

V. Seneadza<sup>1</sup>, A. Koob<sup>1</sup>, J. Kaltschmitt<sup>2</sup>, H.J. Staehle<sup>2</sup>, J. Duwenhögger<sup>2</sup>, P. Eickholz<sup>3</sup>

# Digitale Bildbearbeitung zur Röntgendiagnostik von Approximalkaries\*



V. Seneadza

**Zielsetzung:** Beurteilung der Validität eines speziellen digitalen Bildbearbeitungsmodus für die röntgenologische Diagnostik von Approximalkaries (Filter) hinsichtlich seines Effekts auf die Validität der Messung der Tiefe kariöser Läsionen. **Methoden:** Von 44 extrahierten Zähnen, die eine Approximalkaries aufwiesen, wurden jeweils sechs standardisierte Röntgenbilder in Rechtwinkeltechnik angefertigt: Von jedem Zahn wurden vier Röntgenbilder der Empfindlichkeitsgruppe D jeweils mit und ohne Weichgewebsäquivalent (STSE) bei normaler (0,32 s) und bei Unterbelichtung (0,16 s) erstellt; zwei weitere Zahnfilme wurden mit Filmen der Empfindlichkeitsgruppe E mit STSE bei normaler Belichtungszeit (0,16 s) und bei Unterbelichtung (0,08 s) angefertigt. Auf jedem dieser 264 Röntgenbilder wurde die zentrale Tiefe (CD) jeweils einer kariösen Läsion pro Zahn durch vier unabhängige Untersucher gemessen. Jedes Röntgenbild wurde dazu in seiner unveränderten Version und unter Verwendung des Filters vermessen. Zur Beurteilung der Validität wurden die röntgenologischen CD-Messungen mit histometrischen Messungen von Dünnschliffpräparaten der Prüfkörper, die als Goldstandard dienten, verglichen. Die statistische Auswertung erfolgte über eine multivariate Varianzanalyse für Mehrfachmessungen mit den abhängigen Variablen Untersucher, Läsionstyp, Filter, Filmart, Belichtungszeit und STSE. **Ergebnisse:** Der Läsionstyp hatte einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Validität der CD-Messungen. Ferner beeinflusste die Variable Untersucher in Kombination mit Läsionstyp ( $p < 0,001$ ), Filter ( $p = 0,017$ ), Belichtung ( $p = 0,027$ ) und Filmart ( $p = 0,044$ ) die Validität statistisch signifikant. **Schlussfolgerung:** Der Läsionstyp beeinflusste die Validität der CD-Messungen signifikant: Schmelzläsionen wurden weniger unterschätzt als Dentinläsionen.

**Schlüsselwörter:** Karies, Röntgen/diagnostisches Röntgen; Röntgenbildbearbeitung, Validität

## Digital enhancement of radiographs for measurement of caries lesion depth\*\*

**Objectives:** Evaluation of a particular digital caries image-enhancing mode (filter) for its effect on the validity of measurements of caries lesion depth.

**Methods:** Standardized radiographs of 44 extracted teeth exhibiting interproximal caries lesions were obtained. Six radiographs were obtained of each tooth and digitized. Four were made using D-speed film with and without soft tissue scattering equivalent (STSE) at normal exposure time (0.32 s) and underexposed (0.16 s). Two were made using E-speed film with STSE normally (0.16 s) and underexposed (0.08 s). Four independent examiners measured on each of the 264 radiographs, the central depth (CD) of one carious lesion per tooth both on the unchanged radiographic image and after use of the filter. Histometric CD assessments provided a gold standard for comparison with the radiographic measurements (validity). Repeated measures analysis of variance for validity in relation to examiner, lesion type, filter, film type, exposure time, and STSE was calculated.

**Results:** Lesion type was identified to statistically significantly influence the validity of CD measurements. Examiner in combination with defect type ( $p < 0.001$ ), filter ( $p = 0.017$ ), exposure ( $p = 0.027$ ), and film type ( $p = 0.044$ ) had additional however small effect.

**Conclusions:** Lesion type significantly influenced validity of CD measurements: enamel lesions were less underestimated than of dentine lesions.

**Keywords:** dental caries, radiology/diagnostic X-ray, radiographic image enhancement, validity

<sup>1</sup> Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Universitätsklinikum Heidelberg

<sup>2</sup> Poliklinik für Zahnerhaltungskunde, Klinik für Mund-, Zahn- und Kieferkrankheiten, Universitätsklinikum Heidelberg

<sup>3</sup> Poliklinik für Parodontologie, Zentrum der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (Carolinum), Klinikum der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

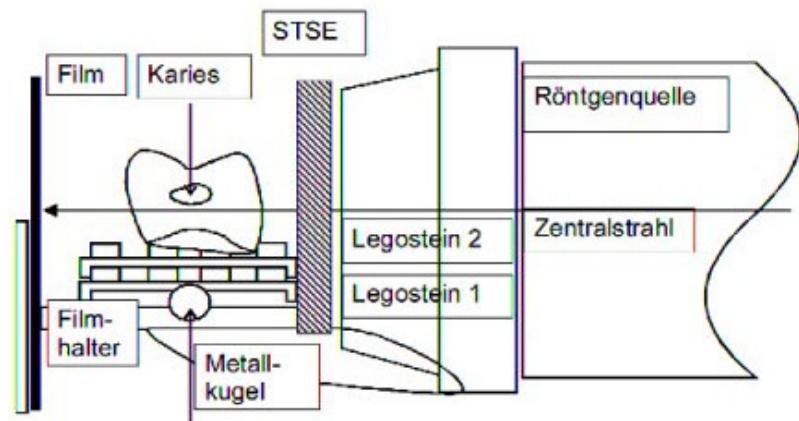
\* Diese deutsche Version wird mit Erlaubnis des British Institute of Radiology abgedruckt. Die definitive Version dieses Artikels wurde publiziert in *Dentomaxillofacial Radiology* 2008 37: 142–148; doi: 10.1259/dmfr/51572889; URL: <http://dmfr.birjournals.org/cgi/content/full/37/3/142>.

\*\* This German version is reprinted by permission of the British Institute of Radiology. The definitive version of this article was published in *Dentomaxillofacial Radiology* 2008 37: 142–148; doi: 10.1259/dmfr/51572889; URL: <http://dmfr.birjournals.org/cgi/content/full/37/3/142>.

## 1 Einleitung

Für die Diagnostik approximaler kariöser Läsionen stehen heute verschiedene Methoden zur Verfügung, dennoch sind Bissflügelaufnahmen noch immer eine bewährte klinische Methode [2, 13, 21, 36]. Prinzipiell hat die röntgenologische Kariesdiagnostik zwei Aufgaben: 1. Diagnosestellung bzw. die Feststellung, ob eine Karies vorhanden ist oder nicht (ROC-Analyse) [8–10, 19, 20, 22, 34], und 2. die Feststellung der Ausdehnung der kariösen Läsion. Letzteres geschieht entweder durch die Messung der aktuellen Ausdehnung (z. B. der zentralen Tiefe: CD) [5, 11, 16, 27] oder durch die Klassifizierung der kariösen Läsion [26]. Es konnte gezeigt werden, dass die Ausdehnung kariöser Läsionen und deren Veränderung durch lineare Distanzmessung *in vitro* bestimmt und beobachtet werden können [6, 17]. Jedoch ist die Überwachung der Approximalkaries schwierig, da Änderungen der Projektionsgeometrie von unterschiedlichen zweidimensionalen Abbildungen einer identischen dreidimensionalen Realität im Röntgenbild resultieren können, die ggf. zu Fehleinschätzungen führen [3, 23, 29]. Selbst wenn Veränderungen durch Abweichungen der Projektionsgeometrie minimiert werden, wird der Bereich der Demineralisation im Vergleich zur histologischen Auswertung im Röntgenbild zumeist unterschätzt [11, 23–25, 29, 30, 32, 36]. Auch die digitale Bildbearbeitung konnte die Validität der röntgenologischen Darstellung der Karies an Approximalflächen nicht zuverlässig verbessern [4, 5, 16, 17]. Es ist denkbar, dass speziell für die Kariesdiagnostik entworfene Bildbearbeitungsmodi von großem Nutzen sind, da durch Ausgleich eventueller Qualitätsmängel oder durch Kontrasterhöhung Änderungen sichtbar gemacht werden könnten, die sonst für das Auge unentdeckt blieben.

Zielsetzung dieser Studie war deshalb die Untersuchung der Validität der Tiefenmessungen approximalkariöser Läsionen, die mit Hilfe eines speziellen digitalen Bildbearbeitungsmodus für die röntgenologische Diagnostik von Approximalkaries erfolgt waren, in Abhängigkeit von Untersucher, Läsionstyp, Filmtyp, Weichgewebsäquivalent und Belichtungszeit.



**Abbildung 1** Röntgenfilmhalter: Prüfkörper angebracht an dem Filmhalter (Verbindung durch Legosteine 1 + 2) und Filmhalter angebracht an der Röntgenquelle mit dem Kollimator: STSE (Weichgewebsäquivalent; Plexiglasscheibe).

**Figure 1** Specimen attached to the film holder (connection by Lego chip 1 and 2) and film holder attached to the x-ray source using the collimator: STSE (soft tissue scattering equivalent: plexiglass slap).

## 2 Material und Methoden

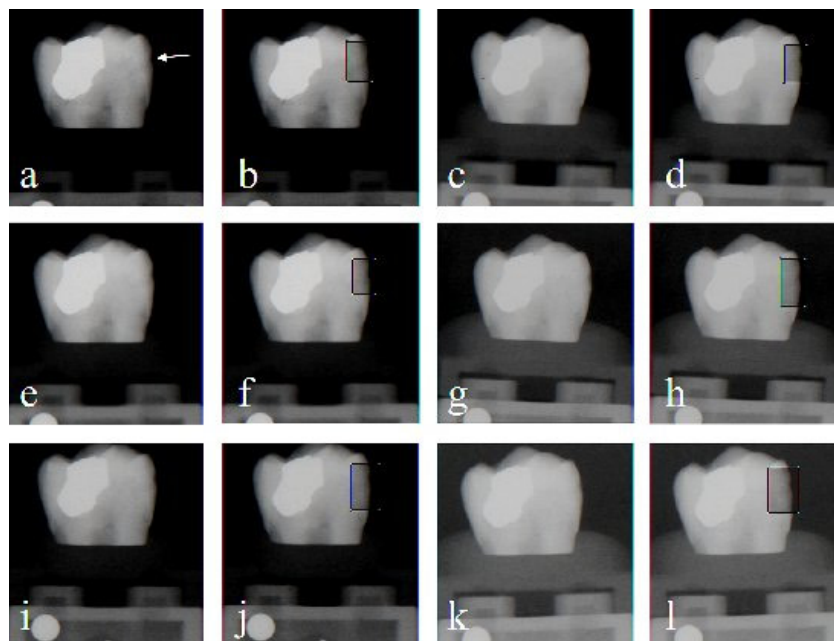
### 2.1 Prüfkörper

Die Vorbereitung der Prüfkörper, die Herstellung der Röntgenbilder sowie die histometrische Beurteilung wurden ausführlich an anderer Stelle beschrieben [5, 16, 27], daher nur eine kurze Beschreibung an dieser Stelle: Es wurden von 44 extrahierten menschlichen Zähnen sechs standardisierte Röntgenbilder unter Verwendung eines speziellen Filmhalters (Abb. 1) angefertigt. Alle Zähne wiesen eine natürlich vorkommende Approximalkaries auf. Vier Röntgenbilder wurden unter Verwendung von Filmen der Empfindlichkeitsspezifikation D (Ultraspeed, Größe 2, Eastman Kodak Co., Rochester, NY, USA) mit und ohne Weichgewebsäquivalent (soft tissue scattering equivalent [STSE]: 9 mm Plexiglasscheibe) [31] bei normaler Belichtungszeit (0,32 s) und unterbelichtet (0,16 s) erstellt. Zwei weitere Röntgenbilder wurden unter Verwendung eines Films der Empfindlichkeitsspezifikation E (Ektaspeed Plus, Größe 2, Eastman Kodak Co., Rochester, NY, USA) mit STSE normal belichtet (0,16 s) und unterbelichtet (0,08 s) angefertigt (Tab. 1). Alle kariösen Läsionen wurden nach der histometrischen Beurteilung, in Anlehnung an die röntgenologische Klassifizierung approximaler Karies nach Pitts und Rimmer, klassifiziert [26]:

C1: Karies in der äußeren Schmelzhälfte, C2: Karies in der inneren Schmelzhälfte, C3: Karies in der äußeren Dentinhälfte, C4: Karies in der inneren Dentinhälfte. Histologisch wurde an elf Zähnen eine Karies in der äußeren Schmelzhälfte (C1), nachgewiesen. An 15 Zähnen reichte die Karies bis in die innere Schmelzhälfte (C2), an 16 Zähnen bis zur äußeren Dentinhälfte (C3) und bei zwei Zähnen reichte die Karies bis in die innere Dentinhälfte (C4).

### 2.2 Radiologische Beurteilung

Alle 264 Röntgenbilder wurden unter Verwendung eines Flachbettscanners (Friacom-Scanner: Linotype Saphir, Friadent AG, Mannheim) mit 600 x 1200 dpi optischer Auflösung sowie 10 bit Graustufen-Modus digitalisiert und danach auf einem Computer gespeichert (Friacom-PC, Friadent AG, Mannheim, PC: 486DX2, 66 MHz, Grafikkarte: Elsa Winner 1000 PRO; Monitor: 17" Trinitron Multiscan 17 Zoll, Sony, Tokio, Japan). Die digitale Bildbearbeitung und Längenmessungen wurden unter Verwendung des Computer-Programms Friacom 2.5 (Friadent AG) durchgeführt. Es wurde mit allen Röntgenbildern auf dieselbe Weise verfahren, ob zu gering belichtet oder bei optimaler Belichtungszeit angefertigt. Alle Röntgenbilder wurden bei 9,5facher Vergrößerung ausgewertet. Um einen Refe-



**Abbildung 2** Digitalisierte Röntgenbilder des Prüfkörpers Nr. 13 mit einer C1-Läsion: a-h: D-Speed Film (Ultraspeed, Größe 2, Eastman Kodak Co., Rochester, NY, USA): ohne Weichgewebsäquivalent bei normaler Belichtungszeit (a: ohne Filter; b: mit Filter) und bei Unterbelichtung (c: ohne Filter; d: mit Filter). Mit Weichgewebsäquivalent (STSE) bei normaler Belichtungszeit (e: ohne Filter; f: mit Filter) und bei Unterbelichtung (g: ohne Filter; h: mit Filter). i-l: E-Speed Film (Ektaspeed Plus, Größe 2, Eastman Kodak Co., Rochester, NY, USA) mit STSE bei normaler Belichtungszeit (i: ohne Filter; j: mit Filter) und bei Unterbelichtung (k: ohne Filter; l: mit Filter).

**Figure 2** Digitized radiographic images of specimen #13 with C1 lesion (arrow): a-h: D-type film (Ultra Speed, size 2, Eastman Kodak Co., Rochester, NY, USA): without soft tissue scatter equivalent at normal exposure time (a: without filter; b: with filter) and underexposed (c: without filter; d: with filter). with soft tissue scatter equivalent (STSE) at normal exposure time (e: without filter; f: with filter) and underexposed (g: without filter; h: with filter) i-l: E-type film (Ekta Speed plus size 2, Eastman Kodak Co., Rochester, NY, USA) with STSE normally (i: without filter; j: with filter) and underexposed (k: without filter; l: with filter).

renzwert zu erhalten, wurde unter Verwendung der Funktion „measurement tool“ der horizontale Durchmesser der Abbildung der Metallkugel im Filmhalter ausgemessen (Abb. 1). Das Programm passte darauf hin alle Messungen automatisch dem Vergrößerungsfaktor an. Von jedem der 264 Röntgenbilder wurden zwei Bildversionen angefertigt: 1. ein unbearbeitetes digitalisiertes Bild und 2. ein durch einen speziellen Kariesfilter bearbeitetes Bild [14, 15]. Dieser Filter basiert auf Segmentation. Es wurden zwei Grenzwerte berechnet: Ein Grenzwert, um metallische Restaurationen auszuschließen und ein Grenzwert, um Hintergrund inklusive Weichgewebe auszublenden. Zuerst wurde ein lokal adaptierter alpha-korrigierter Mittelwertfilter verwendet. Dann wurde eine Methode angewendet, bei der zwei all-

gemeingültige Grenzwerte festgelegt wurden: 1. Bestimmung lokaler Minimalwerte im Grauwert-Histogramm. Die zwei niedrigsten und der größte Grenzwert wurden für weitere Vorgänge verwendet. 2. Umwandlung des Grauwert-Histogramms in ein Grauwert-Gradienten-Histogramm. Der jeweilige Grauwert, der den höchsten Gradienten im Bild aufwies, wurde als Grenzwert verwendet [14]. Ungeachtet der Verwendung des jeweiligen Filters war es den Untersuchern nicht gestattet die Bilddateien individuell zu bearbeiten.

Ein Bereich, der die gesamte Ausbreitung einer bestimmten kariösen Läsion umfasste, wurde ausgesucht (region of interest: ROI) (Abb. 2). In jeder Version jedes Röntgenbildes wurde die zentrale Tiefe der kariösen Läsion (CD) unter der Verwendung der Funktion „mea-

surement tool“ ausgemessen, d. h. für jedes Röntgenbild wurde die Strecke zweimal vermessen. Um Beeinflussungen zu verhindern, wurde eine Messreihenfolge erstellt, nach welcher die Messungen vorgenommen werden sollten. Die Röntgenbilder waren von 1 bis 264 durchnummeriert. Die erste Messung erfolgte mit der unbearbeiteten Version von Röntgenbild 1, die zweite Messung fand an der mit dem Karies-Filter bearbeiteten Version von Röntgenbild 2 statt usw. Dementsprechend erfolgte die 265. Messung mit der bearbeiteten Version von Nummer 1 [5, 16, 27]. Alle Messungen wurden von vier unabhängigen Untersuchern durchgeführt (VS, AK, JD, JK). Es wurde für jeden Prüfkörper im Voraus festgelegt, auf welcher Approximalfläche die zentrale Tiefe der kariösen Läsion gemessen werden sollte. Also war den Untersuchern bekannt, auf welcher Seite die Karies zu finden war und es wurde nur eine Oberfläche pro Röntgenbild bewertet. Des Weiteren war den Untersuchern bekannt, dass alle Prüfkörper klinisch eine Karies aufwiesen.

Alle Untersucher waren vor der experimentellen Einschätzung kalibriert worden. Zu diesem Zweck wurden Röntgenbilder einer früheren Studie vermessen. Diese Messungen wurden mit den histometrischen Messungen, die bereits existierten und als Goldstandard dienten, verglichen. Um eine hohe Übereinstimmung zwischen den Untersuchern und dem Hauptuntersucher (PE) zu erreichen, wurden signifikante Abweichungen diskutiert. Die Untersucher wurden trainiert, bis eine mittlere Abweichung vom histologischen Goldstandard von maximal 0,5 mm festzustellen war, bevor es ihnen erlaubt war die experimentellen Messungen durchzuführen. Ein Untersucher (B) war durch frühere Studien erfahren in der Vermessung von Röntgenbildern kariöser Läsionen [16]. Ein anderer Untersucher (D) hatte Erfahrung in der Auswertung parodontalen Knochenabbaus auf Röntgenbildern aufgrund seiner Mitarbeit an einer anderen Studie [12].

### 2.3 Statistische Analyse

In dieser Studie wurden Röntgenbilder als Modelle analysiert. Dabei wurde das Röntgenbild als statistische Einheit definiert ( $n = 528$ ). Um die Validität der Messungen auf den verschiedenen Modifi-

kationen der Röntgenbilder zu bestimmen, wurden die röntgenologischen CD-Messungen mit den histometrischen Messungen, die als Goldstandard dienten [5, 16, 27], verglichen. Die Mittelwerte der Differenzen zwischen histologischen und radiologischen Messungen mit den verschiedenen Untersuchern als interindividueller Variable wurden unter Verwendung einer multivariaten Varianzanalyse für Mehrfachmessungen miteinander verglichen. Folgende Faktoren wurden in die Analyse mit einbezogen: Filter, Läsionstyp (C1/C2/C3 und C4; Schmelz/Dentin), Filmtyp, Expositionszeit, STSE (n = 528).

Die Identifikation von Faktoren, welche die abhängigen Variablen signifikant beeinflussten, lösten paarweise Vergleiche mit dem verbundenen t-Test (zwischen den Untersuchern für unterschiedliche Läsionstypen) oder gruppenweise Vergleiche mit dem unverbundenen t-Test (Filter, Exposition, Filmtyp) aus. Wegen multipler Vergleiche wurde eine Korrektur der Signifikanzniveaus nach *Bonferroni* vorgenommen. Die statistische Analyse wurde unter Verwendungen der Software „Systat für Windows“ Version 10.0 (Systat Inc., Evanston, IL, USA) erstellt.

### 3 Ergebnisse

Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung der histometrischen und der radiologischen Messungen der verschiedenen Untersucher (A, B, C, D) wurden für die digitale Bildbearbeitung (ohne Filter/mit Filter), Belichtungszeit, Filmart (Ultraspeed/Ektaspeed) und Weichgewebsäquivalent (mit/ohne) berechnet (Tab. 2). Die multivariate Varianzanalyse für Mehrfachmessung identifizierte den Defekttyp als statistisch signifikanten Einflussfaktor der Validität der CD-Messungen (Tab. 3). Die verschiedenen Untersucher selbst hatten keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Validität der CD-Messungen. Allerdings beeinflusste die Variable Untersucher in Kombination mit Läsionstyp ( $p < 0,001$ ), Filter ( $p = 0,017$ ), Belichtungszeit ( $p = 0,027$ ) und Filmart ( $p = 0,044$ ) die Validität signifikant (Tab. 3). Die Validität der verschiedenen Untersucher in Abhängigkeit von den verschiedenen Läsionstypen wird in Tabelle 4 wieder gegeben. Die Tabellen 5a bis 5c zeigen

Filmart	Belichtungszeit	Weichgewebsäquivalent
Ultraspeed Empfindlichkeitsgruppe D	Standardbelichtung: 0,32 s	Ohne
	0,32 s	Mit
	Unterbelichtung: 0,16 s	Ohne
	0,16 s	Mit
Ektaspeed Plus Empfindlichkeitsgruppe E	Standardbelichtung: 0,16 s	Mit
	Unterbelichtung: 0,08 s	Mit

**Tabelle 1** Eigenschaften der Röntgenbilder, die von jedem Prüfkörper erstellt wurden.

**Table 1** Characteristics of radiographs that were obtained of each specimen.

die Validität der verschiedenen Untersucher in Abhängigkeit von Filter, Belichtungszeit und Filmtyp. Für Belichtungszeit und die Verwendung eines Filters konnte bei den Untersuchern A und C kein Effekt auf die Validität nachgewiesen werden. Hingegen bewirkte für die Untersucher B und D Filter und Standardbelichtung eine Steigerung der Validität (Tab. 5a und 5b). Die Art des Films hatte keinen Effekt auf die Validität der Messung des Untersuchers C. Die Verwendung des Ultraspeed-Films hatte einen positiven Effekt auf die Validität der Messungen der anderen Untersucher.

### 4 Diskussion

Zurzeit ist die Bissflügelaufnahme die meist verwendete *In-vivo*-Methode zur Überwachung der Kariesprogression [1, 2, 3, 7]. Die klinische Entscheidung, ob eine Karies exkaviert werden sollte oder nicht, sollte eher von Kavitation denn von der histologischen Tiefe der kariösen Läsion abhängig gemacht werden [36]. Jedoch können herkömmliche Röntgenbilder keine zuverlässige Information über das Vorliegen einer Kavitation geben und somit keine eindeutige Entscheidung über die Notwendigkeit der invasiven Behandlung [26]. Da standardisierte Röntgenbilder für die Überwachung der approximalen kariösen Läsion wesentlich sind [3, 24, 25], war in dieser Studie für eine standardisierte orthoradiale Projektion gesorgt worden.

Um die Rückbildung oder Weiterentwicklung einer kariösen Läsion zu überwachen, sind weitere Informationen erforderlich. Es muss in Betracht gezogen werden, dass Röntgenbilder dazu neigen, den realen Umfang einer Demineralisation zu unterschätzen [5, 6, 16, 27, 29, 32]. Einige neuere Studien konnten zwar nicht zeigen, dass Röntgenbilder die histometrischen Messungen statistisch signifikant unterschätzen [11, 36]. Es muss aber berücksichtigt werden, dass auch die röntgenologischen Messungen ( $0,47 \text{ mm} \pm 0,17 \text{ mm}$ ) von *Young* und *Featherstone* den histometrischen Goldstandard ( $0,58 \text{ mm} \pm 0,19 \text{ mm}$ ) sehr wohl unterschätzten [36]. Bei einer Stichprobe der Größe 13 konnten die Differenzen keine statistische Signifikanz aufweisen. Die Stichprobe könnte zu klein gewesen sein, um statistisch signifikante Differenzen aufzuweisen, ferner ist es einfacher künstlich erzeugte Läsionen zu beurteilen. Dennoch sind die berichteten Differenzen zwischen den radiologischen und den histometrischen Messungen vergleichbar denen, die in dieser Studie bei Untersucher B bei Verwendung des Kariesfilters beobachtet wurden. Andere Autoren fanden heraus, dass die CD durch ein digitales Röntgensystem im Vergleich zum histologischen Goldstandard nicht unterschätzt wurde. Jedoch konnte diese Beobachtung nur bei zwei von vier Untersuchern gemacht werden. Offensichtlich ist der Untersucher ein einflussreicher Faktor in Bezug auf die Validität der röntgenologischen CD-Messungen kariöser Läsionen [11]. Besonders

Messungen	Mittelwert ± SD							
<b>Histometrisch</b>	1,34 ± 0,89							
<b>Untersucher</b>	A		B		C		D	
<b>Röntgenologisch</b>	Ohne Filter	Mit Filter	Ohne Filter	Mit Filter	Ohne Filter	Mit Filter	Ohne Filter	Mit Filter
<b>Alle Röntgenbilder</b>	0,91 ± 0,62	0,94 ± 0,65	1,14 ± 0,64	1,20 ± 0,69	0,78 ± 0,43	0,77 ± 0,51	0,92 ± 0,51	1,04 ± 0,59
<b>Δ zur Histometrie</b>	0,44 ± 0,78	0,41 ± 0,76	0,21 ± 0,77	0,15 ± 0,71	0,57 ± 0,77	0,58 ± 0,75	0,43 ± 0,74	0,31 ± 0,73
<b>D-Film/Standardbelichtung</b>	0,90 ± 0,64	1,00 ± 0,65	1,29 ± 0,66	1,23 ± 0,65	0,79 ± 0,38	0,77 ± 0,50	0,93 ± 0,56	1,02 ± 0,60
<b>Δ zur Histometrie</b>	0,45 ± 0,76	0,35 ± 0,75	0,05 ± 0,69	0,12 ± 0,67	0,56 ± 0,79	0,58 ± 0,70	0,41 ± 0,71	0,32 ± 0,72
<b>D-Film/Unterbelichtung</b>	0,93 ± 0,64	0,94 ± 0,59	1,09 ± 0,53	1,22 ± 0,74	0,75 ± 0,29	0,76 ± 0,48	0,86 ± 0,52	1,03 ± 0,62
<b>Δ zur Histometrie</b>	0,42 ± 0,77	0,41 ± 0,77	0,25 ± 0,80	0,12 ± 0,76	0,60 ± 0,79	0,59 ± 0,71	0,49 ± 0,72	0,31 ± 0,73
<b>D-Film/STSE/Standardbelichtung</b>	0,91 ± 0,65	0,93 ± 0,69	1,17 ± 0,72	1,17 ± 0,72	0,78 ± 0,46	0,72 ± 0,34	1,05 ± 0,51	1,18 ± 0,66
<b>Δ zur Histometrie</b>	0,44 ± 0,79	0,42 ± 0,79	0,17 ± 0,84	0,17 ± 0,76	0,57 ± 0,73	0,63 ± 0,76	0,29 ± 0,84	0,17 ± 0,79
<b>D-Film/STSE/Unterbelichtung</b>	0,99 ± 0,68	0,99 ± 0,72	1,12 ± 0,70	1,19 ± 0,64	0,80 ± 0,49	0,78 ± 0,58	0,92 ± 0,51	1,02 ± 0,56
<b>Δ zur Histometrie</b>	0,36 ± 0,78	0,36 ± 0,79	0,23 ± 0,86	0,15 ± 0,66	0,55 ± 0,84	0,57 ± 0,82	0,43 ± 0,70	0,32 ± 0,70
<b>E-Film/STSE/Standardbelichtung</b>	0,92 ± 0,58	0,91 ± 0,68	1,15 ± 0,67	1,26 ± 0,72	0,80 ± 0,45	0,79 ± 0,65	0,94 ± 0,49	1,04 ± 0,57
<b>Δ zur Histometrie</b>	0,43 ± 0,86	0,44 ± 0,82	0,20 ± 0,71	0,09 ± 0,73	0,55 ± 0,73	0,55 ± 0,79	0,41 ± 0,79	0,31 ± 0,78
<b>E-Film/STSE/Unterbelichtung</b>	0,81 ± 0,55	0,87 ± 0,58	1,00 ± 0,52	1,13 ± 0,69	0,77 ± 0,48	0,80 ± 0,47	0,82 ± 0,44	0,93 ± 0,55
<b>Δ zur Histometrie</b>	0,53 ± 0,75	0,48 ± 0,67	0,34 ± 0,70	0,22 ± 0,72	0,58 ± 0,78	0,55 ± 0,75	0,52 ± 0,71	0,42 ± 0,71

**Tabelle 2** Histometrische und radiologische Messungen der zentralen Tiefe (CD) der kariösen Läsionen (Mittelwert ± Standardabweichung [SD]) sowie die Unterschiede zwischen den histometrischen und radiologischen Messungen für verschiedene Untersucher, Filmtypen (D-, E-Speed), mit und ohne Filter, mit und ohne Gewebeäquivalent (STSE), bei Standard- und Unterbelichtung.

**Table 2** Histometric and radiographic measurements of central depth (CD) of 44 carious lesions (mean ± standard deviation [SD]) and differences between histometric and radiographic measurements for the different image (filter) and film characteristics; STSE: soft tissue scatter radiation equivalent

wenn Dentinläsionen überwacht werden sollen, ist es notwendig, die Unterschätzung der tatsächlichen Ausdehnung zu minimieren. Eine Verbesserung diesbezüglich kann vermutlich durch digitale Bildbearbeitung erzielt werden [16, 27].

Alle Röntgenbilder wurden bei

9,5facher Vergrößerung ausgewertet, da frühere Studien aufgedeckt hatten, dass die Darstellung der Röntgenbilder bei einer höheren Vergrößerung die Validität erhöht [5, 7].

Einen signifikanten Einfluss auf die Validität der CD-Messungen hatte der

Kariestyp. Während die Tiefe der C1-Läsion überschätzt wurde, war die Unterschätzung bei Dentinläsionen (C3 und C4) stärker als bei C2-Läsionen. Dies bestätigten auch Beobachtungen früherer Studien [5, 16, 27]. Andere Autoren berichteten, dass bei der Verwendung von

Abhängige Variable: Histometrische minus radiologische Messung CD [mm]				
Quelle	Summe der Quadrate	DF	F-Ratio	P
<b>Zwischen den Prüfkörpern</b>				
Defekttyp	167,15	1	141,29	0,000
Dentin	11,32	1	9,57	0,002
Filter	1,25	1	1,06	0,304
Belichtung	1,15	1	0,97	0,326
Film	0,85	1	0,72	0,397
STSE	0,05	1	0,04	0,836
Fehler	616,37	521		
<b>Innerhalb der Prüfkörper</b>				
Untersucher	0,23	3	0,70	0,550
Untersucher x Defekttyp	2,10	3	6,58	0,000
Untersucher x Filter	1,12	3	3,51	0,015
Untersucher x Belichtung	1,01	3	3,15	0,024
Untersucher x Filmtyp	0,88	3	2,76	0,041
Untersucher x STSE	0,71	3	2,22	0,084
Untersucher x Dentin	0,51	3	1,60	0,188
Fehler	166,44	1563		
Greenhouse-Geisser Epsilon (G-G): 0,9303 Huynh-Feldt Epsilon (H-F): 0,9466				

**Tabelle 3** Multivariate Varianzanalyse für Mehrfachmessungen für die Unterschiede der histometrischen und röntgenologischen CD-Messungen der digitalisierten unbearbeiteten und bearbeiteten Röntgenbilder (statistische Einheit: Röntgenbild); DF: Freiheitsgrade; STSE: Weichgewebs-äquivalent.

**Table 3** Repeated measures analysis of variance of the differences between the histometric assessments and radiographic measurements of central depths on the digitized but unchanged and the manipulated radiographic images (statistical unit: radiograph); DF: degrees of freedom; STSE: soft tissue scatter radiation equivalent.

ROC-Analysen die Genauigkeit vom Läsionstyp abhängig sei: Dentinläsionen waren leichter zu diagnostizieren als Schmelzläsionen [20, 22].

Die verschiedenen Untersucher selbst hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Validität der CD-Messungen. Aller-

dings hatte die Kombination aus Untersucher mit Defekttyp, Filter, Belichtung und Filmtyp einen signifikanten Effekt auf die Validität. Untersucher B und D waren in der Lage einen Vorteil aus der optimalen Expositionszeit und aus der Verwendung des D-Speed-Filmes sowie aus der Bild-

bearbeitung (Filter) zu ziehen. Beide Untersucher waren bereits erfahren in der Vermessung von Röntgenbildern kariöser Zähne (B) bzw. überhaupt in der Auswertung von Röntgenbildern (D). Diese Beobachtungen bestätigten Aussagen anderer Autoren, die berichteten, dass orale Radio-

Messungen	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD
Untersucher	A	B	C	D
<b>C1 Läsionen</b>				
Histometrisch	0,50 ± 0,21			
Radiologisch	0,79 ± 0,24	0,97 ± 0,33	0,70 ± 0,19	0,90 ± 0,31
Δ zur Histometrie	-0,28 ± 0,34	-0,47 ± 0,42	-0,20 ± 0,28	-0,40 ± 0,34
<b>C2 Läsionen</b>				
Histometrisch	1,23 ± 0,47			
Radiologisch	0,87 ± 0,45	1,12 ± 0,50	0,73 ± 0,35	0,89 ± 0,38
Δ zur Histometrie	0,36 ± 0,67	0,11 ± 0,68	0,50 ± 0,59	0,34 ± 0,60
<b>Schmelzläsionen</b>				
Histometrisch	0,96 ± 0,53			
Radiologisch	0,84 ± 0,37	1,06 ± 0,45	0,72 ± 0,30	0,90 ± 0,36
Δ zur Histometrie	0,12 ± 0,65	-0,10 ± 0,65	0,24 ± 0,60	0,06 ± 0,63
<b>C3 und C4 / Dentinläsionen</b>				
Histometrisch	1,96 ± 0,97			
Radiologisch	1,06 ± 0,88	1,34 ± 0,88	0,86 ± 0,64	1,11 ± 0,75
Δ zur Histometrie	0,90 ± 0,78	0,62 ± 0,77	1,10 ± 0,77	0,85 ± 0,73

C1: Karies in der äußeren Schmelzhälfte, C2: Karies in der inneren Schmelzhälfte,  
C3: Karies in der äußeren Dentinhälfte, C4: Karies in der inneren Dentinhälfte

**Tabelle 4** Histometrische und radiologische Messungen der zentralen Tiefe (CD) der kariösen Läsionen (Mittelwert ± Standardabweichung [SD]) und Unterschiede zwischen den histometrischen und radiologischen Messungen für die verschiedenen Untersucher (A, B, C, D) und Defektypen (Schmelz/Dentin; C1/C2/C3 und C4).

**Table 4** Histometric and radiographic measurements of central depth (CD) of carious lesions (mean ± standard deviation [SD]; range [minimum – maximum]) and differences between histometric and radiographic measurements for the different examiners and lesion types (enamel/dentine; C1/C2/C3 and C4).

logen (Personen, die besonders auf die Beurteilung von Röntgenbildern und die Verwendung digitaler Bildbearbeitung trainiert wurden) größeren diagnostischen Nutzen aus digitaler Bildbearbeitung ziehen [22, 30, 32, 33]. Andere Autoren hatten herausgefunden, dass die Vali-

dität durch automatische digitale Bearbeitung von unterbelichteten Röntgenbildern gesteigert werden konnte. Allerdings waren alle sechs Untersucher dieser Studie geübte orale Radiologen [35].

Der Einfluss des Filmtyps sollte nicht überschätzt werden: Die mittleren

Unterschiede zwischen D- und E-Speed-Filmen lagen bei 0,07 mm – 0,08 mm (Tab. 5c). Diese kleinen Unterschiede haben sicherlich keine klinische Relevanz. Unter Verwendung von ROC-Analysen konnte in einigen Studien kein Unterschied zwischen verschiedenen

Messungen	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD
Untersucher	A	B	C	D
Histometrisch	1,34 ± 0,89			
Ohne Filter				
Radiologisch	0,91 ± 0,62	1,14 ± 0,64	0,78 ± 0,43	0,92 ± 0,51
Δ zur Histometrie	0,44 ± 0,78	0,21 ± 0,77	0,57 ± 0,77	0,43 ± 0,74
Filter				
Radiologisch	0,94 ± 0,65	1,20 ± 0,69	0,77 ± 0,51	1,04 ± 0,59
Δ zur Histometrie	0,41 ± 0,82	0,15 ± 0,80	0,58 ± 0,82	0,31 ± 0,80

**Tabelle 5a** Histometrische und radiologische Messungen der zentralen Tiefe (CD) der kariösen Läsion (Mittelwert ± Standardabweichung [SD ]) und Unterschiede zwischen den histometrischen und radiologischen Messungen für die verschiedenen Untersucher mit und ohne Filter.

**Table 5a** Histometric and radiographic measurements of central depth (CD) of carious lesions (mean ± standard deviation [SD]); range [minimum – maximum]) and differences between histometric and radiographic measurements for the different examiner and filter (no/yes).

Messungen	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD
Untersucher	A	B	C	D
Histometrisch	1,34 ± 0,89			
Standardbelichtung				
Radiologisch	0,93 ± 0,64	1,21 ± 0,69	0,77 ± 0,47	1,03 ± 0,57
Δ zur Histometrie	0,42 ± 0,85	0,13 ± 0,82	0,57 ± 0,81	0,32 ± 0,83
Unterbelichtung				
Radiologisch	0,92 ± 0,63	1,13 ± 0,64	0,77 ± 0,47	0,93 ± 0,54
Δ zur Histometrie	0,43 ± 0,75	0,22 ± 0,75	0,57 ± 0,78	0,41 ± 0,71

**Tabelle 5b** Histometrische und radiologische Messungen der zentralen Tiefe (CD) der kariösen Läsion (Mittelwert ± Standardabweichung [SD ]) und Unterschiede zwischen den histometrischen und radiologischen Messungen für die verschiedenen Untersucher und die Belichtungszeit.

**Table 5b** Histometric and radiographic measurements of central depth (CD) of carious lesions (mean ± standard deviation [SD]); range [minimum – maximum]) and differences between histometric and radiographic measurements for the different examiner and exposures.

Messungen	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD	Mittelwert ± SD
Untersuchung	A	B	C	D
Histometrisch	1,34 ± 0,89			
D-Film				
Radiologisch	0,95 ± 0,65	1,19 ± 0,67	0,77 ± 0,45	1,00 ± 0,57
Δ zur Histometrie	0,40 ± 0,77	0,16 ± 0,85	0,58 ± 0,76	0,28 ± 0,73
E-Film				
Radiologisch	0,88 ± 0,59	1,13 ± 0,65	0,79 ± 0,51	0,93 ± 0,51
Δ zur Histometrie	0,47 ± 0,86	0,21 ± 0,85	0,56 ± 0,85	0,36 ± 0,74

**Tabelle 5c** Histometrische und radiologische Messungen der zentralen Tiefe (CD) der kariösen Läsion (Mittelwert ± Standardabweichung [SD ]) und Unterschiede zwischen den histometrischen und radiologischen Messungen für die verschiedenen Untersucher und den Filmtyp.

**Table 5c** Histometric and radiographic measurements of central depth (CD) of carious lesions (mean ± standard deviation [SD]); range [minimum – maximum]) and differences between histometric and radiographic measurements for the different examiner and film type.



Filmtypen bezüglich der Genauigkeit von Kariesbeurteilung aufgezeigt werden: D-/E-Speed- [8, 10, 19, 20, 34], E-/F-Speed-Filme [9, 19, 22]. Jedoch selbst bei ROC-Analysen gibt es einige widersprüchliche Aussagen hinsichtlich der Validität verschiedener Filmtypen für die Feststellung approximalkariöser Läsionen. Einige Autoren berichten über signifikante Unterschiede in der Validität bestimmter E-Speed-Filme (Ektaspeed/Ektaspeed Plus) [20] und andere berichten das Gegenteil [8]. Dennoch konnten einige Autoren feststellen, dass der E-Speed-Film im Vergleich mit D- und F-Speed-Filmen statistisch signifikant überlegen ist [28], während andere Autoren keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Ektaspeed Plus- und F-Speed-Filmen feststellen konnten [4].

Bei Untersucher B und D führte die Verwendung des Filters dazu, dass die Validität der CD-Messungen von C1- und C2-Läsionen im Vergleich zu digitalisierten aber unbearbeiteten Bildern verbessert werden konnte. Auch bei Dentinläsionen konnte durch diese Studie gezeigt werden, dass der angewandte Kariesfilter einen signifikanten Effekt auf die Validität der CD-Messung hat, wenn er von geübten Untersuchern an-

gewandt wurde. Die verbesserte Validität der CD-Messungen verbessert die Möglichkeiten zur Überwachung von Dentinläsionen (Kariesmonitoring). Jedoch wurde die geringste Validität der CD-Messungen für Dentinläsionen beobachtet. Die Beobachtung einer C3-Läsion anhand von Röntgenbildern birgt immer noch die Gefahr der Unterschätzung der Tiefe einer kariösen Läsion und dadurch auch einer pulpalen Reaktion innerhalb des Beobachtungsintervalls. Der Gebrauch des Filters kann diese Gefahr verringern und dadurch die Option verbessern eine Dentinkaries zu beobachten.

Die Validität, die in dieser Studie erzielt wurde, war für jeden Prüfer und Parameter besser als die Validität, die in den früheren Studien mit herkömmlichen Röntgenfilmen (mittlerer Unterschied zwischen histometrischem Goldstandard und der röntgenologischen CD-Messung: 0,52 mm bis 0,80 mm) [16] und mit einem CCD System (0,61 mm bis 0,91 mm) [27] beobachtet wurde. Die schlechteste Validität (0,63 mm) wurde bei Prüfer C mit dem Filter im D-Speed-Film mit STSE unter Standardbelichtung beobachtet. Die beste Validität (0,05 mm) wurde von Untersucher B ohne Filter unter optima-

len Filmbedingungen (D-Geschwindigkeit, ohne STSE, Standardbelichtung) erzielt (Tab. 2). Ein wichtiger Unterschied zu den früheren Studien [16, 27] war, dass nur Röntgenbilder von Zähnen histologisch gesicherter Karies in dieser Studie verwendet wurden. Allen Untersuchern war die Tatsache bewusst, dass auf allen Röntgenbildern eine Karies dargestellt war und es war ihnen bekannt, auf welcher Seite die kariöse Läsion zu finden sei. Dadurch konnten die Variabilität und die verringerte Validität, die durch die Ungewissheit, ob eine Karies vorliegt oder nicht, ausgeschlossen werden.

Der Läsionstyp hatte einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Validität der CD-Messungen: Schmelzläsionen wurden weniger unterschätzt als Dentinläsionen. D77

#### Korrespondenzadresse:

Dr. V. Seneadza  
Universitätsklinikum Heidelberg  
Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik  
Im Neuenheimer Feld 400  
69120 Heidelberg  
Tel.: 0 62 21 / 56 67 38  
Fax: 0 62 21 / 56 53 71  
E-Mail: viktorija\_seneadza@med.uni-heidelberg.de

## Literatur

1. Angmar-Månsson B, ten Bosch JJ: Advances in methods for diagnosing coronal caries – a review. *Adv Dent Res* 7, 70–79 (1993)
2. Benn DK: Radiographic caries diagnosis and monitoring. *Dentomaxillofac Radiol* 23, 69–72 (1994)
3. Benn DK, Watson TF: Correlation between film position, bite-wing shadows, clinical pitfalls, and histologic size of approximal lesions. *Quintessence Int* 20, 131–141 (1989)
4. de Araujo EA, Castilho JC, Medici Filho E, de Moraes ME: Comparison of direct digital and conventional imaging with Ekta Speed Plus and INSIGHT films for the detection of approximal caries. *Am J Dent* 18, 241–244 (2005)
5. Eickholz P, Kolb I, Lenhard M, Hassfeld S, Staehle HJ: Digital radiography of interproximal caries. Effect of different filters. *Caries Res* 33, 234–241 (1999)
6. Eickholz P, Pioch T, Lenhard M: Progression of dental demineralisation with and without modified tunnel restorations in vitro. *Oper Dent* 22, 222–228 (1997)
7. Haak R, Wicht MJ, Nowak G, Hellmich M: Influence of displayed image size on radiographic detection of approximal caries. *Dentomaxillofac Radiol* 32, 242–246 (2003)
8. Hintze H, Christoffersen L, Wenzel A: In vitro comparison of Kodak Ultraspeed, Ektaspeed, and Ektaspeed Plus, and Agfa M2 Comfort dental x-ray films for the detection of caries. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 81, 240–244 (1996)
9. Hintze H, Wenzel A: Influence of the validation method on diagnostic accuracy for caries. A comparison of six digital and two conventional radiographic systems. *Dentomaxillofac Radiol* 31, 44–49 (2002)
10. Hintze H, Wenzel A, Jones C: In vitro comparison of D- and E-speed film radiography, RVG, and Visualix digital radiography for the detection of enamel approximal and dentinal occlusal caries lesions. *Caries Res* 28, 363–367 (1994)
11. Jacobsen JH, Hansen B, Wenzel A, Hintze H: Relationship between histological and radiographic caries lesion depth measured in images from four digital radiography systems. *Caries Res* 38, 34–38 (2004)
12. Kaltschmitt J, Pretzl B, Eickholz P: Langzeitergebnisse 10 Jahre nach parodontaler Therapie. 2. Zahnbezogene Faktoren. *Dtsch Zahnärztl Z* 60, 211–214 (2005)
13. Kidd EAM, Pitts NB: A reappraisal of the value of bitewing radiograph in the diagnosis of posterior approximal caries. *Br Dent J* 169, 195–200 (1990)
14. Koch S: Methoden zur diagnoseorientierten Qualitätsobjektivierung und automatischen Bildverbesserung in der zahnärztlichen Radiologie. *Med Diss, Heidelberg* 1997
15. Koch S, Wagner IV, Seipel S, Schneider W: Controlled diagnosis-oriented enhancement of automatically segmented radiographs in dentistry. *Comput Methods Programs Biomed* 57, 125–131 (1998)

16. Koob A, Sanden E, Hassfeld S, Staehle HJ, Eickholz P: Effect of digital filtering on the measurement of the depth of proximal caries under different exposure conditions. *Am J Dent* 17, 388–393 (2004)
17. Lenhard M, Mayer T, Pioch T, Eickholz P: A method to monitor dental demineralisation in vitro. *Caries Res* 30, 326–333 (1996)
18. Li G, Sanderink GC, Berkhout WE, Syriopoulos K, van der Stelt PF: Detection of proximal caries in vitro using standard and task-specific enhanced images from a storage phosphor plate system. *Caries Res* 41, 231–234 (2007)
19. Ludlow JB, Abreu M, Mol A: Performance of a new F-speed film for caries detection. *Dentomaxillofac Radiol* 30, 110–113 (2001)
20. Ludlow JB, Platin E, Delano EO, Clifton L: The efficacy of caries detection using three intraoral films under different processing conditions. *J Am Dent Assoc* 128, 1401–1408 (1997)
21. Mann J, Pettigrew JC, Revach A, Aewas JR, Kochavi D: Assessment of the DMF-S index with the use of bitewing radiographs. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 68, 661–665 (1989)
22. Nair MK, Nair UP: An in-vitro evaluation of Kodak Insight and Ektaspeed Plus film with a CMOS detector for natural proximal caries: ROC analysis. *Caries Res* 35, 354–359 (2001)
23. Pitts NB: Monitoring of caries progression in permanent and primary posterior approximal enamel by bitewing radiography. *Community Dent Oral Epidemiol* 11, 228–235 (1983)
24. Pitts NB: Film-holding, beam-aiming and collimating devices as an aid to standardization in intra-oral radiography: a review. *J Dent* 12, 36–46 (1984)
25. Pitts NB, Renson CE: Image analysis of bitewing radiographs: a histological validated comparison with visual assessment of radiolucency depth in enamel. *Br Dent J* 160, 205–209 (1986)
26. Pitts NB, Rimmer PA: An in vivo comparison of radiographic and directly assessed clinical caries status of posterior approximal surfaces in primary and permanent teeth. *Caries Res* 26, 146–152 (1992)
27. Sanden E, Koob A, Hassfeld S, Staehle HJ, Eickholz P: Reliability of digital radiography of interproximal dental caries. *Am J Dent* 16, 170–176 (2003)
28. Schulze RK, Nackat D, D'Hoedt B: In vitro carious lesion detection on D-, E-, and F-speed radiographic films. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 97, 529–534 (2004)
29. Sewerin I: Influence of X-ray beam angulation upon the radiographic image of proximal carious lesions. *Community Dent Oral Epidemiol* 9, 74–78 (1981)
30. Shrout MK, Russell CM, Potter BJ, Powell BJ, Hildebolt CF: Digital enhancement of radiographs: can it improve caries diagnosis? *J Am Dent Assoc* 127, 469–473 (1996)
31. Stassinakis A, Brägger U, Lussi A: Determination of the human buccal soft tissue equivalent for in vitro studies on dental radiography. *Acta Med Dent Helv* 1, 46–49 (1996)
32. Syriopoulos K, Sanderink GCH, Velders XL, van der Stelt PF: Radiographic detection of approximal caries: a comparison of dental films and digital imaging. *Dentomaxillofac Radiol* 29, 312–318 (2000)
33. Wenzel A, Hintze H, Mikkelsen L, Mouyen F: Radiographic detection of occlusal caries in noncavitated teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 72, 621–626 (1991)
34. Wong A, Monsour PA, Moule AJ, Basford KE: A comparison of Kodak Ultra-speed and Ektaspeed Plus dental X-ray films for the detection of dental caries. *Aust Dent J* 47, 27–29 (2002)
35. Yoshiura K, Nakayama E, Shimizu M, Goto TK, Chikui T, Kawazu T et al.: Effects of the automatic exposure compensation on the proximal caries diagnosis. *Dentomaxillofac Radiol* 34, 140–144 (2005)
36. Young DA, Featherstone JDB: Digital imaging fiber-optic trans-illumination, F-speed radiographic film and depth of approximal lesions. *J Am Dent Assoc* 136, 1682–1687 (2005)