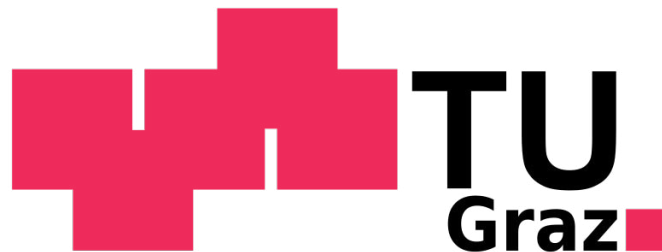


Alexander POHLODEK

Suche und Bewertung von Diagnoseverfahren für ausgewählte Dentalanwendungen

Masterarbeit



Institut für Medizintechnik
Technische Universität Graz
Kronesgasse 5, A - 8010 Graz
Vorstand: Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Rudolf Stollberger

Betreuer:
Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Rudolf Stollberger

Begutachter:
Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Rudolf Stollberger

Graz, September, 2011

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

(signature)

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich bei der Verfassung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Stollberger, für die unkomplizierte und konstruktive Kooperation und stets freundliche Unterstützung bei der fachgerechten Umsetzung der Arbeit, trotz großer örtlicher Distanz.

Einen großen Dank möchte ich Herrn Dr. Christoph Heinrich für die engagierte und lehrreiche Betreuung der Arbeit aussprechen. Die Zusammenarbeit stellte für mich nicht nur eine fachliche, sondern auch eine persönliche Erweiterung meiner bisherigen Lebenserfahrung dar.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und vor allem meiner Freundin Stefanie für die mentale Begleitung bedanken.

Kurzfassung:

Es sollen praxisrelevante Diagnoseverfahren für ausgewählte Dentalanwendungen erarbeitet und vorgeschlagen werden.

Ziel soll es sein, einen Überblick über mögliche, in die Zahnarztpraxis, insbesondere in zahntechnische Instrumente (z.B. Hand- und Winkelstücke) integrierbare, Diagnoseverfahren zu erhalten. Durch die Integration solcher Verfahren in Produkte werden die Anwender bei der Diagnose und/oder Behandlung unterstützt und die Kundenzufriedenheit bei Anwender und Patienten wesentlich erhöht. Die Funktionsweise der interessantesten Technologien, sowie die Vorteile bei Integration dieser Diagnoseverfahren in den Behandlungsablauf des Zahnarztes sollen aufgezeigt werden.

Anhand einer Produktsuche und systematischen Literaturrecherche werden die Diagnoselösungen und Diagnoseverfahren zu ausgewählten Anwendungsfeldern ermittelt und zusammengefasst. Die Bewertung der Diagnoseverfahren erfolgt nach festgelegten Kriterien und in zwei systematischen Teilschritten, einer Vorselektion und einer Detailbewertung.

Die für den Einsatz von Diagnoseverfahren vielversprechendsten Dentalanwendungen wurden durch die Recherche ermittelt. Jene Diagnoseverfahren, welche in den Zahnarztpraxen angewandt werden, bzw. eingesetzt werden können, sind in der Arbeit strukturiert angeführt. Die Bewertung der Anwendungen, die Vorselektion sowie die Detailbewertung werden in separaten Bewertungsmatrizen dargestellt.

Die vorliegende Arbeit ermöglicht einen Überblick über praxisrelevante Diagnoseverfahren in den ausgewählten Anwendungsfeldern und bietet eine nachvollziehbare Hilfestellung bei der Entscheidung zur Umsetzung der vielversprechendsten Verfahren in Dentalprodukte.

Schlüsselwörter:

Zahnheilkunde, Nutzwertanalyse, Paarvergleich, Karies, Zahnstein

Abstract:

A systematic search for practice-oriented diagnostic methods should be carried out. Through the assessment of the methods in the selected dental applications it should be possible to demonstrate the most interesting procedures.

The aim of the thesis is to give an overview of diagnostic methods, which are capable of being integrated in dental instruments, like (contra-angle) handpieces, in a dental practice. On the basis of the implementation of the methods in the products, the user can be supported in confirming his diagnosis and/or in performing the treatments. As a consequence the satisfaction of the user and customer can be substantially raised. Furthermore the functionality of the most interesting technologies, as well as the advantages by integration of the methods into the treatment procedure of the dentist should be shown.

Via the search of dental products and scientific literature the dental applications as well as the diagnostic methods are determined for the selected application fields and summarized. Criteria for the assessment of the applications and methods are defined and templates are provided for the evaluation. The assessment of the diagnostic methods is carried out according to specified criteria and two systematic partial steps, a preselection and a detailed assessment.

The most promising applications for the use of diagnostic methods were selected due to the search. Those diagnosis procedures which are or could be applied in dental offices are stated in the thesis. The assessment of the importance of the applications, as well as the results of the preselection and the detailed assessment are shown in separate matrices.

The present thesis permits an overview of diagnostic methods for selected dental applications and delivers a comprehensible assistance for the decision of the implementation of the most promising methods into dental products.

Key Words:

Dentistry, cost-utility analysis, pairwise comparison, dental caries, dental calculus

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung und Einleitung	10
1.1	Aufgabenstellung.....	10
1.2	Anwendungsfelder und Problemstellungen	11
1.2.1	Prophylaxe und Parodontologie	11
1.2.2	Restauration und Prothetik.....	14
1.2.3	Endodontie.....	18
2	Methoden	19
2.1	Projektstrukturplan.....	19
2.2	Aufstellung der Dentalanwendungen.....	20
2.3	Aufstellung der Diagnoseverfahren	21
2.3.1	Produktrecherche.....	21
2.3.2	Literaturrecherche.....	22
2.4	Bewertung der Dentalanwendungen	24
2.5	Bewertung der Diagnoseverfahren	25
2.5.1	Vorselektion der Diagnoseverfahren.....	25
2.5.2	Detailbewertung der Diagnoseverfahren.....	30
3	Ergebnisse.....	34
3.1	Ergebnisse der Produkt und Literaturrecherche	34
3.1.1	Prophylaxe und Parodontologie	34
3.1.2	Restauration und Prothetik.....	36
3.1.3	Endodontie.....	40
3.2	Aussichtsreiche Anwendungen für den Einsatz von Diagnoseverfahren.....	41
3.2.1	Prophylaxe und Parodontologie	42
3.2.2	Restauration und Prothetik.....	46
3.2.3	Endodontie.....	52

3.3	Aufstellung der Diagnoseverfahren	58
3.3.1	Prophylaxe und Parodontologie	59
3.3.2	Restauration und Prothetik.....	66
3.3.3	Endodontie.....	72
3.4	Bewertung der Anwendungen	76
3.5	Bewertung der Diagnoseverfahren	78
3.5.1	Vorselektion anhand eines Beispiels	78
3.5.2	Ergebnis der Vorselektion	79
3.5.3	Bewertungskriterien für die Detailbewertung.....	83
3.5.4	Detailbewertung	87
4	Diskussion	99
4.1	Umfang und Rahmen der Recherche	99
4.2	Methodik der Recherche	99
4.3	Methodik der Bewertung der Diagnoseverfahren und Anwendungen.....	100
4.3.1	Bewertungskriterien	100
4.3.2	Detailbewertung	103
4.4	Aussichtsreiche Diagnoseverfahren für Dentalanwendungen	104
4.4.1	Prophylaxe und Parodontologie	104
4.4.2	Restauration und Prothetik.....	106
4.4.3	Endodontie.....	109
4.5	Ergebnis der Detailbewertung	111
5	Schlussfolgerung	112
6	Literaturverzeichnis	113
7	Anhang	124

Symbole und Abkürzungen

ACIST	Alternating current impedance spectroscopy technique
ATP	Adenosintriphosphat
CAD	Computer-aided design
CAM	Computer-aided manufacturing
CEREC	Ceramic reconstruction
CI	Confidence interval
CRI	Color rendering index
CT	Computed tomography
DIFOTI	Digitale faseroptische Transillumination
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DVT	Digitale Volumentomographie (auch „Cone Beam CT“- CBCT)
ECM	Electrical caries monitor
FACE	Fluorescence-aided caries excavation
FOTI	Faseroptische Transillumination
HIV	Human immunodeficiency virus
HPV	Humane Papillomaviren
IDS	Internationale Dental-Schau
LIFEDT	Fluorescence evaluator for diagnosis and treatment
LUM	Lumineszenz
MRT	Magnetresonanztomographie
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OCT	Optical coherence tomography (Optische Kohärenztomographie)

PAD	Photo-activated disinfection
PCR	Polymerase chain reaction
PSI	Parodontaler Screening Index
PTR	Photothermische Radiometrie
QLF	Quantitative Licht-induzierte Fluoreszenz
RDA	Radioactive dentin abrasion
SAF	Self adjusting file
TACT	Tuned aperture computed tomography
UCD	Ultrasonic caries detectors
USP	Unique selling proposition (Alleinstellungsmerkmal)

1 Aufgabenstellung und Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Minimalinvasive und qualitativ hochwertige medizinische Behandlungen, sind großteils nur durch vorbereitende bzw. während der Behandlung unterstützende Diagnostik möglich. In dieser Arbeit sollen praxisrelevante Diagnoseverfahren für ausgewählte Dentalanwendungen erarbeitet und vorgeschlagen werden. Ziel der Arbeit soll es sein, einen Überblick über mögliche, in die Zahnarztpraxis, insbesondere in zahn-technische Instrumente (Turbinenbohrer, Hand- und Winkelstücke) integrierbare, Diagnoseverfahren zu erhalten. Durch die Integration solcher Verfahren in Produkte werden die Anwender bei der Diagnose und/oder Behandlung unterstützt und die Kundenzufriedenheit bei Anwender und Patienten wesentlich erhöht. Die Funktionsweise der interessantesten Technologien, sowie Behandlungs- und medizinischen Vorteile bei Integration der Diagnoseverfahren sollen aufgezeigt werden. Die Ergebnisdarstellung soll in Form einer Bewertungsmatrix erfolgen.

1.2 Anwendungsfelder und Problemstellungen

Die in dieser Arbeit bearbeiteten Anwendungsfelder in der Zahnheilkunde sind in Tabelle 1 aufgelistet und kurz zusammengefasst.

Tabelle 1: Ausgewählte Anwendungsfelder in der Zahnheilkunde [1].

Anwendungsfeld	Kurzbeschreibung
Prophylaxe	Vorbeugende Maßnahmen zur Verhütung von Krankheiten der Zähne und des Zahnhalteapparates, z.B. professionelle Zahnreinigung.
Parodontologie	Ursache, Diagnose und Behandlung des erkrankten Zahnfleisches.
Restauration	Wiederherstellungsmaßnahmen, z.B. Füllungen.
Prothetik	Zahnersatzkunde, funktionelles Wiederherstellen verlorener Zähne.
Endodontie	Wurzelkanalbehandlung: Entfernung der entzündeten oder infizierten Pulpa (auch Zahnmark, siehe Abbildung 1), Reinigung und Erweiterung des Wurzelkanals; anschließend Füllung und Abdichtung des entstandenen Hohlraumes.

Diese Anwendungsfelder werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

1.2.1 Prophylaxe und Parodontologie

Die Prophylaxe und Parodontologie wird ab sofort als ein eigenständiges Anwendungsfeld betrachtet.

Unter Zahnprophylaxe versteht man die Vorbeugung von Zahn- und Zahnbettterkrankungen (Karies und Parodontitiden bzw. Parodontopathien). Das Hauptziel ist die Erhaltung der Zahngesundheit, durch Behandlungsmaßnahmen, die sich gegen die bakterielle Kolonisierung richten, um infektiöse Plaque (Zahnbeläge) unter einem krankheitsauslösenden Schwellenwert zu halten [2], [3].

Man unterscheidet weiche und feste Zahnbeläge. Weiche Zahnbeläge setzen sich aus Speiserückständen, Mikroorganismen, Blutzellen, und abgestoßenen Zellen des Mundschleimhautepithels zusammen. Feste Zahnbeläge entstehen aus weicher Plaque, welche durch die Zufuhr von Mineralstoffen aus dem Speichel verhärtet und für die Zunge als raue Oberfläche fühlbar sind. Diese raue Oberfläche begünstigt weitere Plaqueentstehung, vor allem im Bereich der Ausführungsgänge der Speicheldrüsen. Bei festen Zahnbelägen unterscheidet man Zahnstein (Ablagerungen

über dem Zahnfleisch) und Konkremente (Ablagerungen unter dem Zahnfleisch), wie in Abbildung 1 ersichtlich ist [2], [4].

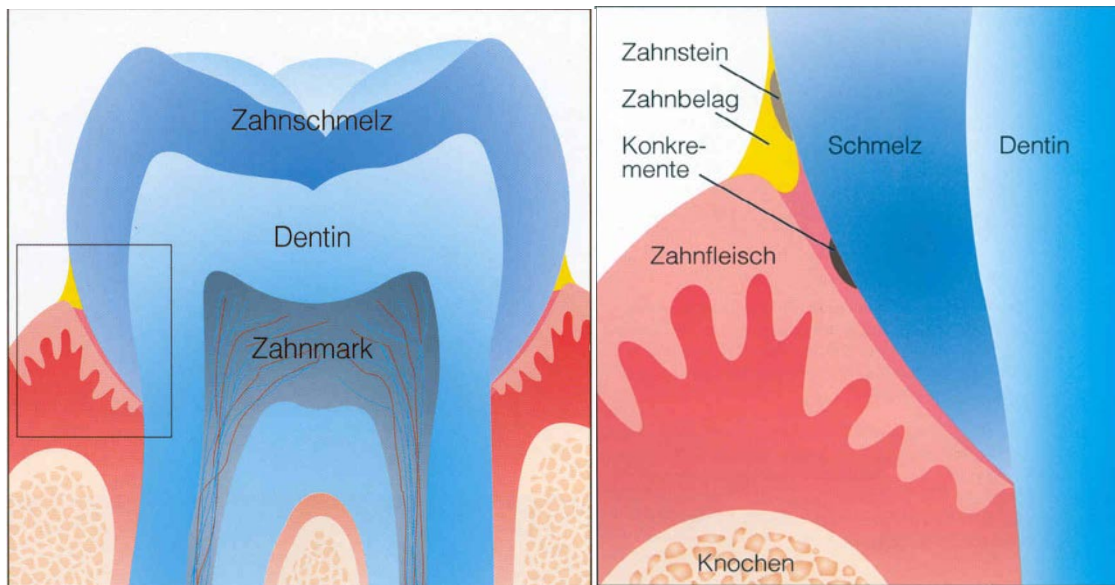


Abbildung 1: Zahnstein, Konkremente und Zahnbelag [2].

Plaque ist die Voraussetzung für die Entstehung von Karies (= Zerstörung der Zahnhartsubstanzen) und Parodontopathien (Gingivitis – Entzündliche Erkrankung der Zahnpulpa, Parodontitis – Die Wurzelspitze umgebende Läsion) [2].

Parodontologie (lat.: „para“ = neben; gr.: „odus“ = Zahn; gr.: „lógos“ = Wort, Lehre) ist die Lehre vom Zahnhalteapparat. Der Zahnhalteapparat fasst die Gewebe zusammen, die den Zahn umgeben und im Kiefer verankern. Er besteht aus der Alveole (knöchernes Zahnfach im Unter- und Oberkiefer), dem Zahnfleisch (Gingiva), der Wurzelhaut (Desmodont oder Periodontium; Gesamtheit der Fasern, mit denen der Zahn in der Alveole befestigt ist) und dem Wurzelzement (Cementum). Die Parodontologie befasst sich somit mit den Komponenten des Zahnes, die den Zahn im Kiefer halten (siehe Abbildung 2) [5], [6].

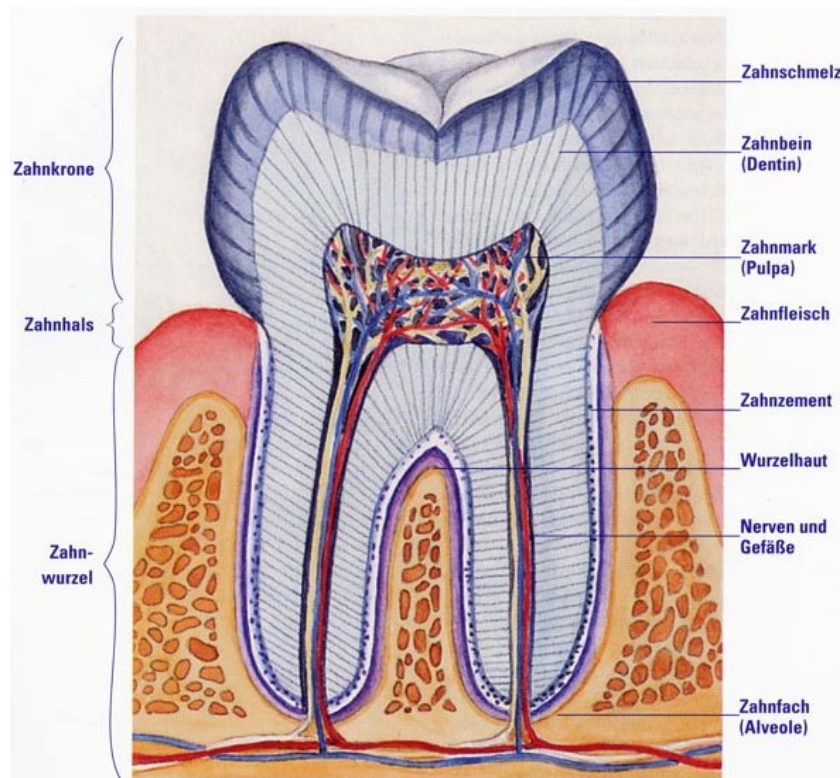


Abbildung 2: Alveole, Zahnfleisch, Wurzelhaut und Zahnzement bilden den Zahnhalteapparat [7].

Die Entzündung des Zahnhalteapparats (Parodontitis) gehört zu den häufigsten Erkrankungen des Menschen. Eine Parodontitis beginnt immer mit einer bakteriellen Zahnfleischentzündung (Gingivitis). Während gesundes Zahnfleisch die Zwischenräume zwischen den Zähnen vollständig ausfüllt, bei Berührung nicht blutet und die Zähne frei von Belag sind, ist erkranktes Zahnfleisch gerötet, blutet leicht bei Berührung und ist geschwollen (siehe Abbildung 3). Das empfindliche Zahnfleisch liegt nicht mehr straff am Zahn an und die Zähne sind mit bakteriellen und verfärbten Belägen behaftet. Eine unbehandelte Gingivitis kann zu einer Parodontitis führen, wodurch der Zahnhalteapparat geschädigt wird. Das Zahnfleisch ist gerötet und teilweise geschwollen, außerdem entstehen vertiefte Zahnfleischtaschen. Die Zähne sind belegt, gelockert und der knöcherne Unterbau ist zum Teil verlorengegangen. Durch diese chronische Entzündung wird der Kieferknochen zerstört, wodurch es bei fortgeschrittener Erkrankung zum Zahnverlust kommt [6].



Abbildung 3: Gesundes Zahnfleisch (links); Entzündetes Zahnfleisch (Gingivitis, Mitte); Entzündeter Zahnhalteapparat (Parodontitis, rechts) [6].

Die Therapie besteht darin, den Entzündungszustand des Zahnfleisches und des Zahnhalteapparates zu beseitigen und Plaque und Zahnstein, sowie entzündungsfördernde Faktoren zu entfernen [8].

1.2.2 Restauration und Prothetik

Auch die beiden Anwendungsfelder Restauration und Prothetik werden als ein gemeinsames Anwendungsfeld zusammengefasst.

In der Restauration steht die Kariestherapie im Vordergrund. Sie umfasst funktionelle und ästhetische Wiederherstellungsmaßnahmen des Zahnes, z.B. durch Füllungen. In der Prothetik, der Zahnersatzkunde, werden verlorengegangene Zähne funktionell wiederhergestellt. Neben der Beseitigung von Schmerzen beinhaltet sie die Rekonstruktion von morphologischen Strukturen und funktioneller Merkmale mittels prothetischer Behandlungsmittel, wie Kronen und Brücken oder Prothesen [9].

Da Karies die häufigste Erkrankung der Zahnhartsubstanzen ist, wird in weiterer Folge genauer darauf eingegangen [10].

1.2.2.1 Karies

Karies (lateinisch „Morschsein“ und „Fäulnis“) ist ein akuter oder chronischer Zerfall der harten Substanz (Zahnschmelz und Dentin). Kariesbakterien zerstören dabei die Zahnhartsubstanz durch chemische Entkalkungs- und Auflösungsprozesse [11].

Zahnkaries entsteht nur dann, wenn die vier Faktoren Zähne (Wirt), Mikroorganismen (z.B. *Streptococcus mutans*), Nahrung für die Mikroorganismen (Substrat) und Zeit zusammen vorliegen (Abbildung 4) [12].

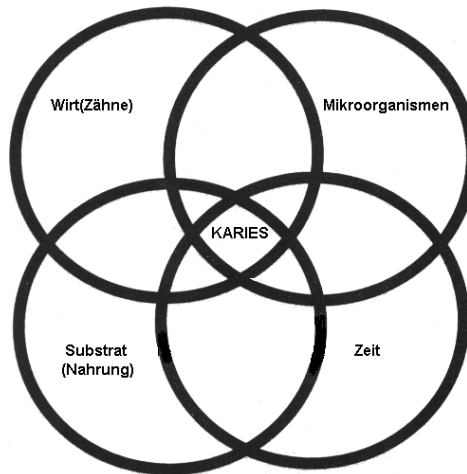


Abbildung 4: Die vier Voraussetzungen zur Entstehung von Karies [12].

Die Bakterien in den weichen Zahnbelägen (Plaque) bilden als Stoffwechselendprodukt Säure, durch die Kalziumphosphat aus dem Zahnschmelz herausgelöst wird und der pH-Wert in den lokalisierten Schichten sinkt. In der Regel verdünnt und neutralisiert der Speichel die Säure in der Mundhöhle. In der Folge neutralisiert sich der pH-Wert, die Plaqueschicht ist mit Kalzium- und Phosphationen übersättigt, und es findet eine umgekehrte Ionenbewegung zurück in den Schmelz statt (Remineralisation). Erst wenn die Plaque lange Zeit am Zahn haftet und keine Neutralisation durch den Speichel mehr stattfinden kann, überwiegt die Demineralisation und es entsteht ein Defekt (Läsion), da der geschwächte Zahnschmelz bröckelt. Die Karies verursachenden und Säure bildenden Bakterien können nun tiefer liegende Anteile der Zahnhartsubstanzen demineralisieren. Die Karies dringt auf diese Weise vom Zahnschmelz bis ins Dentin vor. Die Säure und die Giftstoffe (Toxine) der Bakterien können dann bei einer tiefen Dentinkaries zu einer Entzündung der Pulpa (Pulpitis) führen. Durch die Einlagerung von Fluoridionen kann die Säurelöslichkeit des Zahnschmelzes reduziert werden [11], [12].

Karieseinteilung

Primär wird Karies aufgrund von Tiefe und Lokalisation eingeteilt.

Bei Kindern kann außerdem die sogenannte „Kleinkindkaries“ oder „Fläschchenkaries“ (auch „Nursing-Bottle-Syndrom“ oder „Early Childhood Caries“) an den Milchzähnen auftreten, und ist vor allem auf den Konsum von kohlenhydratreichen Getränken, durch häufiges Flaschentrinken, zurückzuführen [13], [10].

Eine Möglichkeit der Kariesunterteilung ist jene nach Ausmaß des kariösen Schadens (kariöse Läsion), wie sie in Tabelle 2 zusammengefasst wird. Befindet sich die Karies noch innerhalb des Zahnschmelzes („Schmelzkaries“), spricht man von „Caries initialis“ bzw. „Caries superficialis“. Ist hingegen Dentin von Kariesbefall („Dentinkaries“) betroffen, handelt es sich entsprechend der Tiefe um „Caries media“, bzw. „Caries profunda“. Die „Caries profunda complicata“ ist bereits in die Zahnwurzel („Wurzelkaries“) vorgedrungen [11], [14].

Tabelle 2: Kariesunterteilung nach fortschreitender Tiefe [11], [14].

Kariesart	Beschreibung
Caries initialis	Demineralisation ohne Strukturdefekt. Das Stadium kann durch Prophylaxemaßnahmen (Fluoridierung, gesteigerte Mundhygiene, etc.) noch umgekehrt werden.
Caries superficialis	Wegen Strukturdefekt, aufgrund von Mineralverlust, nicht mehr umkehrbar. Plaque ist hier ständig vorhanden und durch Bakterien gebildete Säure kann durch Speichel nicht neutralisiert werden. Dadurch tritt weiterer Mineralverlust auf, jedoch noch innerhalb des Zahnschmelzes.
Caries media	Durch die Dentinkanäle breiten sich Bakterien breitflächig aus, wodurch die Karies schneller fortschreitet als im Schmelz. Unter noch fast intakter Schmelzoberfläche kann somit erheblich fortgeschrittener Dentinkaries eine Unterhöhlung verursachen.
Caries profunda	Karies ist bis in die pulpanahen Dentinschichten vorgedrungen (Kariesläsion über 2/3 der Dentinschicht in Richtung Pulpa).
Caries profunda complicata	Die Karies hat zur Eröffnung der Pulpenhöhle geführt.

In Abbildung 5 werden die beschriebenen Kariesstadien nach fortschreitender Tiefe veranschaulicht.

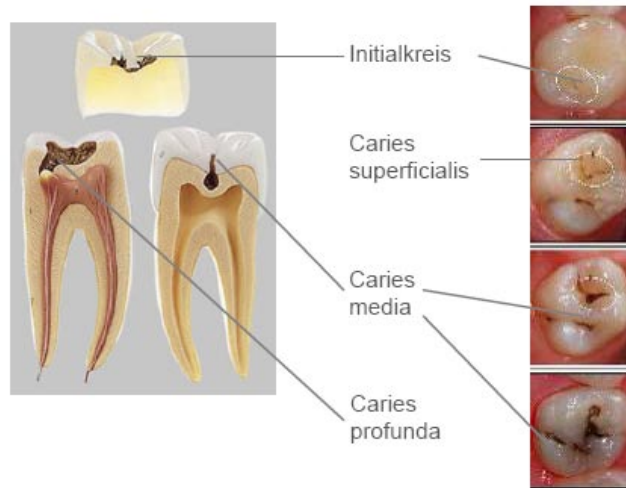


Abbildung 5: Darstellung von Initialkaries, Caries superficialis, Caries media und Caries profunda [11].

Häufig wird Karies auch nach Lokalisation unterteilt, wobei bevorzugte Orte die sogenannten Kariesprädispositionsstellen sind. Das sind jene Bereiche des Zahnes, die durch ihre Morphologie und Lage gute Retentionsmöglichkeiten für Speisereste und Plaque bieten. Man unterscheidet natürliche und künstliche Prädispositionsstellen. [12]

Karies an natürlichen Prädispositionsstellen sind Grübchen- bzw. Fissurenkaries, Glattflächenkaries, Okklusalkaries (Kauflächenkaries), Approximal- bzw. Interdentalkaries (Zahnseitenflächen bzw. Zahnflächen im Kontaktbereich zum Nachbarzahn) und Zahnhals- bzw. Wurzelkaries (siehe Abbildung 6) [10], [11].

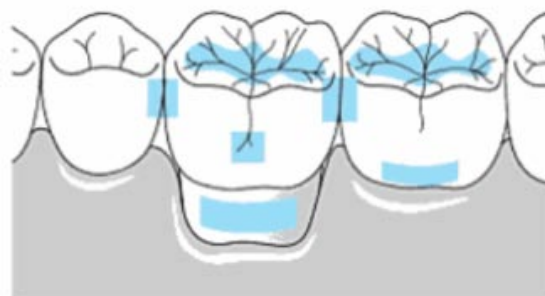


Abbildung 6: Besonders kariesgefährdete Bereiche (Kariesprädispositionsstellen) [10].

Bei künstlichen Prädispositionsstellen unterscheidet man zwischen Karies an Kronen- und Füllungsrandern und Karies unter Füllungen. Das erneute Entstehen von Karies an einem bereits behandelten Zahn wird als „Sekundärkaries“ bezeichnet (z.B. an einem schadhafte Füllungsrand). Im Unterschied dazu versteht man unter Kariesrezidiv das erneute Aufflammen einer nicht vollständig entfernten Karies [11].

1.2.3 Endodontie

Die Endodontie (auch Endodontologie) ist ein Spezialgebiet der Zahnerhaltungskunde und befasst sich mit der Behandlung des Inneren des Zahns, wobei das Ziel die Erhaltung des Eigenzahns ist [15].

Endodontische Behandlungen werden nötig, wenn die Pulpa durch das Eindringen von Bakterien und Viren infiziert wird, bzw. sich entzündet (Pulpitis) oder sie sogar zerstört wird (Pulpanekrose). Ursachen können tiefe Karies, wiederholte Behandlungen am Zahn, Zahn-/Wurzelriss, oder Verletzungen nach einem Unfall sein. Dabei können Schmerzen, verlängerte Kalt/Heiß-Empfindlichkeit, Zahnkronenverfärbungen, Schwellungen und eventuell empfindliches Zahnfleisch auftreten [16].

Die Hauptaufgaben des Arztes in der Endodontie betreffen die möglichst vollständige Entfernung des infizierten Gewebes und der Bakterien aus dem Wurzelkanal, sowie die Desinfektion des Kanalsystems. Durch die von Zahn zu Zahn verschiedenartigen Kanalkrümmungen werden endodontische Eingriffe erschwert, da visuelle Sichtkontrollen in der Regel nicht möglich sind. Mögliche Komplikationen bei der Wurzelkanalbehandlung sind:

- Unzugängliche Wurzelkanalabschnitte:
 - Verlegung des Kanallumens durch „Dentikel“ (=Verkalkungen des Pulpengewebes) oder starke Krümmung der Wurzel
- Abgebrochene Instrumente im Wurzelkanal
- Via falsa (»falscher Weg«):
 - Perforation des Wurzelkanals (vom Arzt verursachte, ungewollte Verbindung zum Zahnfach)
- Überfüllung des Wurzelkanals (Füllung tritt über die Wurzelspitze aus)
- Unterfüllung des Wurzelkanals (Verbleiben von Bakterien im Wurzelkanal)
- Überinstrumentierung - eine zusätzliche Infektion in der Umgebung der Wurzelspitze (durch die Bakterien, die durch die Aufbereitung über die Wurzelspitze hinaus transportiert werden)
- Wurzelbruch [16]

2 Methoden

2.1 Projektstrukturplan

Abbildung 7 zeigt den Projektstrukturplan der vorliegenden Arbeit.

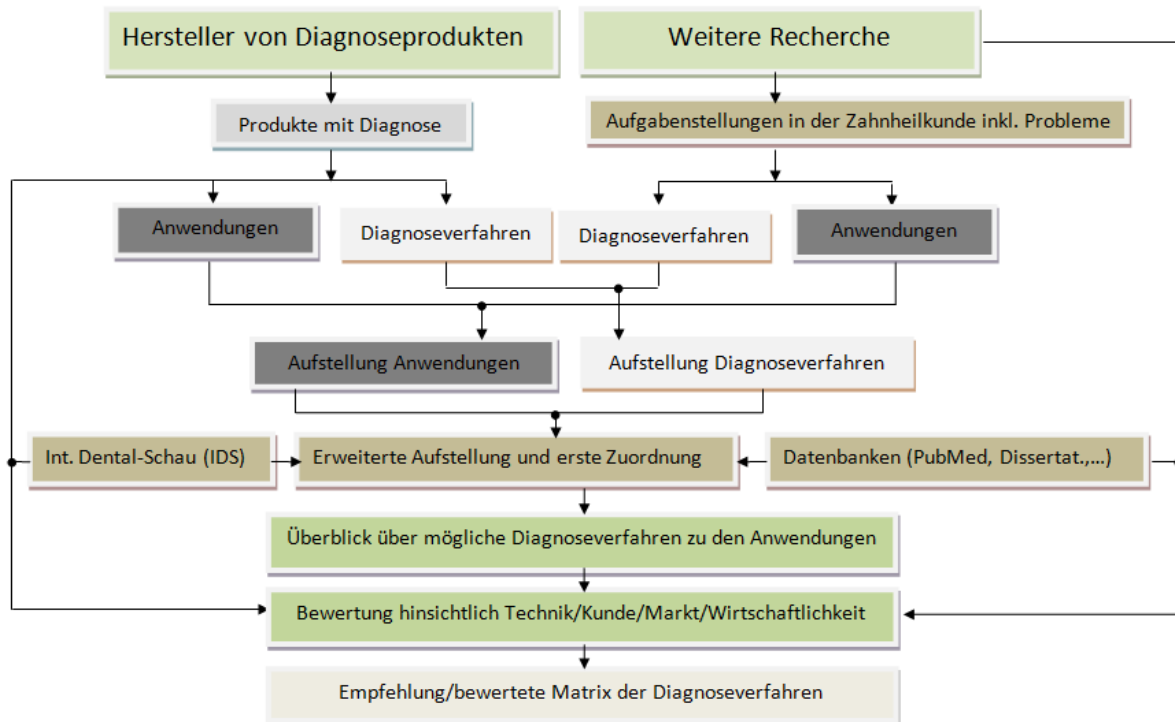


Abbildung 7: Projektstrukturplan

Die Recherche nach Dentalanwendungen und Diagnoseverfahren erfolgt zunächst getrennt. Über die Hersteller von Diagnoseprodukten werden die zugrunde liegenden Diagnoseverfahren bestimmt, sowie die Anwendungen definiert. Durch die weitere Recherche (z.B. Fachliteratur, Webseiten von Zahnärzten, etc.) können die Aufgabenstellungen und Probleme in den Anwendungsfeldern dargelegt und dadurch weitere Anwendungen und Diagnoseverfahren bestimmt werden.

Die gesammelten Ergebnisse werden in einer Aufstellung zusammengefasst. So werden für jedes Anwendungsfeld sowohl die Anwendungen aufgelistet, als auch getrennt dazu die in den Anwendungsfeldern eingesetzten Diagnoseverfahren aufgestellt. Durch die weitere Produktrecherche auf der Internationalen Dental-Schau, sowie einer gezielten Literatursuche nach Diagnoseverfahren in Online-Datenbanken wird die Recherche vervollständigt. Es erfolgt eine erweiterte Aufstellung der Verfahren und Anwendungen, sowie eine erste Zuordnung. Dadurch wird ein Überblick über

die möglichen Diagnoseverfahren für die Dentalanwendungen geschaffen. Die Verfahren werden hinsichtlich Technik, Kunde, Wirtschaftlichkeit und Markt beurteilt und das Ergebnis in Form einer Bewertungsmatrix dargestellt.

2.2 Aufstellung der Dentalanwendungen

Mit Hilfe des Programms MindManager (Mindjet GmbH, Alzenau, Deutschland) wird für jedes Anwendungsfeld eine sogenannte MindMap erstellt. Die Anwendungen werden in Form von Zweigen dargestellt, welche in einem Unterzweig kurz beschrieben werden (siehe Abbildung 8).

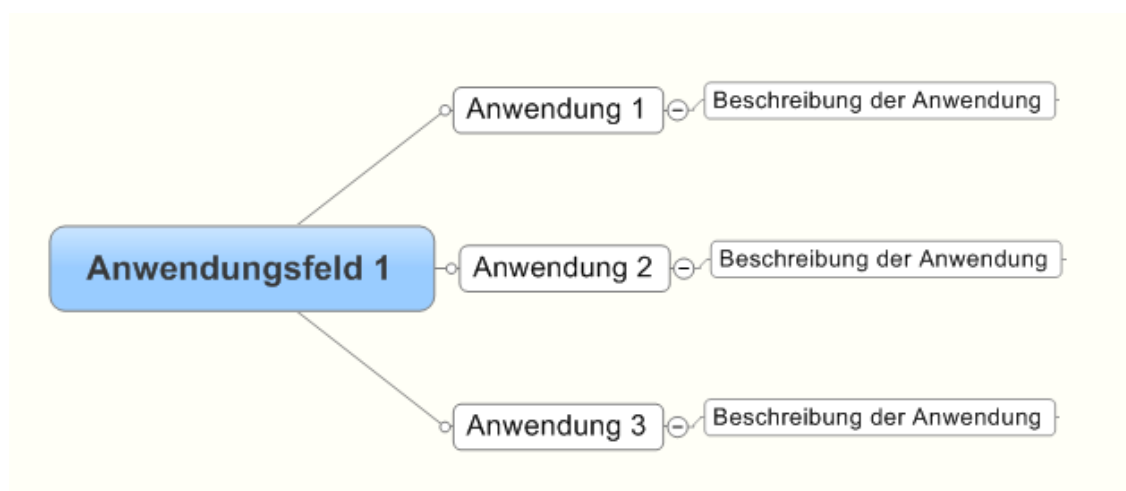


Abbildung 8: Methodik der Beschreibung der Anwendungen in den Anwendungsfeldern

Die Anwendungen werden durch die Produktrecherche bzw. durch die weitere Recherche (z.B. Fachliteratur, Zahnarzt-Homepages, etc.) gesammelt.

Nach der Aufstellung der Dentalanwendungen zu jedem Anwendungsfeld, werden die interessantesten Anwendungen für den Einsatz von Diagnoseverfahren selektiert. Interessante Anwendungen kennzeichnen sich z.B. dadurch, dass bereits Diagnoseprodukte eingesetzt werden. Noch interessanter sind jedoch Anwendungen, für die eine Diagnosestellung von Vorteil ist, aber noch wenig bzw. noch keine Diagnoseprodukte vorhanden sind. So sollen neue, innovative Diagnoseprodukte entwickelt werden.

Die Darstellung erfolgt in den angefertigten MindMaps, wobei die interessanten Anwendungen hervorgehoben und kurz beschrieben werden. Die Selektion dient als Grundlage für die weitere Literaturrecherche nach Diagnoseverfahren.

2.3 Aufstellung der Diagnoseverfahren

Die Aufstellung der Diagnoseverfahren erfolgt analog zu Kapitel 2.2. Dabei werden die Ergebnisse der Produkt- und Literaturrecherche in einer MindMap aufbereitet. Für jedes Anwendungsfeld wird eine eigene MindMap in Form einer Baumstruktur erstellt (siehe Abbildung 9). Die Zweige werden von den Diagnosefeldern (z.B. optische Verfahren) gebildet, die weiter in die einzelnen Diagnoseverfahren (z.B. Fluoreszenzverfahren) aufgespalten werden. Die Verfahren werden kurz beschrieben und die möglichen Anwendungen im jeweiligen Anwendungsfeld aufgeführt. Für jedes gefundene Verfahren wird mindestens eine Quelle (z.B. Produkt, Journal, etc.) angegeben.

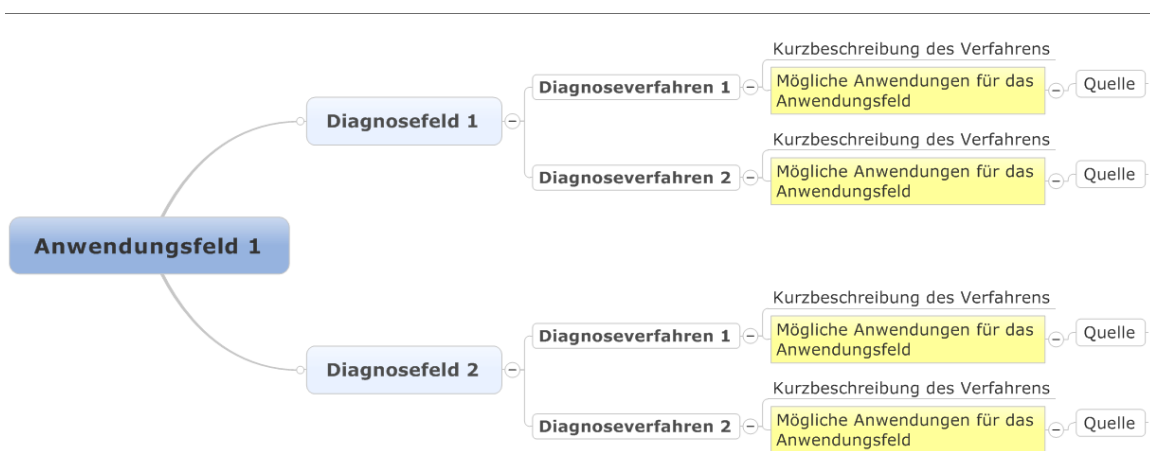


Abbildung 9: Methodik der Aufbereitung der Diagnoseverfahren

2.3.1 Produktrecherche

Ziel der Produktrecherche ist es, einen Überblick über die in der Praxis eingesetzten Diagnoseverfahren in den ausgewählten Anwendungsfeldern zu erhalten. Die Recherche erfolgt auf Dentalprodukt-Webseiten und ist noch nicht auf spezielle Dentalanwendungen ausgerichtet.

Für die Produktrecherche werden folgende Quellen verwendet (siehe Tabelle 3):

Tabelle 3: Quellen für die Produktrecherche

Recherchequelle	Beschreibung
Dental Product Shopper	„Dental Product Shopper“ ist eine Internetplattform für zahnmedizinische Produkte. Es werden Produktbeurteilungen und -informationen von Zahnärzten bereitgestellt. Diese Leistungen erfolgen ohne Bezahlung, weder von „Dental Product Shopper“ noch von den Herstellern. Die

	Recherche auf der Internetseite erfolgt in der Kategorie „Diagnostics/Diagnostics Products“. [17]
Dentalcompare	Dentalcompare ist eine objektive Online-Quelle, welche den Vergleich von Dentalprodukten ermöglicht. Die Produktrecherche erfolgt im Verzeichnis „Dental Product Directory/Restorative Dentistry/Dental Software and Diagnostics“. [18]
Internationale Dental Schau (IDS)	Die internationale Dentalmesse, welche alle zwei Jahre in Köln stattfindet, wird zur weiteren Produkt- und Hersteller-suche verwendet.
Homepage von Dental-firmen	Die durch die Recherche bekannt gewordenen Anbieter von Diagnoseprodukten werden gezielt in die weitere Suche nach Diagnoseverfahren mit einbezogen.

2.3.2 Literaturrecherche

Aus den aussichtsreichsten Anwendungen für den Einsatz von Diagnoseverfahren ergeben sich für jedes Anwendungsfeld die Suchthematiken für die weitere Online-Literaturrecherche. Als Suchdatenbanken werden in erster Linie „PubMed“ sowie die Dissertationsdatenbank „Dissonline“ gewählt. Für die teilweise weitere Recherche, z.B. zur Online-Volltextsuche von gefundenen Artikeln, wird die wissenschaftliche Suchmaschine Scirus sowie Google.scholar bzw. das Online-Verzeichnis von Journalen verwendet.

Die Keywords werden in der Dissertationsdatenbank in Englisch und Deutsch eingegeben. Bei der PubMed-Suche werden ausschließlich englische Suchbegriffe verwendet. Eine Auflistung der Suchthematiken, der verwendeten Keywords und deren Kombinationen ist im Kapitel 3.1 auf Seite 34 zu finden.

Bei der Suche werden zwei Strategien verfolgt. Zum einen wird allgemein nach Diagnoseverfahren für die jeweiligen Anwendungen gesucht. Die dadurch (z.B. durch Reviewartikel) und durch die Produktrecherche gewonnenen Diagnoseverfahren werden in Kombination mit den Anwendungen verknüpft. Dadurch werden nähere Informationen zu den Verfahren gewonnen und gegebenenfalls weitere Verfahren gefunden. Die Ergebnisse werden mit Hilfe des Programms MindManager gesammelt und aufbereitet. Für jede Suchthematik (z.B. Kariesdiagnose) werden nach dem Prinzip der Baumstruktur Zweige für die PubMed-Suche sowie für die Dissertations-Suche erstellt (siehe Abbildung 10). Jeder Zweig enthält die verwendete Kombination der Keywords sowie die Anzahl der aufgelisteten Ergebnisse der Suche. Wenn in

den Titeln oder Abstracts bzw. Zusammenfassungen der Artikel praxisrelevante Diagnoseverfahren aufscheinen (außer Verfahren, die im Vorfeld ausgeschlossen werden), werden sie in die Liste aufgenommen und die Anzahl der Treffer notiert. Außerdem wird unterschieden, ob der relevante Treffer die gesuchte Kombination behandelt (Treffer für Suche) oder für andere Fragestellungen des Suchfeldes interessant erscheint (Treffer für Suchfeld). Die zusätzliche Dokumentation von Treffern für das Suchfeld soll der Unterstützung der weiteren Recherche dienen. Jeder Artikel wird nachvollziehbar zitiert (zumindest Autor, Titel, Erscheinungsjahr) und der Link der Online-Quelle angefügt, um bei Bedarf den Volltext bzw. das Abstract lesen zu können. Wenn der Volltext der Artikel einsehbar ist, wird das Feld mit einem verriegelten Schloss versehen bzw. rot hinterlegt, ansonsten mit einem geöffneten Schloss und grün markiert. Zudem werden zur besseren Übersicht für jeden Artikel die behandelte(n) Anwendung(en) und die dazu beschriebenen Diagnoseverfahren angeführt.

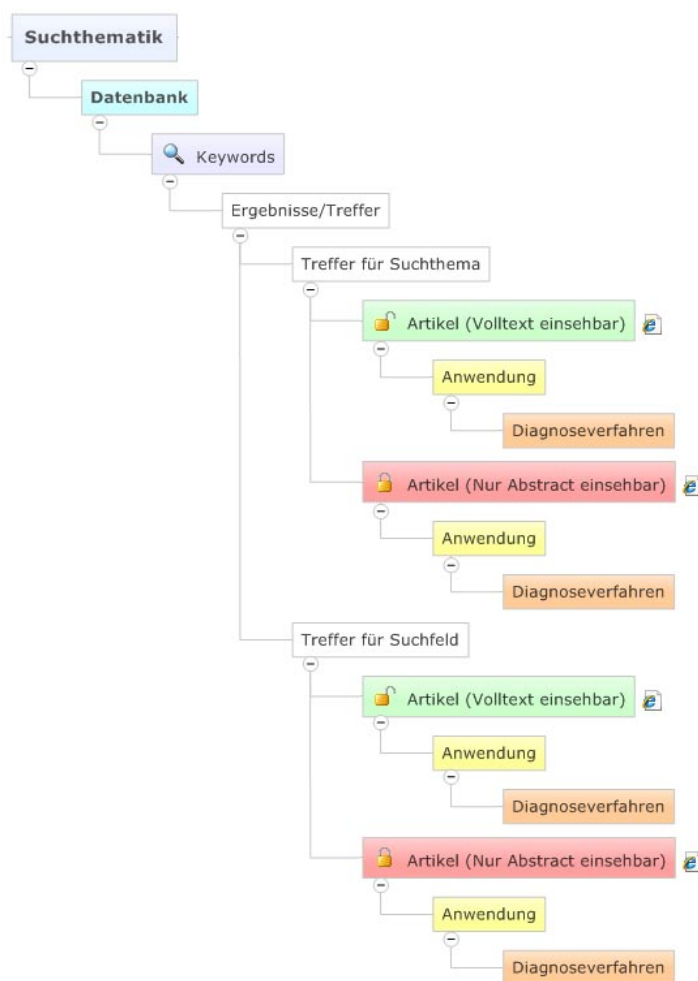


Abbildung 10: Methodik der Ergebnisdokumentation der Literaturrecherche

Redundante Treffer verschiedener Suchanfragen werden auch dokumentiert, um sicherzustellen, dass keine interessanten Artikel bei der Suche vergessen werden.

Ausschlusskriterien der Suche sind Röntgenverfahren, Artikel ohne Abstract, deren Volltext auch nicht online verfügbar ist, Verfahren für die Forschung (z.B. μ CT, Elektronenmikroskop, etc.) und nicht deutsch- oder englischsprachige Artikel.

2.4 Bewertung der Dentalanwendungen

Die aussichtsreichen Dentalanwendungen für Diagnose sind für Hersteller von Diagnoseprodukten von unterschiedlicher Bedeutung. Aus diesem Grund werden diese Anwendungen explizit bewertet. Produziert ein Hersteller bereits Dentalprodukte für eine Anwendung, z.B. für den therapeutischen Einsatz, so kann die Integration eines Diagnoseverfahrens in das bestehende Produkt von Nutzen sein. Dadurch können z.B. Diagnose und Therapie, während der Behandlung, mit einem Gerät kombiniert werden. Dieser Aspekt fließt in das Bewertungskriterium „Wichtigkeit der Integration in ein Produkt (W2)“ ein. Erscheint es jedoch nicht sinnvoll/möglich, ein Produkt mit einem Diagnoseverfahren zu kombinieren, so kann ein eigenständiges Diagnoseprodukt von Vorteil sein (Wichtigkeit eines eigenständigen Produkts – W1).

Die Bewertung für beide Kriterien erfolgt von 0 (nicht interessant) bis 5 (sehr interessant). Wenn für eine Hauptanwendung (z.B. Kavitätenpräparation) mehrere Teilanwendungen vorhanden sind (z.B. Bestimmung der Restdentindicke; Unterstützung der Kariesdiagnose), ist es ausreichend, nur die Teilanwendungen zu bewerten (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Bewertung der Anwendung bzw. dessen Teilanwendungen nach zwei Kriterien

Bewertung der Anwendungen	Wichtigkeit eines eigenständigen Produkts (W1)	Wichtigkeit der Integration in ein Produkt (W2)
Thema	Bewertung (0-5)	Bewertung (0-5)
Anwendung 1		
Anwendung 2		
*Teilanwendung 1		
*Teilanwendung 2		

Die Ergebnisse der Bewertung der Anwendungen fließen als Gewichtungsfaktoren W1 und W2 in die Vorselektion der Diagnoseverfahren ein.

2.5 Bewertung der Diagnoseverfahren

Die Bewertung der Diagnoseverfahren erfolgt anhand von zwei Teilschritten, der Vorselektion und der Detailbewertung. Die Vorselektion ist ein in der Praxis nötiger Schritt, um die in der Recherche gefundenen Verfahren vorab schnell und systematisch zu untersuchen, um in weiterer Folge nur die aussichtsreichsten Verfahren im Detail zu bewerten.

2.5.1 Vorselektion der Diagnoseverfahren

Die Vorselektion der Diagnoseverfahren dient der Ermittlung der aussichtsreichsten Verfahren für die Detailbewertung. Da die Vorselektion ein entscheidender Schritt der Bewertung ist, ist eine systematische und transparente Vorgehensweise nötig. In Anlehnung an die Nutzwertanalyse (siehe 2.5.2.1, Seite 30), anhand dessen die nachfolgende Detailbewertung durchgeführt wird, wird ein ähnliches, heuristisches Verfahren entwickelt, das speziell dem praktischen Einsatz dienen soll.

Für jede Anwendung werden dazu in einer Tabelle die durch die Recherche ermittelten Diagnoseverfahren aufgelistet (siehe Tabelle 5). Dabei wird in extra Spalten gekennzeichnet, ob es für das Verfahren bereits ein Produkt gibt und/oder dessen Verwendung durch wissenschaftliche Literatur belegt werden kann. Jedes der Verfahren wird anhand von drei Kriterien entsprechend einer Skala von 0 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) bewertet:

- Allgemeine Bewertung
- Innovationsgrad
- Integration in Produkte

Bei der allgemeinen Bewertung wird eingeschätzt, wie effizient die jeweilige Aufgabenstellung durch die Verwendung des Diagnoseverfahrens gelöst werden kann. Dabei spielt das Nutzen/Aufwand Verhältnis der praktischen Umsetzung eine wesentliche Rolle.

Die interessantesten Verfahren können somit am höchsten bewertet werden und umgekehrt.

Tabelle 5: Matrix zur Vorselektion der Diagnoseverfahren

Anwendungsfeld 1		Grundsätzliche Bewertung	Innovationsgrad	Integrierbarkeit in Produkte	W/1	W/2	Ergebnis 1	Ergebnis 2
Produkt	Literatur	Bewertung von 0 (uninteressant) bis 5 (sehr interessant)	Bewertung von 0 (veraltet) bis 5 (innovativ)	Bewertung von 0 (nicht möglich) bis 5 (sehr gut möglich)	0-5	0-5	0-50	0-75
	Anwendung 1							
	Diagnosegruppe 1							
	Diagnoseverfahren 1							
	Diagnoseverfahren 2							
	Anwendung 2							
	* Anwendung 2a							
	Diagnosegruppe 1							
	Diagnoseverfahren 1							
	Diagnoseverfahren 2							
	* Anwendung 2b							
	Diagnosegruppe 1							
	Diagnoseverfahren 1							
	Diagnoseverfahren 2							

Bei der Bewertung des Innovationsgrades wird eingestuft, in wie fern sich das Verfahren für die jeweilige Anwendung schon in der Praxis etabliert hat, bzw. wie neuartig der Einsatz des Verfahrens für den/die Anwendern wäre. Je neuartiger ein Verfahren ist, desto höher fällt die Bewertung aus.

Für die Bewertung der Integrierbarkeit eines Verfahrens in Produkte (Hand- und Winkelstücke) wird in Betracht gezogen, ob und mit welchem Aufwand die Integration vollzogen werden könnte. Somit erhalten sehr gut integrierbare Verfahren die höchste Punktzahl.

Zusätzlich zu den drei Kriterien fließt die Wichtigkeit jeder Anwendung in die Vorselektion ein. Dabei wird zwischen der Wichtigkeit der Anwendung als eigenständiges Produkt und der Wichtigkeit für die Integration in ein Produkt unterschieden. Um die Ergebnisse der Bewertung miteinander vergleichen zu können, müssen die Einzelbewertungen passend miteinander verknüpft werden. Durch Bildung eines Endwertes können die Verfahren für jede Anwendung gegenübergestellt werden, und bestimmt werden, ob das Verfahren in der Detailbewertung näher untersucht werden soll. Dazu werden zwei Ergebnisse gebildet. Unter dem Aspekt, auf Basis des Verfahrens ein konkurrenzfähiges, eigenständiges Produkt zu entwickeln, ist es in erster Linie wichtig, dass die Problemstellung mit einem sinnvollen Aufwand-Nutzen-Verhältnis gelöst werden kann und das Verfahren neuartig ist. Nach Gewichtung mit der Wichtigkeit der Anwendung als eigenständiges Produkt ergibt sich somit das erste Ergebnis (siehe Formel 1).

$$\begin{aligned} \text{Ergebnis 1} = \{ & [\text{Grundsätzliche Bewertung}] + [\text{Innovationsgrad}] \\ & * [\text{Wichtigkeit als eigenständiges Produkt } W1] \end{aligned} \quad (1)$$

Für das zweite Ergebnis wird wie zuvor untersucht, wie effizient die Aufgabe gelöst werden kann und wie neuartig das Verfahren ist. Zusätzlich ist es nun von Bedeutung, wie gut das Verfahren in bestehende Produkte integrierbar ist. Diese Kriterien werden mit der Wichtigkeit der Integration in ein bestehendes Produkt gewichtet. (Formel 2).

$$\begin{aligned} \text{Ergebnis 2} = \{ & [\text{Grundsätzliche Bewertung}] + [\text{Innovationsgrad}] \\ & + [\text{Integrierbarkeit in Produkt}] \\ & * [\text{Wichtigkeit für Integration in Produkt } W2] \end{aligned} \quad (2)$$

Um die Ergebnisse der Vorselektion zu klassifizieren, wird ein Ampelsystem eingeführt. Ergebnisse im letzten Drittel (roter Bereich) scheiden aus, Verfahren deren Bewertung sich im mittleren (gelben) Bereich befindet, müssen noch einmal diskutiert werden, und Verfahren im obersten Drittel (grüner Bereich) werden sofort für die Detailbewertung ausgewählt.

Die Einteilung der drei Bereiche erfolgt nach folgendem Prinzip:

- Anwendungen, die mit einer Wichtigkeit von 0 bis 2 eingestuft werden, sollen nicht in die weitere Bewertung aufgenommen werden (roter Bereich), unabhängig von der Bewertung der Verfahren. Somit ergibt sich der obere Grenzwert für den unteren/roten Bereich durch die maximal mögliche Bewertung der Verfahren bei einer Wichtigkeit der Anwendung von 2.
- Bei einer Wichtigkeit der Anwendung von 3 sollen nur die am besten (mit jeweils 5 bzw. maximal einmal 4, sonst höher) bewerteten Verfahren in den grünen Bereich gelangen. Damit ergibt sich die untere Grenze des oberen/grünen Bereichs.
- Anwendungen mit der höchsten Wichtigkeit von 5 erlauben auch mittelmäßige Bewertungen der Verfahren zur Klassifizierung in den grünen Bereich. Dies liegt daran, dass für solch wichtige Anwendungen möglichst viele Verfahren in Betracht gezogen werden müssen.
- Ergebnisse unter der Hälfte des Maximalwerts sind nicht in den grünen Bereich einzustufen.

Für das Ergebnis 1 ergibt sich somit laut Tabelle 6 ein grüner Bereich von 27-50, ein mittlerer Bereich von 21-26 und ein roter Bereich von 0-20. Für Ergebnis 2 folgt laut Tabelle 7 ein grüner Bereich von 42-75, ein mittlerer Bereich von 31-41 und ein roter Bereich von 0-30.

Tabelle 6: Ermittlung der drei Bereiche für Ergebnis 1

Kriterium 1	Kriterium 2	W1	Ergebnis 1
5	5	2	20
5	5	3	30
5	4	3	27
4	4	3	24
4	3	3	21
3	3	3	18
4	4	4	32
4	3	4	28
3	3	4	24
3	2	4	20
3	3	5	30
3	2	5	25
2	2	5	20

Tabelle 7: Ermittlung der drei Bereiche für Ergebnis 2

Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	W2	Ergebnis 2
5	5	5	2	30
5	5	5	3	45
5	5	4	3	42
5	4	4	3	39
4	4	4	3	36
4	4	3	3	33
4	3	3	3	30
4	4	4	4	48
4	4	3	4	44
4	3	3	4	40
3	3	3	4	36
3	3	2	4	32
3	2	2	4	28
3	3	3	5	45
3	3	2	5	40
3	2	2	5	35
2	2	2	5	30

2.5.2 Detailbewertung der Diagnoseverfahren

Zur Detailbewertung der Diagnoseverfahren wird das Prinzip der Nutzwertanalyse und des Paarvergleichs angewandt.

2.5.2.1 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist eine analytische Methode, die eine nachvollziehbare Bewertung von Handlungsalternativen ermöglicht und zur systematischen Entscheidungsvorbereitung dient. Sie wurde in den 1960er Jahren in den USA entwickelt und durch Zangemeister, Professor am Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft der TU Berlin, in den 1970er Jahren in Deutschland bekannt. Laut Zangemeister werden die Handlungsalternativen entsprechend der Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems geordnet, wobei die Abbildung der Ordnung durch die Angabe von Nutzwerten (Gesamtwerten) der Alternativen erfolgt [19].

Die Teilschritte der Nutzwertanalyse sind:

1. Bestimmung der zu bewertenden Alternativen
2. Definition der Zielkriterien (Bewertungskriterien)
3. Bestimmung der Gewichtungsfaktoren
4. Ermittlung der Zielerreichungsfaktoren
5. Bestimmung des Teilnutzens
6. Berechnung des Gesamtnutzwerts der Alternativen
7. Aufstellen der Rangfolge der Alternativen

Zur Durchführung der Nutzwertanalyse müssen nach Aufstellung der Handlungsalternativen, das Gesamtziel und die Bewertungskriterien definiert werden. Jedes der Bewertungskriterien wird anschließend gewichtet, wobei ein hohes Gewicht einer hohen Bedeutung zukommt (zur Gewichtung der Bewertungskriterien siehe 2.5.2.2, Seite 32). Anschließend wird für jede Handlungsalternative bestimmt, wie gut sie das Bewertungskriterium erfüllt. Dies kann durch eine zugrunde liegende Bewertungsskala geschehen (z.B. 0 bis 5). In weiterer Folge wird das Produkt aus dem Gewicht des Bewertungskriteriums (=Gewichtungsfaktor) und der Bewertung der Alternative (=Zielerreichungsfaktor) gebildet, wodurch sich der Teilnutzen ergibt. Die Summe der Teilnutzen-Werte einer Alternative ergibt den gesamten Nutzwert, wobei jene Alter-

native zur Durchführung ausgewählt wird, welche den größten Nutzwert aufweist. Bei geringen Unterschieden der Nutzwerte sollte jedoch die endgültige Entscheidung nicht auf der geringen Differenz beruhen, sondern die entsprechenden Alternativen miteinander verglichen werden [20].

Die Bewertung kann in einer Tabelle zusammengefasst werden (Tabelle 8).

Tabelle 8: Durchführung der Nutzwertanalyse zur Bewertung von Handlungsalternativen [20].

	Bewertungskrit. 1			Bewertungskrit. 2			Bewertungskrit. 3			Nutzwert
	Bewertung	Gewicht	Teilnutzen	Bewertung	Gewicht	Teilnutzen	Bewertung	Gewicht	Teilnutzen	
Alternative 1	b11	g1	b11*g1	b12	g2	b12*g2	b13	g3	b13*g3	$\sum_{i=1}^3 b1i * gi$
Alternative 2	b21	g1	b21*g1	b22	g2	b22*g2	b23	g3	b23*g3	$\sum_{i=1}^3 b2i * gi$
Alternative 3	b31	g1	b31*g1	b32	g2	b32*g2	b33	g3	b33*g3	$\sum_{i=1}^3 b3i * gi$

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Matrix für die Detailbewertung der Diagnoseverfahren ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Matrix zur Detailbewertung von Diagnoseverfahren

Detailbewertung	Kriterium 1			Kriterium 2			Kriterium 3			Summe	Prozent	Rang
	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis			
Anwendungsfeld 1												
Anwendung 1												
Diagnoseverfahren 1												
Diagnoseverfahren 2												
Diagnoseverfahren 3												
Maximal Möglicher Wert	5			5			5				100	

Die durch die Vorselektion ermittelten Diagnoseverfahren einer Anwendung können dabei von 0 (=sehr schlecht) bis 5 (=sehr gut) pro Bewertungskriterium eingestuft

werden. Die Gewichtung der Bewertungskriterien wird aus dem Ergebnis der Gewichtungsmatrix übernommen. Nach Multiplikation der jeweiligen Bewertung mit dem Gewichtungsfaktor und Summierung der Einzelergebnisse, ergibt sich ein Summenwert für jedes Verfahren. Diese Summe wird in Relation zur möglichen Gesamtsumme in Prozent ausgedrückt, wodurch sich schlussendlich ein Rang ergibt. Der ermittelte Rang kann als Entscheidungsgrundlage, z.B. für Projektvorschläge dienen.

2.5.2.2 Bewertungskriterien für die Detailbewertung

Die Detailbewertung der vorselektierten Diagnoseverfahren wird grundsätzlich anhand von vier Hauptkriterien vorgenommen: Markt, Wirtschaftlichkeit, Technik und Kunde. Aufgrund dieser Bewertungssäulen wird mittels Brainstorming versucht, Bewertungskriterien zu finden und diese näher zu beschreiben. Da der Bewertungsaufwand mit der Anzahl der Kriterien steigt, werden die ermittelten Kriterien zu Oberbegriffen zusammengefasst. Die Aufbereitung der Kriterien erfolgt mit Hilfe des Programms MindManger.

Um die Wichtigkeit der einzelnen Kriterien untereinander zu ermitteln, wird die Methode des Paarvergleichs angewandt. Der Paarvergleich ist eine einfache und systematische Methode zur Bildung von Rangreihen, Ermittlung von Prioritäten, Gewichtung von Zielen, Auswahl von Alternativen, etc. [21].

Eine Anzahl von Kriterien wird ihrer Wichtigkeit nach geordnet, indem jedes Kriterium paarweise mit jedem anderen verglichen wird und dabei entweder als wichtiger, gleichbedeutend oder weniger wichtig eingestuft wird. Die Entscheidungsfindung wird somit dokumentiert und kann transparent nachvollzogen werden [21].

Die Durchführung des Paarvergleichs wird in Tabelle 10 näher erläutert.

Tabelle 10: Durchführung des Paarvergleichs [21].

Durchführungsschritt	Beschreibung
Bestimmung der Beurteilungskriterien und Erstellung der Matrix	Die Kriterien ergeben sich aus einem Pflichtenheft, bzw. mittels Brainstorming-Methode. Die ermittelten Kriterien werden senkrecht und waagrecht in gleicher Reihenfolge in die Matrix eingetragen.
Paarweiser Vergleich der Kriterien	Zeilenweise Bewertung oberhalb der Diagonale, immer beginnend mit dem waagrechten Kriterium und Vergleich

	<p>mit dem senkrechten Kriterium:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kriterium 1 wichtiger als Kriterium 2: Wert 2 • Kriterium 1 gleich wichtig wie Kriterium 2: Wert 1 • Kriterium 1 weniger wichtig als Kriterium 2: Wert 0 <p>Die Beziehungswerte werden an der Diagonale invers nach unten gespiegelt, d.h. aus 2 wird 0 und umgekehrt bzw. 1 bleibt 1.</p>
Bestimmung der Rangordnung	Die Beziehungswerte werden zeilenweise summiert.
Bestimmung der Gewichtung	Jede der Zeilensummen wird durch das Total der Zeilensummen geteilt, um das relative Gewicht auf Basis von 1 bzw. 100% zu ermitteln.

Tabelle 11 zeigt ein Beispiel für eine vollständig ausgefüllte Paarvergleichs-Matrix. Kriterium 1 wird im Beispiel wichtiger als Kriterium 2 und gleich wichtig wie Kriterium 3 eingestuft. Dadurch ergibt sich ein Summenwert von 3, welcher in Relation zum Total der Zeilensummen (6) einen Gewichtungsfaktor von 0.5 ergibt.

Tabelle 11: Paarvergleichs-Matrix und beispielhafte Ermittlung der Gewichtung [21].

Bewertung: 2 = wichtiger als 1 = gleich wichtig wie 0 = weniger wichtig als	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	Summe	Gewichtung
	Kriterium 1	2	1	3	3/6=0.50
	Kriterium 2	0	1	1	1/6=0.17
	Kriterium 3	1	1	2	2/6=0.33
				6	

Das Ergebnis des Paarvergleichs ist in der Arbeit Basis für die Ermittlung der Nutzwerte der Nutzwertanalyse. Die dabei verwendete Matrix ist in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Gewichtungsmatrix der Bewertungskriterien

Gewichtung		B				
		Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	Summe	Gewichtung
A	Kriterium 1					
	Kriterium 2					
	Kriterium 3					

Die Gewichtung wird folgendermaßen vorgenommen:

- A ist wichtiger als B → 2
- A ist gleich wichtig wie B → 1
- A ist weniger wichtiger als B → 0

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Produkt und Literaturrecherche

Insgesamt wurden auf der Webseite „Dental Product Shopper“ 44 Produkte und auf der Plattform „Dental Compare“ 640 Produkte untersucht und durch die weitere Recherche auf den Hersteller-Homepages bzw. der IDS unterstützt. Die Ergebnisse der Produktrecherche bilden einen Teil der Aufstellung der Diagnoseverfahren in Kapitel 3.3, Seite 58.

Die Literaturrecherche wurde für ausgewählte Dentalanwendungen durchgeführt. Deren Fragestellungen und Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln getrennt für jedes Anwendungsfeld aufgelistet.

3.1.1 Prophylaxe und Parodontologie

Die Schlagwörter und deren Kombinationen für die jeweiligen Fragestellungen, zusammen mit den erhaltenen Ergebnissen sowie den relevanten Treffern, sind in Tabelle 13 enthalten.

Tabelle 13: Ergebnisse der Recherche zu ausgewählten Fragestellungen in der Prophylaxe und Parodontologie

Thema	Suchquelle	Fragestellung	Ergebnisse	Treffer für Suchthema	Treffer für Suchfeld
Bestimmung der Oberflächenrauigkeit der Zähne	PubMed	(surface roughness) and (dental or tooth or teeth or enamel or dentin) and (measurement or detection or monitoring or diagnosis)	15 (Review)	0	1
	Dissonline.de	oberflächenrauigkeit zahn	64	0	2

Selektive Zahnsteinentfernung	PubMed	dental calculus/diagnosis [MAJR]	102	16	0
	PubMed	"dental endoscope"	6	4	0
	PubMed	meissner g [author] calculus	7	6	0
	Dissonline.de	zahnstein detektion	38	3	7
	Scirus	calculus-detection technologies and their clinical application	-	1	0
Diagnose/Monitoring parodontaler Erkrankungen	PubMed	monitoring gingiva	9 (Review)	1	0
	PubMed	periodontal diseases/diagnosis*	1812	6 (bis 2010)	0
	Periodontology 2000	Handsuche nach: Periodontal und Diagnosis	2	2	0
	Dissonline.de	diagnos* parodont* Erkrankung	547	2	2

Aufgrund der Ergebnisse in Tabelle 13 wurden gezielt Diagnoseverfahren und Schlagwörter von Anwendungen als Fragestellung in die Datenbanken, meist in Kombination, eingegeben (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Ergebnisse der Recherche zu ausgewählten Diagnoseverfahren in der Prophylaxe und Parodontologie

Thema	Suchquelle	Fragestellung	Ergebnisse	Treffer für Suchthema	Treffer für Suchfeld
Quantitative Lichtinduzierte Fluoreszenz (QLF)	PubMed	calculus quantitative light induced fluorescence	0	0	0
Intraoralkamera	PubMed	intraoral camera calculus	0	0	0
Lupe, OP-Mikroskop und Endoskop	PubMed	crack microscopes	6	1	0
Lupe, OP-Mikroskop und Endoskop	PubMed	loupe calculus	0	0	0
Lupe, OP-Mikroskop und Endoskop	PubMed	clinical operating microscopes	25	4	0
Fluoreszenz	PubMed	led fluorescence calculus	5	1	0

	PubMed	laser fluorescence calculus	29	11	0
Faseroptische Transillumination	PubMed	transillumination subgingival calculus	1	1	0
Infrarot-Spektroskopie	PubMed	periodontal diagnosis infra-red	30	4	0

3.1.2 Restauration und Prothetik

Die Fragestellungen in der Restauration und Prothetik, zusammen mit den Suchquellen, Ergebnissen sowie relevanten Treffern sind in Tabelle 15 enthalten.

Tabelle 15: Ergebnisse der Recherche zu ausgewählten Fragestellungen in der Restauration und Prothetik

Thema	Suchquelle	Fragestellung	Ergebnisse	Treffer für Suchthema	Treffer für Suchfeld
Diagnoseverfahren zur Kariesfrüherkennung	PubMed	early caries detection	189	23	3
	PubMed	diagnostic tools early caries detection	9	4	0
	Dissonline.de	diagnostic tools early caries detection	2	2	0
Diagnose von Sekundärkaries	Dissonline.de	"secondary caries"	52	3	9
	PubMed	diagnos* secondary caries	193	15	6
Diagnose von Kariesrezidiv	Dissonline.de	"recurrent caries"	8	0	4
	PubMed	diagnos* recurrent caries	66	3	6
Diagnose von Zahnhartsubstanzverlusten	Dissonline.de	"tooth surface loss"	19	7	0
	Dissonline.de	Diagno* Zahnverletzung	11	2	0
	Dissonline.de	zahnhartsubstanzverlust diagnos*	54	6	4
	PubMed	"tooth surface loss" (diagnostics or diagnosis or detection)	44	1	0
Parallelisierung der Kronenstumpfpräparation	Dissonline.de	Kronenstumpf	5	0	0
	Dissonline.de	dental crown stump	1	0	0
	PubMed	dental crown stump preparation	40	0	0
Diagnosemethoden für die Kavitätenpräparation	PubMed	dental cavity preparation/diagnos*	379	9	9
	Dissonline.de	kavitätenpräparation diagnose	23	2	2
	Dissonline.de	cavity preparation diagnosis	3	0	0

Zudem wurde eine Datenbankrecherche zu ausgewählten Diagnoseverfahren in Kombination mit Schlagwörtern von Dentalanwendungen getätigt, deren Ergebnisse in Tabelle 16 aufgeführt sind.

Tabelle 16: Ergebnisse der Recherche zu ausgewählten Diagnoseverfahren in der Restauration und Prothetik

Thema	Suchquelle	Fragestellung	Ergebnisse	Treffer für Suchthema	Treffer für Suchfeld
Quantitative Lichtinduzierte Fluoreszenz (QLF)	Dissonline.de	Quantitative Lichtinduzierte Fluoreszenz qlf	12	10	0
	PubMed	quantitative light induced fluorescence early caries	23	6	0
	Google Scholar	[Detection and prevention of early caries after fluoride dentifrice application using quantitative light-induced fluorescence in vivo]	-	1	-
	Scirus	Qlf papers	-	1	-
	PubMed	quantitative light induced fluorescence demineralization	36	12	0
Intraoralkamera	PubMed	intraoral camera caries	12	2	1
Lupe, OP-Mikroskop und Endoskop	PubMed	loupe caries	4	1	0
	PubMed	caries endoscope	5	0	0
	PubMed	crack microscopes	6	1	0
Magnetresonanz Tomographie (MRT)	PubMed	caries magnetic resonance	77	4	0
Fluoreszenz/Lumineszenz	Dissonline.de	caries luminescence	23	6	2
	Dissonline.de	caries fluorescence	113	19	12
	Dissonline.de	Laserinduzierte Fluoreszenz Karies	9	8	1
ATP-Lumineszenz	PubMed	adenosine triphosphate bioluminescence plaque	6	3	0
Nah-Infrarot Transillumination	PubMed	caries near infrared transillumination	7	5	2
	Dissonline.de	karies nah infrarot transillumination	0	0	0
	Dissonline.de	caries near infrared transillumination	4	2	0
	Dissonline.de	infrared transmission karies	10	0	1
Polarisiertes Licht	PubMed	visible polarized caries	9	0	1
OCT	Dissonline.de	optical coherence tomography oct	6	1	0
	Dissonline.de	PS-OCT dental	0	0	0
	Dissonline.de	optische kohärenz tomographie zahn	1	0	1

	Dissonline.de	kohärenztomographie zahn	0	0	0
	Dissonline.de	kohärenztomographie karies	0	0	0
	Dissonline.de	kohärenztomographie	21	1	0
	PubMed	optical coherence tomography dental caries	39	17	14
Polarisierte Raman Spektroskopie (PRS)	Dissonline.de	"polarized raman spectroscopy"	0	0	0
	Dissonline.de	raman spectroscopy caries	2	2	0
	PubMed	polarized Raman spectroscopy caries	6	4	0
DIAGNOdent	Dissonline.de	diagnodent	23	19	4
	PubMed	diagnodent	178		
	Dissonline.de	Acist	2	1	0
	Dissonline.de	impedance spectroscopy caries	7	2	3
Impedanzmessung/ACIST	Dissonline.de	impedance dentin	16	4	0
	Dissonline.de	caries impedance	14	3	3
	Dissonline.de	CarieScan	1	1	0
	PubMed	acist	6	0	0
	PubMed	ac impedance spectroscopy technique acist	0	0	0
	PubMed	ac impedance spectroscopy caries	3	3	0
	PubMed	CarieScan	0	0	0
	PubMed	pitts[author] impedance	3	3	0
	PubMed	Longbottom [author] dental	44	8	0
Fluorescence Aided Caries Excavation (FACE)	Dissonline.de	"fluorescence aided caries excavation"	0	0	0
	PubMed	fluorescence aided caries excavation	5	4	0
Optoakustische Tomographie	Dissonline.de	optoakustische tomogra*	6	1	0
	PubMed	opto acoustical tomography	1	1	0
DIFOTI	Dissonline.de	difoti	2	2	0
	PubMed	difoti	7	4	0
DIAGNOcam	Dissonline.de	diagnocam	0	0	0
	PubMed	diagnocam	0	0	0
	Google-Scholar	diagnocam	0	0	0
	Scirus	diagnocam	0	0	0
Optical caries monitor (OCM)	Dissonline.de	optical caries monitor ocm	0	0	0
	PubMed	optical caries monitor ocm	1	1	0
Dye enhanced laser fluorescence (DELFL)	Dissonline.de	Dye enhanced laser fluorescence DELFL	3	0	0
	PubMed	dye enhanced laser fluorescence dental	7	5	0
Terahertz-Imaging	Dissonline.de	terahertz caries	3	3	0
	PubMed	terahertz caries	4	2	2

	PubMed	terahertz pulsed imaging dental	2	2	0
Infrarot-Spektroskopie	Dissonline.de	infrared spectroscopy caries	44	3	1
	Dissonline.de	infrarotspektroskopie karies	21	0	0
	PubMed	infrared spectroscopy caries	61	9	3
Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)	PubMed	laser induced breakdown spectroscopy dental	14	3	2
	Pubmed	laser induced breakdown spectroscopy caries	6	4	0
	Dissonline.de	"laser-induced breakdown spectroscopy" dental	1	1	0
Infrarot-Transmission	PubMed	infrared transmission dental	55	2	0
	Dissonline.de	infrared transmission dental	3	0	0
	Dissonline.de	"infrared transmission" karies	10	0	1
Infrarot-Thermographie	Dissonline.de	Infrarot Thermographie	10	0	0
	Dissonline.de	Infrared Thermography	5	0	0
	Dissonline.de	„thermal imaging“ dental	4	1	1
	PubMed	infrared thermography caries	3	2	0
	PubMed	dental thermal imaging	30	5	2
Multi photon imaging	Dissonline.de	"Multi photon imaging"	1	0	0
	PubMed	multi photon imaging dental	5	1	0
Ultraschall	PubMed	ultrasound caries (diagnosis or detection)	56	10	2
	PubMed	Dental Caries/ultrasonography*	13	8	2
	PubMed	Ultrasonic caries detector	2	2	0
	Dissonline.de	ultrasound caries	28	0	2
	Dissonline.de	Ultraschall karies	0	0	0
Infrared photothermal radiometry (and modulated luminescence)	PubMed	ptr lum	3	3	0
	PubMed	infrared photothermal radiometry teeth	6	6	0
	PubMed	Canary Caries Detection System	0	0	0
	Dissonline.de	ptr lum	19	0	0
	Dissonline.de	photothermal radiometry PTR	3	0	0
	Dissonline.de	Canary Caries Detection System	1	0	0
Polymerbohrer (SmartPrep)	PubMed	smartprep	27	3	0
Light-induced fluorescence evaluator (LIFE)	PubMed	Light-induced fluorescence evaluator	2	2	0
	Dissonline.de	Light-induced fluorescence evaluator	0	0	0
Prepometer	Dissonline	Prepometer	3	3	0
Prepometer	PubMed	Prepometer	5	5	0

3.1.3 Endodontie

Die Schlagwörter und deren Kombinationen für die jeweiligen Fragestellungen, zusammen mit den erhaltenen Ergebnissen sowie den relevanten Treffern, sind in Tabelle 17 enthalten.

Tabelle 17: Ergebnisse der Recherche zu ausgewählten Fragestellungen in der Endodontie

Thema	Suchquelle	Fragestellung	Ergebnisse	Treffer für Suchthema	Treffer für Suchfeld
Detektion der Pulpa während der Behandlung	Dissonline.de	dental pulp diagnos*	4	1	1
	PubMed	dental pulp diagnos*	14	5	0
	PubMed	((dental pulp) or (root canal)) and (detection or diagnosis or monitoring) and (excavation or trepanation)	32	0	0
Feedback über den Desinfektionsgrad des Wurzelkanals	PubMed	feedback root canal	15	0	1
	PubMed	root canal disinfection feedback	0	0	0
	PubMed	root canal disinfection (efficiency or efficacy)	0	0	0
	PubMed	cleaning effectiveness root canal	49	0	0
	Dissonline.de	Wurzelkanal-desinfektion	20	3	0
	Worlddental-online.com	Diagnose von bakteriellen Infektionen im Wurzelkanal	1	1	0
Endodontische Arbeitslängenbestimmung	Dissonline.de	Wurzelkanallängenmessgeräte	3	3	0
	Dissonline.de	Apexlokalisator	3	2	0
Detektion der Feilenspitze während der Wurzelkanalbehandlung	Dissonline.de	Cbct	44	1	0
	PubMed	navigation endodontics	3	2	0
	PubMed	navigation dental root canal	3	2	0
Kombination Arbeitslängenbestimmung, Wurzelkanalaufbereitung und Desinfektion	PubMed	endodontic worklength root canal preparation disinfection	53	0	0
	PubMed	combination endodontic worklength root canal preparation	64	1	0
	PubMed	combination root canal length measurement preparation	2	0	0
	Dissonline.de	endodontic worklength root canal preparation disinfection	0	0	0

Zusätzlich wurde eine Recherche zu ausgewählten Diagnoseverfahren in Kombination mit der Pulpa getätigt, deren Statistik in Tabelle 18 aufgeführt ist.

Tabelle 18: Statistik der Recherche zu Diagnoseverfahren in der Endodontie

Thema	Suchquelle	Fragestellung	Ergebnisse	Treffer für Suchthema	Treffer für Suchfeld
Photo-plethysmographie	PubMed	Photoplethysmography pulp	18	5	2
	Dissonline.de	Photoplethysmographie pulpa	1	1	0
	Dissonline.de	Photoplethysmography pulp	0	0	0
Laser Doppler Flowmetry	PubMed	laser doppler flowmetry endodontics pulpa	8	5	0
	Dissonline.de	laser doppler flowmetry pulpa	9	4	0
Pulsoximetrie	PubMed	pulse oximetry pulp	24	17	0
	Dissonline.de	pulsoximetrie pulpa	2	1	0
	Dissonline.de	"pulse oximetry" pulp	0	0	0
Spektrophotometrie	Dissonline.de	dual wavelength spectrophotometry pulp	3	0	0
	Dissonline.de	spektrophotometrie pulpa	3	0	0
	PubMed	dual wavelength spectrophotometry pulp	3	1	0
Lupe, OP-Mikroskop und Endoskop	PubMed	operating microscope endodont* pulp	52	7	1
Fluoreszenz	PubMed	fluorescence endodontics	67	4	0

3.2 Aussichtsreiche Anwendungen für den Einsatz von Diagnoseverfahren

Die vielversprechendsten Anwendungen in den behandelten Anwendungsfeldern (Prophylaxe und Parodontologie, Restauration und Prothetik, Endodontie), für die die Integration von Diagnoseverfahren in den Workflow eine wesentliche Erleichterung darstellt bzw. darstellen würde, werden in Folge näher erläutert.

Dabei werden die bisherigen Arbeitsschritte der Anwendungen und die eingesetzten Mittel näher beschrieben, um in weiterer Folge beurteilen zu können, ob und wo die Diagnoseverfahren eingesetzt werden könnten.

3.2.1 Prophylaxe und Parodontologie

Bei der Verhütung von Krankheiten der Zähne und des Zahnhalteapparats unterscheidet man zwischen der individuellen, von jeder Person selbstständig durchführbaren und der professionellen (zahnärztlichen) Prophylaxe. Zur individuellen Zahnprophylaxe gehören die Ernährung und die Mundhygiene bzw. die Zahnpflege. Durch die Ernährung können wichtige Stoffe für den Aufbau der Zähne aufgenommen werden (z.B. Kalzium, Phosphor, Fluor). Die Zahnpflege kann durch die verschiedensten Hilfsmittel unterstützt werden (z.B. elektr. Zahnbürste, Zahnseide, Mundspülung, etc.) [2].

Basis für die Zahngesundheit stellen eine gute Anleitung des Patienten zur persönlichen Zahnprophylaxe, die professionelle Zahnreinigung, sowie regelmäßige Kontrolluntersuchungen dar, welche individuell auf das Krankheitsrisiko des Patienten abgestimmt sind [22].

Weitere Bestandteile der professionellen Prophylaxe sind die Fissurenversiegelung sowie die lokale Fluoridierung. Bei der Fissurenversiegelung werden Grübchen und Fissuren zur Vorbeugung vor Karies mit einem dünnen Kunststoffüberzug versehen. Fluoride haben eine antibakterielle Wirkung und dienen der Remineralisation des Zahnschmelzes [2].

Die für die Verwendung von Diagnoseverfahren vielversprechendsten Anwendungen in der Prophylaxe und Parodontologie sind in Abbildung 11 grün hinterlegt und kurz erläutert. Sie werden in weiterer Folge näher beschrieben.

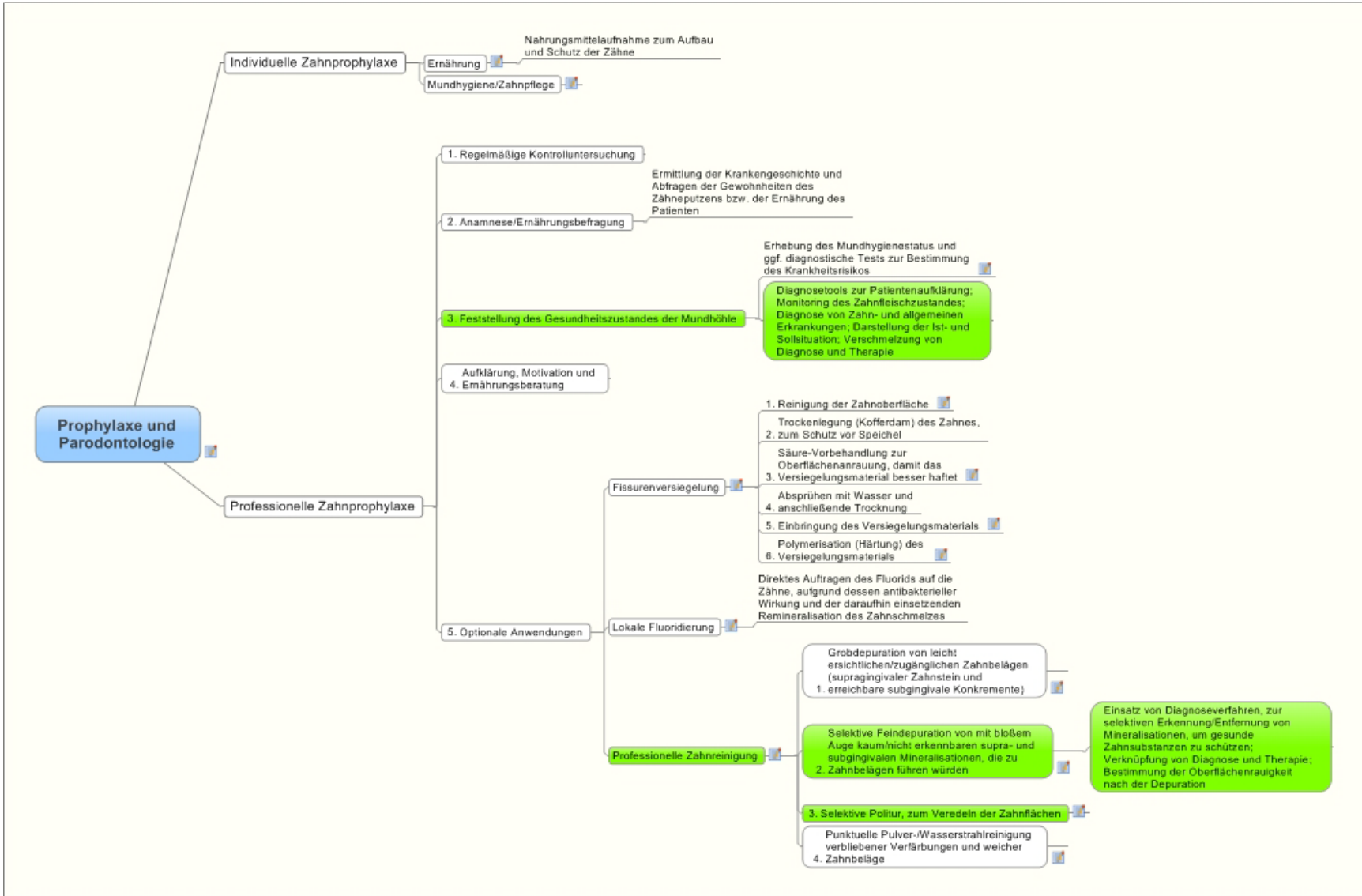


Abbildung 11: Aussichtsreiche Dentalanwendungen für den Einsatz von Diagnoseverfahren (grün hinterlegt) in der Prophylaxe und Parodontologie [2].

Feststellung des Gesundheitszustandes der Mundhöhle:

Im Rahmen einer zahnärztlichen Verlaufskontrolle wird der Parodontalstatus erhoben (zumindest einmal im Jahr) [23].

Tabelle 19 listet mögliche Einzelbefunde eines Parodontalstatus auf [24].

Tabelle 19: Einzelbefunde eines Parodontalstatus [24].

Status	Beschreibung
Zahnzahl	Kennzeichnung nicht vorhandener und zu extrahierenden Zähne.
Sondierungstiefe	Die (konventionell) mit einer parodontalen Messsonde ermittelten Zahnfleisch-Taschentiefen werden in Millimeter eingetragen.
Pathologische Zahnbeweglichkeit	Eintragung des Beweglichkeitsgrades entsprechend der gewählten Methodik (Gradeinteilung).
Furkationsbefall	Gabelungen zwischen den Zahnwurzeln, unabhängig ihres Ausmaßes, einzeichnen.
Vitalität	Kennzeichnung von marktoten (=devitalen) Zähnen.
Rezessionen	Optional: Eintragen der Stellen, an denen sich das Zahnfleisch zurückgezogen hat (=vestibuläre Rezessionstiefen in Millimeter).
Befestigungsverlust	Optional: Eintragung des Gingivaverlaufes und davon ausgehend die Sondierungstiefe in Millimetern abtragen.
Provokationsblutung	Optional: Positive Provokationsblutungen werden angegeben.

Zur Beurteilung des Parodontalstatus stehen Indizes zur Verfügung, die den Grad der Erkrankung wiedergeben. Beispielsweise wird mit dem Approximalraum-Plaque-Index nach Plaqueanfärbung beurteilt, ob im Approximalraum Plaque vorhanden ist. Somit kann das Reinigungsmuster des Patienten kontrolliert und dem Patienten demonstriert werden, in welchen Bereichen der Mundhöhle die Mundhygiene noch verbessert werden muss. Mit dem Papillen-Blutungs-Index wird der Entzündungsgrad der Gingiva beurteilt. Der Schweregrad reicht von Grad 0 (keine Blutung nach Sondierung) bis Grad 4 (starke Blutung bei Sondierung) [4].

Ein weiterer Index ist der „Parodontale Screening Index“ (PSI) zur Früherkennung von Parodontitis. Das Gebiss wird dabei in Sextanten eingeteilt und jeder Zahn mit einer speziellen Parodontalsonde mit Tiefenmarkierung untersucht. Die Sonde wird zwischen Zahn und Zahnfleisch eingeführt und behutsam um den Zahn herum getastet. An bis zu sechs verschiedenen Stellen des Zahnes wird ein Befund über die Sondierungstiefe, Blutungsneigung des Zahnfleisches und Rauigkeit an der Zahnoberfläche erhoben. Für jeden Sextanten ergibt sich der jeweils höchste Codewert (von PSI-Code 0 bis PSI Code 4). Während Code 0 auf gesundes Zahnfleisch hinweist, signalisieren Code 1 und Code 2 eine Zahnfleischentzündung (Gingivitis). Zahnfleischtaschen werden durch Code 3 (flach) sowie Code 4 (tief) wiedergegeben und weisen auf eine Parodontitis hin. Nachteil des PSI ist, dass die individuellen Stellen, welche reinstrumentiert werden müssen, nicht identifiziert werden können. Denn sobald für einen Zahn im Sextanten der Code 4 ermittelt wird, wird mit dem nächsten Sextanten fortgefahren [23], [25].

Durch das frühzeitige Erkennen von sich entwickelnden Läsionen, können behandlungsintensive Eingriffe vermieden werden. So kann die Verschmelzung von Diagnose im frühen Krankheitsstadium und anschließender minimalinvasiver Therapie zur langfristigen Erhaltung der Zahngesundheit beitragen. Ein generelles Ziel in der Parodontologie ist daher das Monitoring des Zahnfleischzustandes. Durch die ständige Aufzeichnung und regelmäßige Kontrolle können entstehende und sich verändernde Zahnfleischtaschen beurteilt werden. So kann die Entstehung von Konkrementen in den Taschen verhindert bzw. rechtzeitig gestoppt werden und die Chance, dass sich das parodontale Gewebe wieder regeneriert, erhöht sich. Des Weiteren können dadurch chirurgische Parodontaleingriffe vermieden werden [26], [27].

Professionelle Zahnreinigung

Bei der professionellen Zahnreinigung werden abhängig von den Mundhygienedefiziten des Patienten Grobdeposition, Feindeposition, selektive Politur und eine punktuelle Pulver-/Wasserstrahlreinigung durchgeführt [2].

Während bei der Grobdeposition ersichtliche/erreichbare mineralisierte Zahnbeläge (supragingivaler Zahnstein und erreichbare subgingivale Konkremente) entfernt werden, werden bei der supra- und subgingivalen Feindeposition die verbliebenen Mineralisationen beseitigt. Diese würden beim Belassen zur Belagsbildung führen. Es

werden z.B. feine Scaler, Küretten und Hirschfeld-Feilen, bzw. Pulverstrahlgeräte, Airscaler und Ultraschallinstrumente eingesetzt [3].

Die Hauptprobleme bei der Entfernung von subgingivalen Konkrementen aus den Zahnfleischtaschen bestehen darin, dass die Gefahr besteht, Konkremente unbehandelt zurückzulassen oder durch Übertherapie gesunde Zahnhartschubstanz an bereits gereinigten Stellen abzutragen. Um den Wurzelzement zu schonen, und somit die Freilegung von Dentin sowie eine resultierende Zahnhalsüberempfindlichkeit zu vermeiden, sind minimalinvasive Verfahren nötig [28], [29].

Durch den Einsatz diagnostischer Methoden kann die Zahnsteinerkennung bzw. -entfernung verbessert werden. Man unterscheidet zwischen Zahnstein-Detektionssystemen und Systemen, welche den Zahnstein detektieren und im Anschluss entfernen [30].

Selektive Politur

Im Anschluss an die Feindepuration erfolgt die selektive Politur, bei der z.B. mit rotierenden Gummikelchen und wenig abrasiven Polierpasten die Zahnoberflächen veredelt werden. Um gesunde, fluoridreiche Zahnschmelzoberflächen durch den möglichen Abrieb bei der Politur nicht zu schädigen, wird die Politur nur an Stellen durchgeführt, an denen sie auch nötig ist [3].

3.2.2 Restauration und Prothetik

Ein wesentlicher Bestandteil der Restauration ist die kariesbedingte Füllungstherapie. Wird nach der Anamnese und Prädiagnostik die Entscheidung zur Kariesentfernung getroffen, wird die Behandlung geplant und eventuell eine Anästhesie zur Gewährleistung eines schmerzlosen Eingriffs durchgeführt. Bei der Kavitätenpräparation wird der Zahn eröffnet, um die kariöse Läsion freizulegen. Anschließend kann die Karies entfernt werden (Exkavation). Um den Verbund mit der nachfolgenden Füllung zu gewährleisten, wird die Behandlungsstelle getrocknet und zur Zahnoberflächenaufrauung angeätzt. Falls das Füllungsmaterial die Pulpa reizen würde oder Temperaturen gut leitet, kann eine Unterfüllung zwischen Zahnhartschubstanz und anschließender Füllung angebracht werden. Die Füllung dient dazu, die (Schutz-) Funktion und Form des Zahnes wiederherzustellen. Überschüssige Füllungsmaterialien werden beim Finieren entfernt. Durch das abschließende Polieren wird die Oberflächenrauigkeit reduziert [11].

In der Prothetik werden z.B. Zahn- bzw. Zahnhartsubstanzverluste durch Brücken, Veneers, Kronen, etc. behandelt [11].

Die für die Verwendung von Diagnoseverfahren vielversprechendsten Anwendungen in der Restauration und Prothetik sind in der nachstehenden MindMap (Abbildung 12) hinterlegt und kurz erläutert, bzw. in weiterer Folge näher ausgeführt.

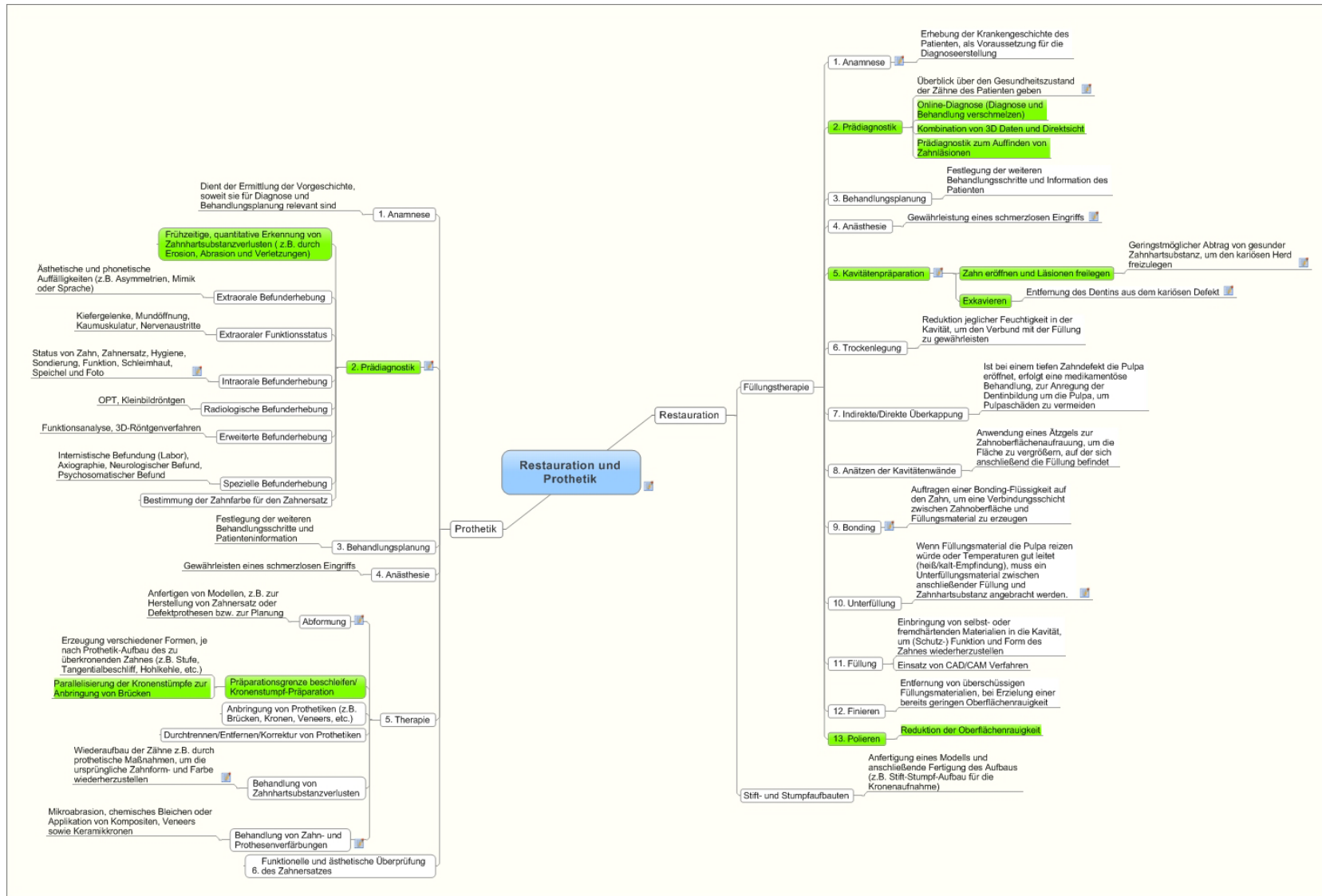


Abbildung 12: Aussichtsreiche Dentalanwendungen für den Einsatz von Diagnoseverfahren (grün hinterlegt) in der Restauration und Prothetik [11], [31].

Prädiagnostik

Vordergründiges Ziel der Prädiagnostik ist das Auffinden von Zahnläsionen. Bei der standardmäßigen Verlaufskontrolle werden zur Aufnahme des Zahnstatus neben der klinischen Inspektion auch Röntgenbilder (z.B. Bissflügelaufnahmen), optische Verfahren (z.B. Fluoreszenzverfahren), diagnostische Tests (z.B. Kariesrisikotest), optische Hilfsmittel (z.B. Lupenbrille) und elektrische Verfahren eingesetzt [22].

Im Zahnstatus werden fehlende und ersetzte Zähne, Kariesbefall, Lückenschluss, Inlays, Onlays, Kronen, Brückenglieder, Stützelemente Implantate sowie sonstige auffällige pathologische Befunde der Mundschleimhaut und des Zahnhalteapparats festgehalten [32].

Die Lokalisation der zu untersuchenden Zahnhartsubstanz (Okklusal-, Approximal- bzw. Glattflächen, Fissuren oder Zahnwurzel) ist entscheidend für die Wahl des Diagnoseverfahrens. So werden z.B. Bissflügelaufnahmen zur Detektion von Approximalkaries und die visuelle Inspektion für Glattflächenkaries, bzw. Caries initialis eingesetzt. Fluoreszenzverfahren können „versteckte“ Karies detektieren und Wurzelkaries z.B. durch Röntgenkontrollen und Sondierung festgestellt werden. Bei schwierigen Fällen werden zur Absicherung der Fragestellung mehrere geeignete Verfahren angewandt [11], [22].

Die Schwierigkeit der Fluoridierung und Entfernung von Plaque in Fissuren und Grübchen erhöht das Kariesrisiko. Plaque wird zurückgehalten und durch den dünnen Schmelz am Boden der Fissur erreicht eine kariöse Läsion schnell das Dentin. Für den Patienten ist eine solche Läsion schwer zu erkennen. Der Zahnarzt geht bei der Diagnose z.B. so vor, dass er mit einer sogenannten CPITN-Sonde (Sonde mit kleinem Kugelkopf an der Spitze) in den Defekt eindringt. Wenn er den Kugelkopf frei bewegen kann, liegt eine behandlungswürdige Läsion vor. Im Vorfeld kann eine solche Läsion auch röntgenologisch erkannt werden [33].

Die Feststellung von Okklusal- und Approximalkaries kann in der Praxis auf verschiedene Weise erfolgen. Durch die klassische visuelle (klinische) Inspektion mit Spiegel und Sonde können kleine Läsionen nur schwer erkannt werden. Mit Hilfe der Diaphanoskopie, der Laser-induzierten Fluoreszenz, bzw. röntgenologischer Methoden (z.B. Bissflügelaufnahmen) können auch kleinere Läsionen diagnostiziert werden [33].

Die Bestimmung des Kariesrisikos durch Speicheltests kann hilfreich bei der Ernährungsberatung des Patienten sein. Die bakterielle Besiedelung mit kariesrelevanten Bakterien, der pH-Wert bzw. die Pufferkapazität sowie die Speichelfließrate lassen sich leicht bestimmen und sind einfache Hilfsmittel um den Patienten über die langfristige Zahngesunderhaltung aufzuklären [22].

Methoden mit anerkanntem kariesprädiktiven Wert sind dabei Karieserfahrung, die Quantität der Initialläsionen, die Plaquebildungsrate und die Bestimmung der Zahl von *Streptococcus mutans* sowie Laktobazillen im Speichel. Methoden mit geringem kariesprädiktivem Wert, also einer großen individuellen Schwankung, sind die Speichelfließrate und die Pufferkapazität [34].

Sind Zähne vorhanden, die bereits mit einer Versorgung (Füllung, Inlay, etc.) versehen sind, muss festgestellt werden, ob diese noch in Ordnung sind. Wenn der Kavitätenverschluss nicht dicht ist, können sich Keime am Kavitätenboden durch Substratzufuhr wieder vermehren und Richtung Pulpa vordringen. Durch das Eindringen von Bakterien (z.B. Laktobazillen) über Randspalten kann sich Sekundärkaries bilden [35].

Die klinische Diagnose von Sekundärkaries (z.B. Karies unter Füllungen oder an den Restaurationsrändern) ist ein häufiger Grund für die Erneuerung von Restaurationen. Die Diagnose von Sekundärkaries am Restaurationsrand ist jedoch schwierig. Randeinbrüche bzw. graue Verfärbungen im Zahnschmelz neben Amalgamfüllungen sind z.B. kein sicheres Zeichen für Sekundärkaries. Zur Unterstützung werden z.B. röntgenologische Bissflügelaufnahmen im Approximalbereich angefertigt [36], [37].

Kavitätenpräparation

Erfolgt nach der Kariesdiagnose die Entscheidung zur Füllungstherapie, ist das Ziel bei der Kariesentfernung ein minimalinvasives und sicheres Vorgehen. Um den kariösen Herd freizulegen, soll so wenig wie möglich gesunde Zahnhartsubstanz abgetragen werden. Dies ist nur möglich, wenn die Lokalisation und Ausdehnung der kariösen Stelle genau bekannt sind (Prädiagnostik).

Während der Zahneröffnung und dem Freilegen der kariösen Läsion stehen dem behandelnden Arzt optische Hilfsmittel, wie z.B. Beleuchtung und Vergrößerung zur Verfügung. Neben dem Sondieren und dem klinischen Blick (konventionelle Methode) gehören Kariesdetektoren (Farbstofflösungen zur Visualisierung von kariös ver-

ändertem Dentin), chemomechanisches Exkavieren (z.B. CarieSolv) und konventionelle (Rosen-) Bohrer zu den Standardmethoden direkt beim Exkavieren [22].

Bei tiefen kariösen Läsionen besteht die Gefahr, während der Exkavation die Pulpa zu schädigen. Somit ist die Kenntnis der Distanz z.B. des Bohrers zur Pulpa von entscheidender Bedeutung, um diese nicht zu verletzen.

Kronenstumpf-Präparation

Beim Einbringen von festsitzenden Brücken müssen meist gesunde Nachbarzähne beschliffen werden. Die Schwierigkeit besteht darin, die Kronenstümpfe entlang ihrer Achse parallel zueinander zu präparieren, da die Brücke nur im richtigen Winkel aufgesetzt werden kann.

Verlust von Zahnhartsubstanzen

Der Verlust von Zahnhartsubstanzen ist meist bedingt durch Verletzungen, Einfluss von Säuren (Erosion) und Reibung (Abrasion). Um die ursprüngliche Form und Farbe der Zähne wiederherzustellen, werden z.B. plastische Füllungstherapien oder prothetische Maßnahmen eingesetzt.

Als Zahnerosion bezeichnet man den oberflächlichen Zahnhartsubstanzverlust durch den Einfluss von chemischen Prozessen ohne die Beteiligung von Mikroorganismen, z.B. durch säurehaltige Getränke und Speisen, Reflux, etc. Im Gegensatz zu kariösen Läsionen, welche durch kariöse Mikroorganismen entstehen, treten bei der Erosion unterhalb der Oberfläche keine nennenswerten Demineralisationen auf. Frühe erosive Läsionen betreffen nur den Zahnschmelz und sind visuell schwer zu erkennen. Bei Spätläsionen ist bereits Dentin involviert. Frontzähne werden dünn und transluzent und der Verlust des Zahnschmelzes führt zur Freilegung von Dentin. Dadurch können z.B. Schmerzen bei Kälte- und Wärmereizen auftreten [38].

Unter Abrasion (abrasio dentium) versteht man den pathologischen Verlust von Zahnhartsubstanzverlust durch mechanische Kräfte, z.B. durch Reibung beim Kauvorgang. Der Substanzverlust kann dabei entweder durch den Kontakt mit anderen Zähnen geschehen (Attrition) oder durch das Kauen von (abschleifenden) Nahrungsmitteln (Demastikation) auftreten [38], [39].

Außerdem können falsche Putztechniken in Kombination mit abrasiven Zahnpasten (hoher Radioactive-Dentin-Abrasion-Wert, kurz RDA-Wert) bzw. Knirsch- und Press-

bewegungen (Bruxismus) zur Abrasion führen. Die Erfassung der Verluste dentaler Zahnhartsubstanzen kann somit z.B. zur Ernährungsberatung bewegen oder zur Fluoridierung, Versiegelung, Kronen, Füllungen, etc. führen [40], [41].

Meist erkennen die Patienten bzw. Zahnärzte erst in einem sehr späten Stadium das Problem. Dies kann durch empfindliche Zähne, Schmerzen, Rillen an den Schneidekanten oder die fast vollständige Auflösung des Zahnschmelzes geschehen. Durch die frühzeitige Erkennung von beginnenden Zahnhartsubstanzverlusten können die nichtreversiblen Prozesse gestoppt werden und aufwendige, therapeutische Eingriffe entfallen.

3.2.3 Endodontie

Die für den Einsatz von Diagnoseverfahren aussichtsreichsten Anwendungen sind in Abbildung 13 grün dargestellt und werden in weiterer Folge näher beschrieben.

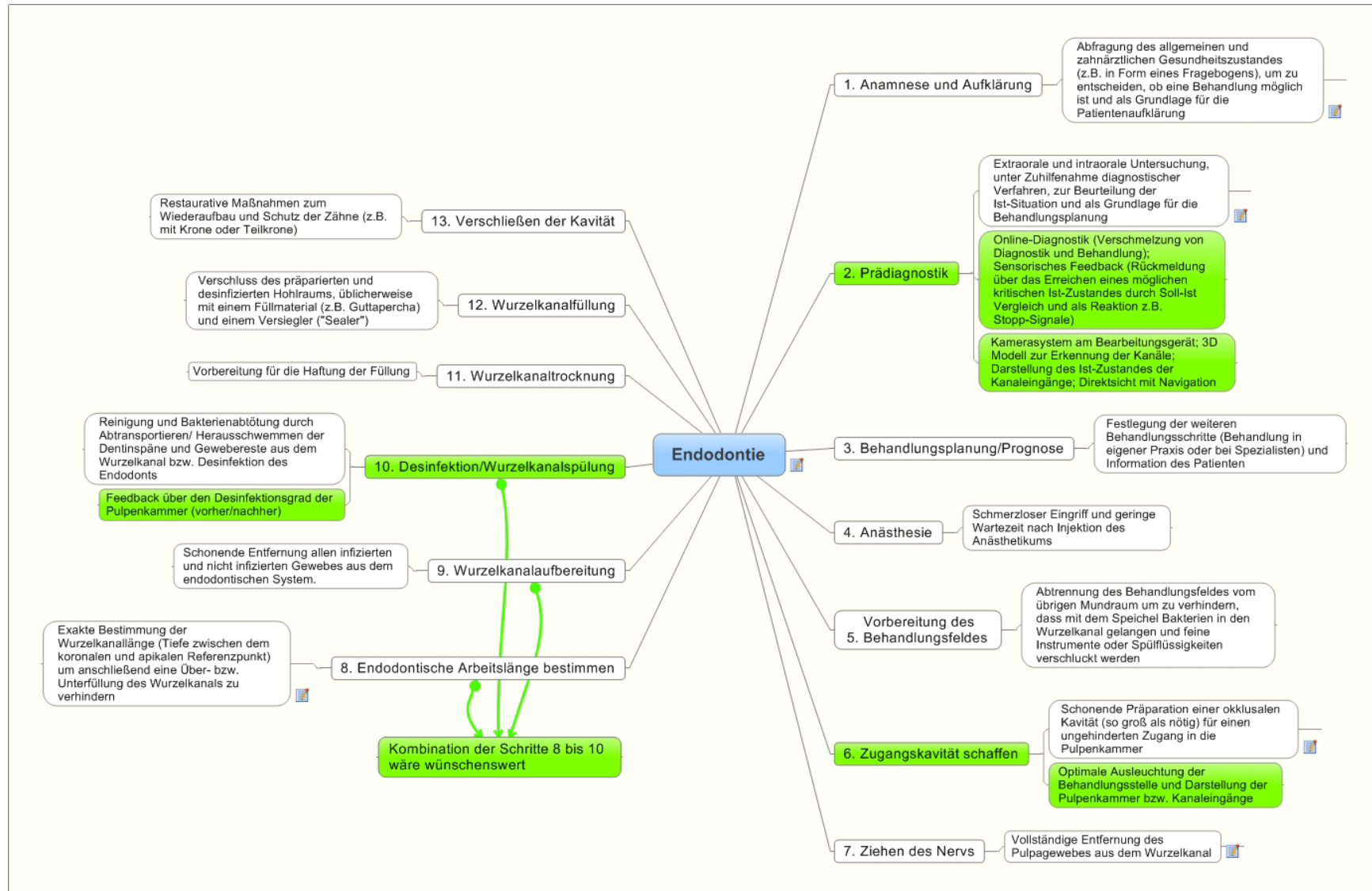


Abbildung 13: Aussichtsreiche Dentalanwendungen für den Einsatz von Diagnoseverfahren (grün hinterlegt) in der Endodontie [15], [16].

Prädiagnostik

Endodontische Erkrankungen werden bisher durch die Anamnese, die extraorale und intraorale Untersuchung diagnostiziert. Bei der Anamnese werden Dauer, Anlass und Qualität des Schmerzes und eventuelle Vorbehandlungen abgefragt. Bei der extraoralen Untersuchung werden äußerliche Veränderungen, wie z.B. Schwellungen bewertet. Die intraorale Untersuchung dient der Feststellung von unbehandelter Karies, begonnener Wurzelkanalbehandlung, Verfärbungen, Fisteln oder Schwellungen. Röntgenuntersuchungen (vor allem Kleinbildröntgen) werden zur Erkennung der Pulpaausdehnung, der Anzahl, Länge und Krümmung des/der Wurzelkanals/Wurzelkanäle und umgebender Strukturen eingesetzt [42].

Pulpaerkrankungen können Anlass für eine Wurzelbehandlung sein und werden z.B. durch Karies verursacht. Durch das Eindringen von Karies in den Wurzelkanal wird die Pulpa infiziert und ruft eine Entzündungsreaktion des Körpers hervor. Eine Infektion der Pulpa kann aber auch über die Zahnfleischtasche oder den Blutkreislauf hervorgerufen werden. Man unterteilt die Stadien der Pulpaerkrankungen in akute bzw. chronische, reversible, irreversible Pulpitis und den Pulpentod (Nekrose) [43].

Unbehandelt oder unzureichend behandelt kann eine Erkrankung der Pulpa somit bis zur Nekrose führen und in weitere Gewebe, z.B. den Kieferknochen, vordringen. Durch eine Wurzelkanalbehandlung können an irreversibler Pulpitis erkrankte Zähne versorgt und erhalten werden [44].

Mit Hilfe von Sensibilitäts-, bzw. Vitalitätstests kann die Empfindlichkeit des Zahnes bzw. die Fähigkeit der Pulpa zur Reizweiterleitung oder die Vaskularisierung untersucht werden. Sie dienen nicht unmittelbar der Kariesfindung, sind aber dazu geeignet herauszufinden, ob eine akute Pulpitis vorliegt oder ob ein Zahn noch vital ist. Eine erhöhte Reizbarkeit kann z.B. ein Hinweis auf versteckte Karies sein. Die Diagnose kann somit letztendlich über die Erhaltung oder Exstirpation der Pulpa entscheiden [11].

Nach Ende der Prädiagnostik soll der Arzt in der Lage sein zu entscheiden, ob eine Wurzelkanalbehandlung nötig ist. Außerdem kann er die weiteren Planungs- und Behandlungsschritte einleiten.

Zugangskavität schaffen

Wenn der Arzt die Entscheidung zur Wurzelkanalbehandlung getroffen hat, erfolgt nach der Planung, Anästhesie und der Vorbereitung des Behandlungsfelds die Schaffung der Zugangskavität. Ziel der Trepanation, also der Eröffnung der Zahnhöhle, ist das schonende Schaffen eines Zuganges zur Pulpankammer bzw. der Kanäleingänge. Wesentliche diagnostische Hilfsmittel bei der Trepanation, sind eine optimale Beleuchtung, bzw. eine vergrößerte Darstellung der Strukturen, z.B. durch ein OP-Mikroskop. Dadurch kann der Arzt nach dem Grundsatz „so viel wie nötig, aber so wenig wie möglich“ Zahnschmelz entfernen, um einen ungehinderten Zugang zur Pulpenkammer zu schaffen. Unbedingt nötig ist dabei die genaue Kenntnis der anatomischen Gegebenheiten des Zahninneren des Patienten, um den Wurzelkanal bzw. die Wurzelkanäle freizulegen. Dies kann mit Hilfe von 3D-Aufnahmen (z.B. 3D-Röntgen) von außen erfolgen (Prädiagnostik). In weiterer Folge werden die Wurzelkanäleingänge mit feinen Instrumenten vorsichtig ertastet (evtl. zusätzlich mit Lupe oder OP-Mikroskop). Nach dem Auffinden der Wurzelkanäleingänge wird mit Hilfe von Exstirpationsnadeln das Pulpengewebe aus dem Kanal entfernt und im Anschluss die endodontische Arbeitslänge bestimmt [16].

Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge

Für den Erfolg von Wurzelkanalbehandlungen ist die exakte Bestimmung der Arbeitslänge entscheidend, um z.B. eine Über- bzw. Unterfüllung des Wurzelkanals zu vermeiden. Die ideale Wurzelkanalfüllung schließt an der engsten Stelle des Kanals ab, der apikalen Konstriktion (auch Foramen apicale) [45].

Bei der röntgenologischen Wurzelkanallängenbestimmung wird der Abstand von einem koronalen (von lat.: corona „Krone“) Bezugspunkt (z.B. Höckerspitze) zum Foramen apicale dargestellt. Dabei wird eine Nadel in den Wurzelkanal eingeführt, welche mit einem Stopper (z.B. Gummiring) versehen ist, der entlang des Instruments verschoben werden kann und den koronalen Anschlagspunkt definiert. Anschließend wird eine Röntgenaufnahme des Zahnes mit dem Instrument angefertigt. Das Foramen apicale befindet sich jedoch nur selten in der Nähe des zweidimensionalen, röntgenologischen bzw. sogar anatomischen Apex, wodurch häufig fehlerhafte Arbeitslängen gemessen werden (siehe Abbildung 14). Dadurch sind häufig Zwischenröntgenaufnahmen zur Kontrolle nötig [46].

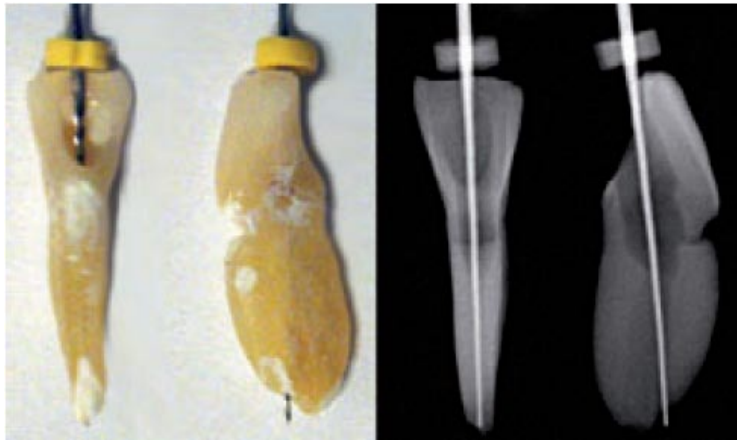


Abbildung 14: Zahn mit scheinbar richtig eingeführter Feile zur röntgenologischen Arbeitslängenbestimmung. Durch seitliche Betrachtung wird erkennbar, dass die Feile über das Foramen apikale hinausragt [46].

Aus diesem Grund wird die Arbeitslänge auch immer häufiger durch eine elektrische Längenbestimmung (Endometrie) bestimmt. Dabei wird eine Elektrode in den Wurzelkanal eingeführt und eine Referenzelektrode an der Mundschleimhaut befestigt (z.B. Lippenelektrode). Durch das Anlegen eines Stromes kann ein Widerstand (bzw. eine Impedanz) zw. den Elektroden gemessen werden, wodurch die Kanallänge bestimmt werden kann [45].

Wurzelkanalaufbereitung und Desinfektion/Wurzelkanalspülung

Nach der möglichst exakten Bestimmung der Wurzelkanallänge können die Instrumente zur nachfolgenden Aufbereitung, in der entsprechenden Länge gewählt werden. Somit kann durch manuelle Aufbereitung mit Handfeilen bzw. maschineller Aufbereitung (mit oszillierendem oder rotierendem Antrieb) das Wurzelkanalsystem vollständig gereinigt und erweitert werden (z.B. im Wechsel mit keimreduzierenden Spülungen, durch Diodenlaser oder durch desinfizierende Ozonbehandlung) [16].

Ein Produkt zur Wurzelkanal-desinfektion ist PAD Plus (Photo-Activated Disinfection) von Denfotex Light Systems Ltd. (Inverkeithing, Vereinigtes Königreich), welches auf der IDS 2011 vorgestellt wurde. Bei der photoaktivierten Desinfektion heftet sich der Farbstoff Toloniumchlorid selektiv an die Bakterienzellwände an. Die anschließende Bestrahlung per LED-Lichtquelle (635nm) führt zur Bildung von Singlett-Sauerstoffen und zur Zerstörung der Zellmembran. PAD Plus eliminiert laut Herstellerangaben alle Arten oraler Bakterien selektiv [47].

Eine Möglichkeit zur gleichzeitigen Aufbereitung und Spülung bietet die „self adjusting file“ (SAF, Henry Schein Deutschland GmbH, Langen, Deutschland). Sie

besteht aus einem hohlförmigen NiTi-Gitter und bietet somit die Möglichkeit, Spülflüssigkeit durch die Feile zu leiten (siehe Abbildung 15) [48].



Abbildung 15: Self-adjusting file (SAF) von Henry Schein [48].

Ein entscheidender Aspekt bei der Wurzelkanalbehandlung ist die vollständige Entfernung des infizierten pulpalen Gewebes [44].

Durch ein quantitatives Feedback über den (Des-) Infektionsgrad der Pulpa wäre ein Vergleich des Infektionsgrades vor und nach der Behandlung möglich und der Erfolg der Wurzelkanal desinfektion könnte beurteilt werden.

Kombination der Arbeitslängenbestimmung, Wurzelkanalaufbereitung und Desinfektion/Spülung

Eine Kombination der Wurzelkanalaufbereitung und Desinfektion/Spülung ist bereits möglich, z.B. durch die SAF. Auch eine Kombination der endometrischen Arbeitslängenbestimmung und der Wurzelkanalaufbereitung ist bereits kommerziell verfügbar. Das Signal für den Apexlokator kann wie bei Root ZX (J. Morita Europe GmbH, Dietzenbach, Deutschland) an der Instrumentenspitze abgegriffen werden (siehe Abbildung 16) und durch das Winkelstück durchgeführt werden. Wie durch das Produkt „Endo Pilot Endomotor mit Apexfinder“ (Schlumbohm GmbH und Co. KG, Brokstedt, Deutschland) vorgezeigt, kann das Signal auch ohne externen Abgriff direkt durch das Instrument geführt werden.



Abbildung 16: Root ZX von J. Morita Europe GmbH [49].

Wünschenswert wäre ein Verfahren, welches die Position der Feile im Wurzelkanal während der Wurzelkanalbehandlung zu jederzeit wiedergibt, da sie während der Behandlung nicht direkt einsehbar ist, möglicherweise in Kombination mit anatomischen 3D-Aufnahmen.

3.3 Aufstellung der Diagnoseverfahren

Die in der Zahnheilkunde eingesetzten Diagnoseverfahren können aufgrund von Gemeinsamkeiten klassifiziert werden. Eine Auflistung und kurze Beschreibung liefert Tabelle 20.

Tabelle 20: Übersicht und Kurzbeschreibung der Diagnoseverfahren in den ausgewählten Anwendungsfeldern

Diagnoseverfahren	Kurzbeschreibung
Konventionelle bildgebende Diagnoseverfahren	Untersuchungsmethoden, welche Aufnahmen des Körperinneren, zur morphologischen bzw. funktionellen Diagnostik liefern (z.B. Röntgendiagnostik, Sonographie).
Optische Diagnoseverfahren	Methoden, welche Gewebeuntersuchungen aufgrund der Wechselwirkung mit optischer Strahlung ermöglichen (z.B. Fluoreszenz).
Elektrische Diagnoseverfahren	Durch die Applikation von elektrischem Strom (Gleichstrom bzw. Wechselstrom) in das Untersuchungsgebiet können Reize gesetzt werden (z.B. zur Sensibilitätsbestimmung), sowie daraus abgeleitete Messungen (z.B. Impedanzmessung zur Apex-Lokalisation) diagnostische Informationen liefern.
Mechanische Diagnoseverfahren	Gezielte Einwirkung von Kräften auf die Messprobe, zur Gewinnung von Informationen, z.B. Bisskraftbestimmung durch Aufdruckmessung.
Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing-Verfahren (CAD/CAM)	Ein computerunterstützt entwickeltes Modell (CAD) wird direkt zur Fertigung übermittelt (CAM). Beispielsweise können keramische Restaurationen nach einer Kameraaufnahme der Kavität am Computer entworfen und im Anschluss gefertigt werden.
Diagnostische Tests/Indikatoren	Indikatoren bzw. diagnostische Tests liefern nach Wechselwirkung mit der Probe ein Resultat, das über Gesundheitsrisiken bzw. -zustände informiert.
Kombinierte Diagnoseverfahren	Gezielte Kopplung von mindestens zwei Diagnoseverfahren, um deren Vorteile bei der Untersuchung zu verknüpfen.

In weiterer Folge werden die Diagnoseverfahren pro Anwendungsfeld aufgelistet.

3.3.1 Prophylaxe und Parodontologie

Konventionelle bildgebende Verfahren (siehe Abbildung 17), vor allem die Röntgendiagnostik, haben in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde einen großen Stellenwert. Die in der Zahnheilkunde angewandten Röntgenverfahren lassen sich grundsätzlich in 2D- und 3D-Verfahren unterteilen. Bei den durch Projektionsaufnahmen erzeugten 2D-Röntgenbildern unterscheidet man des Weiteren zwischen Kleinbildröntgen für Detailaufnahmen (z.B. von parodontalen Strukturen) und Panoramarröntgen für Übersichtsaufnahmen (z.B. zur Beurteilung von Zahnstellungen). Durch den Einsatz von digitalen Verfahren wurde die Auflösung im Gegensatz zu analogen Film-Folien-Systemen verbessert. 3D-Röntgenverfahren sind z.B. die Dental-Computertomographie (CT) und die digitale Volumentomographie (DVT, auch „Cone Beam CT“- CBCT). Bei diesen Verfahren erzeugt ein um den Patienten angeordnetes Röntgenquelle-Detektor-System Schnittbilder durch ein Strahlenbündel (CT) bzw. einen Strahlenkegel (CBCT), welche zu einem 3D-Bild rekonstruiert werden. Die Sonographie (Ultraschallbildgebung) und nuklearmedizinische Verfahren (z.B. Magnetresonanztomographie, MRT) sind nicht-ionisierende Verfahren, die das Spektrum der konventionellen bildgebenden Verfahren in der Zahnheilkunde vervollständigen. Sie dienen z.B. der Beurteilung von oberflächlichen Gewebeprozessen, wie Schleimhauterkrankungen [50].

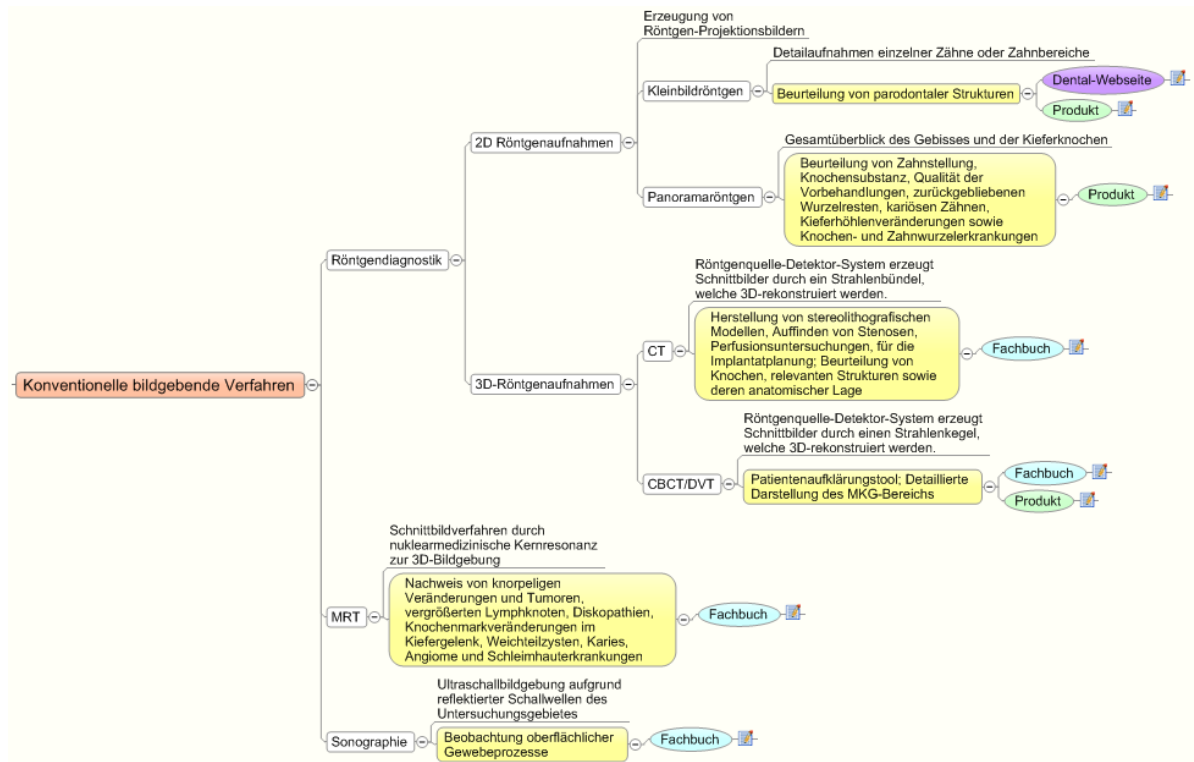


Abbildung 17: Konventionelle bildgebende Verfahren in der Prophylaxe und Parodontologie

Gewebeuntersuchungen mit Hilfe von optischer Strahlung reichen von der visuellen Inspektion, über mikroskopische Techniken, bis hin zu spektroskopischen Verfahren (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19). Unter optischer Strahlung wird die ultraviolette Strahlung, das für den Menschen sichtbare Licht und die Infrarotstrahlung zusammengefasst, welche Teile des elektromagnetischen Spektrums sind. Die klassische visuelle (klinische) Inspektion der Mundhöhle kann durch optische Hilfsmittel unterstützt werden. So kann die Ausleuchtung des Behandlungsfeldes mit Deckenleuchten, Lichtsonden, einer Lichtquelle am Instrument bzw. einer Lupenbrille, etc. geschehen. Mundspiegel ermöglichen dem Arzt die Inspektion von nicht direkt ersichtlichen Strukturen in der Mundhöhle. Zur vergrößerten Darstellung des Untersuchungsgebietes dienen Lupenbrille, OP-Mikroskop, sowie Kameras (Intraoralkamera, Extraoralkamera, Endoskop). Sie können auch als Patientenaufklärungstools verwendet werden.

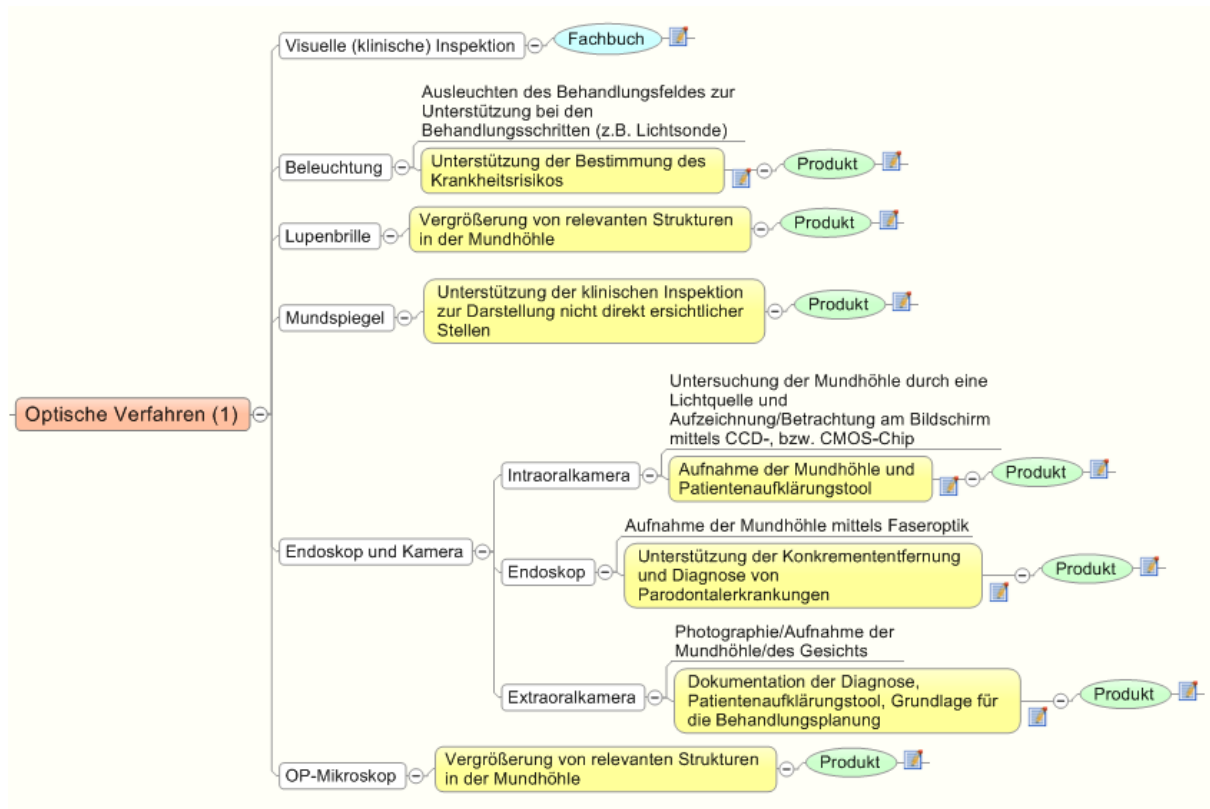


Abbildung 18: Optische Verfahren (Teil 1) in der Prophylaxe und Parodontologie

Mit Hilfe der Durchleuchtung von Zähnen mit der faseroptischen Transillumination (FOTI, auch Diaphanoskopie) und anschließender Beurteilung der Transparenz können z.B. Konkremente erkannt werden [51].

Außerdem werden in der Prophylaxe und Parodontologie Lumineszenzverfahren eingesetzt. Lumineszenz ist die optische Strahlung eines physikalischen Systems, die beim Übergang von einem angeregten Zustand zum Grundzustand entsteht. Man bezeichnet die Lumineszenz oft als „kaltes Leuchten“, da bei dem Vorgang Licht emittiert wird, ohne das Material erhitzt zu haben. Man kann die Lumineszenz nach Art der Anregung (z.B. Chemolumineszenz) oder nach der Dauer des Leuchtens nach der Anregung (Fluoreszenz oder Phosphoreszenz) einteilen. Die Chemolumineszenz, bei der die Anregung des Systems aufgrund einer chemischen Reaktion erfolgt, wird z.B. zum Oral-Krebs-Screening, nach Spülung der Mundhöhle mit einer verdünnten Ethansäure eingesetzt (ViziLite, Zila Inc., USA).

Als Fluoreszenz wird das Nachleuchten, als Begleiterscheinung und unmittelbare Folge der Anregung des Systems, bezeichnet. Im Gegensatz zur Phosphoreszenz, welches ein Nachleuchten von wenigstens 1/1000 Sekunden nach der Anregung be-

schreibt, erlischt die Fluoreszenz im Regelfall ca. 10^{-7} Sekunden nach Ende der Bestrahlung [52].

Die Atome des Fluorophors absorbieren die einfallende Strahlungsenergie und werden in einen angeregten Zustand versetzt. Durch spontane Emission von charakteristischer Fluoreszenz wird diese Energie wieder abgegeben und der Stoff zurück in den Grundzustand versetzt [22].

Die LED- oder LASER-induzierte (Auto-)Fluoreszenz wird z.B. beim Oral-Krebs Screening sowie der Zahnsteindetektion ausgenutzt. Die Detektion der Fluoreszenz kann nicht nur visuell, sondern auch mit Hilfe einer Kamera geschehen. Die sogenannte „Quantitative Licht-induzierte Fluoreszenz“ (QLF) oder „Light induced fluorescence evaluator for diagnosis and treatment“ (LIFEDT) werden z.B. zur Detektion von Plaque und Zahnstein eingesetzt (z.B. Inspektor Pro, OMNI Oral Pharmaceuticals, Florida, USA).

Absorptions- und Reflexionsverfahren schließen das Spektrum der optischen Verfahren in der Prophylaxe und Parodontologie ab. Neben der „Optischen Kohärenztomographie (OCT) ist es mit Hilfe der Raman-Spektroskopie sowie der Nah-Infrarot-Spektroskopie möglich, z.B. Zahnfleischerkrankungen festzustellen. Durch Bestrahlung des Zahnes mit Licht verschiedener Frequenzen und anschließender Auswertung des Spektrums kann außerdem Zahnstein detektiert werden (DetecTar, Dentsply Professional, York, USA).

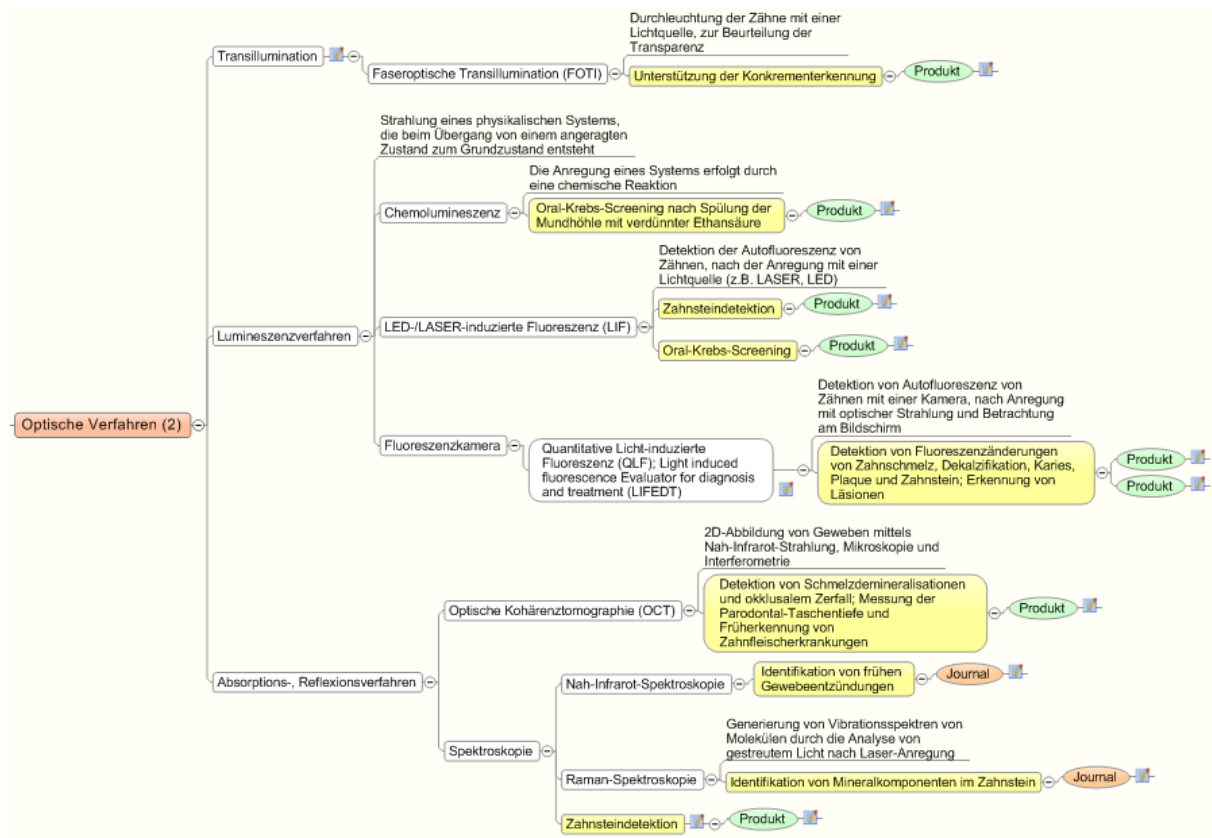


Abbildung 19: Optische Verfahren (Teil 2) in der Prophylaxe und Parodontologie

Zu den elektrischen Verfahren in der Prophylaxe und Parodontologie (siehe Abbildung 20) kann die elektronische Messung der Zahnfleischtaschentiefe gezählt werden. Beim Produkt Florida Probe (Florida Probe Corp., Gainesville, USA) wird durch einen kalibrierten Sondendruck und einem Displacement-Transducer, welcher die mechanische Verschiebung in ein elektrisches Signal umwandelt, die Tiefe bestimmt.

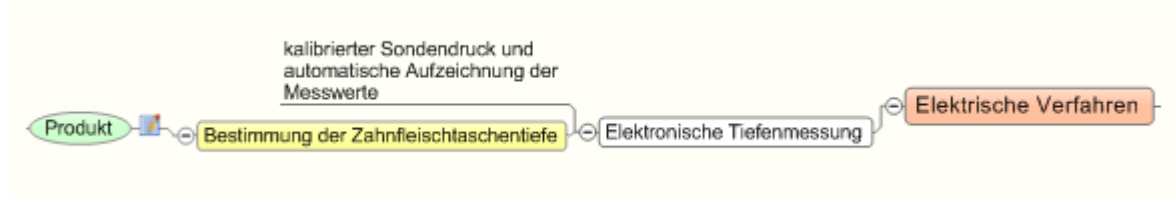


Abbildung 20: Elektrische Verfahren in der Prophylaxe und Parodontologie

Zu den rein mechanischen Verfahren (siehe Abbildung 21) zählt die mechanische Messung der Zahnfleischtaschentiefe durch Parodontalspitzen mit Tiefenmarkierungen und die taktile Abtastung des Untersuchungsgebietes z.B. mit einem Instrument oder durch die Finger [53].

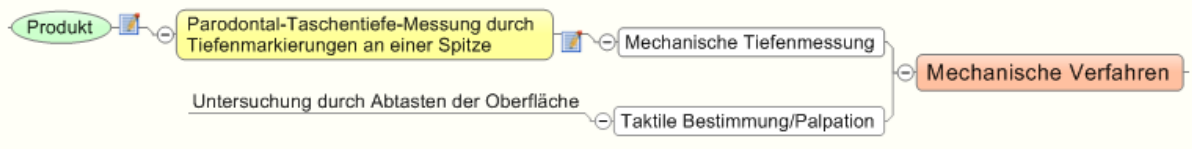


Abbildung 21: Mechanische Verfahren in der Prophylaxe und Parodontologie

Derzeit wird die Möglichkeit der Verwendung von Speichel zur Beurteilung von (Parodontal-) Erkrankungen intensiv erforscht. Speichel-Biomarker (z.B. Immunglobuline oder C-reactive Protein) könnten als Monitoring-Tool für den Gesundheitsstatus eingesetzt werden und um einen aktiven Erkrankungsfortschritt frühzeitig zu erkennen [54], [55].

Es liegt auf der Hand, dass eine Vielzahl an Biomarkern die diagnostische Aussagekraft für die multifaktorellen Parodontalerkrankungen erhöht. Dabei scheinen Kombinationen von Biomarkern auf sogenannten „Lab-on-a-chip“-Plattformen vielversprechend zu sein (siehe Abbildung 22) [27].

Neben einfachen Färbetests, z.B. zum Anfärben von Plaque als Patientenmotivationsstool bei der professionellen Zahnreinigung werden auch einige Tests für allgemeine Erkrankungen in der Zahnpraxis eingesetzt. Zahnärzte können dabei helfen, Patienten mit erhöhtem Diabetes-Risiko zu identifizieren (Diabetes Risk Assessment Plus, Healthy Heart Dentistry Inc., Bannockburn, IL, USA). Bei Diabetes mellitus kann keine Glukose in die Zellen aufgenommen werden, die dadurch im Blutkreislauf verbleibt. Durch die Entnahme eines Bluttröpfens vom Finger kann die Glukosekonzentration bestimmt werden (z.B. auf Test Karte anhand der Farbe des Testareals). Wenn das Glukose-Level über einem kritischen Wert liegt, wird die Probe durch weitere Analyse im Labor ausgewertet (Hb A1c Analyse) und dadurch das Diabetesrisiko bestimmt. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Gesundheitszustandes des Patienten ist ein HPV-Screening Tool. Humane Papillomaviren (HPV) sind DNA-Viren (DNA - Desoxyribonukleinsäure), die eine virale Schleimhautinfektion auslösen und auch zu oralem Krebs führen können. Beim OraRisk® HPV Salivary Diagnostic Test (OralDNA Labs, Brentwood, Tennessee) wird nach dem Gurgeln einer sterilen Salzlösung in eine Sammlungstube gespuckt und die Flüssigkeit im Labor durch eine DNA-PCR-Analyse auf HPV untersucht. Die DNA-Analyse ist ein molekularbiologisches Verfahren, mit deren Hilfe die Erbsubstanz untersucht wird. Unter Zuhilfenahme der PCR (Polymerase Chain Reaction) werden bestimmte Stränge der

DNA vervielfältigt, weshalb schon geringste DNA-Proben zur Untersuchung herangezogen werden können.

Außerdem werden Tests zum Nachweis von HIV (Human immunodeficiency virus) und Oralkrebs angeboten. Enzyme-linked Immunosorbent Assay (ELISA) ist ein Verfahren zum Nachweis von HIV im menschlichen Körper. Dazu ist eine Blutabnahme nötig, um darin Antikörper gegen HIV nachzuweisen (Uni-Gold™ Recombigen® HIV, Trinity Biotech Plc, Irland). Mittels oralem Abstrich und anschließender chemischer Analyse im Labor kann das Oralkrebs-Risiko festgestellt werden (OralCDx Brush Test, OralCDx Laboratories Inc., Suffern, NY).

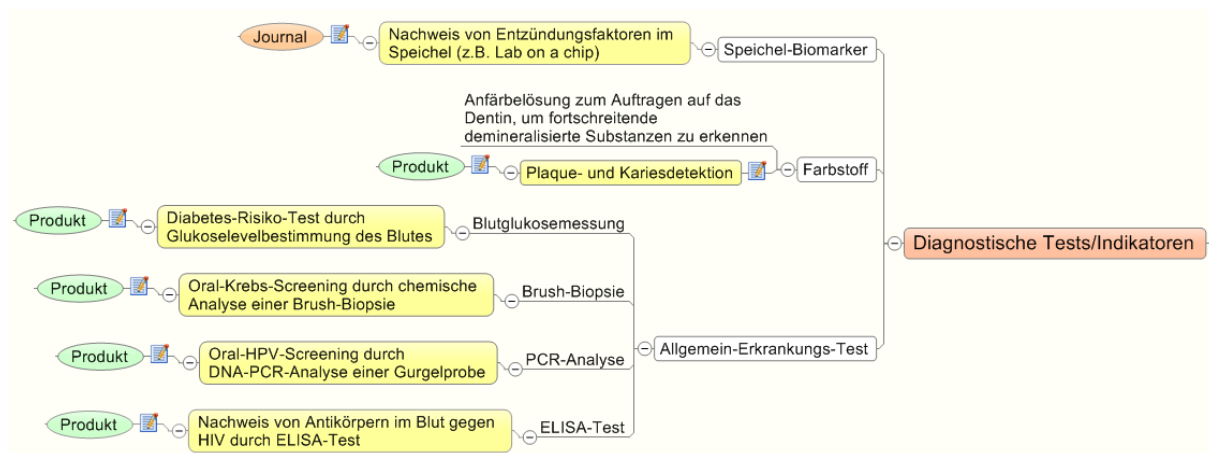


Abbildung 22: Diagnostische Tests/Indikatoren in der Prophylaxe und Parodontologie

Einige kombinierte Verfahren, meist in Verbindung mit optischen Verfahren, werden in der Prophylaxe und Parodontologie eingesetzt. Neben der Verwendung von Farbstoffen und anschließender Beleuchtung/Anregung der Untersuchungsstelle mit einer Lichtquelle, z.B. zur Schleimhautdiagnostik oder Plaquedetektion, werden Fluoreszenz und Reflexion von Licht in Kombination für das Oral-Krebs-Screening angewandt (Identafi 3000, DentaleZ Group, Malvern, PA, USA). Weiter sind kombinierte Verfahren zur selektiven Zahnstein- bzw. Konkrementerkennung und anschließender Entfernung am Markt erhältlich. So wird die Kombination eines InGaAs DiodenLasers für die Autofluoreszenz-Zahnstein-Detektion und eines Er-YAG Lasers für die Behandlung eingesetzt. Die automatische Zahnsteinentfernung erfolgt, wenn ein Autofluoreszenz-Schwellwert überschritten wird (Keylaser3, KaVo Dental GmbH, Biberbach, Deutschland). Eine weitere Möglichkeit zur kombinierten Zahnsteinerkennung und -entfernung bietet die Verbindung eines Ultraschallscalers mit einer Spektralanalyse, zur Erkennung von Zahnoberflächen und Konkrementen/Zahnstein (PerioScan, Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland).

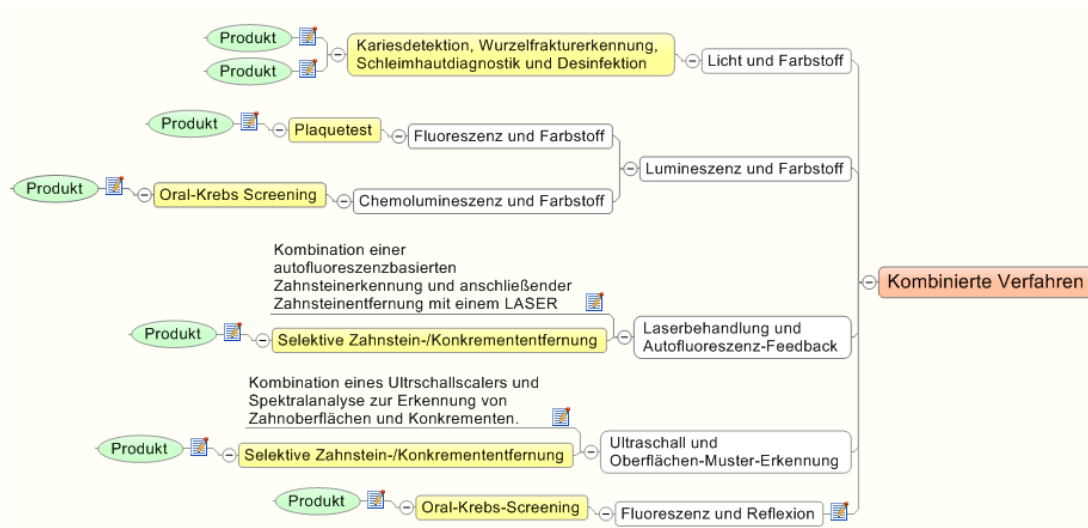


Abbildung 23: Kombinierte Verfahren in der Prophylaxe und Parodontologie

3.3.2 Restauration und Prothetik

In der Restauration und Prothetik werden zur Prädiagnostik vor allem Röntgenverfahren in der Praxis eingesetzt (siehe Abbildung 24). Sie dienen z.B. der Erkennung von Karies sowie der Darstellung des Mund-Kiefer-Gesichtsbereichs. Relativ neue Verfahren in der Zahnheilkunde wie MRT und Terahertz-Imaging zur Kariesdiagnostik sind aktuell noch Gegenstand der Forschung [56], [57].

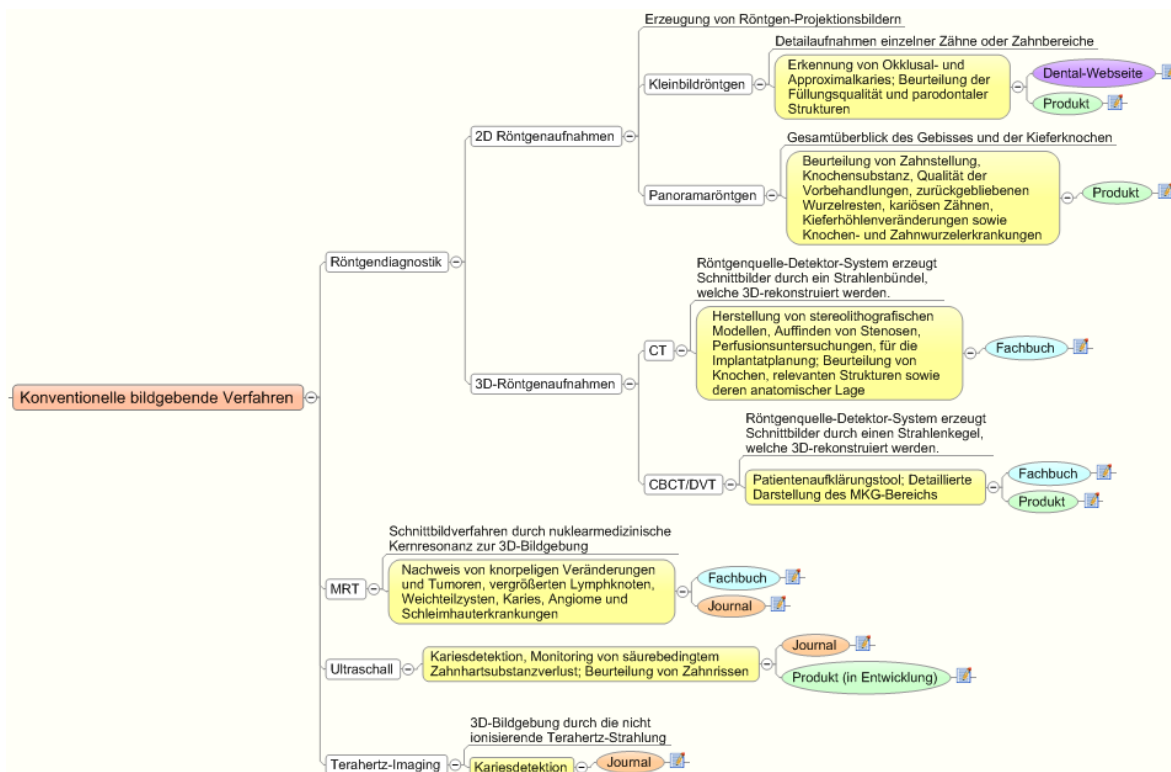


Abbildung 24: Konventionelle bildgebende Verfahren in der Restauration und Prothetik

Durch optische Hilfsmittel kann z.B. die Kariesdiagnose oder die Kariestherapie unterstützt werden. Endoskope/Kameras, OP-Mikroskope, Lupenbrillen sowie verschiedene Beleuchtungsmöglichkeiten werden eingesetzt (siehe Abbildung 25)

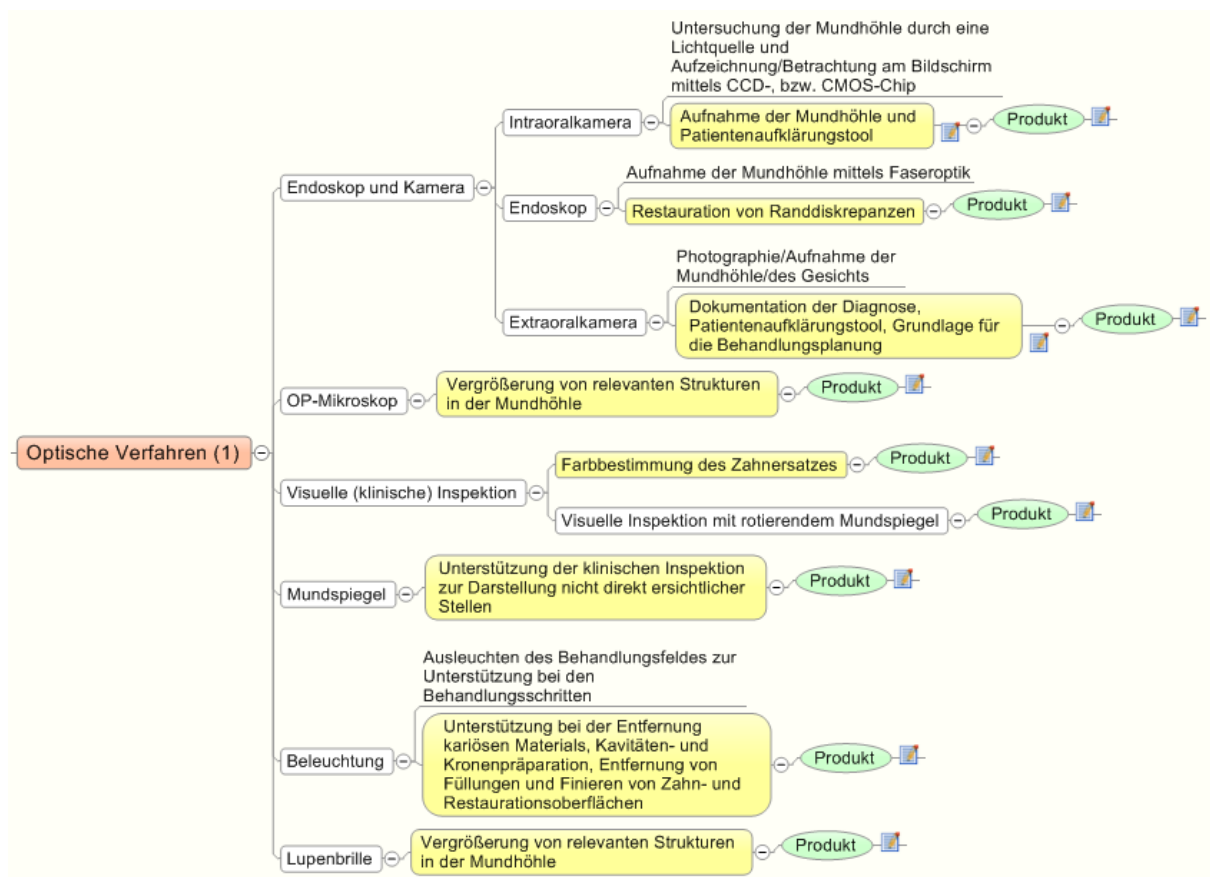


Abbildung 25: Optische Verfahren (Teil 1) in der Restauration und Prothetik

Weitere optische Verfahren für die Restauration und Prothetik basieren auf der Transillumination, Lumineszenz sowie Absorption und Reflexion und dienen hauptsächlich der Kariesdetektion bzw. der Unterstützung der Kariesentfernung (siehe Abbildung 26).

So kann mit Hilfe der Faseroptischen Transillumination (FOTI) bzw. der Digitalen Faseroptischen Transillumination (DIFOTI) sowohl Karies als auch Zahnrisse detektiert werden. Verschiedene Fluoreszenzverfahren wie die LASER-/LED-induzierte Fluoreszenz (z.B. DIAGNOdent, KaVo Dental GmbH, Bieberbach, Deutschland) bzw. Fluoreszenzkameras (z.B. VistaProof, Dürr Dental AG, Bietigheim, Deutschland) werden ebenfalls zur Kariesdetektion eingesetzt. Zur Unterstützung der Kariestherapie kann die sog. „Fluoreszenzgestützte Kariesexkavation“ (FACE) verwendet werden. Die Bestimmung der oralen Bakterienzahl aus einer Plaqueprobe, als Indikator für das Kariesrisiko, kann mit Hilfe des Verfahrens der Adenosintriphos-

phat-Biolumineszenz geschehen (CariScreen Caries Susceptibility Testing Meter, Oral BioTech, Albany, Oregon, USA).

Weitere optische Verfahren zur Kariesdiagnose sind die Optische Kohärenztomographie (OCT), die Photothermische Radiometrie sowie die polarisierte Ramanspektroskopie, wobei sich ersteres als Dentalprodukt in Entwicklung befindet (OCT Dental Imaging System, Lantis Laser, Denville, New Jersey, USA) [57], [58], [59].

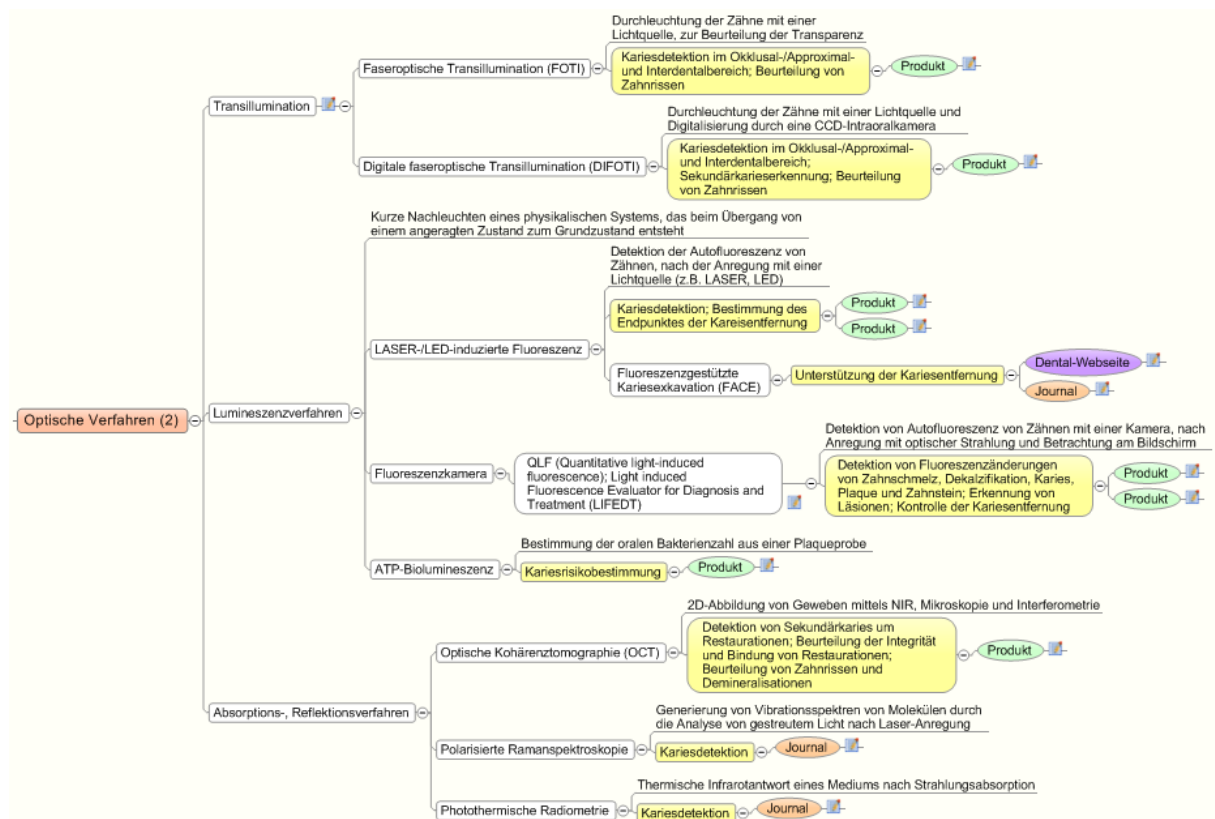


Abbildung 26: Optische Verfahren (Teil 2) in der Restauration und Prothetik

Elektrische Verfahren (siehe Abbildung 27) dienen in der Restauration und Prothetik der Kariesdiagnose (AC Impedanz-Spektroskopie - ACIST, Electrical Caries Monitor - ECM) und der Bestimmung der Restdentinstärke während der Kariestherapie (Prepometer®, Hager & Werken GmbH & Co. KG, Düsburg, Deutschland) [60], [61].

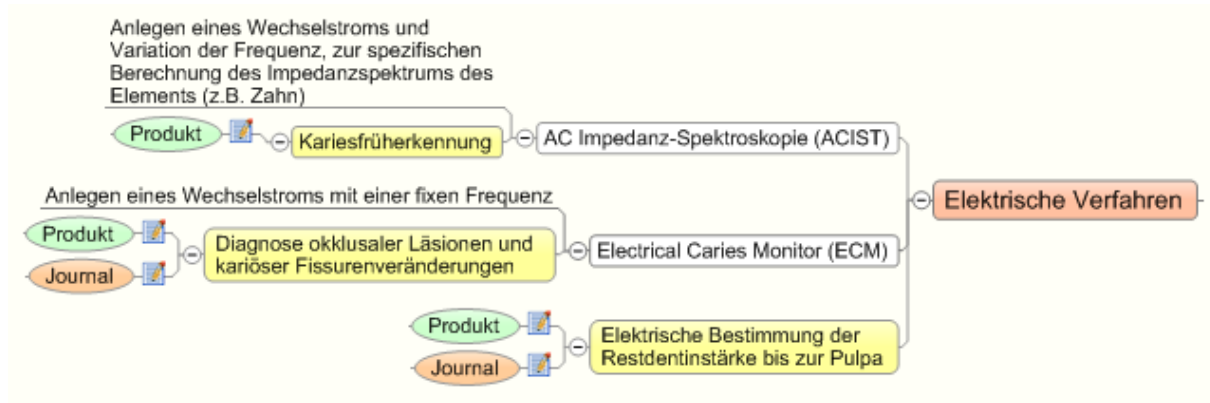


Abbildung 27: Elektrische Verfahren in der Restauration und Prothetik

Zu den mechanischen Verfahren (Abbildung 28) gehören die Abtastung der Oberfläche (Palpation) z.B. zur Analyse von Druckschmerzen oder des Befestigungsgrades der Zähne, die Druckaufbringung durch eine(n) zahnärztliche(n) Sonde/Scaler zur Kariesdiagnose sowie die Abformung von Gebiss- bzw. Kieferstrukturen zur Anfertigung von prothetischen Situationsmodellen. Außerdem wird mit Druck-Sensorfolien die Bisskraft und das Bisstiming bestimmt (T-Scan III, Tekscan, South Boston, USA).

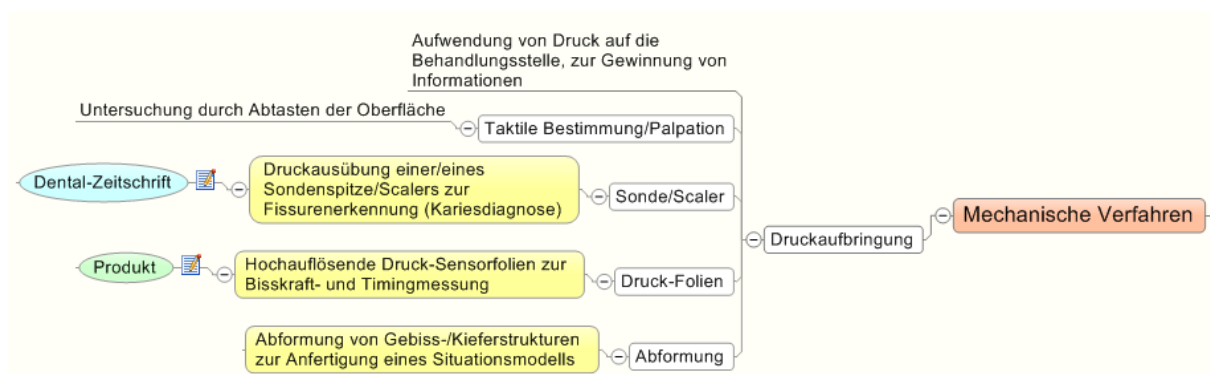


Abbildung 28: Mechanische Verfahren in der Restauration und Prothetik

Mit Hilfe von CAD/CAM-Systemen (Abbildung 29) wird ein computerunterstützt entwickeltes Modell (CAD – Computer-Aided Design) im Anschluss maschinell gefertigt (CAM – Computer-Aided Manufacturing). Dadurch können z.B. Zahnersatzmaterialien angefertigt werden. Mit Hilfe von CEREC (CEramic REConstruction, Sirona Dental Systems GmbH) können keramische Restaurierungen (z.B. Kermaik-Inlays, Onlays, Kronen, Veneers, etc.) maßgeschneidert und meist noch während der Behandlung hergestellt und eingesetzt werden. Mit einer Messkamera wird eine 3D-Aufnahme des zu präparierenden Zahnes aufgenommen, ohne konventionelle Abdrucknahme. Die Daten werden mit Hilfe eines CAD/CAM Systems verarbeitet, wodurch das Endprodukt nach der Anfertigung des Computermodells aus einem Keramikblock gefertigt wird [62].



Abbildung 29: CAD/CAM Verfahren in der Restauration und Prothetik

Die diagnostischen Tests bzw. Indikatoren in der Restauration und Prothetik dienen hauptsächlich der Kariesrisikobestimmung (siehe Abbildung 30). Neben Farbstoffen zur Detektion von Karies, z.B. zur Unterstützung der Kariesentfernung, werden verschiedene Speichelassoziierte Tests angeboten. Aufgrund der Annahme, dass Laktobazillen- bzw. Mutans-Streptokokken in der Mundhöhle aufgrund ihrer säurehaltigen Stoffwechselprodukte zu einem erhöhten Kariesrisiko führen, da diese Demineralisationsprozesse der Zahnhartsubstanz einleiten, werden Bakterientests angeboten. So kann z.B. durch das Kauen auf einem sterilen Paraffinstück die Gesamtbelastung der Leitkeime über den Speichel ermittelt werden (CRT bacteria, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein). Durch diese Methode können zusätzlich die Speichelflussrate bzw. die Viskosität bestimmt werden, welche ebenfalls im Zusammenhang mit dem kariösen Erkrankungsrisiko stehen. Bakterien können auch durch die sogenannte Immunochromatographie nachgewiesen werden. So enthalten beim Produkt Saliva-Check Mutans (GC Europe, Leuven, Belgien) Teststreifen zwei monoklonale Antikörper, die selektiv nur *S. Mutans* nachweisen. Die pathogene Stoffwechselaktivität von Laktobazillen in der Mundhöhle kann nach der Entnahme einer Biofilmprobe durch Milchsäureindikatorstäbchen bestimmt werden. (Clinpro Cario L-Pop, 3M Espe AG, Seefeld, Deutschland).

Kariesrisikotests werden auch auf Grundlage des pH-Werts des Speichels durchgeführt. Die sogenannten Puffersysteme des Speichels haben eine zahnschützende Wirkung, da Säuren binden und somit die Oberflächenentkalkung der Zahnhartsubstanzen verhindern. Wenn kritische Entkalkungs-pH-Werte (z.B. 6.3 für Wurzelzement, 5.7 für Zahnschmelz) unterschritten werden, kann mit Mineralverlusten gerechnet werden [63].

Die Kariesdiagnostik kann somit durch die Bestimmung des pH-Werts des Speichels (z.B. pH-Paper, Denteq Medical Technologies e.K., Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland) bzw. der Plaque (Plaque Indicator Kit, GC Europe, Leuven, Belgien) unterstützt werden. Durch die Ermittlung der Pufferkapazität nach Speichelentnahme und Auswertung auf Teststreifen, kann die Stabilität des pH-Werts durch Zugabe von

starken Säuren/Basen überprüft werden (z.B. CRT buffer, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein).

Neben Kariesrisikotests werden auch Aufbisssticks zum Auffinden von Frakturen verwendet (FracFinder, Denbur Inc., Oak Brook, Illinois, USA).

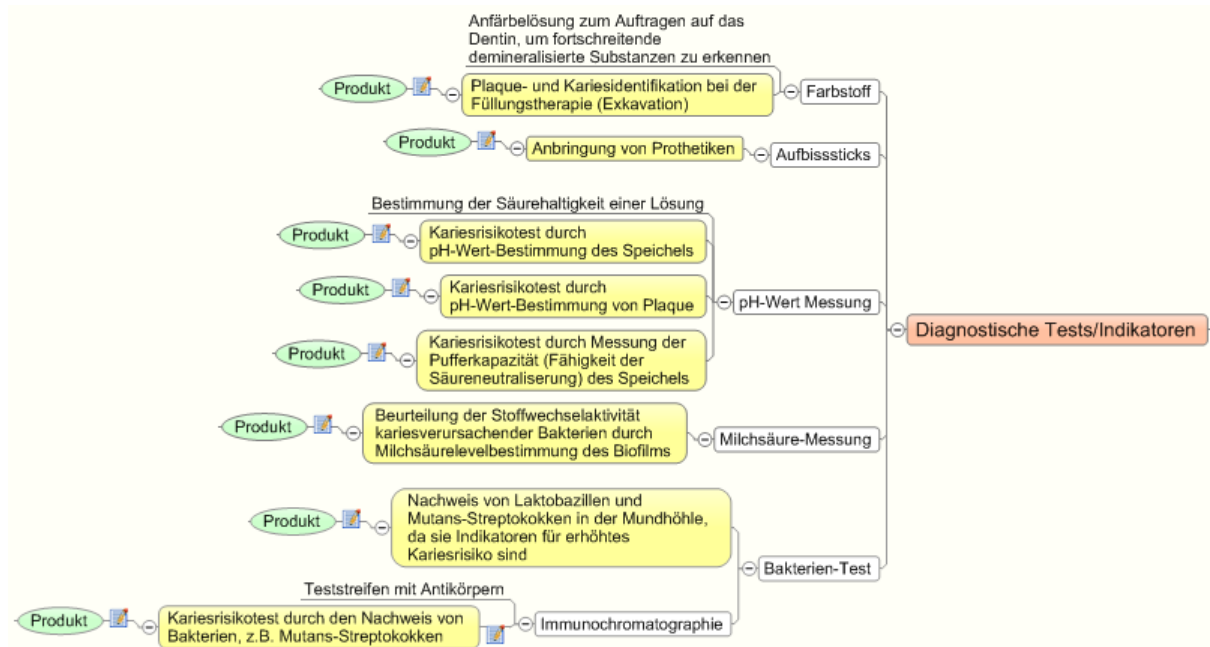


Abbildung 30: Diagnostische Tests/Indikatoren in der Restauration und Prothetik

Die kombinierten Diagnoseverfahren in der Restauration und Prothetik betreffen die Kariesdetektion, Kariesentfernung sowie die Funktionsanalyse des Kiefers (siehe Abbildung 31).

Mit Hilfe mechanischer Gesichtsbögen mit elektronischem Messsystem (z.B. ARCUSdigma von KaVo Dental GmbH) können Unterkieferbewegungen oder (schmerzhafte) Kiefergelenkspositionen bei der Funktionsdiagnostik analysiert werden. Die Gelenkspositionen können per Datenübertragung (z.B. USB) am PC ermittelt werden. Zusätzlich können Muskelbewegungen durch die Aufnahme mittels EMG (Elektromyogramm) und die Aufzeichnung von Gelenkgeräuschen durch Körperschallmikrofone zur Analyse herangezogen werden. Durch die Verwendung von Gesichtsbögen mit integrierten Empfängermodulen (z.B. Zebris CMD-Kieferregistriersystem, Schütz Dental GmbH, Rosbach, Deutschland) können die Freiheitsgrade des Unterkiefers mittels Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen erfasst werden.

Die Kariesdetektion kann mit Hilfe von Farbstoffen zur Anfärbung von Karies und der zusätzlichen Ausnutzung der Fluoreszenz geschehen. Außerdem wird die Photothermische Radiometrie (PTR) und Lumineszenz (LUM) zur Diagnose von Karies bereits in einem Produkt eingesetzt (Canary Caries Detection System, Quantum Dental Technologies, Toronto, Kanada). Ein System zur Detektion und anschließender Entfernung von Karies, auf Basis eines Autofluoreszenz-Feedbacks und einer Laserbehandlung, wird bei Keylaser III (KaVo, Bierberbach, Deutschland) ausgenutzt.

Des Weiteren wird die bildgeführte Laserablation von Karies, z.B. mit OCT oder Nah-Infrarot-Bildgebung erforscht [64].

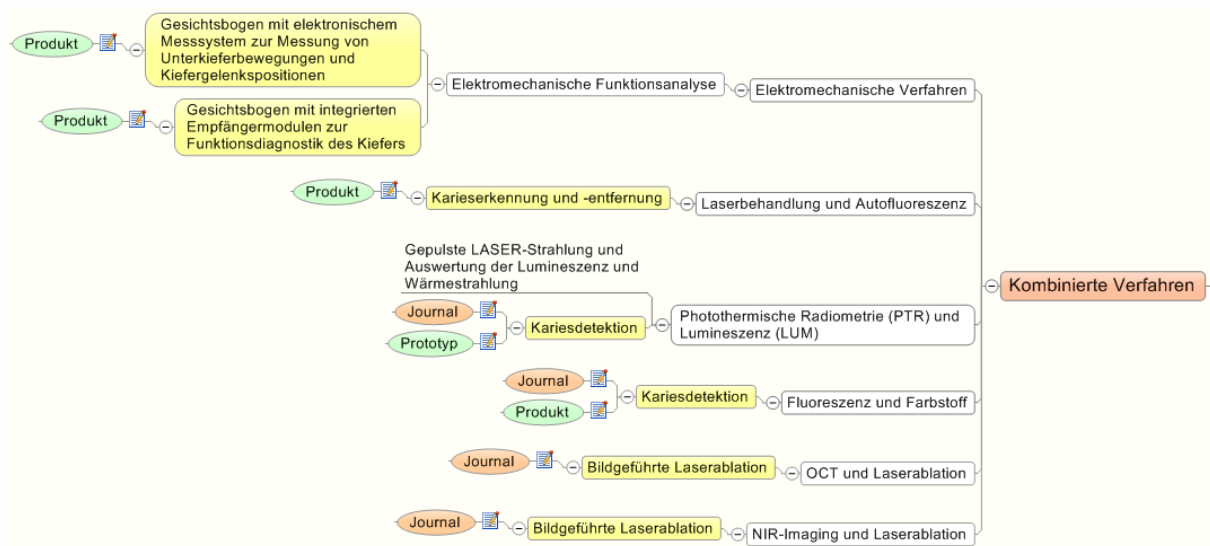


Abbildung 31: Kombinierte Verfahren in der Restauration und Prothetik

3.3.3 Endodontie

In der Endodontie werden konventionelle bildgebende Verfahren, vor allem die Röntgendiagnostik, zur Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge, Zahnwurzelkrankungen, Lokalisierung aller Wurzelkanäle, etc. eingesetzt (siehe Abbildung 32).

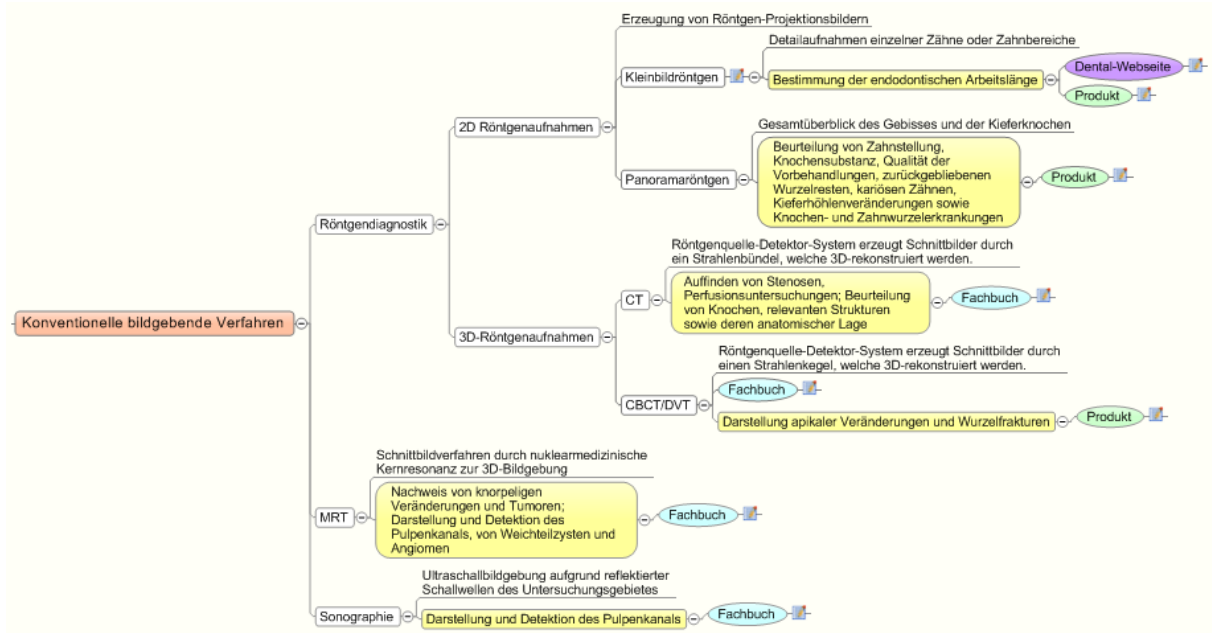


Abbildung 32: Konventionelle bildgebende Verfahren in der Endodontie

Optische Hilfsmittel, vor allem eine ausreichende Beleuchtung, sowie Vergrößerungshilfen wie dem OP-Mikroskop, werden bei der Wurzelkanalbehandlung eingesetzt. (siehe Abbildung 33).

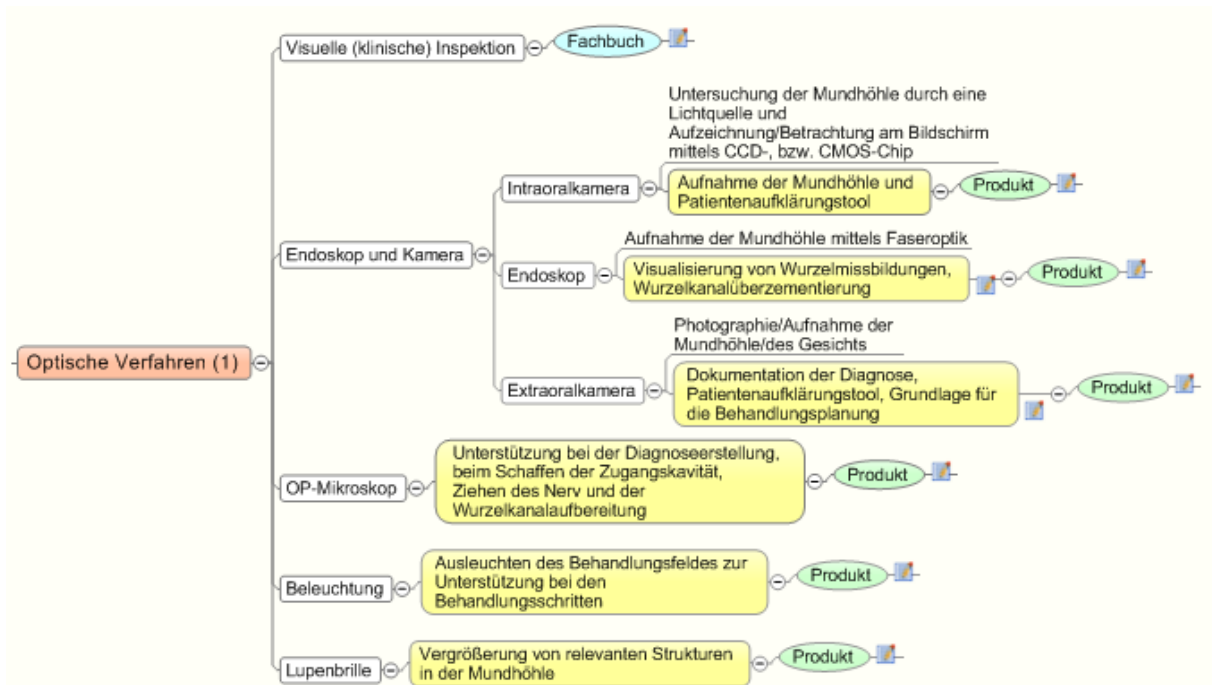


Abbildung 33: Optische Verfahren (Teil 1) in der Endodontie

Mit Hilfe der Transillumination können Wurzelfrakturen erkannt werden (siehe Abbildung 34). Außerdem wurden Laborversuche zur Bestimmung des Infektionsgrades der Pulpa mit Hilfe der Laser-induzierten Fluoreszenz unternommen [65].

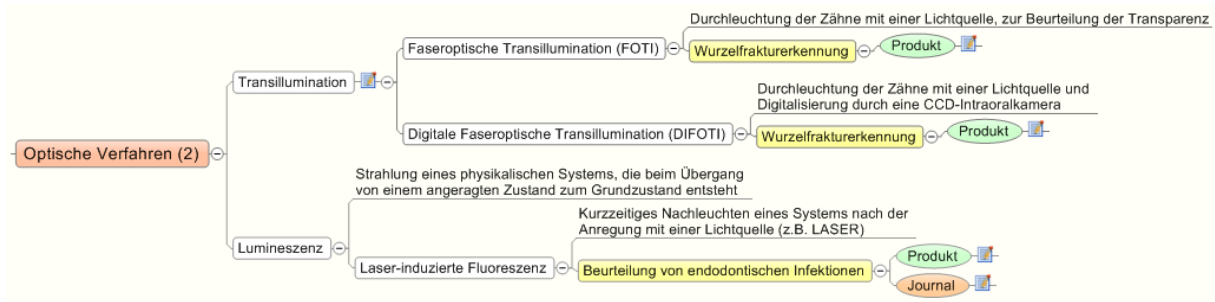


Abbildung 34: Optische Verfahren (Teil 2) in der Endodontie

Bei der taktilen Arbeitslängenbestimmung wird mit einem Wurzelkanalinstrument aufgrund von Erfahrung und Gespür des Zahnarztes versucht, die apikale Konstriktion zu lokalisieren (siehe Abbildung 35).

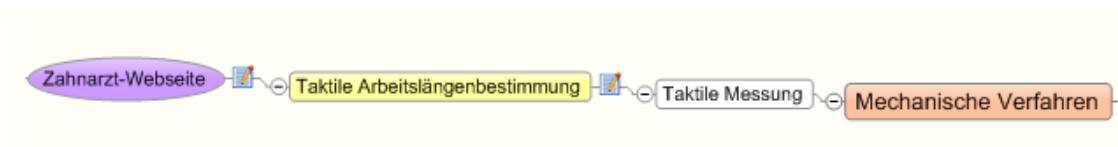


Abbildung 35: Mechanische Verfahren in der Endodontie

Für die elektrische Bestimmung der endodontischen Arbeitslänge (Endometrie) wurden verschiedene Verfahren entwickelt (siehe Abbildung 37).

Endometriegeräte bestehen grundsätzlich aus einer Spannungsquelle und einem Messinstrument (siehe Abbildung 36). Über eine Sondenklemme wird das als Elektrode dienende Wurzelkanalinstrument an das Messgerät angeschlossen. Als Gegenelektrode dient eine Handelektrode oder eine im Mundwinkel angebrachte Schleimhaut- bzw. Lippenelektrode. Die Länge des Instruments im Kanal wird über die Messung der Impedanz/des Widerstandes zwischen den beiden Elektroden bestimmt.

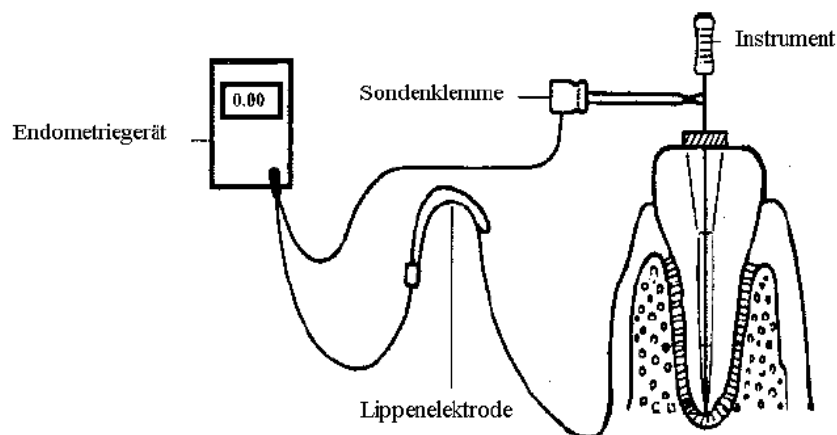


Abbildung 36: Schematische Darstellung der endometrischen Messapparatur [45].

Die Entfernung der Feilenspitze vom Apex wird meist auf einem Display angezeigt und/oder erfolgt akustisch. Die neueste Generation von Endometriegeräten setzt verschiedene Frequenzen zur Bestimmung der Impedanz ein. Bei dieser relativen Impedanzmessung werden die bei den verschiedenen Frequenzen ermittelten Impedanzen rechnerisch in Relation gestellt (Differenzmethode, Verhältnismethode) [45].

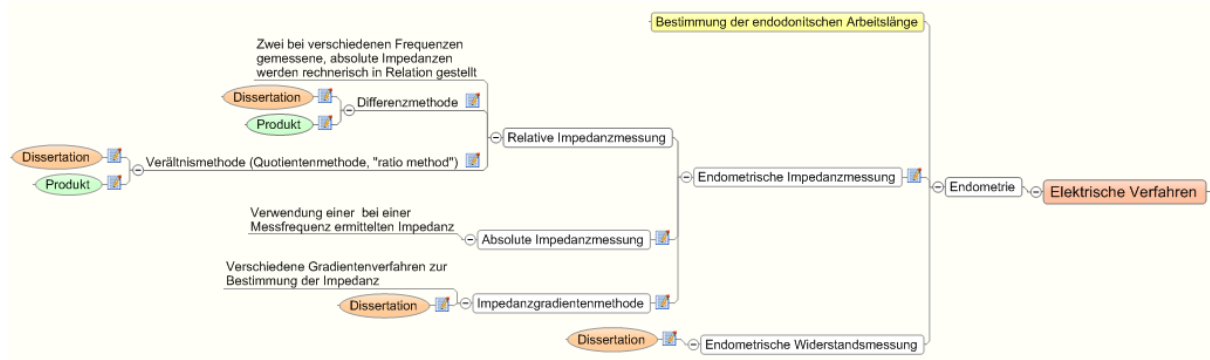


Abbildung 37: Elektrische Verfahren in der Endodontie

Die diagnostischen Tests/Indikatoren in der Endodontie werden zur Bestimmung der Empfindlichkeit bzw. der Vitalität des Zahnes eingesetzt. Bei den Sensibilitätstests unterscheidet man zwischen mechanischen (Aufbiss-, Berührungs- und Klopfempfindlichkeitstests) elektrischen (Stromapplikation und Testen der Reizempfindlichkeit) und thermischen Tests (Kälte- und Wärmetest). Diese relativ einfachen Tests haben jedoch oft nur eingeschränkte Aussagekraft über den tatsächlichen Vitalitätszustand, z.B. beim Vorhandensein von Füllungen oder Prothetiken [43].

Mit Hilfe der Laser-Doppler-Flowmetry kann, durch die Bestimmung der Vaskularisierung, die Pulpenvitalität bestimmt werden (moorVMS LDFTM, Moor Instruments GmbH, Remagen, Deutschland). Weitere experimentelle Verfahren zur Vitalitätsbestimmung sind die Pulsoximetrie sowie die Photoplethysmographie [66].

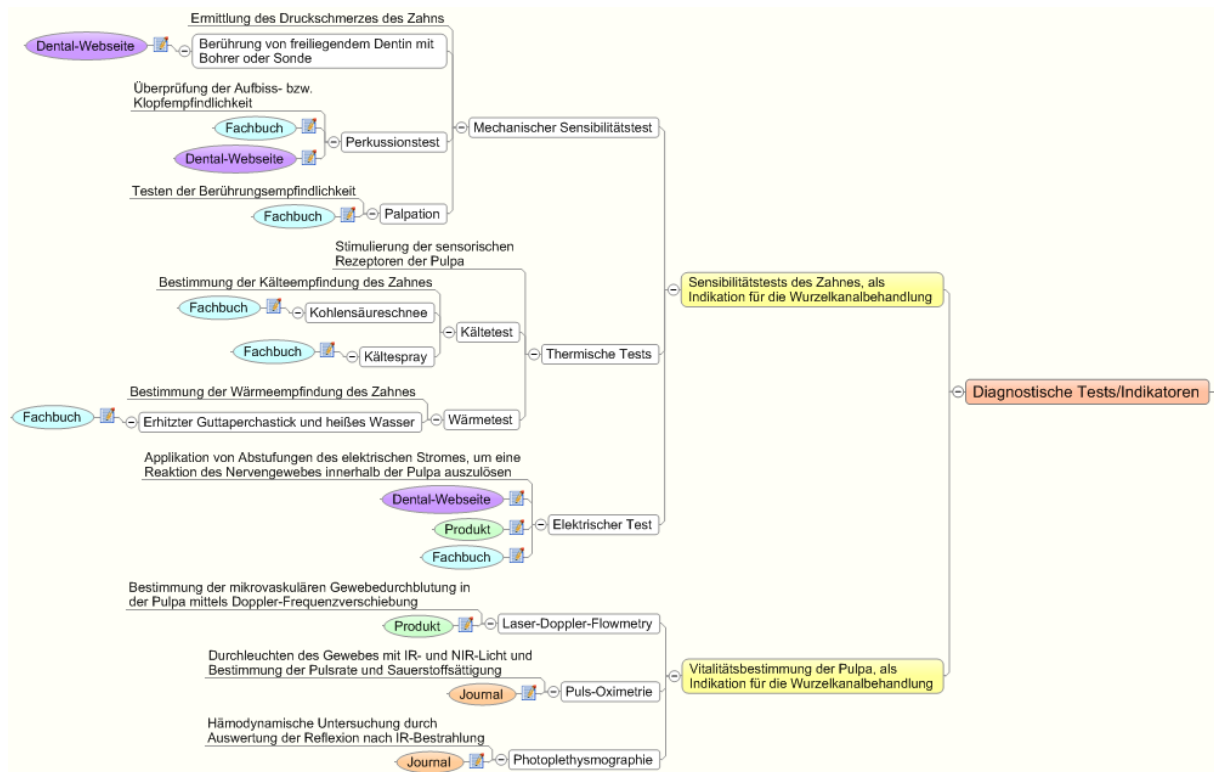


Abbildung 38: Diagnostische Tests/Indikatoren in der Endodontie

Bezüglich einer navigierten endodontischen Behandlung wird an einer Kombination von 3D-Radiographie und optischen Sensoren geforscht (Abbildung 39) [67].

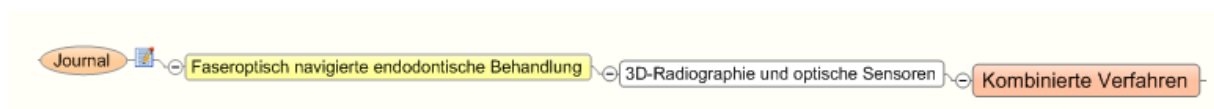


Abbildung 39: Kombinierte Verfahren in der Endodontie

3.4 Bewertung der Anwendungen

In Tabelle 21 werden die aussichtsreichsten Dentalanwendungen für den Einsatz von Diagnoseverfahren in den ausgewählten Anwendungsfeldern aufgelistet, sowie die Bewertung anhand der Wichtigkeit eines eigenständigen Produkts und der Wichtigkeit der Integration in ein bestehendes Produkt (aufsteigend von 0 bis 5) dargestellt.

Tabelle 21: Bewertung der Dentalanwendungen aufgrund der Wichtigkeit für ein eigenständiges Produkt (W1) und der Wichtigkeit der Integration in ein Produkt (W2).

Bewertung der Anwendungen	Wichtigkeit eines eigenständiges Produkts (W1)	Wichtigkeit der Integration in ein Produkt (W2)
Thema	Bewertung (0-5)	Bewertung (0-5)
Selektive Konkrement-, bzw. Zahnsteinerkennung und -entfernung		
*Zahnsteinerkennung	4	3
*Konkrementerkennung	4	5
Diagnose/Monitoring von parodontalen Erkrankungen		
*Erkennung von Entzündungen von Zahnfleisch und Zahnhalteapparat	3	2
*Bestimmung der Zahnfleischtaschentiefe/von Attachmentverlusten	3	4
Diagnose von Zahnhartsubstanzverlusten (Abrasion, Erosion, Trauma)		
*Abrasion (Aufgrund von Reibung)	3	1
*Erosion (Aufgrund der Einwirkung von Säuren)	3	1
*Trauma/Frakturen	3	1
Diagnoseverfahren für die Kavitätenpräparation		
*Unterstützung der Kariesentfernung	3	5
*Bestimmung der Restdentinstärke bis zur Pulpa	3	5
Kariesdiagnose	5	1
Visualisierung der Wurzelkanaleingänge bei der Kavitätenpräparation	3	4
Bestimmung der Pulpavitalität/-sensibilität		
*Bestimmung der Sensibilität	2	3
*Bestimmung der Vitalität	2	3
Detektion der Feilenspitze während der Behandlung	3	5
Beurteilung der Beseitigungsqualität von endodontischen Infektionen	4	5
Kombination der Arbeitslängenbestimmung, Wurzelkanalaufbereitung und Wurzelkanaldesinfektion/-reinigung	4	5

In der Prophylaxe und Parodontologie stellt die selektive Zahnstein-, bzw. Konkrementerkennung und -entfernung ein bedeutendes Thema dar. Dabei wird die selektive Konkrementerkennung für die Integration in ein bestehendes Produkt zur Konkremententfernung am wichtigsten (5) eingeschätzt. Für die Diagnose bzw. das Monitoring von parodontalen Erkrankungen wird zum einen die Erkennung von Entzündungen von Zahnfleisch und Zahnhalteapparat, sowie die Bestimmung der Zahnfleischtaschentiefe bzw. von Attachmentverlusten genannt. Dabei wird letzteres wiederum als am wichtigsten für die Integration in ein bestehendes Produkt (4) eingestuft. In der Restauration und Prothetik wird die Diagnose von Zahnhartsubstanzverlusten, Diagnoseverfahren für die Kavitätenpräparation sowie die Kariesdiagnose aufgeführt. Während die Diagnose von Zahnhartsubstanzverlusten für die Integration in ein Produkt am uninteressantesten (1) bewertet wird, werden Diagnoseverfahren für die Kavitätenpräparation als eigenständiges Produkt als sehr wichtig (5) eingeschätzt. Die Kariesdiagnose wird mit der höchsten Wichtigkeit (5) für ein eigenständiges

ges Produkt bewertet, hingegen erscheint die Integration in ein Produkt zur Kariesentfernung nicht interessant (1). In der Endodontie werden mit Ausnahme der Sensibilitäts- bzw. Vitalitätsbestimmung der Pulpa alle Anwendungen als am wichtigsten (5) für die Integration in ein bestehendes Produkt angesehen.

3.5 Bewertung der Diagnoseverfahren

3.5.1 Vorselektion anhand eines Beispiels

Die Vorselektion der Diagnoseverfahren wird anhand der Faseroptischen Transillumination demonstriert (Tabelle 22).

Tabelle 22: Beispiel der Vorselektion anhand der faseroptischen Transillumination (FOTI)

Restoration und Prothetik			Allg. Bew.	Innovationsgrad	Integrierbarkeit	W1	W2	Ergebnis 1	Ergebnis 2
			0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-50	0-75
Produkt	Literatur	Thema	Bewerter 1	Bewerter 1	Bewerter 1				
		Kariesdiagnose				5	1		
		Optische Verfahren Transillumination							
x	x	Faseroptische Transillumination (FOTI)	3	2	3			25	8

Bei der Faseroptischen Transillumination (FOTI, auch Diaphanoskopie) werden die Zähne mit einer weißen Lichtquelle durchleuchtet und die Transparenz/der Intensitätsverlust beurteilt, z.B. bei der Detektion von Approximalkaries mit Hilfe der Kaltlicht-Diagnostiksonde „Göttingen“ (I.C.Lercher, Stockach, Deutschland).

FOTI kann im Approximalbereich der Seitenzähne, sowie bei den Frontzähnen eingesetzt werden. Bei der Durchstrahlung wird Karies als dunkler Fleck erkennbar, da die Läsion einen größeren Brechungsindex aufweist als die gesunde Zahnhartsubstanz. Die faseroptische Transillumination kann nur visuell (z.B. mit Hilfe von Mundspiegeln) beurteilt werden, erst durch die Kombination mit einer digitalen Kamera (DIFOTI) ist das Verfahren für das Kariesmonitoring geeignet [11], [22].

Obwohl das Verfahren relativ einfach in ein Winkelstück integriert werden könnte, kann aufgrund der geringen Bewertung der Integration eines Kariesdetektionsverfahrens in ein bestehendes Produkt (W2), das Ergebnis für die Integration nur im unteren, roten Bereich ausfallen. Der Innovationsgrad von FOTI ist niedrig einzustufen, da das Verfahren schon durch Produkte am Markt eingesetzt wird und bereits eine digitale Variante (DIFOTI) vorhanden ist. Durch die nötige visuelle Inspektion durch einen Mundspiegel ist das Verfahren subjektiven Anwendereinflüssen unterworfen, wodurch sich die allg. Bewertung verschlechtert. Da das Verfahren ein hohes Aufwand-Nutzen-Verhältnis aufweist, kann die allg. Bewertung mittel-

mäßig ausfallen. Aufgrund der hohen Wichtigkeit der Kariesdiagnose als eigenständiges Produkt findet sich Ergebnis 1 im mittleren, gelben Bereich. Daher ist nach Abschluss der Vorselektion der restlichen Verfahren erneut zu diskutieren, ob FOTI in die Detailbewertung mit einbezogen werden soll.

3.5.2 Ergebnis der Vorselektion

Die Ergebnisse der Vorselektion der Diagnoseverfahren für die aussichtsreichsten Anwendungen in der Prophylaxe und Parodontologie, Restauration und Prothetik sowie der Endodontie, sind in Tabelle 23 aufgelistet. Die Verfahren werden in weiterer Folge kurz beschrieben.

Tabelle 23: Ergebnis der Vorselektion

Anwendungsfeld Endodontie	Punkte
Detektion der Feilenspitze während der Behandlung	
Endoskopisches Navigationssystem: Kombination 3D-Radiographie und optische Sensoren	45
Beurteilung der Beseitigungsqualität von endodontischen Infektionen	
LED-/LASER-Fluoreszenz	47
Anwendungsfeld Prophylaxe und Parodontologie	
Konkrementerkennung	
Ultraschall und automatisiertes Oberflächen-Muster-Erkennungssystem	54
Zahnsteinerkennung	
LED/Laser-Fluoreszenz	49
Anwendungsfeld Restauration und Prothetik	
Kariesdetektion	
Digitale faseroptische Transillumination (DIFOTI)	43,5
Laser-Fluoreszenz	40,5
Optische Kohärenztomographie (OCT)	41
AC Impedance Spectroscopy Technique (ACIST)	42
THz-Imaging	40
Magnetresonanztomographie (MRT)	40
Ultraschall	41
Photothermische Radiometrie (PTR) und Lumineszenz (LUM)	42
Bestimmung der Restdentinstärke bis zur Pulpa	
Elektrische Bestimmung der Restdentindicke	44
Unterstützung der Kariesentfernung	
Fluorescence-aided caries excavation (FACE)	50,5
Weißes Licht	49
Verschiedene Farben/ Helligkeiten	44
Beleuchtung kombiniert mit Spray	44

Endodontie

Das kombinierte Verfahren der 3D-Radiographie in Verbindung mit optischen Sensoren für die Echtzeit-Navigation von endodontischen Instrumenten kann zur Detektion der Feilenspitze während der Behandlung eingesetzt werden. Dafür wurde zur Verbesserung der Erfolgsrate von Wurzelkanalbehandlungen am Institut für Parodonto-

logie und Endodontie der Tsurumi Universität in Japan ein endoskopisches Navigationssystem entwickelt. Damit ist es möglich, die Instrumentenposition während der Behandlung zu bestimmen. Dazu wird ein 3D-Modell (z.B. CBCT) generiert und zusätzlich die optische Position des Messgeräts ermittelt (OPTOTRAK-System), um die Registrierung des Modells mit der aktuellen Zahnposition zu ermöglichen und somit die Bewegungen am Monitor beobachten zu können [68], [67].

Durch eine Echtzeit-Beurteilung des mikrobiellen Status des Wurzelkanalsystems könnte der Endpunkt einer Wurzelkanalbehandlung bestimmt werden. Dazu wurden Untersuchungen bezüglich quantitativer Fluoreszenzspektroskopie durchgeführt [69].

In einer Laborstudie wurde das bestehende Laserfluoreszenz-Gerät DIAGNOdent als vielversprechend für den klinischen Einsatz befunden. Durch die Entwicklung von flexiblen Fasern könnten damit auch tiefe und schwer erreichbare Regionen analysiert werden [65].

Prophylaxe und Parodontologie

Mit Hilfe eines Ultraschallscalers und einem Mustererkennungssystem können Zahnoberflächen- und Konkremete nach Spektralanalyse automatisch erkannt werden. Durch ein Anregungssystem wird ein Rechteckimpuls erzeugt, welcher das Piezosystem des Scalers zum Schwingen anregt (siehe Abbildung 40). Die Oberflächenantwort auf die mechanischen Wellen wird wiederum vom Ultraschallscaler in ein elektrisches Signal umgewandelt. Das Signal kann über Filter, rechengestützte Datenerfassung und Mustererkennung gemessen und ausgewertet werden [29].

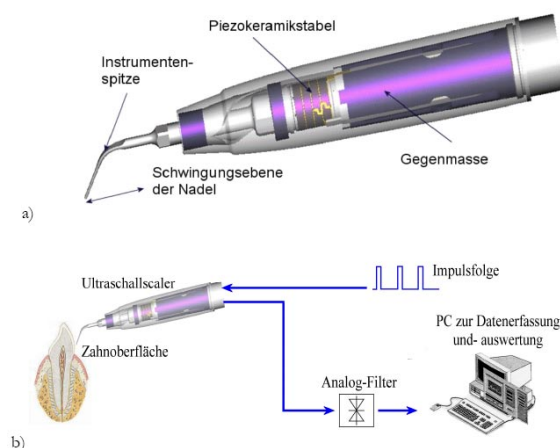


Abbildung 40: a) Prinzip eines Ultraschallscalers, b) System zur automatischen Zahnoberflächen- und Konkrementerkennung durch Ultraschallscaler und PC [29].

Eine Kombination eines Konkrement-Detektions und Entfernungssystems auf Basis eines Ultraschallscalars bietet bereits PerioScan (Sirona Dental Systems, Bensheim, Deutschland). Im Detektionsmodus kann zwischen Zahnsteinablagerungen und gesunder Wurzeloberfläche unterschieden werden. Dazu wird am Gerät visualisiert, ob eine gesunde Wurzeloberfläche (grünes Licht), Konkremente (blaues Licht) oder kein Kontakt (kein Licht) vorliegt. Der Anwender bekommt also eine Rückmeldung, wann Konkremente vorliegen und entfernt werden müssen. Die Entfernung geschieht durch die konventionelle Ultraschallbehandlung, bei unterschiedlichen Leistungsstufen, mit derselben Spitze [70].

Die Zahnsteindetektion oberhalb des Zahnfleisches kann durch die Verwendung von LED- bzw. LASER-induzierter Fluoreszenz erfolgen. Dabei wird der Zahn mit Licht bestimmter Wellenlänge bestrahlt und die Autofluoreszenz detektiert und ausgewertet. In China wurde in einer in vitro Studie ein Echtzeit-Detektionssystem zur Quantifizierung von Zahnstein untersucht. Mit Hilfe einer blauen (405nm) LED wird Autofluoreszenz hervorgerufen. Die Echtzeitdetektion des Zahnsteins geschieht durch eine Software. Die Methode ist laut Autoren kosteneffizient und zuverlässig [71].

Das Laser-Fluoreszenzverfahren wird bereits von DAIGNOdent von KaVo angewandt. Das Gerät wurde ursprünglich zur Kariesdetektion entwickelt und später zur Zahnsteindetektion verfeinert. Es werden die Fluoreszenzintensitäten gemessen, transformiert und in relativen Einheiten auf dem Instrumentendisplay angezeigt (0-99). Laut Hersteller weisen Werte über 39 auf mineralisierte Ablagerungen hin. Werte zwischen 5 und 39 deuten auf sehr kleine kalzifizierte Plaquestellen (nicht näher spezifiziert). Hingegen stehen Werte unter 5 für saubere Oberflächen [30].

Restauration und Prothetik

Eine Vielzahl an diagnostischen Verfahren zur Kariesdetektion mit ähnlicher Punktzahl wurde ausgewählt. Diese Verfahren werden weiter im Detail bewertet (siehe 3.5.4, Seite 87).

Während der Kariestherapie steht für die Bestimmung der Restdentinstärke bis zur Pulpa bereits ein eigenständiges Produkt zur Verfügung. Das sogenannte Prepometer[®] (Hager & Werken GmbH & Co. KG, Duisburg, Deutschland) entspricht einem AC-Ohmmeter. Eine Messelektrode wird auf die Restdentinschicht gehalten und ein geringer Wechselstrom appliziert, welcher über eine Lippenelektrode wieder

zurück zum Gerät fließt. Durch Auswertung des Widerstandes wird dem Anwender mittels LED-Farbskala die Reststärke visualisiert (siehe Abbildung 41) [72].



Abbildung 41: Das Prepometer® (Darstellung ohne Bezugs- und Justierelektrode) [72].

Bei der Messung fließt der Strom über die eröffneten, mit Liquor gefüllten Dentinkanäle. Der Widerstand ist dabei abhängig von Länge, Zahl und Querschnitt der Kanäle. Der Durchmesser und die Dichte der Dentinkanälchen pro Fläche nehmen vom Zahnschmelz zur Pulpa hin zu, wodurch der elektr. Widerstand bei zunehmender Präparationstiefe abnimmt [72], [73].

Das Prepometer® wird seit 1997 in klinisch-prothetischen Studentenkursen der Universität Marburg eingesetzt [73].

Die Anwendung der Widerstandsmessung bei der Kronenpräparation, zur Einhaltung der klinisch relevanten Mindestdicken des Dentins, wird durch die DGMZ (Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde) empfohlen [74], [75].

Für die Unterstützung der Kariesentfernung wurden vier Verfahren vorselektiert. Dabei kamen sowohl drei relativ einfache Verfahren als auch ein komplizierteres Verfahren in die engere Auswahl. Letzteres stellt die fluoreszenzgestützte Kariesentfernung dar (Fluorescence Aided Caries Excavation, FACE), bei der infiziertes Dentin von gesunder Zahnhartsubstanz unterschieden werden kann und gleichzeitig durch die Kopplung mit einem rotierendem Instrument entfernt wird. Dabei wird mit einer faseroptischen Lichtquelle (370-420nm) am Bearbeitungsinstrument die Karies zur Autofluoreszenz angeregt. Die direkte Betrachtung geschieht mittels eines optischen Hochpassfilters (530nm). Dabei wurden in vitro Untersuchungen von Lennon vorgenommen, wobei FACE effektiver als die konventionelle Kariesexkavation mit Rosenbohrer bzw. Farbstoff eingestuft wird [76], [77], [78], [79].

Ein weiteres Verfahren für die Unterstützung der Kariesentfernung ist weißes Licht mit einem hohen Farbwiedergabe-Index (color rendering index, CRI). Dadurch kann das Behandlungsareal farbgetreu und kontrastreich wiedergegeben werden [80].

Des Weiteren könnten verschiedene Farben bzw. Helligkeiten den Anwender bei der Kariesexkavation unterstützen. Durch die abwechselnde, gepulste Kombination von Spray und Beleuchtung könnte die Sichtbarkeit erhöht werden.

3.5.3 Bewertungskriterien für die Detailbewertung

Tabelle 24 zeigt acht Kriterien und deren Aspekte, nach denen die Verfahren im Detail bewertet werden.

Tabelle 24: Bewertungskriterien für die Detailbewertung der Diagnoseverfahren

Bewertungskriterium	Aspekte der Bewertung
Kundennutzen	Behandlungs- und medizinische Vorteile; Anwendbarkeit; Ökonomische Vorteile; Alleinstellungsmerkmal (USP)
Patientennutzen	Angenehme, sichere und effiziente Diagnosestellung; Zeitersparnis bei der Behandlung; Patienteninformation und -motivation
Reifegrad der Technologie	Beschreibung des Funktionsprinzips; Beschreibung der Anwendung; Nachweis der Funktionstauglichkeit der Technologie; Versuchsaufbau/Prototyp im Labor oder in Einsatzumgebung
Gütekriterien	Sensitivität, Spezifität, Reliabilität und Objektivität
Patentsituation	Patentierete Produkte
Vorhandene Studien	Ausreichende klinische Bewertung; In-vivo Studien
Kommerzieller Firmennutzen	Gewinn; Herstellungskosten eines eigenständigen Produkts vs. Integrationskosten in Produkt; Alleinstellungsmerkmal (USP)
Time to market (F&E)	Zeit zwischen Produktidee und Einführung am Markt; Know-How in F&E; Outsourcing; Komplexität des Verfahrens

Kundennutzen

Zu den Behandlungsvorteilen kann die Integrierbarkeit des Diagnoseverfahrens in den Arbeitsablauf, die Möglichkeit einer weiterführenden Behandlungsplanung, ein Feedback über den Behandlungserfolg, eine bessere Dokumentation der Diagnosestellung, die Erhöhung der Recallhäufigkeit durch eine Monitoringfunktion, die Freude am Arbeiten (Wow-Effekt) sowie die Zeitersparnis gezählt werden. Die Behandlungszeit pro Patient kann z.B. durch die direkte Diagnose am Behandlungsstuhl, weniger Arbeitsschritten (z.B. aufgrund der Kombination von Diagnose und Therapie), der

Vermeidung von invasiven Eingriffen oder eine effizienteren Behandlung im Gegensatz zu konventionellen Methoden eingespart werden. Des Weiteren ist es für den Arzt von Vorteil, wenn die Behandlung durch einen Assistenten vollzogen werden kann, um mehr Patienten behandeln zu können. Außerdem stellen Geräte, welche nicht kalibriert oder einfach gereinigt werden können einen zeitlichen Behandlungsvorteil dar. Letztlich soll auch ein ermüdungsfreies Arbeiten ermöglicht werden. Dies kann z.B. durch leichte Anwendungsteile oder einer einfachen bzw. nicht punktweisen Erstellung von Diagnosen ermöglicht werden.

Medizinische Vorteile stellen die Möglichkeit der zeitlichen Kontrolle des Erkrankungsverlaufs (Monitoringfähigkeit), die Erhöhung der Qualität bzw. Zuverlässigkeit im Vergleich zu konventionellen Methoden, eine optimale Erfassbarkeit der Zielparameter (z.B. klare Unterscheidung von Geweben) dar. Zudem ist eine optimale Erfassbarkeit der Zielparameter von medizinischer Bedeutung, z.B. durch eine eindeutige Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Geweben.

Eine einfache bzw. selbsterklärende Anwendung des Diagnosegeräts lässt eine aufwendige Schulung entfallen. Außerdem wird die Anwendbarkeit durch ein robustes Geräte erhöht.

Die ökonomischen Vorteile werden durch ein akzeptierbares Preis/Leistungsverhältnis bestimmt, und durch die Möglichkeit der direkten Abrechenbarkeit der Diagnosestellung.

Durch den Erwerb des Diagnoseprodukts soll der Kunde aufgrund des Alleinstellungsmerkmals (USP) profitieren. So kann der Erwerb zur Prestigeerhöhung führen oder durch einen Werbeeffect neue bzw. mehr Kunden gewonnen werden.

Patientennutzen

Für den Patienten steht eine möglichst schmerzarme Diagnosestellung im Vordergrund. Sie soll kein Angst- oder Stressgefühl hervorrufen oder die Gefahr der Ablehnung aufweisen. Der Patient soll so gut und nachvollziehbar wie möglich über die erstellte Diagnose informiert und zur individuellen Prophylaxe motiviert werden können.

Reifegrad der Technologie

Der technologische Reifegrad (Technology Readiness Level, TRL) gibt auf einer Skala von 0 bis 9 aufsteigend an, wie weit eine Technologie entwickelt ist. Die Methodik wurde von der NASA (National Aeronautics and Space Administration, Washington D.C, USA) eingeführt. Dabei wird klassifiziert, ob lediglich das Funktionsprinzip oder die Anwendung beschrieben wird, die Funktionstauglichkeit nachgewiesen worden ist, ein Versuchsaufbau bzw. Prototyp im Labor, der Einsatzumgebung oder im Einsatz ist oder ein qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit bzw. im erfolgreichen Einsatz vorliegt [81].

Da in der vorliegenden Arbeit der Reifegrad von 0 (niedriger Reifegrad) bis 5 (hoher Reifegrad) bewertet werden soll, werden daraus fünf Klassifikationspunkte gebildet:

- Beschreibung des Funktionsprinzips (0)
- Beschreibung der Anwendung (1)
- Nachweis der Funktionstauglichkeit der Technologie (2)
- Versuchsaufbau im Labor oder der Einsatzumgebung (3)
- Prototyp in Einsatzumgebung oder im Einsatz (4)
- Produkt im praktischen Einsatz (5)

Gütekriterien

Diagnostische Verfahren werden in Studien häufig durch die Angabe von Validität, Reliabilität und Objektivität bewertet. Die Validität wird anhand der Spezifität und Sensitivität bestimmt. Dabei bezeichnet die Sensitivität die Fähigkeit eines Tests, eine kranke Person als krank einzustufen. Sie kann als Quotient aus den richtig positiven Ergebnissen und der Summe aller tatsächlich positiven Ergebnisse ermittelt werden. Die Spezifität hingegen ist die Fähigkeit eines Tests, eine gesunde Person als gesund einzustufen. Sie ergibt sich aus dem Quotient der richtig negativen Ergebnisse und der Summe aller tatsächlich negativen Ergebnisse. Eine diagnostische Methode kann als gut bewertet werden, wenn die Summe aus Sensitivität und Spezifität 160% übersteigt [82], [83], [84].

Die Reliabilität bezieht sich auf die Reproduzierbarkeit eines Verfahrens. Man unterscheidet zwischen der Inter- und der Intrauntersucherreliabilität. Erstere beschreibt die Übereinstimmung der Befunde derselben Messung durch zwei unterschiedliche Untersucher, letztere die Übereinstimmung derselben, wiederholten Messung durch

einen Untersucher. Für nominale Messwerte kann dabei die zufallskorrigierte Übereinstimmung nach Cohen (Cohens Kappa) bestimmt werden. Das Ergebnis kann unterschiedlich interpretiert werden. Nach Fleiss sind Werte von $\kappa > 0.75-1$ als sehr gute, $\kappa > 0.4-0.75$ als mäßige bis gute und $\kappa < 0,4$ als marginale Übereinstimmungen zu sehen [83].

Die Objektivität beschreibt, in welchem Umfang die Ergebnisse durch die untersuchende Person beeinflusst werden [84].

Patentsituation

Liegt ein Patentschutz vor, wird die Entwicklung eines neuen Produkts auf Basis des Diagnoseverfahrens erschwert oder verhindert.

Vorhandene Studien

Medizinprodukte müssen die behaupteten Auswirkungen besitzen und dürfen dabei keine unerwünschten Nebenwirkungen verursachen. Dazu muss jeder Hersteller eine klinische Bewertung durchführen, wobei er sich auf den verfügbaren Stand des Wissens beziehen darf. Dazu kann z.B. die Markterfahrung mit vergleichbaren Produkten (schwacher Nachweis), anerkannte wissenschaftliche Literatur, die dokumentierte klinische Erfahrung sowie klinische Prüfungen vergleichbarer Produkte hinzugezogen werden. Wenn die Nachweisquellen nicht ausreichend sind, muss eine klinische Studie durchgeführt werden, die kostenintensiv, aufwändig und zeitraubend ist [85].

Kommerzieller Firmennutzen

Der kommerzielle Nutzen für den Hersteller durch die Einführung des Diagnoseprodukts in den Markt, spiegelt sich vor allem durch den Gewinn wieder. Dazu sind die verkauften Stückzahlen und der Verkaufspreis im Vorfeld abzuschätzen. Diese sind in Relation zu den Herstellungskosten zu setzen, wobei zwischen den Herstellungskosten für ein eigenständiges Produkt und den Integrationskosten in ein bestehendes Produkt unterschieden werden muss. Ein weiteres Kriterium für den kommerziellen Nutzen ist das Alleinstellungsmerkmal des Diagnoseprodukts. Durch den möglichen Werbeeffect eines neuen Produkts kann der Gewinn, sowie der Druck auf die Konkurrenz erhöht werden. Weitere Vorteile bietet eine weitgehend selbsterklärende Methode, da dadurch eine womöglich intensive Schulung des Vertriebspersonals entfallen kann.

Time to market (F&E)

Time-to-market bezeichnet die Zeit von der Produktidee bis zur Marktreife und stellt einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor für ein Unternehmen dar [86].

Diese Zeit wird durch die Komplexität des Verfahrens beeinflusst. So kann die Umsetzung durch unbedingt erforderliche Gefahrenquellen, wie z.B. LASER oder elektr. Strom die Realisierung erschweren. Ist jedoch bereits Know How in der Forschung und Entwicklung vorhanden, z.B. durch frühere Projekte, oder wird Outsourcing betrieben, kann dem entgegen gewirkt werden.

3.5.4 Detailbewertung

Die Detailbewertung wird anhand des Ergebnisses für die Kariesdiagnose in Tabelle 25 dargestellt. Insgesamt acht verschiedene Diagnoseverfahren für die Kariesdetektion wurden durch die Vorselektion ermittelt. Diese wurden anhand von acht Bewertungskriterien beurteilt. Aufgrund der knappen Ergebnisse wurden diese gruppiert. Dadurch wurden die Verfahren Laser-Fluoreszenz, ACIST sowie PTR und LUM am besten bewertet (Gruppe 1). THz-Imaging und MRT erhielten bei der Detailbewertung die wenigsten Punkte (Gruppe 3).

In weiterer Folge werden das Funktionsprinzip der Verfahren, die diagnostische Kompetenz bzw. die Vor- und Nachteile, sowie vorhandene Studien kurz erläutert.

Tabelle 25: Detailbewertung von vorselektierten Diagnoseverfahren zur Kariesdetektion

Detailbewertung	Kunde		Markt		Technik		Wirtschaftlichkeit			Summe	Prozent	Rang	Gruppe
	Kundennutzen	Patientennutzen	Time to Market (F&E)	Reifegrad der Technologie	Gütekriterien	Kommerzieller Firmennutzen	Vorhandene Studien	Patent-situation					
Kariesdiagnose													
Digitale Faseroptische Transillumination (DIFOTI)	4	4	2	4	3	2	4	2	3,2	64	6	2	
Lasere-Fluoreszenz	4	3	4	5	3	4	5	4	4,0	79	2	1	
Optische Kohärenztomographie (OCT)	4	4	3	3	4	3	3	3	3,4	68	4	2	
AC Impedance Spectroscopy Technique (AcIST)	4	4	4	5	4	4	3	3	4,0	79	3	1	
THz-Imaging	4	4	0	1	0	1	1	3	2,0	39	7	3	
Magnetsonanztomographie (MRT)	4	4	0	1	0	1	1	3	2,0	39	7	3	
Ultraschall	4	4	3	3	4	3	2	3	3,4	67	5	2	
Photothermische Radiometrie (PTR) und Lumineszenz	4	5	3	5	4	4	4	3	4,1	82	1	1	
Maximal Möglicher Wert	5	5	5	5	5	5	5	5	5,0	100			

Digitale faseroptische Transillumination (DIFOTI)

Difoti[®] wurde 2001 von Electro-Optical Sciences (Irvington, New York, USA) eingeführt. Es ist von der FDA (Food and Drug Administration) für die Detektion für anfängliche, freie und rezidive Karies genehmigt. Eine Vielzahl von klinischen Studien wurden durchgeführt und die Ergebnisse zeigen übereinstimmend die Fähigkeit zur Detektion von Zahnrisen und anfänglicher Karies. DIFOTI wurde ursprünglich für 6500\$ verkauft, 2006 wurden die Rechte an KaVo übergeben [87].

KaVo entwickelt die Technologie weiter und soll laut eigenen Angaben das Produkt DIAGNOcam 2012 auf den Markt bringen.

Die intensitätsbasierte Methode der „Digitalen Faseroptischen Transillumination“ verwendet zur Anregung und Auswertung die gleichen Wellenlängen (weißes Licht). Daher muss verhindert werden, dass das Anregungslicht direkt in den Detektor gelangt, um die Messinformation nicht zu überlagern. Die Messung kann entweder durch direkte Durchstrahlung, Reflexion oder in einem Winkel von 90° zwischen Anregungs- und Auswertungsrichtung erfolgen [88].

DIFOTI kann direkt am Behandlungsstuhl angewendet werden, es ist keine zwingende Zahntrocknung nötig und die Ergebnisse können dokumentiert und am Bildschirm veranschaulicht werden, wodurch ein Monitoring möglich ist. Die Diagnose kann schmerzlos erfolgen, jedoch ist keine Tiefenbeurteilung der Karies im Approximalkariesbereich möglich und die schwarz-weißen Bilder müssen subjektiv beurteilt werden [88], [89], [60].

Es wurden in vitro Studien bezüglich Approximalkaries, Okklusalkaries und Karies an Glattflächen durchgeführt (siehe Tabelle 26 und Tabelle 27) [88], [89], [90].

Tabelle 26: Sensitivität von Difoti [89], [91].

Sensitivität von Difoti [®]	Schneiderman et al., 1997	Ando et al., 2004	Gutierrez, 2008	Schäfer, 2007
Approximalkaries	0,69	-	0,44	0,71
Okklusalkaries	0,80	0,33	0,82	-
Glattflächen (Bukkalkaries)	0,41	0,10	1	-

Tabelle 27: Spezifität von Difoti [89], [91].

Spezifität von Difoti®	Schneiderman et al., 1997	Ando et al., 2004	Gutierrez, 2008	Schäfer, 2007
Approximalkaries	0,73	-	0,83	1
Okklusalkaries	0,87	0,83	1	-
Glattflächen (Bukkalkaries)	0,90	0,99	0,88	-

Mit Difoti® können reproduzierbare Ergebnisse gewonnen werden (Intraraterreliabilität von 0,996 und Interraterreliabilität von 0,993), es ist jedoch noch nicht zum Kariesmonitoring einsetzbar, erweist sich aber als gut geeignet bei der Kariesdiagnostik an Glattflächen und im Approximalbereich. Das Verfahren ist als alleinige Entscheidungsbasis für eine mögliche Behandlung einer Läsion momentan noch ungeeignet und das Ziel der Kariesverlaufskontrolle mit Difoti® scheint noch fern [88].

Laser-Fluoreszenz

Bei der Laser-Technologie (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) wird linear polarisiertes, monochromatisches (einfarbiges) Licht erzeugt [92].

Bei Laser-Fluoreszenzmessungen kann z.B. durch eine Laser-Diode Licht bestimmter Wellenlänge (z.B. 655nm, rot) über einen Lichtleiter zum Zahn geleitet werden (siehe Abbildung 42). Die daraufhin emittierte Autofluoreszenz der Zahnhartsubstanz wird von einem Detektor (z.B. Photodiode) registriert. Kariöse Bereiche werden zu einer stärkeren Fluoreszenz angeregt als gesunde Zahnhartsubstanz. In relativen Einheiten kann die Fluoreszenzintensität z.B. auf einem Display angezeigt werden (z.B. 0 – 99) [92].

Dieses Prinzip wird von DIAGNOdent von KaVo angewandt [30].

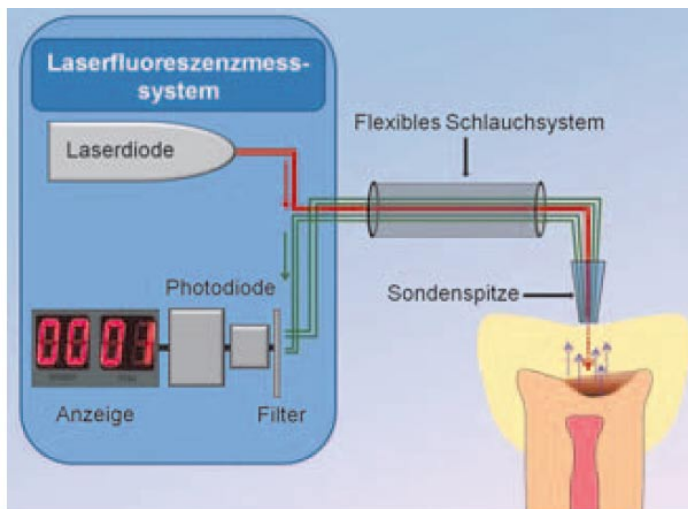


Abbildung 42: Prinzip der Laser-Fluoreszenzmessung [92].

Die quantitativen Messergebnisse eignen sich zur Patientenmotivation. Die Entscheidung zur Kariestherapie sollte jedoch nicht auf dem aktuellen Messwert beruhen, da eine reliabele Kariesquantifizierung nicht möglich ist. Sie sollte vielmehr auf Grund einer deutlichen Zunahme des Messwerts zu verschiedenen Zeiten erfolgen (Kariesmonitoring) [88].

Nachteil des Verfahrens ist, dass die Zähne sauber und trocken sein müssen. Störfaktoren, wie Verfärbungen, Zahnstein, Plaque sowie sich entwickelnde Hypomineralisation können Fluoreszenz erzeugen, welche die Falsch-Positiv-Rate erhöhen [93].

DIAGNOdent 2095, das für glatte und okklusale Oberflächen entwickelt wurde, zeigt gute Performance und Reproduzierbarkeit bei der Detektion und Quantifizierung von Glattflächen- und Okklusalkaries in in-vitro Studien. In vivo Studien sind jedoch widersprüchlich [94].

Bader und Shugars haben in einem systematischen Review (2004) festgestellt, dass trotz zahlreicher Evaluierungen der diagnostischen Performance, die Spannweite der Ergebnisse enorm ist. So finden sich für die Detektion von Dentinkaries Sensitivitätswerte von 0,19 bis 1 und Spezifitätswerte von 0.52 bis 1. Im Vergleich zur visuellen Untersuchung erreicht die Laser-Fluoreszenz-Messung fast ausschließlich immer eine höhere Sensitivität, für die Spezifität hingegen nahezu immer niedrigere Werte. Die Autoren schlussfolgerten, dass aufgrund der unterschiedlichen Karies-Schwellwerte in den evaluierten Studien eine Performanceschätzung nicht möglich ist. Trotzdem konnten die Daten folgendermaßen zusammengefasst werden: „The

mean sensitivity for occlusal surfaces is 80% and the mean specificity is 86%“ [95], [94], [96], [97].

Die Evidenz basierte dabei hauptsächlich auf in-vitro Studien, wobei die Extrapolierung auf klinische Verhältnisse ungewiss ist [94].

DIAGNOdent pen wurde für die leichtere Zugänglichkeit für proximale Oberflächen entwickelt. In vitro war die Performance an Okklusalfächen vergleichbar mit dem Original-DIAGNOdent-Gerät. Derzeit ist nur eine publizierte Studie bezüglich der klinischen Performance von DIAGNOdent pen verfügbar. Bei einem Schwellwert von 25 zwischen Schmelz- und Dentinkaries, wurden eine Sensitivität von 0.67 und eine Spezifität von 0.79 ermittelt. Die Laser-Fluoreszenzmethode wurde auch für das Langzeit-Monitoring des Kariesprozesses und zur Untersuchung der Wirksamkeit von präventiven Maßnahmen verwendet. Die mögliche Rolle von Laser-Fluoreszenz zur Detektion von Wurzelkaries wurde noch nicht weitgehend untersucht. Dazu finden sich drei Studien, wobei eine niedrige bis moderate Korrelation mit histopathologischem Vergleich zur Läsionstiefenbestimmung von Wurzelkaries angegeben wird [94].

Da DIAGNOdent eine rote Laserdiode verwendet, sollte die direkte Exposition auf die Retina vermieden werden. Ansonsten sind keine Sicherheitsaspekte mit dieser Methode assoziiert [95].

Bader und Shugers deklarierten, dass aufgrund der erhöhten falsch-positiven Diagnosen im Gegensatz zur visuellen Inspektion die klinische Verwendbarkeit eingeschränkt ist [97].

Optische Kohärenztomographie (OCT)

Die optische Kohärenztomographie (optical coherence tomography, OCT) ist (stark vereinfacht) vergleichbar mit dem B-Mode der Sonographie, nur dass bei der OCT Nahinfrarot-Licht (NIR) anstatt Ultraschall eingesetzt wird. OCT liefert eine 2D-Abbildung von Gewebemikrostrukturen durch Bestrahlung von Gewebe mit Nah-Infrarot-Strahlung, Detektion der reflektierten Strahlung und Auswertung der Intensität. Dabei basiert OCT auf der Konfokal-Mikroskopie und Kohärenz-Interferometrie (Low-coherence interferometry). Die mehrfachgestreuten Anteile des reflektierten Signals werden selektiv entfernt, da diese keine diagnostische Information liefern und somit hochauflösende Bilder resultieren. Durch die Entwicklung der „polarization-

sensitive OCT“ bzw. der „swept source OCT“ wurde der Einsatz für dentales Gewebe in der Zahnheilkunde (z.B. zur Erkennung demineralisierter, kariöser Zähne) vorangetrieben [98], [99].

Mit Hilfe von OCT können hochauflösende (10-30µm) morphologische Bilder generiert werden. Es ist möglich, 2-4mm tiefe Gewebeinformationen (abhängig von der Wellenlänge des Lichts) zu eruieren. Das OCT-Licht wird durch die unterschiedlichen Brechindizes verschiedener Gewebe rückgestreut (z.B. zw. Schmelz und Dentin oder gesunden und kariösen Regionen). Als Lichtquelle wird Nah-Infrarot Licht (meist 850nm oder 1310nm) eines Lasers mit niedriger Kohärenz verwendet. Die Leistung beträgt bei 850nm ca. 750µW bzw. 7mW bei 1310nm. OCT wurde in der Medizin erstmals in der Ophthalmologie eingesetzt und hat sich erst seit einigen Jahren in der Zahnheilkunde eingefunden, mit vielen Studien, die sich meist noch auf dem Forschungsniveau befinden [100].

Das OCT Dental Imaging System von Lantis Laser (Denville, N.J., USA) soll laut Herstellerangaben 2013 auf den Markt gebracht werden. Die diagnostische Kompetenz des Systems sollen frühe Schmelzdemineralisationen, Okklusalkaries, Wurzelkaries, Sekundärkaries um Restaurationen und die Beurteilung der Integrität von Restaurationen sein [101].

Verschiedene in vitro Studien demonstrieren, dass OCT zur zerstörungsfreien Messung des Demineralisationsgrades in Zahnschmelz und Dentin verwendet werden kann [102].

Derzeit sind jedoch noch keine in vivo Daten verfügbar [57].

AC Impedance Spectroscopy Technique (ACIST)

Die AC-Impedanzmessung (ACIST) ist eine elektrochemische Technologie im Bereich der Materialwissenschaft. Durch das Anlegen eines Wechselstromes durch das zu messende Element (z.B. Zahn) und Variation der Frequenz erhält man ein Impedanzspektrum, das spezifisch für das zu messende Element ist. Neben der sequentiellen Anwendung der Frequenzen können diese auch pulsierend appliziert werden. Somit können Veränderungen von physischen Eigenschaften biologischer Materialien (z. B. Zähne, Knochen oder Weichgewebe) erkannt und überwacht werden [103].

Das Verfahren wird im Dental-Bereich zur Kariesfrüherkennung eingesetzt, da die Impedanz eines gesunden Zahnes wesentlich höher ist, als die eines demineralisierten Zahnes mit kariösen Läsionen. Eine noch geringere Impedanz weist ein Zahn mit ausgeprägter Dentinkaries auf. Als Produkt, welches die Technologie anwendet, wird CarieScan (IDMoS, Dundee, Scotland) genannt [103].

Bei der elektrischen Impedanz-Spektroskopie werden Impedanzen über einen großen Frequenzbereich (z.B. 1MHz bis 0,1Hz) analysiert und somit detaillierte Informationen über die elektrische Charakteristik des Zahnes verfügbar. Huysmans und Kollegen folgerten aus ihrer Studie (1996), dass die in-vitro Performance der elektrischen Impedanz-Spektroskopie hervorragend für die Unterscheidung von gesunden, nicht-kavitierten, kariösen und kavitierten approximalen Zahnoberflächen ist [104].

Longbottom C. und Kollegen behaupteten 1996 nach ihren experimentellen Messungen in-vitro, dass die AC-Impedanz-Spektroskopie zu 100% mit dem Ausmaß von Approximalkaries korreliert [105].

Auch Wozniak demonstrierte 2003 anhand von in vitro AC-Impedanz Untersuchungen an Okklusalfächen, dass es möglich ist, 100% Spezifität und Sensitivität für die Unterscheidung zwischen Schmelz- und Dentinkaries zu erreichen [95].

Durch die Verwendung der AC Impedanz-Spektroskopie werden Polarisierungseffekte durch das Anlegen von Wechselstrom vermieden. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Zahnes, wie die Dielektrizitätskonstante, Reaktionsfähigkeit, Mikrostruktur und Zusammensetzung sind von der gewählten Frequenz abhängig. Um das elektrische Verhalten zu analysieren, ist ein großes Frequenzspektrum (zumindest 6 oder 7 Dekaden) nötig. Die Impedanzspektroskopie wurde zur Bestimmung von Okklusalkaries in extrahierten Zähnen verwendet (Levenkind und Vandemoot, 1993), jedoch ohne die Angabe von Sensitivität und Spezifität. Levenkind untersuchte 1996 mittels AC Impedanz Messungen im Zeitbereich Wurzeloberflächenkaries in vivo. Die Spektren wurden in weniger als 4 Sekunden ermittelt [95].

Es ist nur wenig Information bezüglich in vivo Studien vorhanden. Ferrier verglich 2004 die visuelle Untersuchung, DIAGNOdent-Messungen und die AC-Impedanz-Spektroskopie an 31 Zähnen in vivo. Dabei zeigte ACIST eine höhere Spezifität und Sensitivität als die beiden anderen Methoden [61].

Hall und Kollegen berichteten 2007 über die Reproduzierbarkeit von ACIST in vivo. Für die Intra-Examiner-Reproduzierbarkeit standen Daten von 173 Oberflächen zur Verfügung. Es zeigte sich eine Übereinstimmung von 74% (95% CI: 67-80%). Für die Beurteilung der Inter-Examiner-Reproduzierbarkeit standen Daten von 148 Oberflächen zur Verfügung. Dabei wurde eine Übereinstimmung von 71% (95% CI: 63-78%) ermittelt. Die Autoren schlussfolgerten daraus eine erhebliche Übereinstimmung für die Intra- und Inter-Examiner-Reproduzierbarkeit für ein ACIST-Gerät zur Detektion von gesunden und kariösen Stellen [95].

THz-Imaging

Bei dieser Bildgebungsmodalität wird eine Frequenz im Terahertz-Bereich (10^{12} Hz bzw. eine Wellenlänge von ca. 30 μm) verwendet. Menschliches Gewebe ist relativ transparent für THz-Strahlung, bei der Bildgebung ist eine geringe Leistung (ca. 1 μW) nötig und die Strahlung ist nicht ionisierend. Die Kosten des Systems sind mit jenen für MRT vergleichbar. Dies liegt hauptsächlich an der noch sehr teuren Laserquelle. An der Möglichkeit frühe kariöse Läsionen mittels THz-Imaging zu detektieren, wird geforscht [57].

Churchley und Kollegen haben 2011 Terahertz-Pulsed-Imaging mit der transversalen Mikroradiographie und Mikroindentation zur Messung von künstlich erzeugter Karies verglichen. Sie demonstrierten, dass Terahertz-Pulsed-Imaging das Potential als Forschungstool für die Analyse von Hartgeweben hat [106].

Es sind keine Aussagen über die Zeit zur Bildgewinnung vorhanden. Außerdem sind die Kosten, die Komplexität der Laserquelle und die Anforderungen für die präzise Probenvorbereitung sehr hoch. Deshalb erfordert es wohl noch lange Zeit, um THz-Imaging klinisch verwenden zu können [57].

Magnetresonanztomographie (MRT)

Die MRT beruht auf dem Prinzip der Kernresonanz. Dabei werden Wasserstoffionen im Körper durch die Verwendung von externen Magnetfeldern zur 3D-Bildgebung eingesetzt [107].

In einer Studie von Bracher und Kollegen (2011) wurde das Potential von ultra-short echo time MRT zur Identifikation von kariösen Läsionen untersucht. Die Autoren fol-

gerten aus ihren Ergebnissen, dass Karies mit Hilfe des Verfahrens mit einer hohen Sensitivität identifiziert werden kann [56].

Mittelfristig soll von Sirona Dental Systems GmbH ein MRT-Prototyp für die Zahnmedizin entwickelt werden. In Zusammenarbeit mit Prof. Rasche, Physiker in der Inneren Medizin des Universitätsklinikums Ulm, wurde die klinische Relevanz untersucht. In einer klinischen Studie mit 50 Patienten konnte gezeigt werden, dass die Detektion kariöser Veränderungen in den Zähnen mittels MRT mit hoher Sensitivität erfolgen kann. Vor allem versteckte Karies und Sekundärkaries sollen besser als durch konventionelle Methoden diagnostizierbar sein. Auch die Möglichkeit von MRT zur Beurteilung von akuter Parodontitis wurde untersucht. Laut Rasche sind die Vorteile der MRT für die Zahnmedizin unbestritten, jedoch die Kosten der MRT der limitierende Faktor [108], [109], [110], [111].

Ultraschall

Bei der Ultraschall-Bildgebung (Sonographie) werden Ultraschallimpulse unterschiedlicher Frequenz eingesetzt, welche sich im Untersuchungsgebiet ausbreiten und dort je nach Gewebeeigenschaften teilweise reflektiert werden. Dabei werden die reflektierten Schallwellen vom Schallkopf, der gleichzeitig als Empfänger dienen kann, empfangen (Piezoelektrischer Effekt) [50].

Die zeitlichen Abstände der Echos entsprechen den räumlichen Differenzen ihrer Entstehungsorte und können somit als Bildpunkte dargestellt werden (Echoimpulsverfahren) [112].

Ultraschall als eine Methode zur Detektion von frühen kariösen Läsionen auf Glattflächen, wurde schon 1988 untersucht. Mit Hilfe des Ultraschall-Puls-Echo Verfahrens wurde in der Doppelblindstudie (in vitro) von Ng und Kollegen (1988) festgestellt, dass künstlich erzeugte Schmelzläsionen von intaktem Zahnschmelz unterschieden werden können. Weiter zeigte sich eine Korrelation des Mineralgehalts der Läsionen mit den relativen Änderungen der Echo-Amplituden. Die Autoren schlossen jedoch aus ihrer Studie, dass die Methode nicht sensitiv genug sei, um oberflächliche kariöse Läsionen in vivo zu detektieren. Die Messungen wurden jedoch lediglich an 6 Zähnen durchgeführt [57], [113].

Weitere Untersuchungen wurden mit Hilfe des sogenannten „Ultrasonic Caries Detectors“ (UCD) unternommen. In einer in vitro Studie wurde UCD mit Bissflügel-

aufnahmen verglichen. 36 extrahierte Molaren und Prämolaren wurden untersucht, wobei für UCD eine Spezifität und Sensitivität von jeweils 1 ermittelt wurde, für die Röntgenaufnahmen 0.92 bzw. 0.90 [114].

In einer klinischen Studie bezüglich Approximalkaries, mit 197 inspizierten Approximalstellen (davon 95 kariös und 102 intakt) an Erwachsenen (22-45 Jahre), wurde ebenfalls UCD mit Bissflügelaufnahmen verglichen. Die Sensitivität betrug für UCD 0.82 (Röntgen: 0.75), die Spezifität 0.75 (Röntgen: 0.90) [115].

Die Produktentwicklung eines Ultraschallgeräts zur 3D-Bildgebung soll entwickelt werden. S-Ray (S-Ray Incorporated, Seattle, WA, USA) generiert durch einen Transducer einen Ultraschallpuls, welcher von einem gegenüberliegenden zweiten Transducer empfangen wird. Anders als bei Puls-Echo Verfahren, soll zwischen gesunden und kariösen Läsionen (auch unter Restaurationen) unterschieden werden können [116].

Photothermische Radiometrie (PTR) und Lumineszenz (LUM)

Nach gepulster LASER-Bestrahlung des Zahnes können mit Hilfe der resultierenden Lumineszenz und der Wärmestrahlung die Präsenz und das Ausmaß von Karies unter der Zahnoberfläche bestimmt werden. Diese Methode wird beim Kariesdetektor „Canary Caries Detection System“ verwendet. Damit können außerdem Schmelzkaries auf Glattflächen, Karies auf Wurzeloberflächen, Kauflächen und Karies zw. Zähnen und Füllungen erkannt werden [98], [117].

Jeon und Kollegen haben 2004 PTR und LUM zur Diagnose von Grübchen und Fissuren an Okklusalfächen untersucht. Das Verfahren wurde dabei mit DIAGNOdent 2095, der visuellen Inspektion und der Radiographie verglichen. Als Goldstandard diente die histologische Untersuchung. 52 extrahierte, menschliche Zähne wurden dabei evaluiert. Spezifität und Sensitivität sind in Abbildung 43 aufgelistet. Die Autoren schließen aus ihren Untersuchungen, dass die Kombination von PTR und LUM zur Diagnose von Grübchen- und Fissurenkaries großes Potential hat [118].

Examination method	Sensitivity ^a		Specificity ^b		Size of sample (points, n)
	D ₂ threshold	D ₃ threshold	D ₂ threshold	D ₃ threshold	
PTR and LUM combined	0.81 (75/93)	0.79 (26/33)	0.87 (163/187)	0.72 (179/247)	280
PTR only	0.69 (64/93)	0.52 (17/33)	0.86 (161/187)	0.72 (178/247)	280
LUM only	0.60 (56/93)	0.58 (19/33)	0.81 (151/187)	0.77 (189/247)	280
Visual inspection	0.51 (18/35)	0.36 (4/11)	1.00 (17/17)	1.00 (41/41)	52
Radiograph	0.29 (10/35)	0.36 (4/11)	1.00 (17/17)	0.85 (35/41)	52
DIAGNOdent	0.60 (38/63)	0.76 (16/21)	0.78 (53/68)	0.85 (94/110)	131

^aIn parentheses true positive/(true positive + false negative).

^bIn parentheses true negative/(true negative + false positive).

Abbildung 43: Sensitivität und Spezifität von PTR & LUM, PTR, LUM, der visuellen Inspektion, Radiographie und DIAGNOdent. Karieslevels sind Zahnschmelz (D2) und Dentin (D3) [118].

Jeon und Kollegen zeigten 2004 in einer weiteren Studie, dass PTR sehr sensitiv für tiefe (<5mm) Defekte ist. LUM weist eine geringe Sensitivität und räumliche Auflösung auf [119].

Die Forschungsgruppe von Quantum Dental Technologies publizierte seit 1999 über 30 Artikel und Abstracts in peer-reviewed Dental- und Medizin-Journals. Es wurde bereits eine klinische Studie des Systems durchgeführt, eine zweite klinische Studie ist noch nicht abgeschlossen [120].

4 Diskussion

4.1 Umfang und Rahmen der Recherche

Im Rahmen der Recherche wurde speziell nach praxisrelevanten Diagnoseverfahren gesucht, für die aufgrund der Vorselektion und Bewertung eine fundierte Entscheidung für weitere Projektvorschläge zur Produktentwicklung getroffen werden kann.

Es wurden Standard- bzw. konventionelle Verfahren vorgestellt, aber auch jene, die neu in der Praxis eingeführt wurden oder in naher Zukunft eingesetzt werden (können).

Dabei wurde im Suchfeld aufgrund der Aufgabenstellung wenig Aufmerksamkeit auf Röntgenverfahren bzw. auf Verfahren gelegt, die ausschließlich in der Forschung Verwendung finden.

Aufgrund der vorgegebenen Projektzeit und um den Rahmen der Arbeit in Grenzen zu halten, wurde die Recherche durch die Aufgabenstellung auf die Prophylaxe und Parodontologie, die Restauration und Prothetik sowie die Endodontie beschränkt. Weitere in Hinsicht auf Diagnoseverfahren vielversprechende Anwendungsfelder, wie die Oralchirurgie bzw. Implantologie oder die Sterilisation/Desinfektion bzw. Reinigung von zahnärztlichen Instrumenten wurden nicht betrachtet.

4.2 Methodik der Recherche

Der aufgestellte Projektstrukturplan wurde eingehalten und für die ausgewählten Anwendungen wurden die vielversprechendsten Verfahren aufgezeigt.

Durch die Online-Produktrecherche und die anschließende strukturierte Literaturrecherche in Online-Datenbanken konnte ein Überblick über die möglichen Diagnoseverfahren in den behandelten Anwendungsfeldern gegeben werden.

Dabei war es sinnvoll, zuerst die Produktrecherche durchzuführen, um ein Gefühl und eine bessere Vorstellung von den in der Praxis eingesetzten Diagnoseverfahren zu erhalten. Dadurch wurde ein Großteil der in der finalen Aufstellung ermittelten Verfahren eruiert. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Dentalanwendungen war es nötig, nur für die vielversprechendsten Anwendungen eine detaillierte Literaturrecherche

durchzuführen, um die bereits ermittelten Verfahren durch die Literatur zu belegen und weitere Verfahren zu finden. Diese wurden durch die Recherche in Fachliteratur bzw. in Meetings mit Produktmanagern erarbeitet. Um die Literaturrecherche so effizient wie möglich durchzuführen, wurde in erster Linie die Datenbank PubMed gewählt, um Zugang zu weltweiten Journalartikeln zu erlangen. Zusätzlich wurde eine Dissertationsrecherche durchgeführt, da Dissertationen meist im Volltext verfügbar sind und praxisrelevante Verfahren aufzeigen. Durch die Wahl der Datenbank Dissonline.de konnte außerdem ermittelt werden, ob an Universitäten im deutschsprachigen Raum, auch in Hinblick auf mögliche Kooperationspartner, an interessanten Verfahren geforscht wird. Die Vorgehensweise, zuerst durch die allgemeine Suche nach Diagnoseverfahren einen Überblick über mögliche Diagnoseverfahren zu erhalten (bevorzugt durch Reviewartikel und Einleitungen von Dissertationen) und anschließend Kombinationen von Anwendungen und Verfahren als Suchbegriff in den Datenbanken einzugeben, erwies sich als effizient. So konnte schnell ermittelt werden, ob ein bereits gefundenes Verfahren für weitere Anwendungen eingesetzt wird. Das Programm Mindmanager, als Aufbereitungstool der Ergebnisse, erwies sich als einfach zu erlernen und für die nötigen Anforderungen ausreichend.

Bei mehr Zeit wäre es hilfreich gewesen, direkt die Zahnärzte mit Hilfe von strukturierten Interviews oder Fragebögen zu befragen. So hätten Ihre Erwartungen an Diagnoseprodukte und aussichtsreiche Dentalanwendungen direkt ermittelt werden können.

4.3 Methodik der Bewertung der Diagnoseverfahren und Anwendungen

Die speziell für die Praxis entwickelte Vorgehensweise zur Beurteilung der Anwendungen und Diagnoseverfahren ermöglicht eine strukturierte und transparente Form der Entscheidungsfindung.

4.3.1 Bewertungskriterien

Bewertungskriterien der Anwendungen

Für die Bewertung der Wichtigkeit der Dentalanwendungen stellte sich im Zuge der Arbeit heraus, dass nicht nur jene Verfahren für einen Hersteller von Interesse sein

können, welche in bestehende Produkte integrierbar sind. Demzufolge wurde nicht nur die Wichtigkeit der Integration, sondern auch die Wichtigkeit für ein eigenständiges Produkt als Bewertungsfaktoren eingeführt. Ein Beispiel dafür ist die Kariesdiagnose. Für die Prädiagnostik der Zahnhartsubstanzen erscheint ein eigenständiges Produkt interessanter, als die Kombination z.B. mit einem Rosenbohrer. Hingegen erscheint die Kombination eines Verfahrens zur Kariesdiagnose zur Unterstützung der Kariesentfernung mit Hilfe eines Rosenbohrers, direkt am Behandlungsstuhl, als sehr interessant. Diese Überlegungen werden in der Bewertungstabelle der Dentalanwendungen (siehe Tabelle 21, Seite 77) widergespiegelt. Um die Bewertung der Anwendungen durchführen zu können, muss die medizinische Bedeutung bzw. die Notwendigkeit einer Diagnosemöglichkeit für jede Anwendung bekannt sein. So kann die Bewertung bevorzugt von Zahnärzten und/oder Produktmanagern erfolgen, da hierfür kein technisches Verständnis, sondern ein hohes Maß an Praxiskenntnis nötig ist.

Vorselektionskriterien der Diagnoseverfahren

Die Durchführung einer Vorselektion erscheint in der Praxis notwendig, da in Unternehmen oft hoher Zeitdruck besteht und Personalressourcen begrenzt sein können. Somit werden nur die wichtigsten Verfahren im Detail bewertet. Die Vorselektionskriterien wurden so gewählt, dass sie mit einem fundierten Hintergrundwissen relativ schnell und subjektiv eingeschätzt werden können.

Die Vorselektion eines Diagnoseverfahrens allein durch ein Kriterium würde die Gefahr von unterschiedlichen Bewertungsaspekten während der Evaluierung erhöhen, da ein zu großer Interpretationsspielraum bestehen könnte. So erscheint es zweckmäßig, klar abgrenzbare Kriterien einzuführen. Eine allgemeine Bewertung des Verfahrens, ohne die Einbindung von Firmeninteressen und -möglichkeiten ermöglicht zunächst die allgemeine, subjektive Einschätzung der Effizienz. Dabei wird die Kenntnis des Funktionsprinzips, der diagnostischen Kompetenz, sowie technisches Verständnis in Kombination mit dem Verständnis der Problemstellung vorausgesetzt. Für die Bewertung des Innovationsgrades ist ein Bezug zur Praxis nötig, um entscheiden zu können, ob Verfahren womöglich nicht (mehr) eingesetzt werden, als Standardmethoden gelten, oder erst in der Forschung für den Einsatz in der Praxis untersucht werden. Die Bewertung der Integration in bestehende Produkte setzt eine Kenntnis der Produktpalette eines Unternehmens voraus, sowie das nötige techni-

sche Verständnis für eventuelle Integrationshindernisse. Deshalb kann es durchaus sinnvoll sein, wenn Teilkriterien von verschiedenen Experten getrennt bewertet werden, oder eine gemeinsame Entscheidung getroffen wird, um möglicherweise verschiedene Gesichtspunkte in Betracht zu ziehen.

Um die Verfahren nach Durchführung der Bewertung untereinander vergleichen und reihen zu können, mussten die Bewertungen der Verfahren und die Wichtigkeit der Anwendungen geeignet miteinander verknüpft werden. Dabei wurde die Nutzwertanalyse als Basis für die Verknüpfung der Verfahren verwendet. Bei der klassischen Nutzwertanalyse erfolgt die Gewichtung der durchgeführten Bewertung durch das Kriterium selbst. Da jedoch bei der Vorselektion die Gewichtung durch die Wichtigkeit der Anwendungen vorgegeben ist, wurde jedes Einzelkriterium damit gewichtet.

Diese Vorgehensweise ist auch durch die Risikoanalyse bekannt, bei der zur Ermittlung des technischen Risikos die Eintrittswahrscheinlichkeit mit der Höhe des Schadensausmaßes multipliziert wird und zuvor die beiden Kriterien subjektiv eingeschätzt werden [85].

Da für ein eigenständiges Produkt die Integrierbarkeit keine Rolle spielt, wurde dieses Kriterium nur für Ergebnis 2 eingesetzt. Die Vorselektion erscheint durch die Festlegung eines einzigen Schwellenwertes nicht zweckmäßig, deshalb, wurden drei Bereiche auf Basis eines Ampelprinzips eingeführt. Somit wird der Bewerter dazu bewegt, Verfahren die sich im mittleren Bereich befinden, noch einmal miteinander zu vergleichen, um sicherzustellen, dass kein interessantes Verfahren vergessen wird. Verfahren die bei der Vorselektion mittelmäßig abscheiden, können also durch Nachkontrolle ohne weiteres für die Detailbewertung ausgewählt werden, wobei im Grenzfall immer für die Detailbewertung entschieden werden sollte.

Detailbewertungskriterien der Diagnoseverfahren

Bei der Bestimmung der Kriterien für die Detailbewertung wurde darauf geachtet, dass diese möglichst unabhängig voneinander sind. Einige Aspekte können jedoch trotzdem in mehrere Kriterien einfließen, wenn sie für jedes Kriterium eine unterschiedliche Bedeutung haben. Beispielsweise spielt das Alleinstellungsmerkmal sowohl beim Kundennutzen als auch beim kommerziellen Firmennutzen eine Rolle, kann aber für beide Fälle getrennt betrachtet werden.

Wesentlicher Bestandteil der Bewertung der Gütekriterien sind die Sensitivität und Spezifität, da sie ein Basismaß der Performance eines diagnostischen Tests darstellen. Am Beispiel der Kariesdiagnose zeigt sich jedoch ein Nachteil bei der Evaluierung der Validität eines Systems. Hier besteht die Notwendigkeit, kariöse Läsionen als kariös oder (noch) gesund zu klassifizieren. Die verwendete Messprobe sollte demzufolge keine offensichtlichen Läsionen enthalten, um die Sensitivität nicht zu überschätzen [89].

Außerdem ist die Angabe der Sensitivität und Spezifität maßgeblich von der Studiedurchführung (Anzahl der Testobjekte, in vitro oder in vivo, etc.) abhängig und muss somit immer hinterfragt werden. Auch gerade bei der Kariesdiagnose zeigt sich, dass Studien für die verschiedenen Karieslokalisationen (z.B. Fissurenkaries, Approximalkaries, etc.) durchgeführt werden, sowie die Schwellwerte für die Klassifikation (kariös/gesund) sehr unterschiedlich gewählt werden (z.B. Dentin oder Schmelz). Dadurch lassen sich vor allem die Ergebnisse verschiedener Studien zur Kariesdiagnose meist nur schwer miteinander vergleichen [97].

4.3.2 Detailbewertung

Bei der Detailbewertung wurde nach dem Prinzip der Nutzwertanalyse bzw. des Paarvergleichs als Teil der Nutzwertanalyse vorgegangen.

Die Nutzwertanalyse ist eine Methode, mit der subjektive Entscheidungen begründet und transparenter gemacht werden können. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Alternativen in unterschiedlicher Hinsicht bewertet werden und implizite Vorstellungen die Bewertung beeinflussen.

Auch durch die Anwendung des Paarvergleichs können die Bewertungskriterien nicht objektiv gewichtet werden, da dieser auf subjektiven Einschätzungen beruht. Das Verfahren zwingt jedoch dazu, sich intensiv mit den eigenen Präferenzen auseinander zu setzen und wirkt somit einer willkürlichen Gewichtung entgegen [19].

Beim Paarvergleich sollte darauf geachtet werden, nicht zu vorschnell auf die gleiche Gewichtung (1) zurückzugreifen, nur um einen Konsens zu finden. Die Durchführung der Bewertung im Team ist hilfreich, da unterschiedliche Sichtweisen auftauchen. Dabei sollte jedoch auf Mehrheitsentscheidungen verzichtet werden und stattdessen Durchschnittswerte verwendet werden [21].

Vorteil der Nutzwertanalyse ist, dass sie beliebig durch Handlungsalternativen sowie quantitative und qualitative Bewertungskriterien erweitert werden kann.

Es ist jedoch in Betracht zu ziehen, dass bei einer Vielzahl an Bewertungskriterien die Endergebnisse eher im mittleren Wertbereich liegen. Die Abstände der Ergebnisse können so bei steigender Anzahl an Kriterien immer geringer werden [19].

Dadurch ist die Gruppierung von engen Ergebnissen am Ende der Bewertung sinnvoll.

Außerdem kann in Frage gestellt werden, wie sinnvoll die Bewertung nach Einzelkriterien ist, ohne das Ganze in Betracht zu ziehen und dabei Abhängigkeiten untereinander zu vernachlässigen [121].

Grundsätzlich kann die in der vorliegenden Arbeit präsentierte Vorgehensweise nicht nur für beliebige Hersteller von Medizinprodukten, zur Entscheidung für Handlungsalternativen, verwendet werden, sondern auch branchenübergreifend, z.B. zur Standortentscheidung von Firmen.

4.4 Aussichtsreiche Diagnoseverfahren für Dentalanwendungen

4.4.1 Prophylaxe und Parodontologie

Prädiagnostik

Die Feststellung der Zahn- und Zahnfleischgesundheit bei Kontrolluntersuchungen kann durch die Ermittlung von weiteren (allgemeinen) Krankheiten erweitert werden. So werden einige diagnostische Tests bzw. Geräte zur Feststellung von Oralkrebs, HIV, Diabetes, etc. bereits in der Zahnpraxis angewandt.

Die Diagnose von parodontalen Erkrankungen wird intensiv durch die Verwendung von Biomarkern erforscht. So könnte in Zukunft mit Hilfe von „Labs on a chip“, also sogenannten „miniaturisierten Laboren“, welche auf einem Chip integriert sind, während der Behandlung das individuelle Parodontitisrisiko ermittelt werden.

Bestimmung der Oberflächenrauigkeit

Die Bestimmung der Oberflächenrauigkeit wird derzeit nur in der Forschung angewandt. Die Detektion der Rauigkeit der Zähne durch quantitative Verfahren erscheint

in der Praxis übertrieben, da sich diese täglich durch das Zähneputzen ändern kann. Feste Zahnbeläge erhöhen die Oberflächenrauigkeit, deshalb ist es sinnvoll, Verfahren speziell für die Zahnsteindetektion, auch im Hinblick auf die Kariesprävention, zu entwickeln.

Zahnstein- und Konkremententfernung

Das Hauptproblem von Systemen zur alleinigen Detektion von Zahnstein- bzw. Konkrementen ist, dass die Anwendung ein systematisches abscannen der Zahn(wurzel)oberfläche voraussetzt. Im Falle einer positiven Zahnsteindetektion muss die Behandlungsstelle mit einem therapeutischen Entfernungsgesetz (z.B. Scaler) erneut lokalisiert werden. Dies kann vor allem bei der Konkremententfernung schwierig sein, da in der Regel keine direkte Sicht auf die Behandlungsstelle möglich ist. Dieses Problem führt dazu, dass die Anwendung stark von den Fähigkeiten des Anwenders abhängt, um eine Über- bzw. Unterinstrumentierung zu vermeiden [30].

Eine zusätzliche Herausforderung bei der subgingivalen Konkremententfernung besteht darin, dass es nicht nur wichtig ist, die Konkremeute sicher zu entfernen, sondern auch den umliegenden Biofilm. Dieser ist Grundlage für die Entstehung von Konkrementen. Somit sollten möglichst alle Beläge an der Zahnwurzel effizient entfernt werden, bei gleichzeitiger Schonung der gesunden Zahnsbstanzten.

Mit Hilfe einer Kombination von Diagnose und Behandlung kann dieses Problem bewältigt werden. Die Durchführung klinischer Studien ist nötig, um zu klären, ob diese Kombinationssysteme den Langzeitbehandlungserfolg verbessern [30].

4.4.2 Restauration und Prothetik

Prädiagnostik

Bei der Aufstellung und Vorselektion der Diagnoseverfahren zeigte sich, dass in den behandelten Anwendungsfeldern für die Kariesdetektion mit Abstand die meisten Diagnoseverfahren verfügbar sind. Neben der Röntgentechnologie sind vielversprechende weitere Alternativverfahren zugänglich, die jedoch meist für spezifische Kariesarten (Schmelzkaries, Approximalkaries, etc.) eingesetzt werden sollten.

Während die Vormachtstellung der Röntgentechnologie durch die dreidimensionale DVT-Technologie weiterhin aufrecht erhalten werden sollte, zeigt sich vor allem ein Trend bei optischen Diagnoseverfahren (Fluoreszenz, OCT, DIFOTI, etc.).

Die Strahlenbelastung wurde in zahlreichen Studien durch Ermittlung der effektiven Dosis von Röntgenverfahren erforscht.

Bei der Verwendung eines Zahnfilmes beträgt jene Dosis weniger als $10\mu\text{Sv}$, bei Bissflügelaufnahmen bis zu $30\mu\text{Sv}$ und beim DVT abhängig von Gerät und des eingestellten „field of view“ zwischen 0.3 bis 2.1 mSv [22].

In einer in vitro Studie von Hirsch und Kollegen (2008) wurde die effektive Dosis von zwei CBCT Geräten untersucht. Bei einem „field of view“ von $4\times 4\text{cm}$ wurde eine effektive Dosis von $20.02\ \mu\text{Sv}$ für das Gerät 3D Accuitomo (J. MORITA, Kyoto, Japan) ermittelt. Bei einem „field of view“ von 6×6 wurde bei dem Gerät Veraviewepocs 3D (J. MORITA, Kyoto, Japan) eine effektive Dosis von $43.27\mu\text{Sv}$ beobachtet [122].

In einer weiteren in vitro Studie von Suomalainen und Kollegen (2009) wurde die effektive Dosis von vier CBCT Geräten mit zwei Multi Slice CT (MSCT) Geräten verglichen. Bei der Verwendung von Standardparametern betrug die effektive Dosis der CBCT Geräte zwischen $27\mu\text{Sv}$ und $674\mu\text{Sv}$ (International Commission on Radiation Protection (ICRP) 2008), hingegen $685\mu\text{Sv}$ bis $1410\mu\text{Sv}$ (ICRP 2008) bei den MSCT Geräten [123].

Neben der Verwendung von CT und DVT lässt sich ein Forschungstrend zur softwareseitigen Lösung des 3D-Problems erkennen. Bei der Tomosynthese (auch Ektomographie, Planigraphie oder Tuned Aperture Computed Tomography, kurz TACT[®]) werden mittels Algorithmus aus wenigen 2D-Aufnahmen 3D-Rekonstruktionen des Messvolumens erzeugt. Durch die wenigen Messungen redu-

ziert sich die Strahlenexposition ohne die Verwendung von Großgeräten. Bisher wurde TACT in der Mammographie in den Markt eingeführt [124], [125].

Die mögliche Einführung der MRT in die Zahnheilkunde könnte das Problem der Strahlenbelastung eliminieren. Lage und Ausdehnung von kariösen Läsionen, sowie der Abstand zur Pulpa, könnten so dreidimensional und ohne ionisierende Strahlung bestimmt werden. Das Verfahren könnte aufgrund des guten Weichteilkontrasts auch für weitere Anwendungen wie Diagnose von Parodontalerkrankungen dienen.

Oft könnte das Entfernen von Restaurationen vermieden werden. Da Caries initialis noch durch individuelle Prophylaxemaßnahmen beseitigt werden kann, ist eine vorzeitige Entfernung vermeidbar. Erst durch ein Kariesmonitoring kann die Lokalisation und Ausdehnung von vorhandener und neu auftretender Karies dokumentiert werden. Dabei reicht jedoch die Anfertigung von 2D-Aufnahmen nur bedingt aus, da sie die wirkliche Situation nicht widerspiegeln und durch die Projektionen wichtige Details leicht übersehen werden können. Hat der Anwender aussagekräftige 3D-Daten zur Verfügung, mit denen er nicht nur die Oberfläche, sondern auch das Zahninnere beurteilen kann, kann er das Kariesmonitoring effizient durchführen.

Ein Trend zur Früherkennung von Karies in der Zahnheilkunde ist erkennbar, dabei liegt es jedoch am Patienten selbst, ob er durch regelmäßige Kontrolluntersuchungen diese Möglichkeit wahrnimmt und die Vorschläge zur individuellen Prophylaxe auch umsetzt.

Die Vielzahl an potentiellen Verfahren für die Kariesdiagnose berechtigt zum Optimismus, dass durch schnelle, nicht-invasive und quantitative Verfahren für die Kariesdetektion den Zahnärzten der Zukunft die Möglichkeit geboten wird, optimale präventive Ratschläge zu geben und nur minimalinvasive therapeutische Eingriffe, durch effizientes Kariesmonitoring, tätigen zu müssen.

Zahnhartsubstanzverluste

Die frühzeitige Diagnose von dentalen Erosionen scheint bisher nur schwer möglich. Mit Hilfe von Lichtsonden kann der Zahnarzt bisher die Transparenz des Zahnes subjektiv beurteilen. Jedoch nur durch ein Zahnhartsubstanz-Monitoring könnten in Zukunft quantitative Aussagen über den beginnenden/fortschreitenden Zahnhartsubstanzverlust getroffen werden. Dies wäre ein entscheidender Schritt, den nicht-

reversiblen Prozessen entgegenzuwirken, indem rechtzeitig Prophylaxemaßnahmen eingeleitet werden und Restaurationen vermieden werden könnten.

Zahnrisse hingegen sind schon durch einfache Verfahren wie der Diaphanoskopie effizient diagnostizierbar.

Unterstützung der Kariesentfernung

Zur Unterstützung der Kariesentfernung zeigte sich das Verfahren FACE als sehr vielversprechend. Die mögliche Integration in ein Produkt zur Kariesentfernung wird dadurch bekräftigt, dass noch kein kommerzielles Produkt am Markt vorhanden ist und vergleichende Studien mit alternativen und kommerziellen Methoden gute Bewertungen liefern. Es ist jedoch trotzdem kritisch zu betrachten, dass diese Studien hauptsächlich von Lennon und Kollegen durchgeführt wurden [77].

Demnach erscheinen weitere Studien von unabhängigen Forschungsteams notwendig.

Bestimmung der Restdentinstärke

Zur Bestimmung der Restdentinstärke ist erst ein Produkt erhältlich (Prepometer®). Es wird weitere Untersuchungen benötigen, die Möglichkeit der Integration des zugrunde liegenden elektrischen Verfahrens in ein bestehendes Produkt zur Kariesentfernung zu bestätigen.

Da das Produkt Prepometer® nicht durch die Produktrecherche ermittelbar war, zeigt sich, dass die systematische Literaturrecherche nicht nur zum Auffinden von noch nicht in Produkte integrierte Diagnoseverfahren hilfreich war (wie bei FACE).

Parallelisierung der Kronenstumpfpräparation

Für die Parallelisierung der Kronenstumpfpräparation sind derzeit keine Diagnoseverfahren erhältlich und es wurden auch keine wissenschaftlichen Tätigkeiten eruiert. Dies liegt wahrscheinlich an der Komplexität des Themas, für die noch keine wirtschaftliche Lösung in Sicht scheint.

4.4.3 Endodontie

Prädiagnostik

Einfache Tests wie der Kältetest werden häufig zur Diagnose der Pulpasensibilität angewandt, da sie schnell und unkompliziert durchgeführt werden können. Doch nur durch eine Bestimmung der Vitalität kann die Vaskularisierung der Pulpa direkt bestimmt werden. Die Laser-Doppler-Flowmetry ist derzeit durch das Produkt moorVMS LDF™ von Moor Instruments am Markt erhältlich. Entwicklungen rund um die Pulsoximetrie erscheinen zudem vielversprechend, da sie im Gegensatz zur LDF kostengünstiger ist und bereits weit verbreitet in der allgemeinen Anästhesie eingesetzt wird.

Schaffen der Zugangskavität

Die Darstellung der Wurzelkanaleingänge während der Behandlung kann bereits durch einfache Mittel, wie der Diaphanoskopie geschehen und die Diagnose z.B. durch die Kombination mit einem OP-Mikroskop unterstützt werden. Möglicherweise könnte der Einsatz von verschiedenfarbigem Licht die Wurzelkanäle besser erkennbar machen und zum Beispiel hochklappbare Filterfolien am Mikroskop des Arztes angebracht werden, welche nur für Licht bestimmter Wellenlänge durchlässig sind. Durch eine 3D-Aufnahme des Zahninneren kann jedoch schon im Vorfeld die Position, Anzahl und Ausdehnung der Kanäle wahrheitsgetreu dargestellt werden, z.B. durch DVT.

Navigierte Endodontie

Sensorgeführte Positionsmesssysteme werden in der Zahnheilkunde vor allem in der Chirurgie zum Setzen von Implantaten eingesetzt. Diese Messsysteme basieren auf optischen, elektromagnetischen, elektromechanischen oder Ultraschall-Sensoren. Letztere drei Verfahren finden jedoch aufgrund ihrer limitierten Genauigkeit bzw. ergonomischen Schwierigkeiten in der dentalen Navigation keine Anwendung. [126]

Das am Institut für Parodontologie und Endodontie der Tsurumi Universität in Japan entwickelte endoskopische Navigationssystem scheint vielversprechend zu sein und könnte zu einer Verbesserung der Erfolgsrate von endodontischen Behandlungen führen. Die Entwicklung eines solchen Produkts erfordert ohne firmeninternes Know-

How die Kooperation mit Herstellern von Röntgenprodukten, wodurch die Chancen für eine Umsetzung aus firmenstrategischen Gründen sinken könnten.

Arbeitslängenbestimmung

Für die Arbeitslängenbestimmung kann mittlerweile auf ein breites Spektrum von Endometriegeräten zurückgegriffen werden, wodurch konventionelle Röntgenaufnahmen und die veraltete taktile Bestimmung in den Hintergrund zu rücken scheinen. Endometriegeräte sind dabei entweder als reine Arbeitslängenmessgeräte erhältlich oder bereits in Endometrie-Winkelstücke integriert (z.B. SIROEndo von Sirona Dental Systems, D-Bensheim), wodurch der apparative Aufwand verringert wird.

Die Arbeitslängenbestimmung ist eines der entscheidendsten Anwendungen bei der Wurzelkanalbehandlung. Effiziente, alternative Verfahren für die Längenbestimmung, neben der Röntgentechnologie und der Endometrie, sind derzeit nicht verfügbar. Deshalb würde es nicht innovativ sein, lediglich ein weiteres Endometriegerät auf den Markt zu bringen, welches keine Mehrvorteile liefert.

Kombination von Arbeitsschritten

Eine Verbindung der Arbeitsschritte „Arbeitslängenbestimmung“, „Wurzelkanalaufbereitung“ und „Desinfektion/Wurzelkanalspülung“ wäre durchaus vorstellbar. So könnte möglicherweise ein in das Winkelstück integrierter Apexlokator gleichzeitig den Wurzelkanal aufbereiten und durch die Zufuhr einer Spüllösung (z.B. durch Hohlräume und Austrittsöffnungen im Instrument, Gitter, etc.) bzw. einer Ozonaufbereitung im Gerät, der Kanal desinfiziert werden. Das Signal für den Apexlokator könnte an der Instrumentenspitze abgegriffen werden und wie bei Root ZX vorgezeigt, in das Winkelstück ein- und durchgeführt, oder wie bei iPex (NSK Ltd., Tokyo, Japan), außerhalb des Winkelstücks zur Apexlokator-Einheit geleitet, bzw. wie bei „Endo Pilot Endomotor mit Apexfinder“ ohne externen Abgriff durch das Instrument geführt werden.

Da eine Integration des Apexlokators mit erhöhten Kosten des Endprodukts verbunden ist, wäre auch eine Lösung, bei der die Arbeitslängenbestimmung separat durchgeführt wird und „nur“ die Wurzelkanalaufbereitung und Desinfektion kombiniert werden, denkbar. Zukünftig könnte die Wurzelkanallängenmessung auch bereits bei der intraoralen Untersuchung durch neue Technologien abgedeckt werden, z.B.

durch die Anfertigung eines morphologischen 3D-Scans des Wurzelkanals und der computergestützten Berechnung der Kanallänge.

Wurzelkanalinfektion

Ein kommerzielles System zur Bestimmung des Desinfektionsgrades im Wurzelkanal ist derzeit noch nicht erhältlich, obwohl Versuche mit Hilfe von DIAGNOdent (adaptiert mit einer Faser für den Wurzelkanal) durchgeführt wurden. Eine solche Entwicklung würde zum Erfolg von Wurzelkanalbehandlungen beitragen. Es scheinen jedoch auch therapeutische Verfahren zur Desinfektion des Wurzelkanals nach einer Wurzelkanalbehandlung immer effizienter zu werden, wie die Anwendung der photoaktivierten Desinfektion (z.B. PAD Plus) zeigt.

4.5 Ergebnis der Detailbewertung

Das Ergebnis der Detailbewertung zeigt eindeutig, dass Verfahren, welche für einen Hersteller schwer umsetzbar sind, am schlechtesten abschneiden. So erhielten sowohl MRT als auch THz-Imaging die niedrigste Punktzahl.

Im Bezug auf die Entwicklung von neuen Diagnoseprodukten, z.B. zur Kariesdetektion, kann auch die Kombination von gut bis sehr gut bewerteten Verfahren für die Entscheidung zur Umsetzung in Frage kommen. So könnte man möglicherweise (DI)FOTI mit Laser-Fluoreszenz kombinieren, z.B. durch Variation der Wellenlänge bzw. Intensität der Lichtquelle.

5 Schlussfolgerung

In der vorliegenden Arbeit konnten die für den Einsatz von Diagnoseverfahren vielversprechendsten Dentalanwendungen in den ausgewählten Anwendungsfeldern Prophylaxe und Parodontologie, Restauration und Prothetik sowie Endodontie ermittelt werden. Durch die Produktsuche und systematische Literaturrecherche konnten praxisrelevante Diagnoseverfahren gefunden werden, welche in einer Aufstellung präsentiert wurden. Eine praktische Vorgehensweise zur Bewertung der Verfahren und Anwendungen wurde aufgezeigt und die nötigen Vorlagen sowie die Bewertung angeführt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit erlauben eine Hilfestellung bei der Entscheidung zur Umsetzung der vielversprechendsten Diagnoseverfahren in Dentalprodukte.

6 Literaturverzeichnis

- [1] whintranet. *Basiswissen*. [Online] W&H Dentalwerk Bürmoos GmbH. [Zitat vom: 09. 03 2011.]
http://whintranet/intranet/intra_de_global/womitwirarbeiten/basiswissen/.
- [2] **ANTE/STRM**. *Prophylaxe SM 2003*. [Anwendungsskriptum] Bürmoos : W&H Dentalwerk Bürmoos GmbH, 2003.
- [3] **Hellwege, KD**. *Die Praxis der professionellen Zahnreinigung & Ultraschall-Scaling*. Stuttgart : Thieme, 2007.
- [4] **Lehmann, KM**. *Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnheilkunde*. Köln : Deutscher Ärzte-Verlag GmbH, 2008.
- [5] **Wolf HF, Rateitschak EM, Rateitschak KH**. *Farbatlanten der Zahnmedizin, Bd. 1, Parodontologie*. Stuttgart : Thieme, 2003.
- [6] Deutsche Gesellschaft für Parodontologie e. V. *Informationen zur Parodontologie*. [Online] [Zitat vom: 15. 02 2011.]
<http://www.dgparo.de/content07/patient.html#parodontitis>.
- [7] Zähne.net. [Online] [Zitat vom: 15. 02 2011.] <http://www.zahne.net/zahn-aufbau>.
- [8] Orthopedia-Shop. [Online] [Zitat vom: 15. 02 2011.] <http://www.orthopedia-shop.de/glossar/lexikon-Parodontitis>.
- [9] Behandlungsplanung Prothetik. [Online] [Zitat vom: 24. 03 2011.]
<http://www.medunigraz.at/zahnklinik/Download/BehandlungsplanungProthetik.pdf>.
- [10] **Hellwig E, Klimek J, Attin T**. *Einführung in die Zahnerhaltung*. Köln : Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009.
- [11] **Struber, Mariet**. *Skriptum Restauration*. [Anwendungsskriptum] Bürmoos : W&H Dentalwerk Bürmoos GmbH, 2010.
- [12] **Diecke, Martin**. *Vergleichende Untersuchung zur Validität und Reliabilität unterschiedlicher Methoden der Okklusalkariesdiagnostik*. [Dissertation] Berlin : Medizinische Fakultät Charite - Universitätsmedizin, 2009.

- [13] **Laurisch, Lutz.** *Individualprophylaxe. Diagnostik und Therapie des individuellen Kariesrisikos.* Köln : Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009.
- [14] **Gängler P, Hoffmann T, et al.** *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie.* Stuttgart : Thieme, 2010.
- [15] *Endodontie – MPB Schulung Level II.* [Produktschulungspräsentation] Bürmoos : W&H Dentalwerk Bürmoos GmbH.
- [16] **Struber, Mariet.** *Grundlagen Endodontie.* [Anwendungsskriptum] Bürmoos : W&H Dentalwerk Bürmoos GmbH, 2008.
- [17] Dental Product Shopper. [Online] Integrated Media Solutions. [Zitat vom: 08. 08 2011.] <http://www.dentalproductshopper.com/category/diagnostics/products>.
- [18] Dentalcompare. [Online] CompareNetworks Inc. [Zitat vom: 08. 08 2011.] <http://www.dentalcompare.com/Restorative-Dentistry/4347-Dental-Software-and-Diagnostics/>.
- [19] **Weber, Jochen.** *Die Nutzwertanalyse zur Beurteilung von Entscheidungsalternativen im öffentlichen Sektor.* Norderstedt, Deutschland : GRIN Verlag, 2005.
- [20] **Zimmermann J, Stark C, Rieck J.** *Projektplanung: Modelle, Methoden, Management.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2006.
- [21] **Berndt C, Bingel C, Bittner B.** *Tools im Problemlösungsprozess: Leitfaden und Toolbox für Moderatoren.* Bonn : managerSeminare Verlags GmbH, 2007.
- [22] **Bürklein, Sebastian.** Dental-Online-Community. *Kariesdiagnostik in der Zahnheilkunde: Ein Update.* [Online] [Zitat vom: 30. 03 2011.] http://www.dental-online-community.de/images/magazin/artikel/tw3_09_kariesdiagnostik.pdf.
- [23] **Eickholz, Peter.** Glossar der Grundbegriffe für die Praxis: Unterstützende Parodontitistherapie (UPT). *Teil 1: Ziele und Inhalt.* [Online] [Zitat vom: 20. 04 2011.] <http://www.dgparo.de/content07/pdf/glossar/13.pdf>.
- [24] **Kleber, Bernd-Michael.** *Parodontologie, ein Leitfaden für die Praxis.* Aalen : WM-Colleg, 2000.

- [25] PSI - Der Parodontale Screening Index zur Früherkennung der Parodontitis. [Online] Deutsche Gesellschaft für Parodontologie e.V. [Zitat vom: 02. 05 2011.] <http://www.agz-rnk.de/agz/download/3/PSI-Patientenratgeber.pdf>.
- [26] **Giannobile WV, Beikler T, Kinney JS, Ramseier CA, Morelli T, Wong DT.** Saliva as a diagnostic tool for periodontal disease: current state and future directions. *Periodontology 2000*. 2009, 50:52–64.
- [27] **Chapple, Iain LC.** Periodontal diagnosis and treatment – where does the future lie? *Periodontology 2000*. 2009, 51:9–24.
- [28] Springer Medizin. *Die Parodontalbehandlung wird minimalinvasiv* . [Online] Springer-Verlag GmbH, 2. 12 2009. [Zitat vom: 20. 04 2011.] <http://www.springermedizin.at/artikel/14329-die-parodontalbehandlung-wird-minimalinvasiv>.
- [29] **Dobras, Jens.** *Klassifikation von Schwingungssignalen technischer Systeme mittels FUZZY-Methoden*. [Dissertation] Clausthal : Technischen Universität, 2004.
- [30] **Meissner G, Kocher T.** Calculus-detection technologies and their clinical application. *Periodontology 2000*. 2011, 55(1):189-204.
- [31] **Struber, Mariet.** *Prothetik. Prothetische Zahnheilkunde*. [Anwendungsskriptum] Bürmoos : W&H Dentalwerk Bürmoos GmbH, 2010.
- [32] Flexikon. *Zahnstatus*. [Online] DocCheck Medical Services GmbH. [Zitat vom: 02. 05 2011.] <http://flexikon.doccheck.com/Zahnstatus>.
- [33] **Bratschko RO, Parsche E.** Meduni-graz. *Zahnersatzkunde*. [Online] [Zitat vom: 11. 04 2011.] <http://www.medunigraz.at/zahnklinik/Download/Medizinerskriptum0306-30.pdf>.
- [34] **Weber, Thomas.** *Memorix Zahnmedizin*. Stuttgart : Thieme, 2003.
- [35] **Vogt, Daniela.** *Zur antibakteriellen Wirkung von HealOzone™*. [Dissertation] Jena : Medizinische Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Medizinische Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität, 2007.
- [36] **Heidemann, Detlef.** *Kariologie*. München : Elsevier GmbH, 1999.

- [37] **Wendisch, Marius.** *Untersuchung über einen Zusammenhang zwischen Restaurationsrändern und einem Laktatnachweis.* [Dissertation] München : Medizinische Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität, 2007.
- [38] **MA, Köster.** *Vergleich von der Profilometrie, Kalzium- und Phosphatanalyse zur quantitativen Bestimmung erosiver Mineralverluste.* Giessen : Justus-Liebig-Universität, 2009.
- [39] **Cassan, Klaus de.** Zahnwissen. *Abrasion.* [Online] [Zitat vom: 18. 04 2011.] http://www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm?lexikon_da-dm.htm.
- [40] Optimale Zahnbehandlung. *Abrasion und Attrition der Zähne.* [Online] 2010. [Zitat vom: 18. 04 2011.] <http://www.optimale-zahnbehandlung.ch/index.php/zaehneknirschen?start=15>.
- [41] Optimale Zahnbehandlung. *Definition von Bruxismus.* [Online] 2010. [Zitat vom: 18. 04 2011.] <http://www.optimale-zahnbehandlung.ch/index.php/zaehneknirschen?start=11>.
- [42] **Städtler P, Ebeleseder K.** *Zahnerhaltung, Konservierende Zahnheilkunde.* [Skriptum] Graz : Medizinische Universität Graz. 0306-30.
- [43] Zahngesundheit-online. *Pulpitis.* [Online] Deutsche Gesellschaft für Nährstoffmedizin und Prävention (DGNP) e. V. . [Zitat vom: 15. 04 2011.] <http://www.zahngesundheit-online.com/Zahnerkrankungen/Zahnnervenentzündung-Pulpitis/>.
- [44] **AlKhayer, Majd AlArab.** *Aktueller Stand der chemo-mechanischen Wurzelkanalaufbereitung in den zahnärztlichen Praxen Bayerns.* [Dissertation] München : Ludwig-Maximilians-Universität, 2006.
- [45] **Galler, Kerstin.** *Vier elektronische Wurzelkanallängenmessgeräte im klinischen Vergleich mit Röntgenmesstechnik und tatsächlicher Länge.* [Dissertation] München : Ludwig-Maximilians-Universität, 2002.
- [46] **Brüllmann, Dan.** Endometrische Längenbestimmung - Messaufnahmen in Zeiten der digitalen Endometrie. *Digital Dental News.* 2008, 2(4):S52-55.

- [47] Denfotex. *PAD-Technologie im Überblick*. [Online] Denfotex Light Systems Ltd. [Zitat vom: 27. 04 2011.] <http://www.denfotex.com/DE/PAD-Technologie-im-Uberblick.php>.
- [48] **Metzger, Zvi**. Endoexperience. *The Self-adjusting File (SAF). Part 1: Respecting the Root Canal Anatomy—A New Concept of Endodontic Files and Its Implementation*. [Online] American Association of Endodontists, 2010. [Zitat vom: 29. 04 2011.] <http://www.endoexperience.com/documents/Self-adjustingFilePart12010.pdf>.
- [49] Roos Dental. *Root ZX Wurzelkanalmessgerät*. [Online] ROOS-Dental. [Zitat vom: 20. 08 2011.] <http://www.roos-dental.de/shop/de/praxis/gerate/endodontiegerate/root-zx-wurzelkanalmessgerat.html>.
- [50] **Horch, Hans-Henning**. *Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie*. München : Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH, 2006.
- [51] **Johnson GK, Reinhardt RA, Tussing GJ, Krejci RF**. Fiber optic probe augmented sonic scaling versus conventional sonic scaling. *J Periodontol*. 1989, 60(3):131-6.
- [52] **Oberstolz, Michael**. Skriptum Biosensoren und instrumentelle Analytik. Graz : Technische Universität, 2009.
- [53] **Vartoukian SR, Palmer RM, Wilson RF**. Evaluation of a new periodontal probe tip design. A clinical and in vitro study. *J Clin Periodontol*. 2004, 31(10):918-25.
- [54] **William V. Giannobile, Thomas Beikler et al**. Saliva as a diagnostic tool for periodontal disease: current state and future directions. *Periodontology 2000*. 2009, 50:52-64.
- [55] **Zheng X, Cook JP, et al**. Generic protease detection technology for monitoring periodontal disease. *Faraday Discuss*. 2011, 149:37-47.
- [56] **Bracher AK, Hofmann C, et al**. Feasibility of ultra-short echo time (UTE) magnetic resonance imaging for identification of carious lesions. *Magn Reson Med*. 2011, 66(2):538-45.
- [57] **Hall A, Girkin JM**. A review of potential new diagnostic modalities for caries lesions. *J Dent Res*. 2004, C89-94.

- [58] **Nicolaides L, Feng C, et al.** Quantitative dental measurements by use of simultaneous frequency-domain laser infrared photothermal radiometry and luminescence. *Appl Opt.* 2002, 41(4):768-777.
- [59] **Ko AC, Choo-Smith LP et al.** Detection of early dental caries using polarized Raman spectroscopy. *Opt Express.* 2006, 14(1):203-215.
- [60] **Pretty, Iain A.** Caries detection and diagnosis: Novel technologies. *Journal of Dentistry.* 2006, 34:727-739.
- [61] **Ferrier, S.** The use of ac impedance spectroscopy in clinical caries diagnosis - an initial evaluation. University of Dundee : s.n., 2004.
- [62] Zahnarzt-Empfehlung. [Online] 2009. [Zitat vom: 31. 03 2011.]
<http://www.zahnarzt-empfehlung.de/cerec>.
- [63] **Hellwege, Klaus-Dieter.** *Die Praxis der zahnmedizinischen Prophylaxe: Ein Leitfaden für die Individualprophylaxe, Gruppenprophylaxe und initiale Parodontaltherapie.* Stuttgart : Thieme Verlag, 2003.
- [64] **Tao YC, Fried D.** Near-infrared image-guided laser ablation of dental decay. *J Biomed Opt.* 2009, 14(5):054045.
- [65] **Sainsbury AL, Bird PS, Walsh LJ.** DIAGNOdent laser fluorescence assessment of endodontic infection. *Journal of Endodontics.* 2009, 35(10):1404-1407.
- [66] **Eugene Chen, Paul V. Abbott.** Dental Pulp Testing: A Review. *International Journal of Dentistry.* 2009, 365785.
- [67] **Yamazaki Y, Ozawa T, et al.** Dental fiberscope with navigation system for endodontic treatments. *Stud Health Technol Inform.* 2008, 132:562-4.
- [68] **Yamazaki Y, Ogawa T, et al.** Clinical performance of dental fiberscope image guided system for endodontic treatment. *Stud Health Technol Inform.* 2011, 163:713-5.
- [69] **Sarkissian A, Le AN.** Fiber Optic Fluorescence Microprobe for Endodontic Diagnosis. *J Dent Educ.* 2005, 69(6):633-638.

- [70] Sirona. *Der Lichtblick für gesunde Zähne*. [Online] Sirona Dental Systems GmbH. [Zitat vom: 11. 04 2011.]
http://www.sirona.de/ecomaXL/index.php?site=SIRONA_perioscan_diagnose_therapie.
- [71] **Qin YL, Luan XL, et al.** Real-time detection of dental calculus by blue-LED-induced fluorescence spectroscopy. *J Photochem Photobiol B*. 2007, 87(2):88-94.
- [72] **Bruchmann, Susanne.** *In-vitro- und In-vivo-Untersuchungen zum Prepometer®*. [Dissertation] Marburg : Philipps-Universität, 2004.
- [73] —. Einsatz des Prepometers® im klinischen Unterricht. *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*. 2002, ZWR 111, Nr. 11.
- [74] **Hellwig E, Kimmel K, Lehmann KM.** *Präparationstechnik als Grundlage der Qualitätssicherung*. [Zahnärztliche Mitt 89] s.l. : Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, 1999. 529-528.
- [75] **M, Gente.** Empfehlungen zur Verringerung des Risikos des Vitalitätsverlustes bei Überkronung. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*. 2007, DZZ 62(08).
- [76] **Zeligowski, Thomas.** *Vergleich von Effektivität bei der Kariesentfernung zwischen speziellen, polymerbeschichteten SmartPrep™-Instrumenten und den herkömmlichen Hartmetallrosenbohrern*. [Dissertation] Greifswald : Medizinische Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt-Universität, 2010.
- [77] **Lennon AM, Attin T.** Fluorescence-aided caries excavation (FACE), caries detector, and conventional caries excavation in primary teeth. *Pediatr Dent*. 2009, 31(4):316-9.
- [78] **Lennon AM, Attin T, et al.** Quantity of remaining bacteria and cavity size after excavation with FACE, caries detector dye and conventional excavation in vitro. *Oper Dent*. 2007, 32(3):236-241.
- [79] **AM, Lennon.** Fluorescence-aided caries excavation (FACE) compared to conventional method. *Oper Dent*. 2003, 28(4):341-345.
- [80] LED+ Innovation von W&H. [Online] W&H Detalwerk Bürmoos GmbH. [Zitat vom: 12. 08 2011.]
http://www.wh.com/de_global/products/reportsandstudies/archive/24770/index.aspx.

- [81] **Committee to Review NASA's Exploration, National Research Council.** *A Constrained Space Exploration Technology Program: A Review of NASA's Exploration Technology Development Program.* USA : Natl Academy Pr, 2008. 978-0309125833.
- [82] **Roulet JF, Zimmer S.** *Farbatlant der Zahnmedizin Band 16: Prophylaxe und Präventivzahnmedizin: Bd. 16.* Stuttgart : Thieme, 2002.
- [83] **Fritz, Kathleen.** *Die Eignung des Pulverstrahlgerätes AIR-FLOW® PREP K1 MAX in der Kinderzahnheilkunde – eine klinisch kontrollierte Studie.* [Dissertation] Jena : Friedrich-Schiller-Universität , 2010.
- [84] **Pschyrembel, Willibald.** *Pschyrembel Klinisches Wörterbuch (261. Auflage).* Berlin : Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 2007.
- [85] **Leitgeb, Norbert.** *Sicherheit von Medizingeräten: Recht - Risiko - Chancen.* Wien : Springer-Verlag, 2009.
- [86] **Syska, Andreas.** *Produktionsmanagement.* Wiesbaden : Gabler, 2006.
- [87] **Kincade, Kathy.** Beyond x-rays: Part I -- Do optical caries detection systems really work? [Online] 16. 06 2008. [Zitat vom: 12. 07 2011.]
[http://www.drbcuspids.com/index.aspx?sec=sup&sub=img&pag=dis&ItemID=300676.](http://www.drbcuspids.com/index.aspx?sec=sup&sub=img&pag=dis&ItemID=300676)
- [88] **Schäfer, Peter.** *Kariesdiagnostik mit Difoti.* [Dissertation] München : Ludwig-Maximilian-Universität, 2007.
- [89] **Gutierrez, Cecilia.** *DIFOTI (Digital fiberoptic transillumination).* [Dissertation] München : Medizinische Fakultät der Ludwig-Maximilian-Universität, 2008.
- [90] **Douglas AJ, Featherstone John DB.** Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination, F-speed radiographic film and depth of approximal lesions. *J Am Dent Assoc.* 2005, 136(5):643-651.
- [91] **Schneiderman A, Elbaum M, et al.** Assessment of dental caries with Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination (DIFOTI): in vitro study. *Caries Res.* 1997, 31(2):103-10.
- [92] **Krause, Felix.** Fluoreszenzbasierte optische Methoden zur okklusalen Kariesdiagnostik. *LaserZahnheilkunde.* 2008, 1(8):13-19.

- [93] **Huminicki A, Dong C, et al.** Determining the Effect of Calculus, Hypocalcification, and Stain on Using Optical Coherence Tomography and Polarized Raman Spectroscopy for Detecting White Spot Lesions. *Int J Dent.* 2010, 2010:879252.
- [94] **Karlsson, L.** Caries Detection Methods Based on Changes in Optical Properties between Healthy and Carious Tissue. *Int J Dent.* 2010, 2010:270729.
- [95] **Longbottom, C.** *Carie Scan Clinical Literature Review.* s.l. : CarieScan Ltd, 2008.
- [96] **Bader JD, Shugars DA, Bonito AJ.** Systematic reviews of selected dental caries diagnostic and management methods. *J Dent Educ.* 2001, 65(10):960-8.
- [97] **Bader JD, Shugars DA.** A systematic review of the performance of a laser fluorescence device for detecting caries. *J Am Dent Assoc.* 2004, 135(10):1413-26.
- [98] **Amaechi, Bennet T.** Emerging technologies for diagnosis of dental caries: The road so far. *J Appl Phys.* 2009, 105.
- [99] **Shimada Y, Sadr A, et al.** Validation of swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) for the diagnosis of occlusal caries. *J Dent.* 2010, 38(8):655-65.
- [100] **Choo-Smith LP, Dong CC, et al.** Shedding New Light on Early Caries Detection. *J Can Dent Assoc.* 2008, 74(10):913–918.
- [101] lantislaser. *Optical Coherence Tomography, a new Era in Dentistry.* [Online] Lantis Laser Inc. [Zitat vom: 07. 07 2011.] <http://www.lantislaser.com/>.
- [102] **Kang H, Jiao JJ, et al.** Nondestructive Assessment of Early Tooth Demineralization Using Cross-Polarization Optical Coherence Tomography. *IEEE J Sel Top Quantum Electron.* 2010, 16(4):870-876.
- [103] Cariescan. [Online] Cariescan LLC. [Zitat vom: 30. 03 2011.] <http://eu.cariescan.com/produkte/cariescan-pro-de-DE/merkmale-and-vorteile/die-technologie/>.

- [104] **Huysmans MC, Longbottom C, et al.** Impedance spectroscopy of teeth with and without approximal caries lesions--an in vitro study. *J Dent Res.* 1996, 75(11):1871-8.
- [105] **Longbottom C, Huysmans MC, et al.** Detection of dental decay and its extent using a.c. impedance spectroscopy. *Nat Med.* 1996, 2(2):235-7.
- [106] **Churchley D, Lynch RJ, et al.** Terahertz pulsed imaging study to assess remineralization of artificial caries lesions. *J Biomed Opt.* 2011, 16(2):026001.
- [107] **Wintermantel, Erich.** *Medizintechnik.* Berlin : Springer-Verlag, 2009.
- [108] **Baur, Willi.** Realistische Perspektive: MRT in der Kariesdiagnostik. [Online] Universität Ulm, 01. 02 2011. [Zitat vom: 20. 08 2011.] <http://www.uni-ulm.de/home2/presse/pressemitteilung/article//realistische.html>.
- [109] Die Zahnarzt Woche. [Online] Zahnärztlicher Fachverlag, 08. 02 2011. [Zitat vom: 22. 08 2011.] <http://www.dzw.de/zahnmedizin/artikel/archive/2011/february/article/mrt-in-der-kariesdiagnostik.html>.
- [110] **Bracher AK, Hofmann CP, Ulrici J, Hell E, Haller B, Rasche V.** In-vivo assessment of carious lesions by MRI. *Int J CARS.* 2011, 6 (Suppl 1):S223.
- [111] —. MRI for the assessment of acute parodontitis. *Int J CARS.* 2011, 6 (Suppl 1):S225.
- [112] **Schröttner J, Niedermayr F.** Laborübung Grundlagen der Biomedizinischen Technik. *Ultraschall.* Graz : Institut für Health Care Engineering, 2009.
- [113] **Ng SY, Ferguson MWJ, Payne PA, Slater P.** Ultrasonic studies of unblemished and artificially demineralized enamel in extracted human teeth: a new method for detecting early caries. *J Dent.* 1988, 16:201-209.
- [114] **Matalon S, Feuerstein O, et al.** Diagnosis of approximal caries: bite-wing radiology versus the Ultrasound Caries Detector. An in vitro study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2003, 95(5):626-631.

- [115] —. Detection of cavitated carious lesions in approximal tooth surfaces by ultrasonic caries detector. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2007, 103(1):109-113.
- [116] **Baird, Steve.** S-Ray. [Online] S-Ray Inc. [Zitat vom: 20. 08 2011.] <http://www.s-rayinc.com/sray-technology.htm>.
- [117] Dentalcompare. *Canary Caries Detection System.* [Online] [Zitat vom: 31. 03 2011.] <http://www.dentalcompare.com/details/2412/Canary-Caries-Detection-System.html>.
- [118] **Jeon RJ, Han C, et al.** Diagnosis of pit and fissure caries using frequency-domain infrared photothermal radiometry and modulated laser luminescence. *Caries Res.* 2004, 38(6):497-513.
- [119] **Jeon RJ, Mandelis A, et al.** Nonintrusive, noncontacting frequency-domain photothermal radiometry and luminescence depth profilometry of carious and artificial subsurface lesions in human teeth. *J Biomed Opt.* 2004, 9(4):804-19.
- [120] The Canary System. [Online] Quantum Dental Technologies. [Zitat vom: 12. 08 2011.] <http://www.thecanarysystem.com/research/our-technology.php>.
- [121] **Glaß, Josef Wolfgang.** *Innovations- und Technologiemanagement am Beispiel der Porenbrennertechnologie.* [Dissertation] Erlangen-Nürnberg : Universität , 2004.
- [122] **Hirsch E, Wolf U, Heinicke F, Silva MA.** Dosimetry of the cone beam computed tomography Veraviewepocs 3D compared with the 3D Accuitomo in different fields of view. *Dentomaxillofac Radiol.* 2008, 37(5):268-73.
- [123] **Suomalainen A, Kiljunen T, et al.** Dosimetry and image quality of four dental cone beam computed tomography scanners compared with multislice computed tomography scanners. *Dentomaxillofac Radiol.* 2009, 38(6):367-78.
- [124] **Schulze, Ralf.** zm-online. *Aktueller Stand der digitalen Röntgentechnik .* [Online] 16. 03 2006. [Zitat vom: 13. 04 2011.] http://www.zm-online.de/m5a.htm?/zm/6_06/pages2/zmed1.htm.
- [125] **Franetzki, Manfred.** *Tomographic device for dental tomosynthesis.* WO02086619 WO, 31. 10 2002. A1.

[126] **Esters, Sabine.** *Vergleich zweier Messverfahren zur Überprüfung der Implantatgenauigkeit in der Navigationschirurgie: Computertomographie (CT) vs. Koordinatenmessgerät (KMG).* [Dissertation] Aachen : Medizinischen Fakultät der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 2009.

7 Anhang

Im Anhang befinden sich die erstellten MindMaps für die Aufstellung der Diagnoseverfahren, Dentalanwendungen und Bewertungskriterien für die Detailbewertung. Außerdem wird ein Excel-File beigefügt, das die Vorselektion und Detailbewertung enthält.