 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Charité – Universitätsmedizin Berlin  
Abmannshauer Straße 4–6  
14197 Berlin  
Tel.: +49 30 450-662556  
falk.schwendicke@charite.de

#### Dr. Joachim Krois

Abteilung für Orale Diagnostik, Digitale Zahnheilkunde und Versorgungsforschung  
CharitéCentrum 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

Prof. Dr. Schwendicke  
Infos zum Autor



Literatur



ANZEIGE

**Euroseal® Valida** [www.euronda.de](http://www.euronda.de)  
**Erst 14 Tage kostenlos testen ...**



**Euronda | Pro System®**

**... und dann zusätzlich sparen und nur 16% MwSt. zahlen!** Nutzen Sie schnell noch die Vorteile aus dem Konjunkturpaket.