

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Endodontologie  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Univ.-Prof. Dr. Wolfgang H.-M. Raab  
Sektion Parodontologie  
Univ.-Prof. Dr. Dr. Thomas Beikler

*In vitro Untersuchung  
eines experimentellen Amin-Epoxid-Sealers  
im Vergleich zu zwei Standardprodukten*

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin  
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von  
Andreas Heiner Ritter

2013

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez. Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf

Dekan

Referent: Priv.-Doz. Dr. Sonntag

Korreferent: Prof. Dr. Schwarz

*In Dankbarkeit  
meinen lieben Eltern gewidmet*

# Inhaltsverzeichnis

<b>I Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>II Literaturübersicht</b>	
II 2.1 Ziele der Wurzelkanalbehandlung	3
II 2.2 Mechanische Aufbereitung	3
II 2.2.1 manuelle Aufbereitungstechnik	4
II 2.2.2 maschinelle Aufbereitungstechnik	6
II 2.3 Chemomechanische Reinigung der Wurzelkanäle	6
II 2.4 Kompaktionstechniken	7
II 2.4.1 Laterale Kompaktion	8
II 2.4.2 Zentralstifttechnik (single-cone-Technik)	9
II 2.4.3 Vertikale Kompaktion	10
II 2.5 Wurzelkanalfüllstifte	11
II 2.6 Wurzelkanalfüllpasten (Sealer)	13
II 2.6.1 Sealer auf Epoxidharz - Basis	13
II 2.6.2 Sealer auf Zinkoxid-Eugenol - Basis	16
II 2.6.3 Sealer auf Glasionomermzement - Basis	17
II 2.6.4 Sealer auf Polyketon - Basis	17
II 2.6.5 Sealer auf Salicylat – Basis mit Kalziumhydroxid	18
II 2.6.6 Sealer auf Polydimethylsiloxan - Basis	19
II 2.7 Biokompatibilität von Wurzelfüllpasten	20
II 2.8 Guttapercha und Sealer: Mengenverhältnis und Verbund	22
II 2.9 Physikalische Eigenschaften von Sealern	24
II 2.10 Medikamentenzusätze bei Wurzelfüllmaterialien	25
II 2.11 Quartäre Ammoniumverbindungen	27
II 2.12 Naturstoffmonomere vs. artifizielle Monomere	28

<b>III Problemstellung und Zielsetzung</b>	29
<b>IV Material und Methode</b>	31
IV 4.1 Physikalische Eigenschaften	31
IV 4.1.1 Filmdicke ( <i>DIN EN ISO 6876</i> )	32
IV 4.1.2 Fließfähigkeit ( <i>DIN EN ISO 6876</i> )	33
IV 4.1.3 Schrumpfung ( <i>DIN EN ISO 13907</i> )	34
IV 4.1.4 Abbindezeit ( <i>DIN EN ISO 6876</i> )	36
IV 4.1.5 Röntgensichtbarkeit ( <i>DIN EN ISO 6876</i> )	38
IV 4.1.6 Infrarotspektroskopie	40
IV 4.2 Chemische Eigenschaften	41
IV 4.2.1 pH - Wert Messung	41
IV 4.2.2 Löslichkeit ( <i>DIN EN ISO 6876</i> )	42
IV 4.3 Biologische Eigenschaften	44
IV 4.3.1 Antibakterielle Wirksamkeit ( <i>DIN EN 22196</i> )	44
IV 4.4 Auswertung	47
IV 4.4.1 Boxplot - Diagramm / Balken - Diagramm	47
IV 4.4.2 Der Median	47
IV 4.4.3 Die Quartile	47

<b>V Ergebnisse</b>	49
V 5.1 Physikalische Eigenschaften	49
V 5.1.1 Filmdicke	49
V 5.1.2 Fließfähigkeit	51
V 5.1.3 Schrumpfung	53
V 5.1.4 Abbindezeit	57
V 5.1.5 Röntgensichtbarkeit	58
V 5.1.6 Infrarotspektroskopie	61
V 5.2 Chemische Eigenschaften	64
V 5.2.1 pH-Wert Messung	64
V 5.2.2 Löslichkeit	67
V 5.3 Biologische Eigenschaften	68
V 5.3.1 Antibakterielle Wirksamkeit	68
<b>VI Diskussion</b>	76
VI 6.1 Diskussion der Problemstellung	76
VI 6.2 Diskussion von Material und Methodik	77
VI 6.3 Diskussion der Ergebnisse	80
VI 6.3.1 Filmdicke	80
VI 6.3.2 Fließfähigkeit	82
VI 6.3.3 Schrumpfung	84
VI 6.3.4 Abbindezeit	87
VI 6.3.5 Röntgensichtbarkeit	88
VI 6.3.6 Infrarotspektroskopie	90
VI 6.3.7 pH-Wert Messung	91
VI 6.3.8 Löslichkeit	92
VI 6.3.9 Antibakterielle Wirksamkeit	93

<b>VII Zusammenfassung</b>	96
<b>VIII Summary</b>	98
<b>IX Literaturverzeichnis</b>	100
<b>X Anhang</b>	
X 10.1 Messergebnisse	116
X 10.2 Tabellenverzeichnis	145
X 10.3 Graphikverzeichnis	149
X 10.4 Abbildungsverzeichnis	151
X 10.5 Abkürzungsverzeichnis	153
X 10.6 Danksagung	154

# I Einleitung

Schon im Altertum fanden erste Versuche statt, entzündlich erkrankte Zähne zu erhalten und nicht nur die Extraktion als einzige Therapiemethode zur Schmerzbeseitigung anzusehen<sup>1</sup>.

Die Erkrankung ist eine Entzündungsreaktion des Pulpagewebes, die durch bakterielle Stoffwechsel- und Zerfallsprodukte, traumatische, chemisch-toxische oder thermische Reize initiiert werden kann<sup>2</sup>. Heute stellt die Maßnahme der Wurzelkanalbehandlung eines entzündeten oder pulpatoten Zahnes eine gängige Methode in der Praxis dar. Das Ziel einer Wurzelkanalbehandlung besteht in einem langfristigen Erhalt des Zahnes als funktionsfähige Kaueinheit und Erhaltung oder Wiederherstellung gesunder periradikulärer Strukturen<sup>3,4</sup>.

Hierbei kommt den Wurzelkanalfüllungsmaterialien eine besondere Aufgabe zu: der dauerhafte flüssigkeits- und bakteriendichte Verschluss des Wurzelkanalsystems nach vorheriger chemomechanischer Aufbereitungsmethode. Die zur Obturation verwendeten Materialien bestehen aus einem soliden Kernmaterial, welches entweder kalt oder warm in den Wurzelkanal eingebracht wird, und einem Sealer. Die angestrebte Abdichtung des Wurzelkanalsystems ist mit der vorzugsweise verwendeten Guttapercha, unabhängig von der Verarbeitungstechnik, allein nicht zu erreichen. Die wesentliche Aufgabe des Sealers besteht darin, vorhandene Inkongruenzen zwischen der Wurzelkanalwand und der Guttapercha volumenstabil auszufüllen<sup>5,6</sup>.

Das Sealermaterial muss daher unterschiedliche physikalische, chemische und biologische Anforderungen erfüllen, um diesen Aufgaben zuverlässig nachzukommen. So sind die allgemeinen Anforderungen an ein Wurzelfüllmaterial nach der *Europäischen Gesellschaft für Endodontologie* Dimensionsstabilität, Biokompatibilität, Unempfindlichkeit und Unlöslichkeit gegenüber Gewebeflüssigkeiten, Röntgenopazität, bakterielles Wachstum nicht fördernd und Revidierbarkeit<sup>3</sup>.

Nach ihrer chemischen Zusammensetzung werden die Sealermaterialien in verschiedene Gruppen klassifiziert: 1) Zinkoxid-Eugenol-enthaltende Sealer, 2) Calciumhydroxid-enthaltende Sealer, 3) Epoxidharz-enthaltende Sealer, 4) Silikon-enthaltende Sealer<sup>7</sup>.

Wurzelkanalfüllpasten auf Epoxidharz-Basis wie *AH Plus*® (*Dentsply DETrey* GmbH, Konstanz, Deutschland) zählen zu dem „Goldstandard“ unter der großen Vielzahl von angebotenen Wurzelfüllpasten<sup>8</sup>.

In den letzten Jahren wurden durch die Forschung immer wieder Erleichterungen für die endodontische Behandlung erzielt. So wurden neben den bekannten Kalt-Obturationstmethoden wie der Zentralstifttechnik auch Warmfülltechniken wie die Thermalfilmmethode entwickelt.

Auch Sealmaterialien werden auf Basis bekannter Zusammensetzungen bezüglich ihrer Eigenschaften verbessert und weiterentwickelt<sup>9</sup>. Dies ist auch ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit.

Das Ziel der Untersuchung bestand darin, die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften eines durch Naturstoffmonomer modifizierten Sealers auf Epoxidharz-Basis mit den Eigenschaften zweier konventioneller Materialien (*AH Plus*®, *Dentsply DeTrey* und *EasySeal*®, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, *Komet*) zu vergleichen. Ein zweiter experimenteller Sealer sollte ein erstes Modell eines noch weiter zu entwickelnden Sealers darstellen und wurde daher nicht auf alle Eigenschaften getestet.

## II Literaturübersicht

### *II 2.1 Ziele der Wurzelkanalbehandlung*

Das Ziel einer Wurzelkanalbehandlung besteht in dem langfristigen Erhalt eines erkrankten Zahnes als funktionsfähige Kaueinheit<sup>10</sup>. Hierzu muss mit Hilfe verschiedener Methoden eine Entfernung des infizierten vitalen und nekrotischen Pulpagewebes stattfinden und eine bestmögliche Elimination der Mikroorganismen erfolgen.

Der anatomisch gegebene Wurzelkanalverlauf muss von apikal nach koronal konisch gestaltet werden. Die engste Stelle des gestalteten Kanals muss am apikalen Endpunkt liegen, ohne die Wurzel an dieser Stelle durch einen übermäßigen Materialabtrag unnötig zu schwächen. Die apikale Konstriktion des Wurzelkanals soll hierbei erhalten werden<sup>11</sup>.

Durch die Wurzelkanalfüllung ist nach der Aufbereitung des Kanalsystems ein dauerhaftes, hermetisch und biokompatibel abgeschlossenes Kanallumen zu erreichen, durch welches weder von apikal noch koronal Flüssigkeiten oder Mikroorganismen penetrieren können<sup>12</sup>.

### *II 2.2 Mechanische Aufbereitung*

Die mechanische Aufbereitung dient in erster Linie der Reinigung, der Formgebung und der Glättung des Wurzelkanalsystems. Maßgeblich für den Erfolg der Aufbereitung, welche den zeitintensivsten Teil der Behandlung einnimmt, ist die Routine des Behandelnden und die Vertrautheit mit den verwendeten Aufbereitungssystemen. Unterschieden wird die manuelle von der maschinellen Aufbereitungstechnik<sup>11</sup>.

## II 2.2.1 Manuelle Aufbereitungstechnik

Die manuelle Aufbereitungstechnik wird mit Instrumenten verschiedenen Designs und unterschiedlicher Legierung durchgeführt. Handinstrumente werden in der Regel aus Edelstahl-Nickel-Titan, Chrom-Nickel-Edelstahl oder aus Titan-Aluminium Legierungen hergestellt. Während einer Wurzelkanalbehandlung kommen häufig verschiedene Instrumententypen zur Anwendung, um auch komplizierte Wurzelkanalverläufe *lege artis* aufzubereiten zu können.

Dargestellt werden in *Tabelle II 1* die gebräuchlichen Instrumente, Reamer, K-Feile und Hedström-Feilen, die sich hinsichtlich ihrer Geometrie und ihrer der geometrischen Form zugrunde liegenden Arbeitsweise unterscheiden<sup>13</sup>.

Tab. II 1 *Handinstrumente im Vergleich*

	<i>Reamer</i>	<i>K-Feile</i>	<i>Hedström-Feile</i>
Herstellung	- aus Rohlingen - 3 bzw. 4-eckiger Querschnitt durch Verdrillung	- aus Rohlingen - 3 bzw. 4-eckiger Querschnitt durch Verdrillung	- aus Rohlingen - runder Querschnitt durch Fräsung
Schneiden-Anzahl	8-16 Schneiden	24-36 Schneiden	14-31 Schneiden
Schneidekantenwinkel	10 - 30°	25 - 40°	60 - 65°
Spanraum	groß	klein	groß
Arbeitsweise	drehend-schabend	dehend-schabend feilend	feilend

Zahlreiche Methoden können bezüglich der Aufbereitungstechnik unterschieden werden. Prinzipiell lässt sich als Methodik die apikal-koronal Methode von der koronal-apikal Methode unterscheiden<sup>9</sup>.

Bei der apikal-koronal Technik, die auch als step-back Technik bezeichnet wird, findet zuerst die Aufbereitung des apikalen Wurzelmittels mit zunehmender Feilengröße (ISO-Größe) statt. Die step-back Technik wurde erstmals 1969 von *Clem* erwähnt<sup>14</sup>. Anschließend wird das apikale Wurzelmittels dadurch konisch aufbereitet, dass zunehmende Feilengrößen immer 0.5-1 mm kürzer den Wurzelkanal bearbeiten. Diese Technik eignet sich vorwiegend nur für gerade Wurzelkanäle, da zunehmende Aufbereitungsdurchmesser auch eine Gefahr von Aufbereitungsfehlern, besonders in gekrümmten Kanälen verursachen würden und mit einem ansteigendem Instrumentendurchmesser auch die Flexibilität der Handinstrumente kontinuierlich abnimmt<sup>11,15</sup>. Bei der koronal-apikal Methode wird der Wurzelkanal initial koronal erweitert und sekundär mit Instrumenten abnehmenden Durchmessers nach apikal aufbereitet. Diese Technik wird als crown-down Technik bezeichnet<sup>16</sup>.

Als ein Vorteil dieser Technik wird vor allem eine initiale Ausräumung von Geweberesten und Mikroorganismen und dementsprechend weniger Verschleppung dieser nach apikal angesehen. Des Weiteren findet hier eine verbesserte taktile Kontrolle, eine bessere Penetration von Spüllösungen und eine höhere Ausschwemmung von Zelldebris statt<sup>17</sup>. Die Schwierigkeit, einen Wurzelkanal formgerecht und möglichst frei von Geweberesten zu gestalten, steigt mit zunehmender Kanalkrümmung an<sup>11</sup>. Die Praxis zeigt, dass trotz gut erforschter und formulierter Anforderungen an eine ideale Wurzelkanalaufbereitung eine absolute Reinigung und Entfernung aller Mikroorganismen zur Zeit nicht zu erzielen ist<sup>18</sup>.

## II 2.2.2 Maschinelle Aufbereitungstechnik

Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung soll neben einer Zeitersparnis bei der Aufbereitung auch zu einer besseren und vereinfachten Ausformung des Kanalsystems führen<sup>19</sup>. Für diese rotierende Aufbereitungsmethode dürfen ausschließlich speziell konzipierte Instrumente wie Nickel-Titan Instrumente verwendet werden<sup>11</sup>.

Diese besonderen Instrumente zeigen eine extreme Flexibilität und einen pseudoelastischen Effekt auf. Nickel-Titan Instrumente besitzen einen so genannten „memory effect“, der das Metall nach starker Verbiegung durch eine geeignete Wärmezufuhr wieder in seinen Ursprungszustand übergehen lässt<sup>20</sup>. Auf Grund dieser Eigenschaften führt die Verwendung dieser Instrumente bei strikter Beachtung und Anwendung der Herstellerhinweise besonders bei stark gekrümmten Kanälen zu einer ausgezeichneten Formgebung. In Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass ungeübte Behandler durch die Verwendung der maschinellen rotierenden Aufbereitungstechnik im Vergleich zur Aufbereitung mit Hand-Instrumenten weniger Aufbereitungsfehler im Sinne von Zip- und Elbow-Effekten oder der Kanal-transportation durchführten<sup>21,22</sup>. Ebenso wie bei den Hand-Instrumenten kommen auch bei der maschinellen Aufbereitung Feilen mit verschiedenen Größen und Designs zur Anwendung. Hauptmerkmal ist, dass Nickel-Titan-Instrumente eine nicht-schneidende Arbeitsspitze besitzen und überwiegend in der koronal-apikal Methode angewandt werden<sup>11,23</sup>.

## II 2.3 Chemomechanische Reinigung der Wurzelkanäle

Zusätzlich zur mechanischen Reinigung und Formgebung der Wurzelkanäle muss zur Desinfektion eine antimikrobielle Spüllösung verwendet werden<sup>24</sup>. Durch die alleinige mechanische Aufbereitung werden die Wurzelkanäle nicht ausreichend von Keimen befreit. Zur Verfügung stehen zahlreiche Spüllösungen, wie z.B. NaOCL, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Zitronensäure, EDTA (Ethylendiamin-tetraessigsäure-dinatriumsalz) und CHX (Chlorhexidin-digluconat), die folgende Ziele verfolgen<sup>25,26</sup>:

- Reduktion der intrakanalären Mikroorganismen
- Auflösung und Entfernung des vitalen und nekrotischen Pulpagewebes
- Abtransport der bei der Aufbereitung entstehenden Dentinspäne
- Reduktion der Gefahr von Instrumentenfraktur
- Erhöhung der Schneideleistung der Wurzelkanalinstrumente
- Entfernung des Smearlayers

Die Wirkung der antimikrobiellen Spüllösungen wird von der Applikationsdauer, Applikationsmenge, Konzentration und Temperatur der Lösung beeinflusst. Auch der Durchmesser und die Länge des aufbereiteten Wurzelkanals beeinflussen die Effizienz der Spüllösungen<sup>27</sup>. Von den oben aufgeführten Spüllösungen stellt NaOCL (Natriumhypochlorit) mit seinen Eigenschaften das am häufigsten verwendete Agens dar und wird als Spüllösung der ersten Wahl empfohlen<sup>25,28</sup>. In einer Konzentration zwischen 1% und 5% löst NaOCL Pulpagewebe auf und zeigt eine hervorragende antimikrobielle Wirkung gegen im Wurzelkanal vorhandene Keime. Als einzige Spüllösung ist NaOCL in der Lage, Lipopolysaccharide als Zellwandbestandteile gramnegativer Bakterien zu neutralisieren. Auch ist eine bleichende und blutstillende Wirkung von Natriumhypochlorit nachgewiesen<sup>25</sup>.

#### *II 2.4 Kompaktionstechniken*

Das Ziel einer jeden Wurzelfüllung soll unabhängig von der gewählten Fülltechnik ein von der Pulpakammer bis zum Apex hermetisch dicht versiegelter Wurzelkanal sein. Zur Anwendung kommen hier ein solides Kernmaterial (z.B. Guttapercha) in Kombination mit einem Wurzelkanalsealer, der unter anderem zur Ausfüllung der Hohlräume zwischen Kernmaterial und Wurzelkanalwand angewandt wird<sup>29</sup>.

## II 2.4.1 Laterale Kompaktion

Die kalte laterale Kompaktion von Guttaperchastiften gilt als die Standardtechnik bei der Wurzelkanalfüllung und wird als gegenwärtig bekannteste und am meisten akzeptierte Technik angesehen<sup>30</sup>.

Bei dieser Technik werden konische Guttaperchastifte nach vorheriger konischer Aufbereitung, Reinigung, Spülung und Trocknung des Wurzelkanals zusammen mit einem Sealmaterial seitlich an die Kanalinnenwand mit einem Metall-Handinstrument (Spreader) gedrückt. Der erste eingebrachte Guttaperchastift (Masterpoint) muss bis auf die aufbereitete Arbeitslänge in den Wurzelkanal eingebracht werden können und apikal eine Klemmwirkung aufweisen. Die Größe des Guttaperchastiftes wird äquivalent zu der apikalen Aufbereitungsgröße ausgewählt. Der Wurzelkanal kann vor Einbringung des Guttaperchastiftes mit Hilfe einer K-Feile mit Sealer benetzt werden. Ebenfalls wird auch der Masterpoint vor definitiver Einbringung mit Sealer benetzt.

Der Spreader, welcher 1 mm kürzer als der Masterpoint in den Wurzelkanal eingebracht wird, verdichtet den Guttaperchastift zusammen mit dem Sealmaterial nun an der Kanalwand und schafft Raum für einen weiteren, dünn mit Sealer beschickten Guttaperchastift (Nebenstift). Der beschriebene Vorgang wird so lange durchgeführt, bis der Spreader nur noch ca. 3 mm in den Wurzelkanal eingeführt werden kann. Die Guttaperchastifte werden mit einem heißen Instrument unterhalb des Kanaleingangs abgetrennt und von vertikal verdichtet<sup>31</sup>.

## II 2.4.2 Zentralstifttechnik (single-cone-Technik)

Die Zentralstifttechnik, im Sinne einer Einstifttechnik (single-cone-Technik), sieht das Einbringen eines auf Länge und Größe des zuletzt verwendeten Aufbereitungsinstrumentes genormten Guttaperchastiftes vor. Zuvor wird der Stift mit einem Sealer bestrichen oder als Alternative das Sealmaterial mit Hilfe eines Lentulos auf die Kanalinnenwände aufgebracht.

Diese Technik eignet sich besonders für Wurzelkanäle mit einer runden Form, da eine möglichst hohe Kongruenz zwischen dem soliden Guttaperchastift und dem Wurzelkanal bestehen soll. Bei einem zu hohen Sealeranteil in der Wurzelfüllung kommt es häufig auf Grund der möglichen Schrumpfung des Sealers zu einer verringerten Randständigkeit und zu Porositäten<sup>9,32</sup>. Das Verhältnis zwischen Guttapercha und Sealer sollte im günstigsten Fall 90% zugunsten der Guttapercha betragen<sup>33</sup>. Die Anwendung dieser Technik begrenzt sich demnach auf gerade Wurzelkanäle mit rundem Querschnitt, da zum Beispiel auch Unebenheiten im Kanallumen durch die fehlende laterale Kompaktion nur unzureichend ausgeglichen werden. Einige Untersuchungen bezüglich der Dichtigkeit der Wurzelfüllung nach Anwendung der Zentralstifttechnik wiesen schlechtere Ergebnisse, verglichen mit anderen Fülltechniken, auf<sup>34</sup>. Jedoch konnten keine Unterschiede in kleinen gekrümmten Kanälen zwischen der Zentralstifttechnik und der lateralen Kompaktion festgestellt werden<sup>35</sup>. Zur Verbesserung der Passung zwischen Wurzelkanal und Guttaperchastift wurde in einer Studie die Oberfläche des Stiftes mit einem Lösungsmittel wie zum Beispiel Chloroform oder Xylol angelöst, was auch zu besserer Stiftadaption im Wurzelkanal führte<sup>36</sup>. Jedoch weisen die Lösungsmittel auf Grund ihrer zytotoxischen Eigenschaften keine Biokompatibilität und demnach keinen geeigneten Nutzen im menschlichen Organismus auf; des weiteren wird auch durch Xylol oder Chloroform die apikale Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung negativ beeinflusst<sup>37,38</sup>.

### II 2.4.3 Vertikale Kompaktion

Die Methodik der vertikalen Fülltechnik wurde erstmals 1967 von Herbert Schilder publiziert und beschreibt eine Methodik der warmen Wurzelfüllung<sup>39</sup>. Diese Technik zählt zu der Vielzahl der thermoplastischen Füllmethoden, die alle darauf basieren, dass Guttapercha bei Wärmezufuhr plastisch verformbare Eigenschaften annimmt und durch die entstandene Plastizität als dreidimensionale Wurzelfüllung mittels verschiedener Methoden in den Wurzelkanal eingebracht werden kann<sup>31</sup>. Bei der klassischen Methode nach Schilder wird ein auf Klemmpassung ausgewählter Guttaperchastift mit sogenannten „Heat Carriern“ erwärmt und zusammen mit Sealer mittels eines in der Länge angepassten Planstopfers nach apikal verdichtet.

Dieser Prozess aus Plastifizieren der Guttapercha durch Erwärmen und Kondensieren nach apikal wird so oft wiederholt, bis ca. 3-5 mm Material im apikalen Wurzelbereich eingebracht worden sind. Dieser Prozess wird als „Downpack“ bezeichnet. Durch den Stopfdruck der verwendeten Planstopfer („Plugger“) besteht die Gefahr des Überpressens von Wurzelfüllmaterial. Durch einen konisch aufbereiteten Kanal werden die beim Stopfen freiwerdenden Kräfte auch auf die Kanalwände übertragen und verringern die Gefahr des apikalen Überpressens des Wurzelfüllmaterials.

Mittels des „Backfill“ wird nun der koronale Anteil des Wurzelkanals gefüllt. Hierzu wurden in der Originaltechnik kleine erwärmte Guttaperchastücke koronal eingebracht und verdichtet. Heute werden Systeme verwendet, die eine Erwärmung der Guttapercha in einer Kartusche oder einer Pistole ermöglichen, aus der die plastische, erwärmte Masse direkt in den Kanal injiziert werden kann. Untersuchungen zur thermoplastischen vertikalen Fülltechnik haben gezeigt, dass durchaus dichte und homogene Wurzelfüllungen hergestellt werden können<sup>40,41</sup>. Durch eine Entwicklung der Firma *Sybron-Endo/Analytic* konnte eine Vereinfachung und Zeitersparnis bei der vertikalen Kompaktionstechnik erreicht werden. Durch das Gerät *Touch'n'Heat®* oder die Weiterentwicklung *System B®* kann eine Erwärmung der Guttapercha und eine sofortige Kompaktion durchgeführt werden<sup>42</sup>.

## II 2.5 Wurzelkanalfüllstifte

Wurzelkanalstifte, welche den Hauptbestandteil einer Wurzelfüllung darstellen, werden in feste und halbfeste Stifte unterteilt. Zu den festen Stiften gehören Titan-, Silber- und Kunststoffstifte. Titanstifte, welche eine sehr gute Biokompatibilität aufweisen, wurden eher experimentell eingesetzt und haben keine weite Verbreitung gefunden. Die Verwendung von Silberstiften ist auf Grund der korrosiven Eigenschaften des Metalls heute obsolet<sup>8,9</sup>. Die Anwendung von festen Wurzelkanalstiften hat zum Nachteil, dass diese nicht verdichtet werden können und somit häufig durch die Verwendung von größeren Mengen an Sealmaterialien und der mit diesem Material verbundenen Abbindeschrumpfung Randundichtigkeiten entstehen<sup>43,44</sup>.

Die Verwendung von Kunststoffstiften, welche mit Guttapercha ummantelt sind (*Thermafil*®, *Dentsply De Trey*, Konstanz Deutschland), weisen bei Anwendung ohne Sealmaterialien schlechte Ergebnisse bezüglich der Abdichtungseigenschaften von Wurzelkanälen auf<sup>45</sup>.

In Kombination mit Sealern stellt *Thermafil*® eine gute Alternative zur lateralen Kompaktion dar<sup>46</sup>. Zu den halbfesten Materialien zählt Guttapercha. Seit ungefähr hundert Jahren wird das Material in zahlreichen Formen als Wurzelfüllmaterial verwendet<sup>47</sup>. Der kautschukähnliche Werkstoff wird aus dem Saft von tropischen Bäumen der Palagium- und Isonandraarten gewonnen und zählt mit Abstand zu dem meist verbreiteten Material für die Herstellung von Wurzelkanalstiften. Das Material weist eine sehr gute Biokompatibilität auf und ist bei 60 °C plastisch verformbar und bei niedrigeren Temperaturen dimensionsstabil. Unterschieden werden drei vorkommende Phasen des Materials: die kristalline alpha- und beta-Phase und die amorphe Phase. Die alpha-Form der Guttapercha wird auf Grund der weicheren Eigenschaften für thermoplastische Füllmethoden angewandt.

Die beta-Form kommt bei der kalten Obturationstechnik zum Einsatz. Durch Erwärmung kann die beta-Form in die alpha-Form umgewandelt werden; in die amorphe Phase geht die Guttapercha bei Zufuhr von hohen Temperaturen über. Um die physikalischen Eigenschaften zu verbessern, werden in Abhängigkeit vom Hersteller verschiedene Materialien der reinen Guttapercha zugeführt<sup>48</sup>.

Die Matrix besteht zu 19-22 % aus Guttapercha. Zinkoxyd wird als Füllstoff, Metallsulfate und Bariumsulfate als Röntgenkontrastmittel und Wachse oder Kunststoffe als Weichmacher hinzugefügt<sup>49</sup>. Die alleinige Verwendung von Guttaperchastiften als Wurzelfüllmaterial ist als nicht ausreichend anzusehen; sie müssen in Kombination eines Sealermaterials zur Anwendung kommen<sup>50</sup>.

## II 2.6 Wurzelkanalfüllpasten (Sealer)

### II 2.6.1 Sealer auf Epoxidharz - Basis

Im Jahre 1954 wurde einer der ersten Vertreter der Sealer-Gruppe „Epoxidharz-Basis“ durch Schröder vorgestellt, das *AH 26®* von *Dentsply DeTrey*<sup>51</sup>.

Dieses Wurzelfüllmaterial, bestehend aus einer pulverförmigen und einer flüssigen Komponente, weist zwar ein gutes Abdichtungsvermögen und eine hohe Volumenbeständigkeit auf, wurde aber später durch eine Weiterentwicklung, das *AH Plus®* (*Dentsply DeTrey*), ersetzt. Grund hierfür waren Bestandteile an Hexamethylentetramin, welches die Freisetzung von geringen Mengen an Formaldehyd und Ammoniak nach dem Anmischen bewirkte<sup>8,9</sup>. Hexamethylentetramin wird aus Formaldehyd und Ammoniak synthetisiert und spaltet daher im sauren Milieu Formaldehyd ab. Bei einer sachgerechten Anwendung kommt es durch das Wurzelfüllmaterial kaum zu Irritationen im periapikalen Gewebe. In einer von *Ørstavik et al.* durchgeführten Studie an 810 wurzelkanalbehandelten Zähnen, welche mit Guttapercha und *AH 26®* gefüllt waren, konnte nach einem Jahr der beste periapikale Zustand, gemessen am „periapical-index (PAI)“, ermittelt werden. Der *PAI* ist ein von *Ørstavik et al.* entwickelter Index zur Klassifikation des Zustandes des periapikalen Gewebes in fünf verschiedene Graduierungen. Hierbei entspricht ein *PAI* von 1 dem Zustand des gesunden periapikalen Gewebes und ein *PAI* von 5 einer schweren Periodontitis mit einer Exacerbation<sup>52</sup>.

Weitere zytotoxische Eigenschaften von *AH 26®*, welche *in vivo* untersucht worden sind, konnten an menschlichen Karzinomazellen, Mäusefibroblasten, Rattenpulpezellen und humanen Gingivafibroblasten ermittelt werden<sup>53,54,55</sup>. Sobald Epoxidharze in einem abgebundenen Zustand vorliegen, sind sie als biologisch unbedenklich und als nahezu inert einzustufen<sup>54</sup>.

*AH Plus®* stellt den derzeitigen „Goldstandard“ der Sealer auf Epoxidharz-Basis dar und zeigt nahezu die selben physikalischen und auch materialtechnischen Eigenschaften wie *AH 26®* auf. Der Sealer ist ein Paste-Paste-System, welches auf der einen Seite aus dem Hauptbestandteil Epoxidharz Araldit und auf der anderen Seite aus dem Aminobaustein Amino-Adamantan und einem diskundären Diamin besteht.

Das toxikologisch bedenkliche Hexamethylentetramin ist in *AH Plus*® nicht mehr enthalten. Mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie können jedoch geringe Mengen an Formaldehydfreisetzung durch die Reaktion von Epoxidharz und Amin bei *AH Plus*® nachgewiesen werden. Die gemessene Formaldehydmenge liegt bei *AH Plus*® im Bereich von 3,9 ppm und bei *AH 26*® bei 1347 ppm. *AH Plus*® härtet durch eine Epoxid-Amin-Additionspolymerisation aus, wobei lineare Polymere entstehen, welche thermoplastisch und in geeigneten organischen Lösungsmitteln löslich sind<sup>56</sup>. *AH Plus*® zeigt laut der genannten Quelle eine geringe Volumenänderung auf, die ein gutes Abdichtungsvermögen im Wurzelkanal zur Folge hat; ebenso zeigt der Sealer eine überdurchschnittliche Druckfestigkeit auf<sup>57</sup>. Das Material kann für alle dreidimensionalen Fülltechniken verwendet werden<sup>6</sup>. Auf Grund einer ausreichend langen Verarbeitungszeit und einer hohen thermischen Stabilität (bis 250 °C) eignet sich *AH Plus*® für alle Obturationstechniken. Der Sealer bildet im Wurzelkanal nach Entfernung der Smear-layer Retentionszapfen in die freigelegten Dentintubuli. Die so genannte Smear-layer ist eine Schmierschicht, die die Adhäsion und den Verbund von Sealern und anderen Füllungsmaterialien an die Wurzelkanalwand verhindert<sup>58</sup>.

Durch die Anwendung einer EDTA-Spülung kann nach Empfehlung verschiedener Autoren die Schmierschicht entfernt werden<sup>59,60,45</sup>; bessere Haftwerte zwischen Sealer und Dentin können so erzielt werden<sup>61</sup>.

*AH Plus*® zeigt eine bessere Bioverträglichkeit als *AH 26*® auf; im Falle einer Überstopfung ermöglicht das Sealermaterial sogar eine vollständige Ausheilung mit einer Kontaktosteogenese im apikalen Gewebe. Als Kontaktosteogenese wird ein Prozess bezeichnet, der ein direktes Knochenwachstum auf einer Oberfläche bezeichnet. 1979 publizierte *Osborne* zu diesem Begriff im Sinne der Mechanismen der Distanz- und Kontaktosteogenese an Implantatoberflächen<sup>62</sup>.

Bezüglich der Versiegelungseigenschaften weisen *AH Plus*® und *AH 26*® vergleichbare Werte auf<sup>63</sup>. Anderen Sealern sind *AH Plus*® und *AH 26*® nach Betrachtung der Abdichtungseigenschaften überlegen<sup>64,65,66</sup>.

In einer Studie, welche sich mit der apikalen Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen in Abhängigkeit von der Obturationstechnik und des verwendeten Sealers beschäftigt, konnte Folgendes gezeigt werden: *AH Plus*® zeigt im Vergleich zu einem Sealer der neueren Generation (*EndoREZ*®) gleiche Abdichtungseigenschaften auf, unabhängig davon, ob zur Obturation das *Thermafil*®-System (II 2.5) oder die vertikale Kompaktion

(II 2.4.3) angewandt wurde<sup>67</sup>. Eine weitere Studie beschäftigte sich mit der apikalen Dichtigkeit von Sealmaterialien unterschiedlicher Materialgruppen über einen Zeitraum von 2 Jahren. Hierzu gehörten die Sealmaterialien *AH Plus*®, *Ketac-Endo*®, *Apexit*®, *Tubli-Seal*®, *EndoREZ*® und *GuttaFlow*®. In dieser Studie wurden an 240 Unterkieferinzisivi nach maschineller Aufbereitung und mit Hilfe der Zentralstifttechnik und dem zu untersuchenden Wurzelkanalsealer Farbstoffpenetrationsuntersuchungen durchgeführt. Das Ergebnis zeigte, dass bei *AH Plus*® die geringste Farbstoffpenetration gemessen wurde und demnach die besten Dichtigkeitswerte ermittelt werden konnten<sup>68</sup>.

Zusammenfassend kann nach der wissenschaftlichen Stellungnahme der DGZMK/DGZ angeführt werden, dass *AH Plus*® zur Zeit als „Goldstandard“ unter den auf dem Markt verfügbaren Sealern gilt<sup>8</sup>.

## II 2.6.2 Sealer auf Zinkoxid-Eugenol - Basis

Derartige Sealer werden als Zweikomponentenpräparate angeboten und bestehen aus einem Pulver-Flüssigkeits- oder Paste-Paste-System. Typische Vertreter dieser Sealer sind zum Beispiel *Tubli-Seal*® (*Kerr*), *ProcoSol*® (*Star Dental*) oder *Hermetic*® (*lege artis*). Nach Vermischen der zwei Komponenten bildet sich ein widerstandsarmes und poröses Zinkeugenolat, welches in Gewebeflüssigkeiten löslich ist und somit nur in Kombination mit einem geeigneten Kernmaterial angewandt werden darf<sup>12</sup>. In dieser Kombination zeigen Zinkoxyd-Eugenol-Sealer jedoch gute klinische Ergebnisse im Sinne eines dauerhaft randständig verschlossenen Kanals<sup>69</sup>.

Als nachteilig ist die Verwendung von Eugenol anzusehen. Bei massivem Überfüllen des Materials in das periradikuläre Gewebe kann es zur negativen Beeinflussung des Heilungsverlaufes kommen sowie zur Ausbildung von Nekrosen des Desmodonts oder des Knochens<sup>70,71</sup>.

*In vitro* Untersuchungen, die keinen direkten Vergleich zu *in vivo* Anwendung erlauben, hat Eugenol genotoxische<sup>72</sup> und zytotoxische Wirkungen auf humane und tierische Zellen gezeigt<sup>73,74</sup>.

Zusammenhänge zwischen der Verwendung von eugenolhaltigen Sealern und dem Aufkommen von mutagenen, karzinogenen oder anderweitig toxischen Effekten konnten *in vivo* nicht nachgewiesen werden<sup>75</sup>.

### II 2.6.3 Sealer auf Glasionomerzement - Basis

*Ketac-Endo*®, ein Capmix-Präparat (*3M/Espe*, Neuss, Deutschland), oder *Endion*® (*Voco*, Cuxhaven, Deutschland), ein mit Wasser anmischares Pulver, gehören zu den auf dem Markt erhältlichen Glasionomerzement-Sealern.

*Ketac-Endo*® stellt einen Sealer mit einer verlängerten Abbindezeit dar, welcher als Pulver, Kalzium-Aluminium-Fluorid-Silikatglas, mit Polycarbonsäure vermischt wird<sup>76</sup>. Nach Entfernung der Schmierschicht weist diese Gruppe der Sealmaterialien gute Haftwerte am Dentin auf<sup>77</sup>. *In vitro* Untersuchungen zeigen keine mutagenen oder zytotoxischen Eigenschaften. Ebenso gelten diese Sealer als gewebeverträglich, da sie im periapikalen Gewebe nicht resorbiert werden<sup>76,78</sup>. Signifikant höhere Farbstoffpenetrationen werden bei *Ketac-Endo*® im Vergleich zu *AH 26*® an wurzelkanalgefüllten Zähnen festgestellt<sup>64</sup>. Glasionomerzement-Sealer liefern bezüglich des Abdichtungsverhaltens klinisch akzeptable Ergebnisse, welche denen der Wurzelfüllpasten auf Zinkoxyd-Eugenol-Basis weitestgehend entsprechen<sup>79,80</sup>. Auch wurden in Nachuntersuchungen an mit *Ketac-Endo*® wurzelgefüllten Zähnen über einen Zeitraum von sechs bis achtzehn Monaten gute klinische Ergebnisse verzeichnet<sup>48</sup>.

### II 2.6.4 Sealer auf Polyketon - Basis

Durch eine Komplexbildung härtet eine spezielles Vinylpolymerisat zu wasserunlöslichen, zyklischen Verbindungen aus. *Diaket*® (*Espe*, Seefeld, Deutschland) stellt den einzigen Vertreter dieser Wurzelfüllpaste dar. Das Material zeigt eine gute Biokompatibilität, gute Volumenbeständigkeit und ein gutes Abdichtungsverhalten<sup>70,81</sup>. Im direkten Kontakt mit dem periapikalen Gewebe werden nur geringe Irritationen beschrieben, die nach einigen Wochen vollständig abklingen<sup>82,83</sup>. Es werden während des Abbindevorgangs keine karzinogenen oder mutagenen Effekte beobachtet. Als nachteilig wird eine kurze Abbindezeit des Materialkomplexes von nur sieben Minuten beschrieben, die bei zeitaufwendigen Wurzelfüllungen als problematisch einzustufen ist<sup>12</sup>. Auch die hohe Viskosität und eine schwierige Revidierbarkeit des Materials werden kritisiert<sup>84</sup>.

## II 2.6.5 Sealer auf Salicylat - Basis mit Kalziumhydroxid

Wurzelfüllpasten diesen Typs werden in der Praxis auf Grund ihrer guten Materialeigenschaften und antibakteriellen Wirkung bei befriedigender Biokompatibilität häufig angewandt<sup>85</sup>. *Apexit*® (*Ivoclar Vivadent*, Ellwangen) und *Sealapex*® (*Kerr*, Karlsruhe) sind zwei Vertreter dieser Materialgruppe. Während des Abbindevorgangs werden zytotoxische, aber keine mutagenen Bestandteile frei, die sich in ihrer Menge in Abhängigkeit vom Präparat unterscheiden<sup>72</sup>. Reaktionen im periapikalen Gewebe nach Implantation von Wurzelfüllpasten auf Salicylat-Basis zeigten in Tierversuchen nur geringe entzündliche Reaktionen, so dass die Biokompatibilität dieser Materialien als gut bis ausgezeichnet bewertet werden kann.

*Sealapex*® weist eine gewisse Löslichkeit in Speichel und Gewebeflüssigkeiten auf, welche Randundichtigkeiten zur Folge haben kann<sup>79,86</sup>. In einer Untersuchung wurde gezeigt, dass *Sealapex*® in feuchter Umgebung eine volumetrische Expansion von 80-200 % zeigt, woraus die Autoren eine erhöhte Resorbierbarkeit und Löslichkeit des Materials bei Wasseraufnahme folgerten<sup>87</sup>. *Apexit*® hingegen kann nicht durch Gewebeflüssigkeiten angelöst werden und zeigt dementsprechend ein langfristiges Abdichtungsverhalten im Wurzelkanal<sup>88</sup>. Bezüglich der Dichtigkeit und der Volumenbeständigkeit sind Sealer auf Salicylat-Basis mit Kalziumhydroxid, besonders *Apexit*®, als gut zu bewerten<sup>88,89,90,91</sup>. Jedoch besteht derzeit noch eine zurückhaltende Empfehlung für andere Vertreter dieser Materialklasse, da langfristige Nachweise über Löslichkeiten und direkte Gewebe- und orale Flüssigkeitsexposition noch ausstehen<sup>92,93</sup>.

## II 2.6.6 Sealer auf Polydimethylsiloxan - Basis

Hydrophobe Wurzelfüllmaterialien auf Silikon-Basis zeigen in ersten *in vitro* Studien auf Grund einer geringgradigen Expansion (0,2 %) ein sehr gutes Abdichtungsverhalten und eine gute Wandständigkeit, die mit der Wurzelfüllpaste *AH 26*® vergleichbar ist<sup>94,95</sup>. *RSA RoekoSeal*® (*Coltene Whaledent*, Langenau, Deutschland) stellt einen additions-vernetzten Wurzelkanalsealer auf Silikon-Basis dar. Das Material wird als Doppelkammerapplikator verwendet und liegt als Zwei-Komponentensystem vor. Als weiterer Vorteil neben den guten Abdichtungseigenschaften ist die Unlöslichkeit des hydrophoben Materials gegenüber Gewebsflüssigkeiten und die gute Biokompatibilität anzusehen<sup>96,97</sup>.

Eine Weiterentwicklung des *RSA RoekoSeal*® ist *GuttaFlow*® (*Coltene Whaledent*, Langenau, Deutschland), welches mit kleinen Guttaperchakügelchen (30 µm) angereichert wurde und zu den Kaltfüllsystemen zählt. Nach Herstellerangaben stellt *GuttaFlow*® das erste fließfähige, nicht erhitzte Guttaperchamaterial dar<sup>98</sup>. Die Zytotoxizität des Materials ist geringer einzustufen als die von *AH Plus*®<sup>99</sup>. Bezüglich der apikalen Dichtigkeit weist *GuttaFlow*® sehr gute Ergebnisse auf. Ebenfalls ist es wie *RoekoSeal*® unlöslich gegenüber Gewebeflüssigkeiten, was ein Abbinden im feuchten Milieu möglich macht<sup>96,99,100</sup>.

Bezüglich des Abdichtungsverhaltens bestehen zur Zeit kontroverse Untersuchungsergebnisse. Nur kleine zentrale Undichtigkeiten bei der Wurzelfüllung mit *GuttaFlow*® wurden in einer Studie von *EIAYOUTI et al. 2005* festgestellt, während wesentlich deutlichere Undichtigkeiten in einer Studie von *OZOK et al. 2008* erkannt wurden<sup>101,102</sup>.

## II 2.7 Biokompatibilität von Wurzelfüllpasten

Wurzelfüllmaterialien müssen neben optimalen physikalischen/mechanischen und chemischen Eigenschaften auch eine möglichst gute Biokompatibilität aufweisen, da sie in einigen Fällen über den Apex hinaus ins periapikale Gewebe gelangen können. Wurzelfüllpasten auf Epoxidharz-Basis wie *AH Plus*® zeigen kaum irritierende Effekte und werden im periradikulären Gewebe teilweise resorbiert und bindegewebig abgekapselt. In einer Studie von *Leyhausen* konnte gezeigt werden, dass durch *AH Plus*® eine Beeinträchtigung von Zellen stattfindet, nicht aber ein mutagener Effekt nachgewiesen werden kann<sup>103</sup>. Widersprüchlich stellt sich eine Studie von *Huang et al.* dar, welche unter anderem bei *AH Plus*® bis 24 Stunden nach dem Anmischen dosisabhängige DNA-Schädigungen nachweisen konnte<sup>104</sup>.

Da bei *AH Plus*® nahezu keine Freisetzung von Formaldehyd stattfindet, verhält sich das Material im Gewebe grundsätzlich nicht so toxisch wie das Vorgängermaterial *AH 26*®<sup>8</sup>. Wie in Abschnitt II 2.6.1 bereits erwähnt, existieren Studien zu Tests mit *AH 26*® an Rattenpulpezellen, bei denen eine geringgradige Hemmung der DNA-Synthese festgestellt werden konnte<sup>82</sup>. Bei *in vivo* Tests, im Sinne der Implantation des Materials *AH 26*®, konnten ebenfalls Hemmungen der DNA-Synthese der Testzellen, hervorgerufen durch die Freisetzung von Formaldehyd, festgestellt werden. Diese anfängliche Zytotoxizität ließ nach einigen Wochen nach. Kontaktallergien mit Sealern auf Epoxidharz-Basis sind in Einzelfällen bekannt, welche durch das Ausweichen auf ein gleichwertiges Sealermaterial zu vermeiden sind<sup>8</sup>.

Wurzelfüllpasten, welche auf Basis von Zinkoxid-Eugenol, wie zum Beispiel *Tubli-Seal*® (*Kerr*), *ProcoSol*® (*Star Dental*) oder *Hermetic*® (*lege artis*), verwendet werden, zeigen ebenfalls im periapikalen Gewebe eine Resorption und eine bindegewebige Abkapselung. Jedoch kann es durch das im Sealer enthaltene Eugenol zu neurotoxischen Effekten kommen, die bei der räumlichen Nähe zum *n. mandibularis* zu Hyp-, Par- oder Anästhesien führen können. Ebenfalls kann es bei massiver Überpressung des genannten Sealers in den *sinus maxillaris* zur Bildung einer Aspergillose kommen. *In vitro* Untersuchungen weisen auf genotoxische Effekte des im Wurzelfüllmaterial enthaltenen Eugenols hin, die aber nicht *in vivo* nachgewiesen wurden.

Auch bei Zinkoxid-Eugenol-Sealern sind in wenigen Fällen Kontaktallergien bekannt<sup>8</sup>. Wurzelfüllpasten auf Glasionomermertement-Basis wie *Ketac-Endo*® oder *Endion*® werden im periapikalen Gewebe nicht resorbiert und zeigen sich als gewebeverträglich. *Diaket*®, ein Vertreter der Wurzelkanalsealer auf Polyketon-Basis, bewirkt bei direktem Kontakt mit dem periapikalen Gewebe nur geringe Irritationen und gilt weder als mutagen noch karzinogen. Eine gute Biokompatibilität zeigen Wurzelfüllpasten auf Salicylat-Basis mit Kalziumhydroxid. Hierzu gehören beispielsweise *Apexit*® oder *Sealapex*®. Studien an Rattenpulpezellen zeigen nach mehrtägiger Liegedauer des Materials keine Störungen der zellulären DNA-Synthese, wohingegen bei Fibroblastenkulturen zytotoxische Effekte nachgewiesen werden konnten. Im Kontakt mit dem periapikalen Gewebe werden nur geringe entzündliche Reaktionen hervorgerufen<sup>8</sup>. Sealmaterialien auf Polydimethylsiloxan-Basis, wie zum Beispiel *GuttaFlow*®, zeigen eine gute Biokompatibilität. Sie härten in feuchter Umgebung aus, da sie in Gewebeflüssigkeiten absolut unlöslich sind<sup>96,97</sup>.

## II 2.8 Guttapercha und Sealer: Mengenverhältnis und Verbund

Guttaperchastifte sollen immer in Kombination mit Wurzelfüllpasten (Sealern) zur Kompaktion eines Wurzelkanals angewandt werden<sup>8</sup>. Guttapercha stellt das am weitesten verbreitete Wurzelfüllmaterial dar und dient dem Zweck, den Wurzelkanal dauerhaft zu verschließen. Allerdings ist die Guttapercha unabhängig von der Verarbeitungstechnik nicht allein in der Lage den Wurzelkanal dicht und dauerhaft zu verschließen<sup>105</sup>. Eine Wurzelfüllpaste wird zum Ausgleich der Unregelmäßigkeiten zwischen Wurzelkanalwand und Guttaperchastift benötigt. Die alleinige Verwendung eines Sealermaterials führt ebenso nicht zu einem langfristigen, dimensionsstabilen und bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanalsystems<sup>106</sup>. In einer Studie wurde die Relevanz des Sealermaterials ermittelt. Vergleichend wurde in zwei Gruppen mit dem *Endo-Twinn*®-System (*VDW*, München, Deutschland) einmal die Wurzelfüllung mit und einmal ohne Sealermaterial durchgeführt, wobei sich zwischen den beiden Gruppen signifikante Unterschiede zeigten<sup>107</sup>. Hierbei stellt das *Endo-Twinn*®-System eine Technik dar, bei der in Kombination mit einer Vibrationstechnik und dem thermischen Plastifizieren von Guttapercha, die Kompaktion durchgeführt wird. Durch die thermoplastisch veränderte Guttapercha kommt es anfangs durch die Erwärmung zu einer Volumenexpansion, woran sich bei der Abkühlung der Guttapercha eine Volumenschrumpfung anschließt<sup>108</sup>. Das Mengenverhältnis von Guttapercha und Sealermaterial spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Eine Studie von *Wu et al.* über einen Beobachtungszeitraum von einem Jahr beschäftigte sich mit der Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen in Abhängigkeit von der Filmdicke von vier verschiedenen Sealern<sup>109</sup>. Die Wurzelfüllungen, welche mit dünnen Sealer-Filmdicken durchgeführt wurden, zeigten bessere Erfolgsraten auf als die mit größeren Filmdicken. *Greene et al.* konnte ebenfalls in einer Studie nachweisen, dass bei Farbstoffpenetrationstests mit dünner Sealer-Filmdicke geringere Farbstoffpenetrationen als bei einer hohen Sealer-Filmdicke stattfanden<sup>110</sup>. Das optimale Mengenverhältnis zwischen Guttapercha und Sealermaterial wird mit 99:1 angegeben, wenn eine Anmischung der Wurzelfüllpaste individuell nach Herstellerangaben erfolgt<sup>111</sup>. Ein weiterer kritischer Bereich stellt der Verbund bzw. die chemisch- physikalische Verträglichkeit zwischen der hydrophoben Guttapercha und dem relativ hydrophilen Sealermaterial dar.

Es kann eine Bakterienpenetration entlang der Spaltflächen zwischen Dentin und Sealer bzw. zwischen Sealer- und Guttaperchaoberfläche stattfinden, da Guttapercha auf Grund der Materialunverträglichkeit keine feste mechanische Anbindung an das Wurzelndentin oder das Sealermaterial eingehen kann<sup>112</sup>. Aus diesem Grunde wird bei der Herstellung neuerer Wurzelfüllmaterialien versucht, den Verbund zwischen Kanalinnenwand und Wurzelfüllmaterial zu verbessern. Adhäsive Sealer sollen hierbei zu Verbesserung des Verbundes führen. 2003 wurde ein thermoplastisches Material, *Resilon*®, auf Polyesterbasis entwickelt. Adhäsive Sealermaterialien wie *Epiphany*® (*Jeneric/Pentron*, Kusteringen), *RealSeal*® (*SybronEndo*, Orange, USA) und *Next*® (*Heraeus Kulzer*, Hanau) sind zur Zeit auf dem Markt erhältlich. Hinter dem Prinzip dieser Materialien steht die Bildung eines sogenannten „Monoblocks“, der sich durch einen Verbund des niedrig viskosen Sealers mit der Wurzelkanalinnenwand und dem Kernmaterial bildet. Die verwendeten Wurzelfüllstifte ersetzen die Guttapercha und bestehen aus Polycaprolacton und ca. 65 Gew. % Füllstoffen. Die Materialeigenschaften im Sinne der Verarbeitung und Revision entsprechen weitestgehend denen der Guttapercha<sup>113</sup>. In einer *in vitro* Studie von *Shipper et al.*, welche die Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen mit Guttapercha und *AH 26*® im Vergleich zu *Resilon*® und *Epiphany*®-Sealer mit Hilfe der Bakterienpenetration untersuchte, zeigte das adhäsive System (*Resilon*®) eine signifikant höhere Dichtigkeit auf<sup>114</sup>. Dieses Ergebnis konnte durch eine *in vivo* Studie, ebenfalls von *Shipper et al.*, an Hundezähnen bestätigt werden<sup>115</sup>. *Teixeira et al.* konnte zeigen, dass einwurzelige Zähne, welche mit dem *Resilon*®-System behandelt wurden, eine höhere Frakturresistenz aufwiesen als Zähne, die mit Guttapercha und *AH 26*® gefüllt wurden<sup>116</sup>. In einer anderen Studie von *Williams et al.* wurde festgestellt, dass nur dann eine erhöhte Frakturresistenz besteht, wenn das Wurzelfüllmaterial mindestens ein Elastizitätsmodul wie Dentin (14 000 MPa) aufweist. Das Elastizitätsmodul des *Resilon*®-Systems und von Guttapercha ist mit ca. 80-130 MPa einzustufen. Es besteht bei diesen Materialien die Problematik des enzymatischen Abbaus durch Bakterien<sup>117</sup>. Ebenso wird diskutiert, ob die Menge an Dimethacrylat, welches die adhäsive Eigenschaft des *Resilon*®-Systems bewirkt, ausreicht, um eine dauerhafte Versiegelung des Wurzelkanalsystems zu gewährleisten<sup>118</sup>. In einer Studie von *Paqué et al.* konnte über einen Zeitraum von 16 Monaten gezeigt werden, dass die Wurzelfüllung mit Guttapercha und *AH Plus*® bessere Abdichtungseigenschaften aufwiesen als die mit dem *Resilon*®-System<sup>119</sup>.

## II 2.9 Physikalische Eigenschaften von Sealern

Die physikalischen Eigenschaften von Wurzelfüllmaterialien wie die Filmdicke, die Fließfähigkeit, die Volumenschrumpfung und die Abbindezeit spielen eine wichtige Rolle. Um einen dauerhaften bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanalsystems zu erreichen, muss der Wurzelkanalsealer unter anderem optimale physikalische Eigenschaften aufweisen. Die Abdichtungseigenschaften einer Wurzelkanalfüllung werden unter anderem durch die Filmdicke der Wurzelfüllpaste beeinträchtigt. Negativ beeinflussen kann die Filmdicke die Dichtigkeit einer Wurzelkanalfüllung dann, wenn die Filmdicke des Materials bzw. dessen Partikelgröße größer ist als der Spalt zwischen der Wurzelkanalwand und dem Guttaperchastift. So kann es zu einer ungleichmäßigen Verdrängung der Wurzelfüllpaste kommen, die sich ebenfalls negativ auf die Dichtigkeit der Wurzelfüllung auswirken kann<sup>120</sup>. Laut der *DIN Norm 6876 (2010-08-30)* darf die Filmdicke eines Sealers nicht stärker als 50 µm sein, nachdem das Material zwischen zwei definierten Glasplatten aufgebracht und mit einer Kraft von 150 N belastet wurde. Eine optimale Fließfähigkeit spielt ebenso eine wichtige Rolle; diese sollte laut der *DIN EN ISO 6876: 2010-08-30* so eingestellt sein, dass eine Menge von  $0,05 \pm 0,005$  ml Sealmaterial zwischen zwei Glasplatten und einem Gewicht von 100 g auf der Vorrichtung eine Scheibe von 17 mm ergibt. Die optimale Fließfähigkeit der Sealer ist nötig, um akzessorische Dentinkanälchen und Unebenheiten zwischen dem Kernmaterial (Guttaperchastift) und der Wurzelkanalwand aufzufüllen. Die Fließfähigkeit des Materials sollte jedoch nicht zu groß sein, um das Fließen des Materials über den Apex hinaus zu vermeiden. Eine weitere wichtige physikalische Eigenschaft stellt die Dimensionsstabilität von Wurzelfüllmaterialien dar. Das optimale Mengenverhältnis zwischen der Guttapercha und dem Sealmaterial soll 99:1 darstellen<sup>111</sup>. Das Sealmaterial soll einerseits gleichmäßig an der Wurzelkanalinnenwand verteilt sein, um kleine Dentinkanälchen aufzufüllen, andererseits soll die Menge an Sealer auf Grund seiner Schrumpfungseigenschaft möglichst gering gehalten werden<sup>121</sup>. Wird der Sealeranteil bei einer Wurzelfüllung zu groß, kann es zu Porositäten und zu einer unzureichenden Dichtigkeit, bedingt durch die Schrumpfung des Sealers, kommen. Aus diesem Grunde sollte ebenfalls die Volumenschrumpfung eines Sealmaterials möglichst gering sein, um einen langzeitigen, dauerhaften und bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanalsystems zu gewährleisten.

## *II 2.10 Medikamentenzusätze bei Wurzelfüllmaterialien*

Der Zusatz von Desinfizienzien in Wurzelfüllpasten wie Kortikosteroide oder Paraformaldehyde mit deren Nebenwirkung ist zunehmend als kritisch zu bewerten<sup>84</sup>. Aldehydfreisetzende Materialien wurden in der Zahnmedizin vielfach angewandt. In Form des Formaldehyds wurden diese Materialien als Konservierungsmittel oder im Sinne einer pharmakologischen Wirkung zur Abtötung von Mikroorganismen verwendet. Des Weiteren ist Formaldehyd als Nebenprodukt und demnach als Verunreinigung in unvollständig ausgehärteten Kunststoffen nachweisbar. Neben der Anwendung im Wurzelkanal als dauerwirkende Desinfizienz wurden aldehydfreisetzende Materialien unter anderem auch zur Behandlung an Schleimhäuten, als Devitalisierungsmittel oder als Alternative zur konventionellen Wurzelkanalaufbereitung und Abfüllung („Mumifizierung“) angewandt. Auf Grund zahlreicher unerwünschter lokaler und systemischer Nebeneffekte sind oben genannte Anwendungsbereiche derartiger Präparate heute obsolet oder immer mehr als kritisch zu bewerten. Zu den lokal auftretenden Effekten bei der Anwendung von Aldehyden in Form von Formaldehyd oder Paraformaldehyd in höheren Konzentrationen zählen Schädigungen des marginalen und periradikulären Gewebes, unter anderem in Form von Nekrosen<sup>122</sup>. Auch kann es zu Parästhesien oder irreversiblen Hemmungen der Nervenaktivität bei der Anwendung von paraformaldehydhaltigen Wurzelfüllpasten kommen<sup>123</sup>. Diese Effekte verstärken sich bei Überfüllung des Materials in das periapikale Gewebe<sup>124,125</sup>. Als systemische Nebeneffekte werden vor allem allergische Reaktionen beschrieben, wobei hier Formaldehyd in Kombination mit anderen Substanzen als Allergen wirkt. Die Wirkung wird entscheidend von der Exposition und der Dauer der Antigenfreisetzung (Formaldehyd) beeinflusst<sup>122</sup>. Eine allgemeine zytotoxische Wirkung von Wurzelfüllpasten mit Paraformaldehydzusatz, welche sich sowohl in der Aushärtungsphase als auch im abgebundenen Zustand befinden, konnte für *N2 Normal®* (*Hager & Werken*, Duisburg) nachgewiesen werden<sup>111</sup>.

Nach Empfehlung der *Europäischen Gesellschaft für Endodontologie* und der *DGZMK* sollte möglichst auf die Verwendung von Aldehydverbindungen im Rahmen der Wurzelkanalbehandlung verzichtet werden<sup>95,122,126</sup>.

Die Verwendung von Kortikosteroidzusätzen in Wurzelfüllmaterialien führt lokal zu einer Immunsuppression, indem die Antikörperbildung unterdrückt wird. Erreicht wird dieser Effekt unter anderem durch die Unterdrückung der Phagozytose und den Leukozytenaustritt sowie durch die Hemmung der Proteinbiosynthese<sup>127,128,129</sup>.

Es kann heute keine Empfehlung mehr für die Anwendung von Wurzelfüllpasten mit Kortikosteroidzusatz gegeben werden, da es auf Grund der Unterdrückung der Immunabwehr häufig zu einer Vermehrung der Mikroorganismen kommen kann und somit daraus unter Umständen eine Verschlechterung der periapikalen Entzündung resultiert<sup>84,130,131,132</sup>.

## *II 2.11 Quartäre Ammoniumverbindungen*

Quartäre Ammoniumverbindungen (Quats) werden auf Grund ihrer oberflächenaktiven Eigenschaften in zahlreichen Produkten angewandt. Sie gehören zur Stoffgruppe der kationischen Tenside. Ihre Anwendung erstreckt sich von Zusätzen in Pflanzenschutzmitteln, Medizinprodukten oder kosmetischen Produkten bis hin zur technischen Anwendung in Asphalt, Farben, Lacken oder Flussmitteln<sup>133</sup>. Die antibakterielle Wirkung von Quats als zellwandaktive Stoffe konnte bereits untersucht werden<sup>134</sup>.

Antibakteriell wirksame quartäre Ammoniumverbindungen werden im Bereich der Mund- und Zahnpflegeprodukte besonders auf Grund der Hemmung der Plaquebildung angewandt. Chlorhexidin (1.1'-Hexamethylen-bis-5-(4-chlorphenyl)-biguanid) zählt hier zu einem der bekanntesten antibakteriell wirksamen Präparaten<sup>135</sup>. Der Wirkmechanismus dieser Substanzen beruht im ersten Schritt darauf, dass die kationisch geladenen Quats durch elektrostatische Anziehung an der zumeist negativ geladenen bakteriellen Zelloberfläche adsorbieren können. Im zweiten Schritt kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen den hydrophoben Ketten der Quats und den hydrophoben Bestandteilen der bakteriellen Zellmembran.

Dadurch wird das osmotische Gleichgewicht der Zelle im Sinne einer Permeabilitätsänderung gestört. Folglich kann es zu einer Perforation der Zellmembran, dem Ausfluss des Zytoplasmas und der Abtötung des Bakteriums kommen<sup>136</sup>. Die Verwendung von Quats in Wurzelfüllpasten könnte ebenfalls dazu beitragen, die Abtötung von pathogenen Bakterien im Wurzelkanalsystem zu erreichen.

## *II 2.12 Naturstoffmonomere vs. artifizielle Monomere*

Als Ausgangsstoff für technische Massenkunststoffe kann zum Beispiel Styrol, Ethin, Vinylchlorid, Vinylacetat oder Propylen dienen. Gewonnen werden diese Stoffe überwiegend aus Erdöl. Die Monomere stellen kleine Moleküle dar, welche durch eine Bindung untereinander in der Lage sind, sich zu großen Makromolekülen zusammen zu finden. Monomere sind mindestens bifunktionell bezüglich ihrer Reaktivität, wie beispielsweise Ethylenglykol, Terephthalsäure und Hexamethyldiamin. Ungesättigte Monomere, welche mindestens eine Doppelbindung enthalten, sind ebenfalls bifunktionell. Als Beispiel für die ungesättigten Monomere sind Ethen, Vinylchlorid, Styrol, Propylen oder (Meth)acrylate zu nennen. Klassische Kunststoffe wie zum Beispiel Polyester, Polyurethan oder Formaldehydharze lassen sich aus entsprechenden erdölbasierenden, das heißt artifiziellen Monomeren, herstellen. Stoffe wie (Meth)acrylate, Epoxide und Bisphenol-A Derivate werden zum einen für die Herstellung von zahnärztlichen Produkten als auch zur Herstellung von Gegenständen des täglichen Lebens verwendet<sup>137</sup>. Naturstoffbasierende Monomere können gewonnen werden aus pflanzlichen, tierischen oder mikrobiellen Rohstoffen. Entsprechend werden diese Rohstoffe durch „grüne“, „rote“, oder „weiße“ Biotechnologie gewonnen. Die Verwendung biobasierender Rohstoffe ist für die Kunststoffindustrie ebenfalls essentiell. Wichtige Beispiele sind Cellulose, Naturkautschuk, Lignin oder Proteine. Cellulose kann als Faser direkt zur Herstellung von Textilien verwendet werden. Naturkautschuk wird mit Schwefel und Ruß vermischt und in der Hitze zu Gummi vulkanisiert. Zu Proteinen zählen beispielsweise Seide und Schafwolle. Naturstoffbasierende Monomere zur Herstellung von Wurzelkanalsealern sind bisher nicht bekannt. Dies ist ein Teil der vorliegenden Arbeit. Ein Vorteil der Verwendung von naturstoffbasierenden Monomeren, z.B. in Wurzelkanalsealern, kann bei Verwendung von körpereigenen Substanzen die meistens bekannte Toxizität sein. Es wird oft nur eine geringe Toxizität gefunden, wenn beispielsweise Monomere auf Basis von Hydroxysäuren, wie z.B. Milchsäure, verwendet werden. Solche Polylactide werden häufig in der Chirurgie als abbaubare Nahtmaterialien oder Folien verwendet. Neue artifizielle Monomere sind grundsätzlich gemäß der aktuellen Gesetzgebung auf ihre Toxizität zu untersuchen.

### III Problemstellung und Zielsetzung

Die Forschung im Gebiet der Endodontie legte in den letzten Jahrzehnten sowohl einen großen Schwerpunkt auf die technischen Aspekte der Behandlung als auch auf das Verständnis und die Therapie der pulpalen Erkrankung. Die wichtige Rolle der Bakterien in der Ätiologie der pulpalen und periapikalen Erkrankung wurde in den letzten Jahrzehnten immer weiter erforscht, woraus sich permanente Innovationen in der Reinigung und Obturation der Wurzelkanalsysteme ergaben. Therapeutische Misserfolge ergeben sich unter anderem aus der komplizierten Wurzelkanal-konfiguration und deren unvollständiger Reinigung und Obturation. Neue Techniken und Materialien zur Verbesserung der Wurzelkanalaufbereitung und Desinfektion stehen im Mittelpunkt der Forschung.

Das Ziel der vorliegenden *in vitro* Studie sollte die Untersuchung der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften eines experimentellen Epoxidharzbasis Sealers im Vergleich zu zwei konventionellen Sealmaterialien auf Epoxidharzbasis (*AH Plus*®, *Dentsply DeTrey* und *EasySeal*®, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, *Komet*) sein. Die Innovation des experimentellen Sealers, *EvoSeal A*, liegt in einer Modifizierung der Aminkomponente des Epoxidharzbasis Sealers.

Ein weiterer experimenteller Sealer, *EvoSeal B*, soll ein erstes Modell eines noch weiter zu entwickelnden Sealers darstellen. Bei *EvoSeal B* wurde die Epoxid-Komponente des Epoxidharzbasis Sealers modifiziert. Dieser Sealer wurde auf Grund des weiteren Forschungsbedarfes nur auf seine Volumenschrumpfung und Abbindezeit getestet. Ebenso wurde eine Infrarotspektroskopie des Sealers angefertigt.

Die Zielsetzung bei der Entwicklung des durch Naturstoffmonomer modifizierten Epoxidharzbasis Sealers, *EvoSeal A*, war es, eine verlängerte antibakterielle und antiseptische Wirkung zu erzielen sowie chemische und physikalische Eigenschaften, die den aktuellen Sealmaterialien auf Epoxidharzbasis nicht nachstehen.

Zur Erreichung des genannten Ziels ergab sich die folgende Aufgabenstellung:

- Bestimmungen der Filmdicken, Fließfähigkeiten, der Volumenschrumpfung, der Abbindezeiten, der Röntgensichtbarkeit
- Untersuchung des Härtevorgangs mittels Infrarotspektroskopie
- Bestimmungen der pH-Werte und Löslichkeiten
- Evaluierungen antibakterieller Effekte

## IV Material und Methode

### *IV 4.1 Physikalische Eigenschaften*

Die physikalischen Eigenschaften, Filmdicke, Fließwert, Schrumpfung, Abbindezeit, Dimensionsstabilität, Röntgensichtbarkeit und Infrarotspektroskopie, von zwei gebräuchlichen Sealmaterialien (*AH Plus®*, *Dentsply DeTrey* und *EasySeal®*, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, *Komet*) im Vergleich zu einem experimentellen Sealer (*EvoSeal A*) wurden in dieser Studie untersucht. Die Versuche zu den physikalischen Eigenschaften wurden am Institut für Organische und Makromolekulare Chemie der Universität Düsseldorf im Arbeitskreis von Prof. Dr. Dr. h.c. Helmut Ritter durchgeführt. Die Einweisung in die angewandten Geräte und Verfahren erfolgte durch den Doktoranden Herrn Julian Fischer. Die Untersuchungen zur Filmdicke, Fließfähigkeit, und Abbindezeit wurden nach den empfohlenen Versuchsmethoden für zahnmedizinische Wurzelkanalfüllmaterialien der *International Organisation of Standardisation* / Norm-Entwurf 2010-08-30 (*DIN EN ISO 6876*) durchgeführt. Die Versuche zur Schrumpfung der Sealmaterialien wurden in Anlehnung an die Vorgaben des *Deutschen Instituts für Normung e.V.* „Polymerisationsschrumpfung von Füllungswerkstoffen“ 2007-01 (*DIN EN ISO 13907*) durchgeführt.

*EvoSeal B*, ein weiterer experimenteller Sealer, wurde auf seine Polymerisationsschrumpfung hin getestet.

#### IV 4.1.1 Filmdicke (DIN EN ISO 6876)

##### **Material:**

- zwei Glasplatten (15 x 15 mm,  $11,418 \pm 2 \mu\text{m}$  Dicke)
- Gewicht von 15,3 kg (entspricht einer Kraft von 150 N)
- Mikrometerschraube
- Waage Sartorius® (Göntgen Wägetechnik GmbH)

Zuerst wurde die Dicke der beiden Glasplatten im aufeinander liegenden Zustand mit der Mikrometerschraube (Abb. IV 1) gemessen und notiert. Das zu testende Sealmaterial wurde nach Herstellerhinweisen angemischt und eine Menge von 0,5 g auf eine der beiden Glasplatten aufgebracht. Die zweite Glasplatte wurde auf die bereits mit Sealer beschickte Glasplatte nach 180 s aufgelegt und die Belastungsvorrichtung mit einem Gewicht von 15,3 kg, welches einer Kraft von 150 N entspricht, senkrecht auf die Glasplatten aufgebracht. Nach 10 min wurde die Dicke beider Glasplatten mit der Mikrometerschraube erneut ausgemessen (Abb. IV 2) und die Filmdicke durch Subtraktion des Anfangswertes von dem Endwert ermittelt. Die Filmdicke durfte nach den Normvorgaben und der beschriebenen Prüfmethode nicht mehr als  $50 \mu\text{m}$  betragen.



Abb. IV 1 Mikrometerschraube mit den Glasplatten zur Filmdickenmessung



Abb. IV 2 Messung der Filmdicke der Testsealer mit der Mikrometerschraube

#### IV 4.1.2 Fließfähigkeit (DIN EN ISO 6876)

**Material:**

- zwei Glasplatten (40 x 40 mm, 5 mm Breite, 19 g Masse)
- 100 g Eichgewicht
- Dosierspritze (Skala 0,01 ml)
- Lineal

Mit Hilfe der Dosierspritze wurde eine Menge von 0,05 ml des nach Herstellerangaben gemischten Sealers mittig auf eine der Glasplatten aufgebracht (Abb. IV 3). Hierzu wurden 1 ml des Sealers in die Dosierspritze gefüllt, um folgend genau 0,05 ml Sealer material auf die Glasplatte aufzubringen zu können. Für jeden Versuch wurde eine neue, original verpackte Dosierspritze verwendet. Nach einer Zeit von 180 s wurde die zweite Glasplatte auf die mit Sealer versehene Glasplatte aufgebracht und auf beide Platten ein Eichgewicht von 100 g aufgestellt. Nach 10 min wurde das Gewicht entfernt und die entstandene komprimierte Scheibe aus Sealer material im größten und im kleinsten Durchmesser gemessen. Bei einer Abweichung der beiden Durchmesser über 1 mm wurde der Versuch wiederholt. Es wurden drei Messungen durchgeführt um einen Mittelwert / Median zu berechnen. Insgesamt wurden für jeden Sealer fünfzehn Messungen durchgeführt.



Abb. IV 3 Materialien zur Ermittlung der Fließfähigkeit von EasySeal®

### IV 4.1.3 Schrumpfung

**Material:**

- Dichtebestimmungsset mit Analysewaage und Thermometer *Sartorius*®
- Wasser *Carl Roth* der Dichte 1, doppelt destilliert
- Klimakammer *Heraeus keivitron*®t (37 °C)
- Plastikfolien (Gefrierbeutel *Toppits*®)
- Folienschweißgerät *Melitta*®
- Dosierspritze

Zur Herstellung der Probekörper (Abb. IV 5) wurde eine Menge von 0,3 - 0,6 g Sealmaterial in kleine Tütchen gefüllt und dann luftdicht verschweißt. Von jedem zu testenden Sealmaterial wurden fünf Proben erstellt. In Abständen von 30 min, 60 min, 120 min, 180 min, 24 h und einer Woche wurde nun mit Hilfe des Dichtebestimmungssets (Abb. IV 4) und der genannten mathematischen Formel die Dichte der Probekörper bestimmt. Die mathematische Formel berücksichtigt unter anderem das Gewicht des Probekörpers in Luft und in Wasser sowie die Dichte des Wassers in Abhängigkeit von dessen Temperatur. Es wurde je ein Mittelwert sowie der Median aus den fünf Probekörpern eines Materials zu jedem Zeitpunkt berechnet. Durch die Veränderung der Dichte zu verschiedenen Messzeitpunkten konnte so die Schrumpfung der Probekörper in Abhängigkeit von der Zeit mit Hilfe eines Dreisatzes berechnet werden.

Verwendete Formel zur Berechnung der Dichte ( $\rho$ ):

$$\rho = \frac{W(a) \cdot (p(fl) - 0,0012 \text{ g/cm}^3)}{G \cdot 0,99983} + 0,0012 \text{ g/cm}^3$$

$$G = W(a) - W(fl)$$

$W(a)$  = Gewicht des Probekörpers in Luft

$W(fl)$  = Gewicht des Probekörpers in Wasser

$p(fl)$  = Dichte von Wasser in Abhängigkeit von der Wassertemperatur



Abb. IV 4 Dichtebestimmungsset Sartorius® zur Ermittlung der Dichte der Probekörper

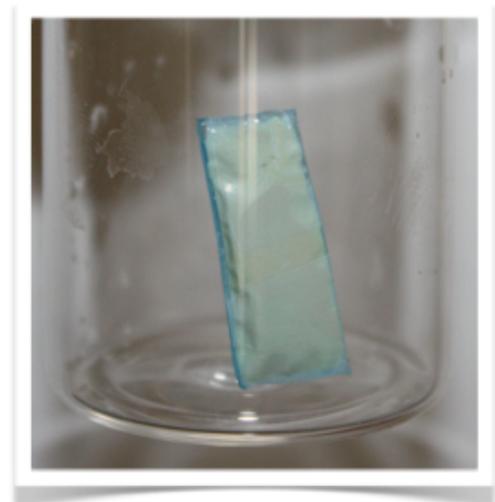


Abb. IV 5 In Tütchen verschweißtes Sealmaterial zur Ermittlung der Dichte des Probekörpers

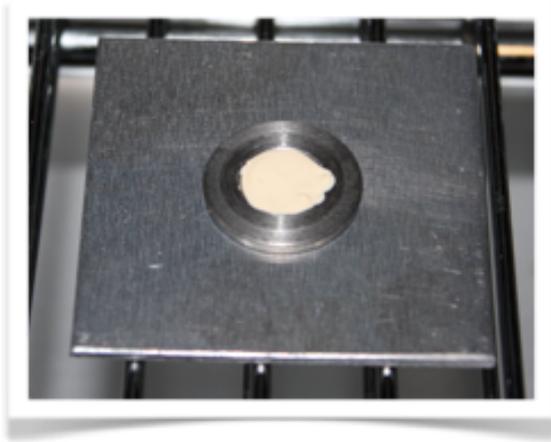
#### IV 4.1.4 Abbindezeit (DIN EN ISO 6876)

**Material:**

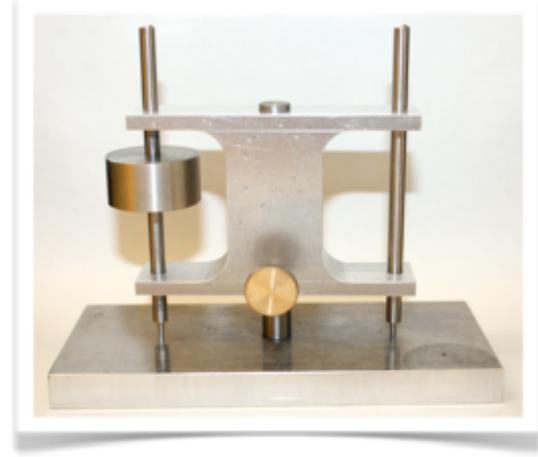
- Klimakammer Heraeus *keivitron* ®t (37 °C, 95 % Luftfeuchtigkeit)
- *Gilmore-Prüfnadel* (100 g Masse, flaches Ende Ø 2 mm, 5 mm lange zylindrisch geformte Nadelspitze)
- Ringform (10 mm Innendurchmesser, 2 mm Höhe)
- Metallblock (140 mm Länge, 60 mm Breite, 12 mm Dicke)
- Objektträger (1 mm Dicke)

Die auf einem Objektträger liegende Ringform wurden bis zum oberen Rand mit dem zu testenden Sealmaterial befüllt. 120 sek. nach Beendigung des Anmischens wurde die Konstruktion auf einen zuvor 1 h in der Klimakammer konditionierten Metallblock (Abb. IV 6) in die Klimakammer gestellt. In Abhängigkeit von der vom Hersteller angegebenen Aushärtezeit wurde kurz vor Erreichen des Zeitendes die *Gilmore-Prüfnadel* (Abb. IV 7) waagrecht auf das Sealmaterial abgelassen.

Das Absenken der Prüfnadel wurde so oft wiederholt, bis sich keine Impressionen mehr auf der Oberfläche des Materials abzeichneten und der Sealer somit nach der beschriebenen Testmethode ausgehärtet war. Die Zeit vom Ende des Anmischens des Materials bis zur Impressionsfreiheit durch die Prüfnadel wurde notiert. Es wurden für jedes Sealmaterial drei Versuchsdurchgänge durchgeführt und der Mittelwert berechnet, welcher als Abbindezeit notiert wurde.



*Abb. IV 6 Metallblock mit einer mit AH Plus® befüllten Ringform zur Abbindezeit in der Klimakammer*



*Abb. IV 7 Gilmore-Prüfnadel zur Ermittlung der Abbindezeit der Testsealer*

#### IV 4.1.5 Röntgensichtbarkeit (*DIN EN ISO 6876*)

**Material:**

- rostfreier Stahlring (Innendurchmesser 10 mm, 1 mm Höhe)
- Folie-Ringabdeckung
- dentales Röntgengerät ( $65 \pm 5$  KV)
- Röntgenfilm *AGFA DENATUS M 2*® (Empfindlichkeitsklasse E)
- Entwickler und Fixierbad *PERIO MAT*® *Plus Dürr Dental*
- Aluminiumstufenkeil (98 % Al.):
  - 50 mm Länge, 20 mm Breite
  - gleichmäßige Stufen von 0,5 mm (auf 10 µm genau messbar)
- optischer Dichtemesser *Densitometer*® *3M*

Die Ringform wurde auf eine Folie gelegt und das zu testende Sealmaterial in die Ringform gefüllt. Als Abdeckung wurde eine zweite Folie auf den befüllten Ring gelegt. Der entstandene Probekörper wurde nun auf den Röntgenfilm neben den Stufenkeil (welcher auf eine gleichwertige Folie aufgesetzt wurde) gelegt (Abb. IV 9). Diese Vorrichtung wurde nun in einem definierten Fokus-Film-Abstand von 300 mm und mit Hilfe der Röntgenröhre (70 KV) belichtet. Vorher wurde die Belichtungszeit so eingestellt, dass die optische Dichte bei „1 mm Aluminium–Stufenkeil“ einen Wert zwischen 0,5 und 2,5 aufwies. Die Belichtungszeit wurde dementsprechend auf 0,32 sek. / Dosis eingestellt. Die optische Dichte, welche mit Hilfe des optischen Dichtemessers (Abb. IV 8) gemessen wurde, betrug  $1,06 + 0,16$ . Ein Vergleich des Probekörpers und des Aluminiumkeils bei einer Stärke von 3 mm Aluminium wurden im Sinne der optischen Dichtemessung anhand der Röntgenbilder durchgeführt. Bei einer steigenden Röntgensichtbarkeit nimmt die gemessene optische Dichte stets ab. Der numerische Wert für die optische Dichte des Probekörpers musste daher kleiner als der Dichtewert der 3 mm Aluminiumstufe sein, um die Anforderung der Röntgensichtbarkeit für Sealmaterialien nach Norm zu erfüllen.



Abb. IV 8 Densitometer® zur Ermittlung der optischen Dichte der Testmaterialien

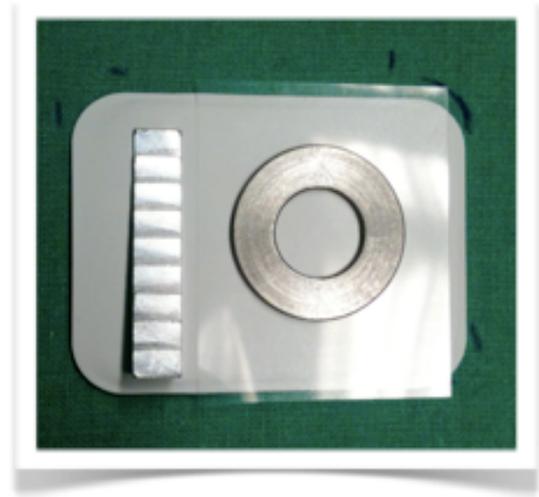


Abb. IV 9 Versuchsaufbau, bestehend aus dem Al-Stufenkeil, Metallring, Folie und Röntgenfilm zur Ermittlung der Röntgensichtbarkeit der Testsealer

#### IV 4.1.6 Infrarotspektroskopie

**Material:**

- Infrarotspektrometer *Thermo® Scientific* (IR-Spektrometer)
- Klimakammer *Heraeus keivitron ®t* (37 °C, 95 % Luftfeuchtigkeit)

Zur spektroskopischen Darstellung des Reaktionsablaufs der beiden Pasten eines Epoxidharz-Basis Sealers wurde die Infrarotspektroskopie als physikalisches Analyseverfahren angewandt. Das Prinzip der Infrarotspektroskopie beruht auf der elektromagnetischen Anregung von Schwingungszuständen innerhalb eines Moleküls. Bei Änderungen der Molekülstrukturen, wie sie bei der Aushärtung von Epoxidharzsealern stattfindet, müssen sich charakteristische Banden im IR-Spektrum entsprechend ändern. Nach der Anmischung der beiden Sealerkomponenten wird ein IR-Referenzspektrum aufgenommen, das mit dem IR-Spektrum nach einwöchiger Aushärtung in der Klimakammer verglichen wird.



Abb. IV 10 *Infrarotspektrometer zur spektroskopischen Darstellung des Reaktionsablaufs der beiden Pasten eines Epoxidharz-Basis Sealers*

## IV 4.2 Chemische Eigenschaften

### IV 4.2.1 pH-Wert Messung

#### Material:

- pH Meter (691 pH Meter  $\Omega$  Methrom®)
- Klimakammer *keivitron* ®t Heraeus (37 °C, 95 % Luftfeuchtigkeit)
- Wasser *Carl Roth* der Dichte 1, doppelt destilliert

Die Sealer wurden nach Herstellerangaben angemischt und jeweils 5 x 0,2 ml Proben eines Sealers in Schnappdeckelgläser gefüllt und mit einem Glasspatel verrührt. Es wurden zu jeder Probe 5 ml destilliertes Wasser hinzugegeben mit einem pH-Wert von 7,3. Die Proben wurden in eine Klimakammer bei 37 °C gestellt. Der pH-Wert der Proben wurde in folgenden Abständen mit Hilfe des pH-Meters (Abb. IV 11) ermittelt und notiert 1 min, 30 min, 1 h, 6 h, 24 h, 2 Wochen, 1 Monat. Ein Mittelwert / Median jeder Messreihe wurde erstellt und als pH-Mittelwert / Median notiert.

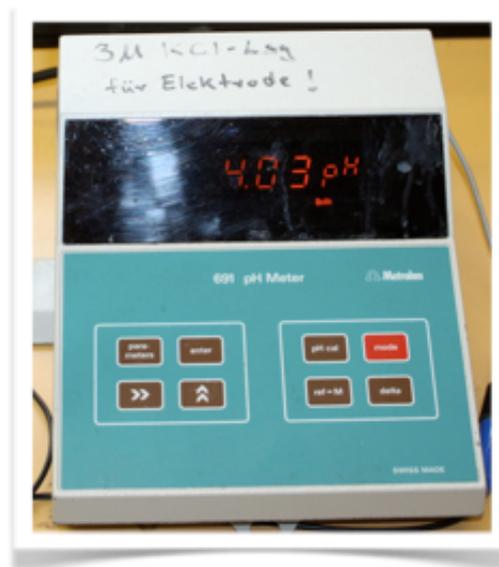


Abb. IV 11 pH Meter zur Messung der pH-Werte der Testsealer

#### IV 4.2.2 Löslichkeit (DIN EN ISO 6876)

**Material:**

- zwei geschlitzte Teflon - Ringformen (Durchmesser 20 mm / Höhe 1,5 mm)
- 4 Glasplatten
- wasserdichte Folien
- zwei Petrischalen (Durchmesser 110 mm)
- Klimakammer *keivitron* ®t *Heraeus* (37 °C, 95 % Luftfeuchtigkeit)
- Wasser *Carl Roth* der Dichte 1, doppelt destilliert
- Waage *Sartorius*® (*Göntgen* Wägetechnik GmbH)
- Exsikkator mit Trockenmittel (Phosphorpentoxid)

Der Sealer wurde nach Herstellerangaben angemischt und in die Ringform, welche sich auf einer Glasplatte befand, gefüllt. Die andere Glasplatte, welche mit einer Kunststofffolie bedeckt war, wurde vorsichtig auf die mit Sealer gefüllte Ringform gedrückt und wieder abgezogen, um eine gleichmäßige und glatte Oberfläche zu erreichen. Nun wurde der Probekörper für eine Zeit in die Klimakammer gestellt, die die angegebene Abbindezeit des Herstellers um die Hälfte überschritt. Nach der Entnahme des Probekörpers aus der Ringform wurde dieser auf 0,001 g genau bestimmt. Es wurden jeweils zwei Prüfkörper nach dem beschriebenen Verfahren hergestellt. Zwei der Probekörper wurden so in eine Schale A gegeben, dass sie untereinander berührungslos blieben. Die Prüfkörper wurden nun abgedeckt und nach Zugabe von 50 ml Wasser für 24 h in die Klimakammer gestellt. Nach dieser Zeit wurden das Wasser und die Prüfkörper in einen mit einem Filter eingelegten Trichter gegossen (Abb. IV 12), welcher sich 20 mm über dem Boden einer Schale B befand. Das Gewicht der Schale B wurde vorher auf 0,001 g genau bestimmt. Mit 50 ml Wasser wurde die Schale A dreimal ausgespült und das Wasser ebenfalls durch den Trichter in die Schale B gegossen. Die Schale B mit Inhalt wurde nun so lange in einen Wärmeschrank (110 °C) gestellt, bis das Wasser verdunstet und eine konstante Masse erreicht war.

Bevor die Schale gewogen wurde, wurde sie auf Raumtemperatur im Exsikkator abgekühlt. Mit der Massendifferenz zwischen der ursprünglichen und der endgültigen Masse der Schale B konnten die gelösten Anteile der Sealmaterialien ermittelt werden. Durch die Massendifferenz der ursprünglichen Probekörper und der in der Schale B verbliebenen Masse des Sealmaterials lässt sich eine prozentuale Löslichkeit des Probekörpers angeben.



*Abb. IV 12 Darstellung der Filtrationsapparatur zur Ermittlung der Löslichkeit der Testsealer*

### *IV 4.3 Biologische Eigenschaften*

#### IV 4.3.1 Antibakterielle Wirksamkeit (*DIN EN 22196*)

Die antibakterielle Wirksamkeit wurde in Anlehnung an die Vorgaben der *International Organisation of Standardisation* „Messung von antibakterieller Aktivität auf Kunststoff- und anderen porenfreien Oberflächen“ Norm-Entwurf 2011-08 (*DIN EN 22196*) durchgeführt. Die Versuchsreihe wurde im Wissenschaftlichen Labor der Poliklinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Endodontologie des Universitätsklinikums Düsseldorf unter der Leitung von Frau Dr. Peters in den Jahren 2012 und 2013 durchgeführt.

#### **Material:**

- Nähragarplatten für: *Streptococcus oralis*
- Brutschrank *Hera cell® Heraeus*
- Klimakammer (37 °C, 95 % Luftfeuchtigkeit)
- *Julabo®* Wasserbad (37 °C)
- TSB-Nährlösung (Tryptic Soy Broth) für Bakterien
- *Vortex®* Kreisschüttler
- Photometer *Bio-RAD SmartSpec™ Plus Spectrophotometer®*
- Pipetten (100 µl und 1000 µl)
- Alkohol und Flamme zur Desinfektion
- Petrischalen
- rostfreie Metallringe mit einem Innendurchmesser von 10,5 mm
- runde Deckgläser
- steriles und autoklaviertes Wasser
- Zählstift für Bakterienkolonien
- sterile Arbeitsbank

Es sollte die antibakterielle Wirksamkeit von drei Testsealern, *AH Plus*®, *EasySeal*® und *EvoSeal A*, zu zwei verschiedenen Zeitpunkten nach der in IV 4.3.1 beschriebenen Versuchsdurchführung ermittelt werden. Die antibakterielle Wirksamkeit der Sealer wurde 24 Stunden und 3 Wochen nach Aushärtung der Sealer untersucht. Ermittelt werden sollte, ob die Sealmaterialien auch nach ihrer vollständigen Aushärtung eine antibakterielle Wirkung auf den ausgewählten Keim *Streptococcus oralis* zeigen.

Vor Beginn der Experimente wurden die bei -20 °C gelagerten Bakterien im Wasserbad bei 37 °C für 3 min aufgetaut und folgend für 24 Stunden in der TSB-Nährlösung im Brutschrank bei 37 °C und 5 % Kohlenstoffdioxid Zufuhr angezüchtet. Die Bakteriensuspension wurde nun mit Hilfe eines Kreisschüttlers durchmischt. Mittels eines Photometers wurde die optische Dichte der Bakterienlösung bestimmt und auf eine optische Dichte von  $1 \pm 0,1$  mit Hilfe der Nährlösung verdünnt, um bei jeder Versuchsreihe gleiche Ausgangsbedingungen zu schaffen. Die zu testenden Sealmaterialien *AH Plus*®, *EasySeal*® und *EvoSeal A* wurden 24 Stunden bzw. 3 Wochen vor Versuchsbeginn in einen Metallring gegeben und zum Aushärten in eine Klimakammer mit einer konstanten Temperatur von 37 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 99 % gestellt.

Nun wurde das Sealmaterial im Metallring in eine kleine Petrischale gelegt, darauf eine Menge von 0,2 ml Bakteriensuspension pipettiert und hierüber ein rundes Deckglas gelegt, welches bei der Inkubationszeit von 24 Stunden vor einer Austrocknung der Bakterien schützen sollte. Die beschriebene Konstruktion, wie sie in der Abbildung IV 14 zu sehen ist, wurde nun in eine größere Petrischale gelegt, in der sich 17 ml steriles Wasser befanden, um ein feuchtes Milieu zu schaffen. Es folgte eine Inkubationszeit im Brutschrank von 24 Stunden bei 37 °C und Zufuhr von 5 % Kohlenstoffdioxid. Die Versuchsdurchführung fand unter einer sterilen Bank und somit stets unter sterilen Bedingungen statt, wie in Abb. IV 13 dargestellt.

Nach der Inkubation der Testmaterialien wurden diese mit 700 µl, das Deckglas mit 200 µl und die kleine Petrischale mit 900 µl Nährlösung abgespült, bevor jeweils 100 µl der Suspension auf einer Agarplatte ausgestrichen wurden.

Nach 24 Stunden Einlagerung im Brutschrank wurden die entstandenen Kolonien gezählt und die Ergebnisse in eine Tabelle zur Auswertung eingefügt. Der Versuch wurde für jedes Sealmaterial sowohl nach 24 Stunden als auch nach 3 Wochen zwanzigmal durchgeführt. Es wurde jeweils eine positiv-Kontrolle mit *Streptococcus oralis* ohne Sealmaterial und eine negativ-Kontrolle mit reiner TSB-Nährlösung (Tryptic Soy Broth) angefertigt.



Abb. IV 13 sterile Arbeitsbank zur Handhabung der Versuche zur antibakteriellen Wirksamkeit von Sealern

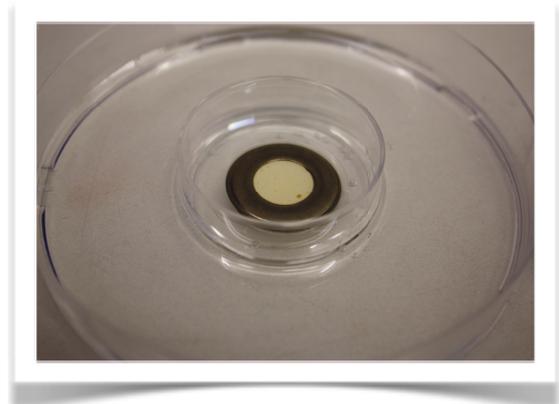


Abb. IV 14 Versuchsaufbau zur Inkubation eines Testsealers mit *Streptococcus oralis*

## IV 4.4 Auswertung

### IV 4.4.1 Boxplot - Diagramm / Balken -Diagramm

Zur Auswertung und Darstellung der gesammelten Daten wurde das Boxplot Diagramm sowie das Balkendiagramm gewählt. Hierzu sollte das Erstgenannte zur Darstellung der Tendenz, der Schiefe und der Streuung der numerischen Daten dienen. Das Balken - Diagramm dient nur der graphischen Darstellung von errechneten Mittelwerten einer Datenreihe. Der Boxplot zeigt fünf verschiedene Punkte einer Datenreihe an: den Median, das erste Quartil, das zweite Quartil und die beiden Extremwerte. Für den Betrachter ist es mit Hilfe dieser Darstellung möglich, in kurzer Zeit einen qualitativen Eindruck über gesammelte Daten einer Versuchsreihe zu gewinnen. Auf Grund der Vorgaben der *DIN ISO* Normen, welche den angewandten Versuchsreihen zugrunde liegen, wurden teilweise nur geringe Fallzahlen gefordert. Bei der Darstellung der einzelnen Versuchsergebnisse ist die Fallzahl und somit die eingeschränkte Aussagekraft von signifikanten Unterschieden zu berücksichtigen. Das 95%-Konfidenzintervall und die Standardabweichung zu den jeweiligen Messreihen ist auf Seite 144 dargestellt.

### IV 4.4.2. Der Median

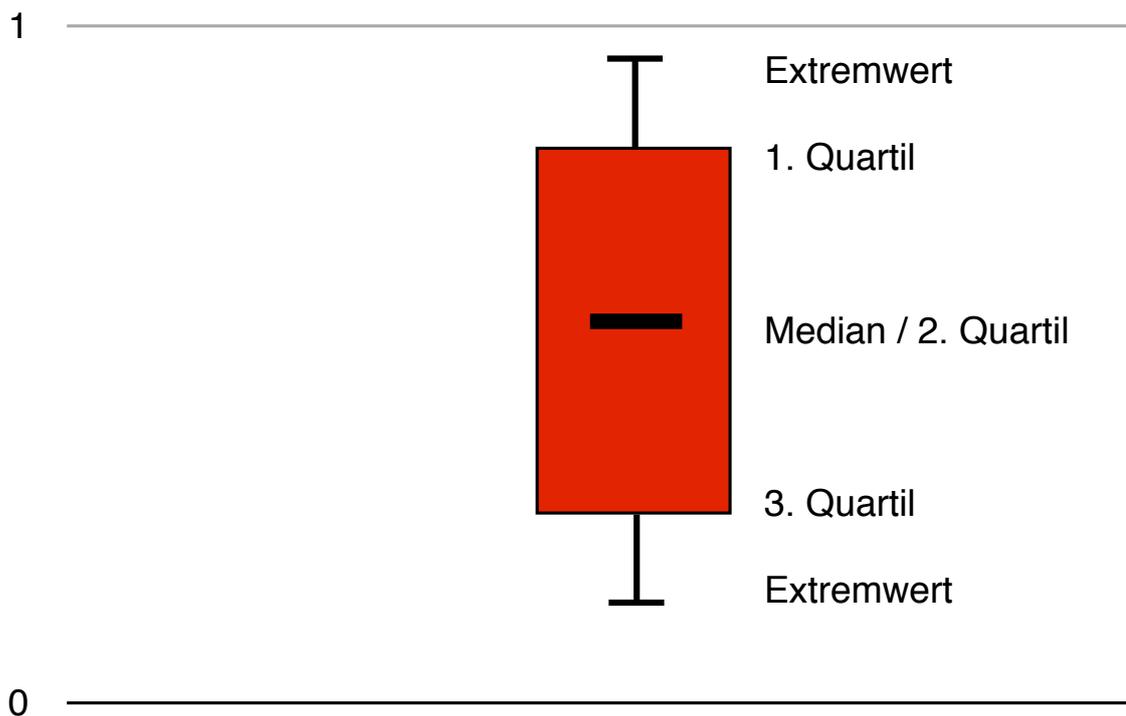
Der Begriff Median leitet sich aus dem Lateinischen ab (*medianus: in der Mitte befindlich*) und bezeichnet einen Zentralwert zwischen zwei Hälften. Hierbei ist bei einer Anzahl von Werten der Median der Wert, welcher an der mittleren Stelle steht, wenn die Werte nach der Größe sortiert werden. Ist die Anzahl der Werte gerade, werden die beiden mittleren Werte addiert und durch zwei geteilt. Der Median hat gegenüber dem arithmetischen Mittel den Vorteil, dass er gegenüber stark abweichenden Werten robuster ist.

### IV 4.4.3 Die Quartile

Quartilen (*lat.: Viertelwerte*) entsprechen den Quartilen der Ordnung  $1/4$  (0,25 Quartil) bzw.  $3/4$  (0,75 Quartil). Die 0,25 Quartile, welche auch als „untere Quartile“

bezeichnet wird, teilt die der Größe nach geordneten Werte so in zwei Teile ein, dass 25 % der Werte unterhalb dieser Quartile liegen und der Rest darüber.

Die 0,75 Quartile, welche auch als „obere Quartile“ bezeichnet wird, teilt die Werte so ein, dass 75 % der Werte unterhalb dieses Grenzwertes liegen. Der Median wird auch als 0,5 Quartile oder als „mittlere Quartile“ bezeichnet. Der Quartilabstand bezeichnet die Differenz zwischen dem oberen und dem unteren Quartil. Der Quartilabstand wird als Streuungsmaß verwendet.



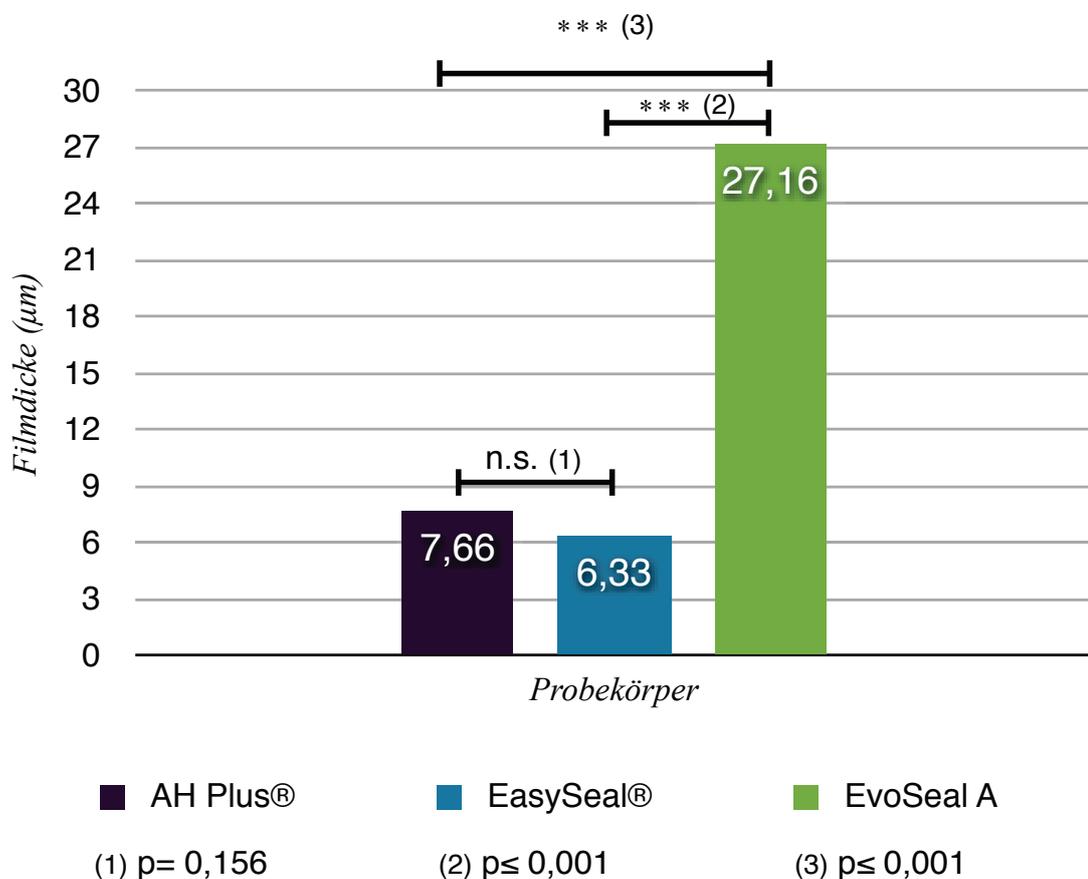
Graph. V Erläuterung des Boxplot Diagramms

## V Ergebnisse

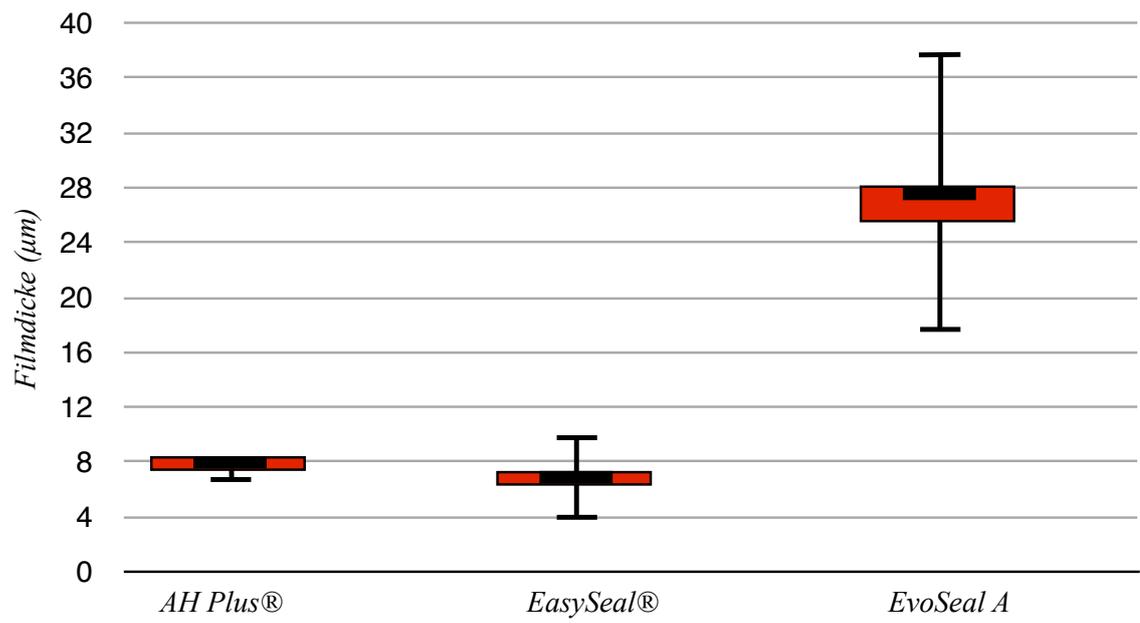
### V 5.1 Physikalische Eigenschaften

#### V 5.1.1 Filmdicke

Die Untersuchungen zur Filmdicke der Sealmaterialien, welche nach den ISO-Standards durchgeführt wurden, zeigen signifikante Unterschiede auf ( $p \leq 0,001$ ). Die in den Graphiken dargestellten Signifikanzzeichen sind wie folgt abgekürzt: n.s. bedeutet nicht signifikant, \* entspricht einem  $p$  zwischen 0,05 und 0,01, \*\* entspricht einem  $p$  unter 0,01 und \*\*\* entspricht einem  $p \leq 0,001$ . Die Mittelwerte der Filmdicken stellen sich wie folgt dar: *EasySeal*® (6,33  $\mu\text{m}$ ) < *AH Plus*® (7,66  $\mu\text{m}$ ) < *EvoSeal* (27,16  $\mu\text{m}$ ). Die Medianwerte der Filmdicken, gemessen in Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ), welche in den Tabellen V 1.1, V 1.2, und V 1.3 dargestellt sind, steigen in folgender Reihenfolge an: *EasySeal*® (6  $\mu\text{m}$ ) < *AH Plus*® (8  $\mu\text{m}$ ) < *EvoSeal A* (27  $\mu\text{m}$ ).



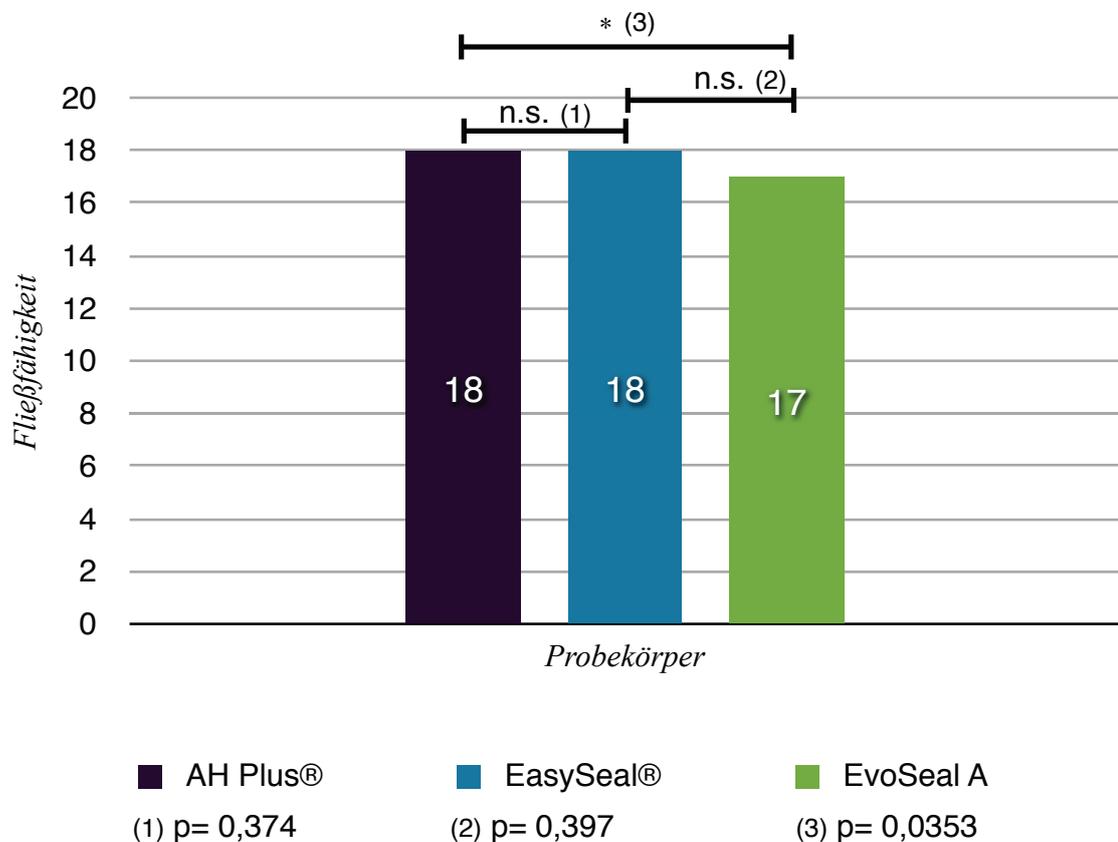
Graph. V 1 Mittelwerte und Signifikanzen der Filmdicken der Probekörper (Fallzahl: 6)



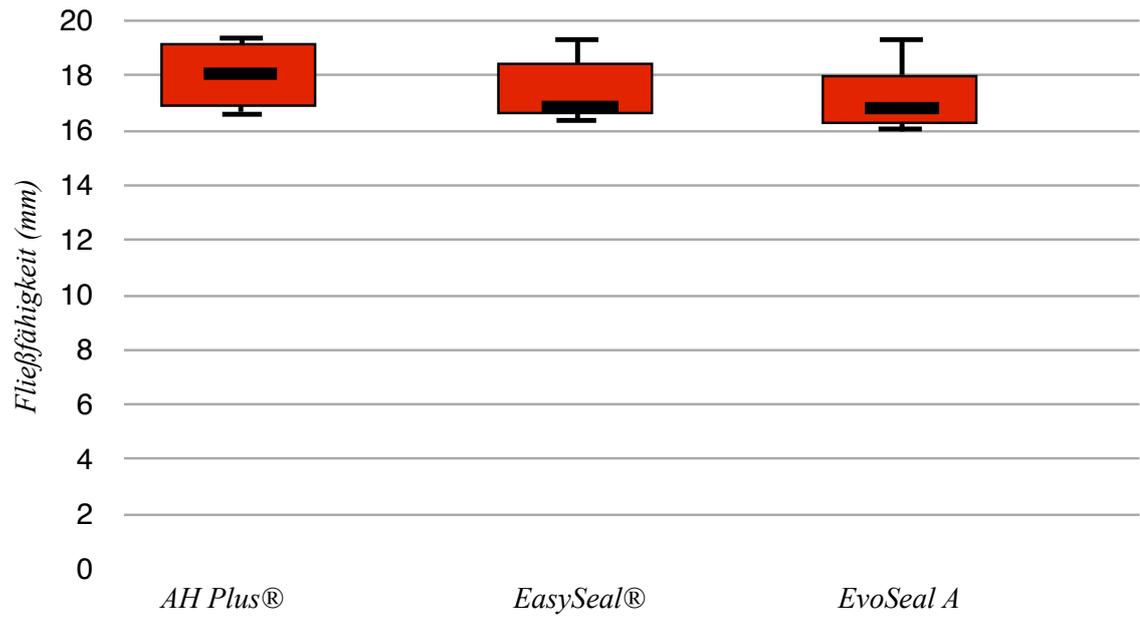
Graph. V 1.1 Boxplot Diagramm zu den Filmdicken der Probekörper (Fallzahl: 6)

## V 5.1.2 Fließfähigkeit

Die Ergebnisse zur Fließfähigkeit der Sealmaterialien sind in den Tabellen V 2.1 für *AH Plus*®, V 2.2 für *EasySeal*® und in der Tabelle V 2.3 für den experimentellen Sealer *EvoSeal A* dargestellt. Bei den Versuchen wurde stets der kleinste und der größte Durchmesser der entstandenen Sealerscheibe ermittelt und ein Mittelwert aufgezeichnet. Für jeden Sealer wurde die Messung fünfzehnmal durchgeführt, wobei jeweils drei Messungen zu einem Mittelwert berechnet wurden und somit fünf Mittelwerte für jeden Sealer dargestellt werden konnten. Bei allen Sealern zeigten sich ähnliche Eigenschaften bezüglich des Fließverhaltens. Es bestehen keine signifikanten Unterschiede, nur das Messergebnis *AH Plus*® zu *EvoSeal A* ist signifikant ( $p=0,0353$ ). Wie in der Graphik V 2 dargestellt, ergeben sich in ansteigender Reihenfolge die Fließfähigkeiten: *EvoSeal A* (17 mm) < *EasySeal*® (18 mm) < *AH Plus*® (18 mm). Ebenfalls wurden die Medianwerte zur Fließfähigkeit der Probesealer errechnet, welche in Graphik V 2.1 dargestellt sind. Hier zeigt sich folgendes Ergebnis: *EvoSeal A* (17 mm) < *EasySeal*® (17,25 mm) < *AH Plus*® (18 mm).



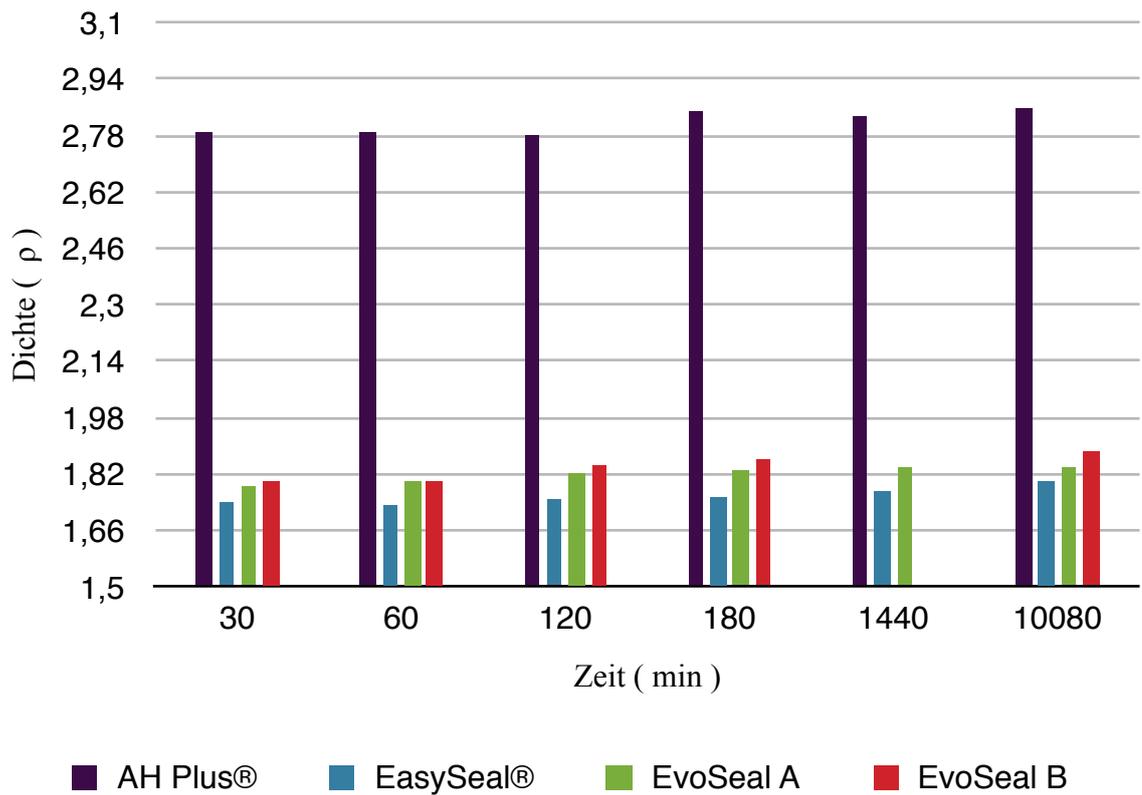
Graph. V 2 Mittelwerte/Signifikanzen der Fließfähigkeit der Probekörper (Fallzahl: 15)



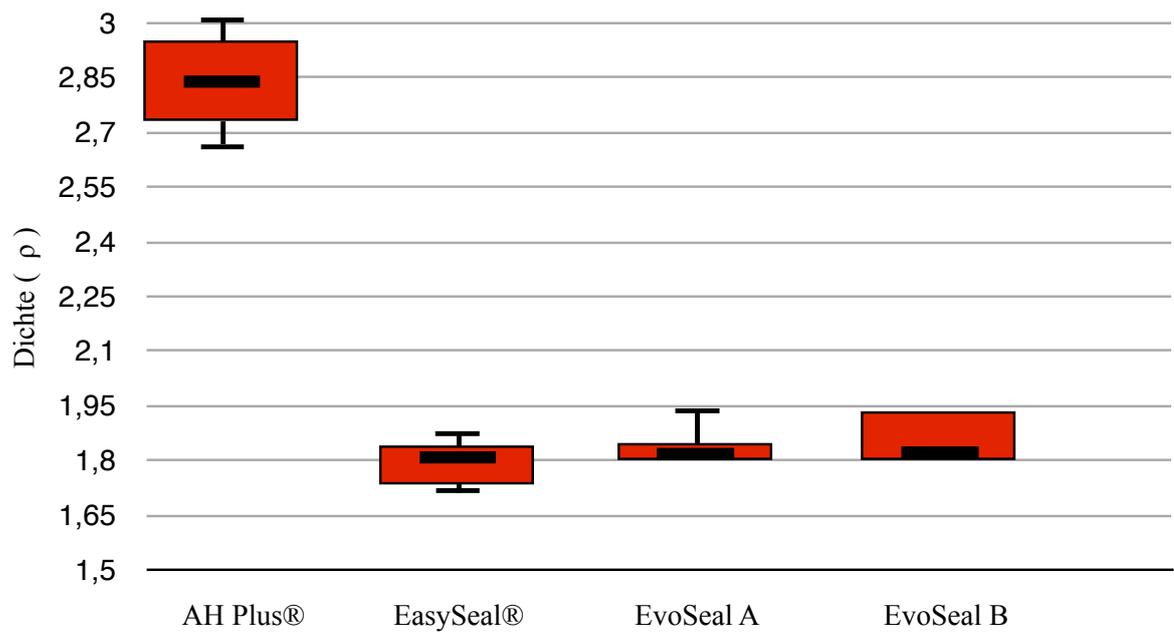
Graph. V 2.1 Boxplot Diagramm zu der Fließfähigkeit der Probekörper (Fallzahl: 15)

### V 5.1.3 Schrumpfung

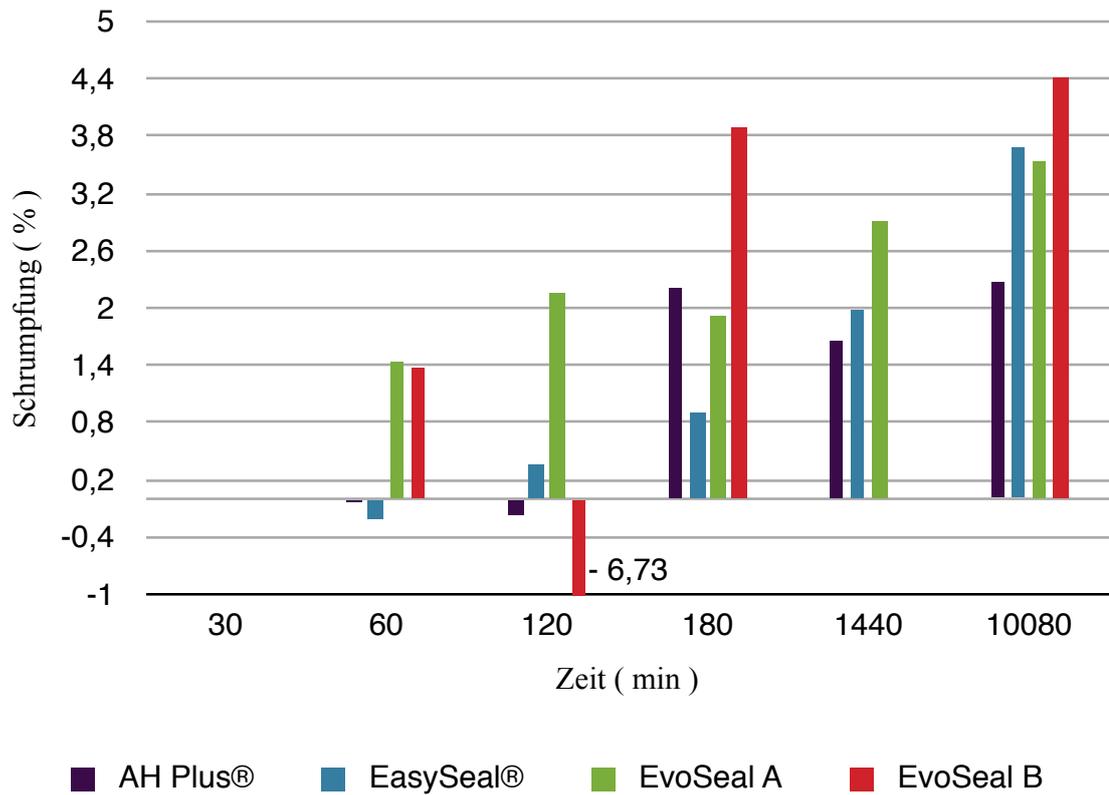
Die Untersuchung bezüglich der Volumenveränderung der vier verschiedenen Sealer (*AH Plus*®, *EasySeal*®, *EvoSeal A*, *EvoSeal B*) wurde nach der in IV 4.1.3 beschriebenen Versuchsmethodik durchgeführt. Wie in den Tabellen V 3.1.1 bis V 3.4.6 dargestellt, wurde ein Beobachtungszeitraum von einer Woche gewählt. Eine Wägung und die darauf folgende Berechnung der Dichte der Probekörper wurde in den Zeitabständen 30 min, 60 min, 120 min, 180 min, 24 Stunden und 1 Woche durchgeführt. Bei allen Sealern konnte mit fortgeschrittener Zeit ein Anstieg der Dichte (siehe Graphik V 3) der Probekörper festgestellt werden, welche auf eine Volumenschrumpfung der Proben hinweist. Die Schrumpfung wurde bei allen Ergebnissen zum Zeitpunkt „30 min“ als Nullpunkt ermittelt und die folgenden Werte Mittels Dreisatz errechnet. Ebenfalls sind in den Tabellen V 3.1.1 bis V 3.4.6 die Schrumpfungen angegeben. In den Tabellen V 3.1.7, V 3.2.7, V 3.3.7 und V 3.4.6 werden die Schrumpfwerte als Mittel- und als Medianwerte in der Übersicht dargestellt. Die Schrumpfung der Sealmaterialien (s. Graphik V 4) stellt sich nach einer Woche Aushärtezeit in ansteigender Reihenfolge nach dem Mittelwert wie folgt dar: *AH Plus*® (2,27 %) < *EvoSeal A* (3,54 %) < *EasySeal*® (3,68 %) < *EvoSeal B* (4,42 %). Die Berechnung der Medianwerte nach einer Woche Aushärtezeit ergibt für die Testsealer folgende Schrumpfwerte: *EvoSeal A* (1,84 %) < *AH Plus*® (2,20 %) < *EvoSeal B* (2,42 %) < *EasySeal*® (3,39 %). In den Graphiken V 3 bis V 4.1 sind die Ergebnisse dargestellt. Es konnten keine Signifikanzen (n.s.) bei den Messergebnissen festgestellt werden.



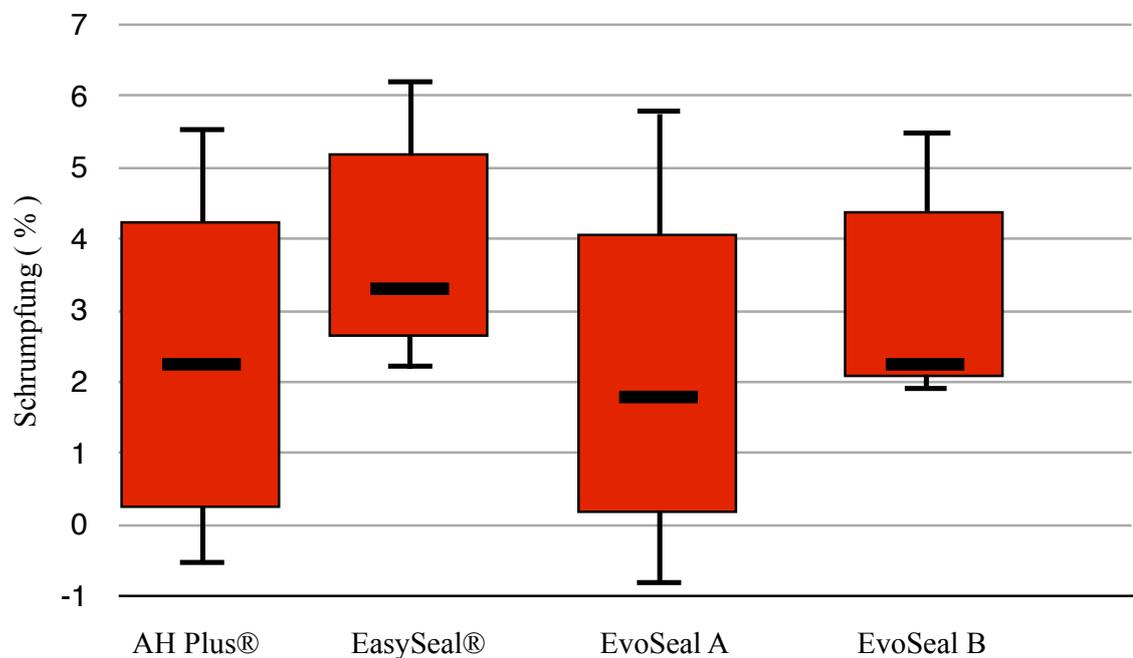
Graph. V 3 Mittelwerte der Dichte aller Proben in Abhängigkeit von der Zeit (Fallzahl: 5)



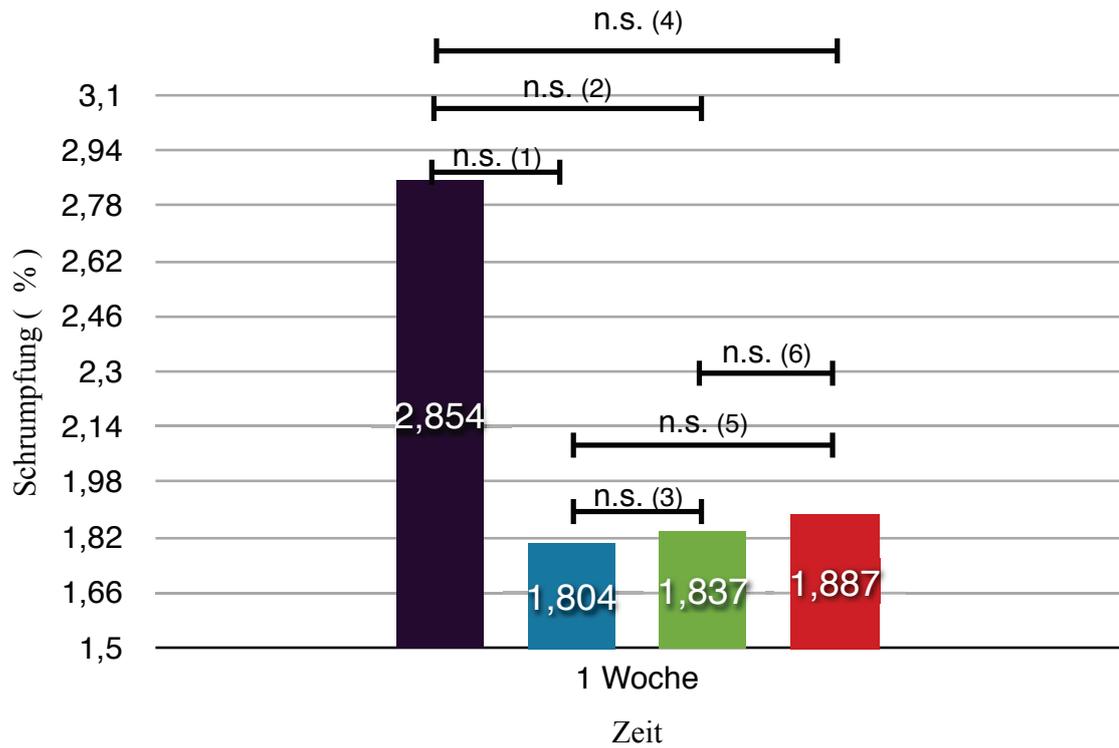
Graph. V 3.1 Boxplot Diagramm der Dichteänderung der Proben nach einer Woche im Vergleich zum Ausgangszeitpunkt nach 30 min (Fallzahl: 5)



Graph. V 4 *Schrumpfung der Probekörper (Fallzahl: 5)*



Graph. V 4.1 *Boxplot Diagramm zur Schrumpfung der Probekörper nach einer Woche (Fallzahl 5)*



■ AH Plus®    ■ EasySeal®    ■ EvoSeal A    ■ EvoSeal B

(1)  $p = 0,236$

(2)  $p = 0,897$

(3)  $p = 0,196$

(4)  $p = 0,541$

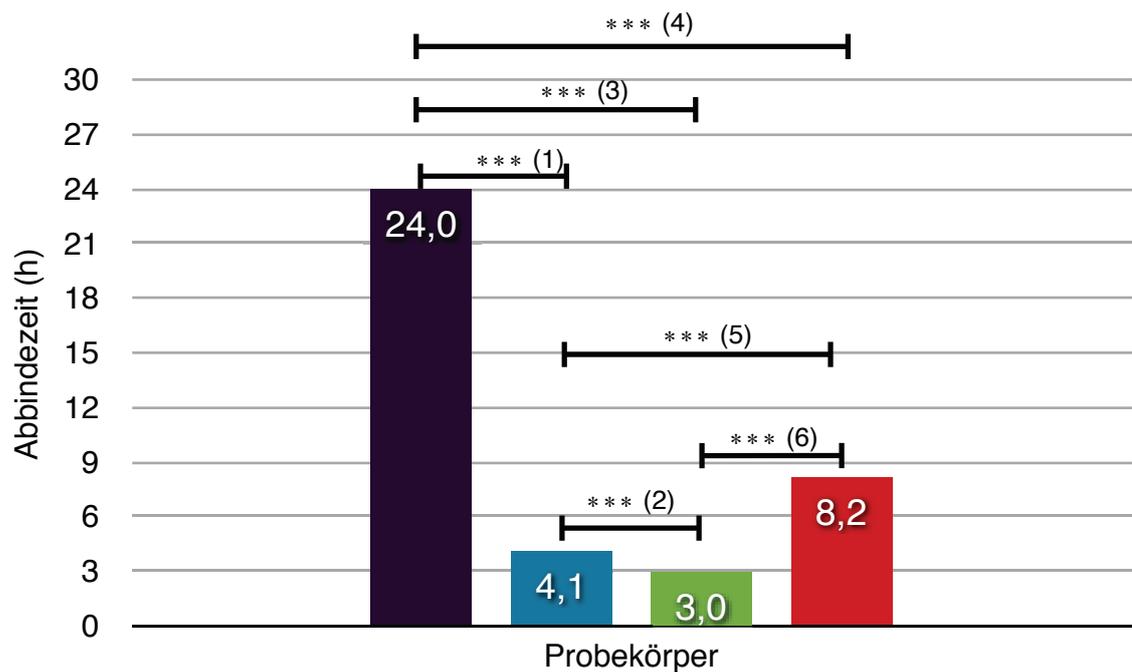
(5)  $p = 0,426$

(6)  $p = 0,455$

Graph. V 4.2 *Schrumpfung der Probekörper nach einer Woche und Darstellung der Signifikanzen (Fallzahl: 5)*

### V 5.1.4 Abbindezeit

Die Abbindezeiten der zu testenden Sealer, welche nach standardisierten Bedingungen bei 37 °C und 95 % Luftfeuchtigkeit getestet wurden, wiesen deutliche Unterschiede auf. Nach Auflegen der Gilmore-Prüfnadel (s. Abb. V 8) zeigte *EvoSeal A* bereits nach 2,95 Stunden keine Impressionen mehr. *EasySeal®* härtete nach 4,1 Stunden aus; bereits nach 3 Stunden stellte sich bei *EasySeal®* beim Auflegen der Gilmore-Prüfnadel eine Elastizität dar, die aber erst nach 4,1 Stunden keine sichtbaren Impressionen mehr zeigte. Eine vollständige Aushärtung stellte sich bei *EvoSeal B* nach 8,16 Stunden ein. *AH Plus®* benötigte die längste Aushärtezeit von 24 Stunden. Die Tabelle V 4 (s. X Anhang) stellt die Abbindezeiten der vier verschiedenen Testsealer in der Übersicht dar, während die Graphik V 5 die Ergebnisse als Balkendiagramm aufzeigt. Es konnten Signifikanzen (\*\*\*) bei den Messwerten festgestellt werden.



■ AH Plus®    ■ EasySeal®    ■ EvoSeal A    ■ EvoSeal B

(1)  $p \leq 0,001$

(2)  $p \leq 0,001$

(3)  $p \leq 0,001$

(4)  $p \leq 0,001$

(5)  $p \leq 0,001$

(6)  $p \leq 0,001$

Graph. V 5 Mittelwerte und Signifikanzen der Abbindezeit der Probekörper (Fallzahl: 3)

### V 5.1.5 Röntgensichtbarkeit

Die Auswertungen zu der Ermittlung der Röntgensichtbarkeit von *AH Plus*®, *EasySeal*® und *EvoSeal A* sind in den Tabellen V 5.1 bis V 5.3 dargestellt. Bei jeder Messung ist die mit Hilfe des Densitometers ermittelte optische Dichte für 1 mm und 3 mm Stärke Aluminium sowie für den Prüfkörper angegeben. Der numerische Wert für die optische Dichte des Prüfkörpers musste kleiner sein als die optische Dichte für 3 mm Aluminiumstärke, um den Vorgaben nach Norm-Entwurf 2010-08-30 (*DIN EN ISO 6876*) für die Röntgensichtbarkeit von Sealmaterialien gerecht zu werden.

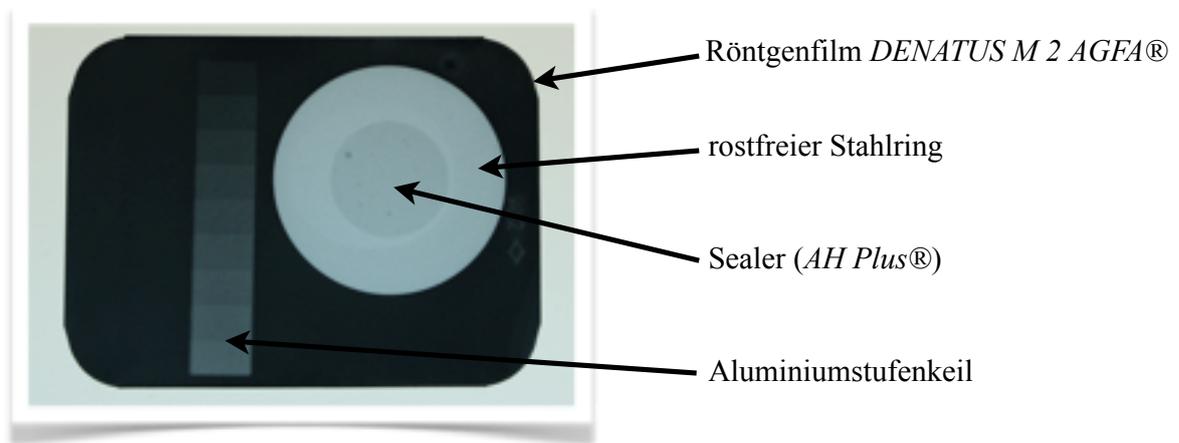
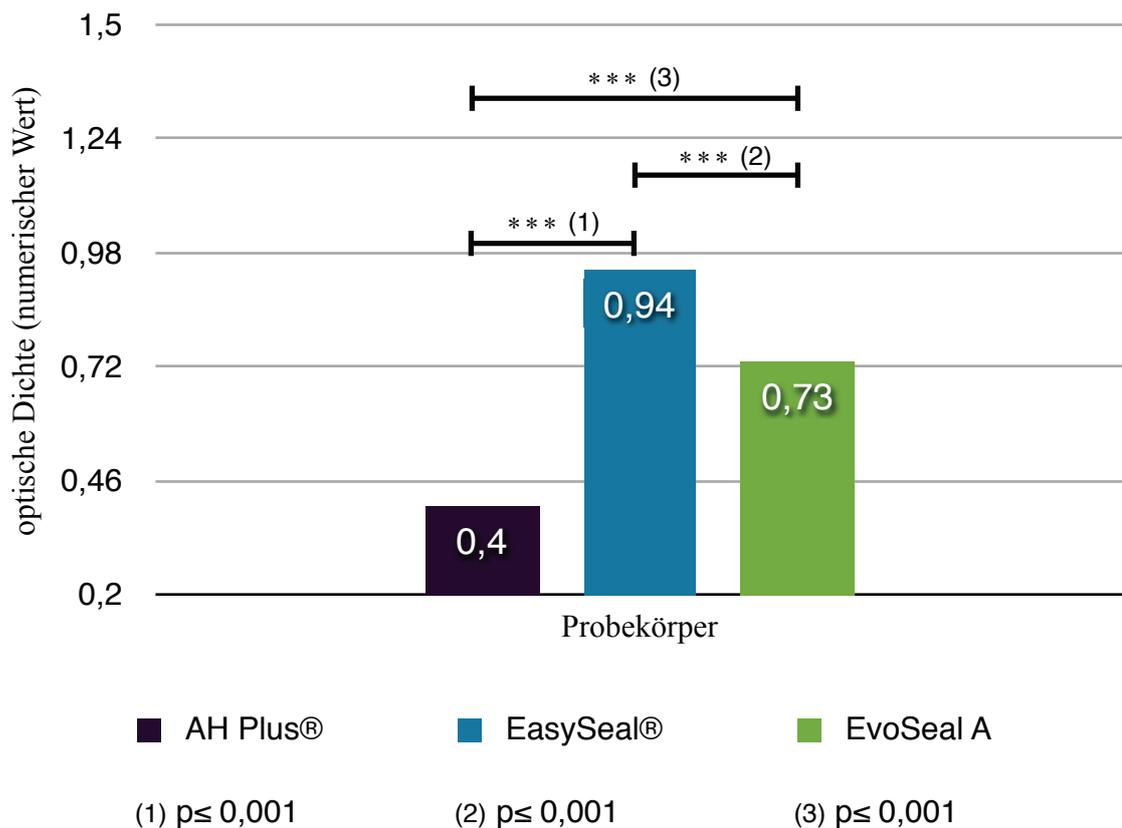


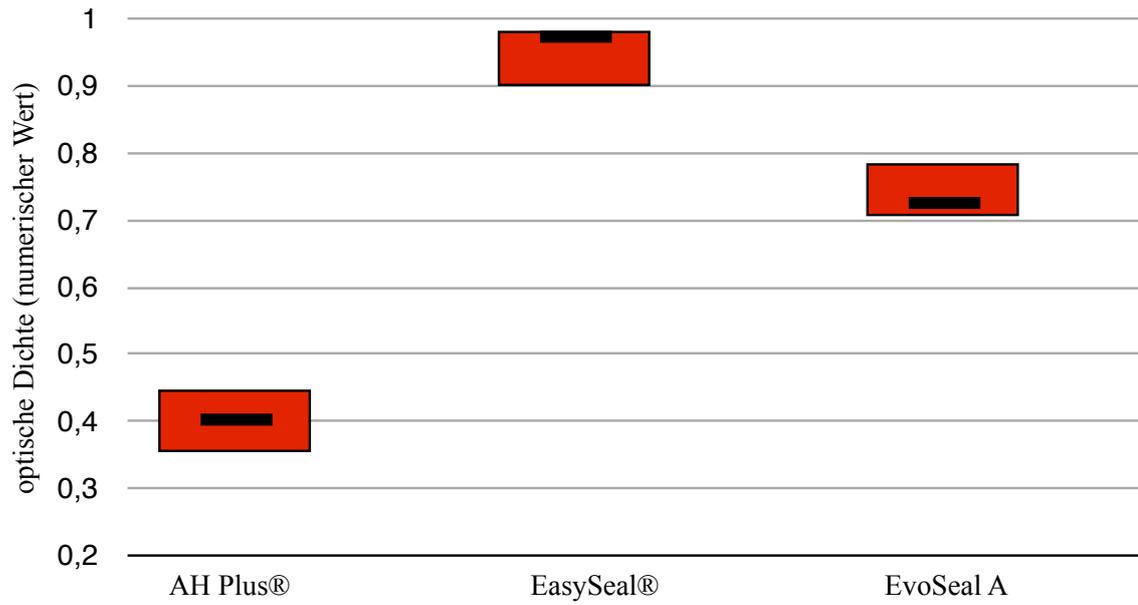
Abb. V 15 Darstellung des entwickelten Röntgenbildes (*AH Plus*® Probe 1) mit Metallring, Sealer und Aluminiumkeil

Der berechnete Mittelwert der Röntgensichtbarkeit von *AH Plus*® stellt sich mit einer optischen Dichte von 0,4 im Vergleich zu einer optischen Dichte von 0,93 bei 3 mm Aluminiumstärke als deutlich kleiner dar. *EvoSeal A* zeigt eine optische Dichte von 0,73 im Vergleich zu einer optischen Dichte von 0,86 bei 3 mm Aluminium. Der Mittelwert der optischen Dichte der Prüfkörper von *EasySeal*® liegt bei 0,94, während sich der numerische Wert für die optische Dichte bei 3 mm Aluminium im Mittelwert bei 0,89 einstellt. Somit ergibt sich folgende Röntgensichtbarkeit, wie in Graphik V 6 dargestellt, in ansteigender Reihenfolge: *EasySeal*® (0,94 optische Dichte) < *EvoSeal A* (0,73 optische Dichte) < *AH Plus*® (0,4 optische Dichte).

Nach Verwendung der Medianwerte zur Berechnung der Röntgensichtbarkeit ergibt sich das folgende Ergebnis: *EasySeal*® (0,96 optische Dichte) / (3 mm Aluminium 0,95 optische Dichte) < *EvoSeal A* (0,72 optische Dichte) / (3 mm Aluminium 0,86 optische Dichte) < *AH Plus*® (0,4 optische Dichte) / (3 mm Aluminium 0,95 optische Dichte). Wie in der Graphik V 6.1 dargestellt, konnten Signifikanzen (\*\*\*) bei allen Messwerten festgestellt werden.

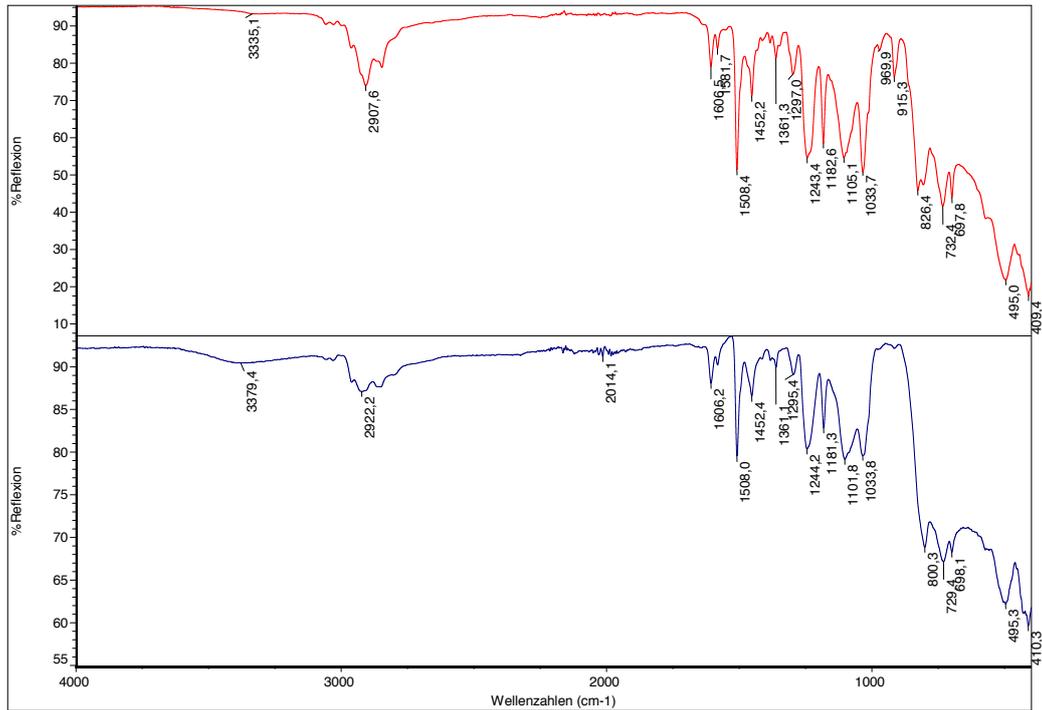


Graph. V 6 Mittelwerte und Signifikanzen der optischen Dichte der Probekörper (Fallzahl: 3)

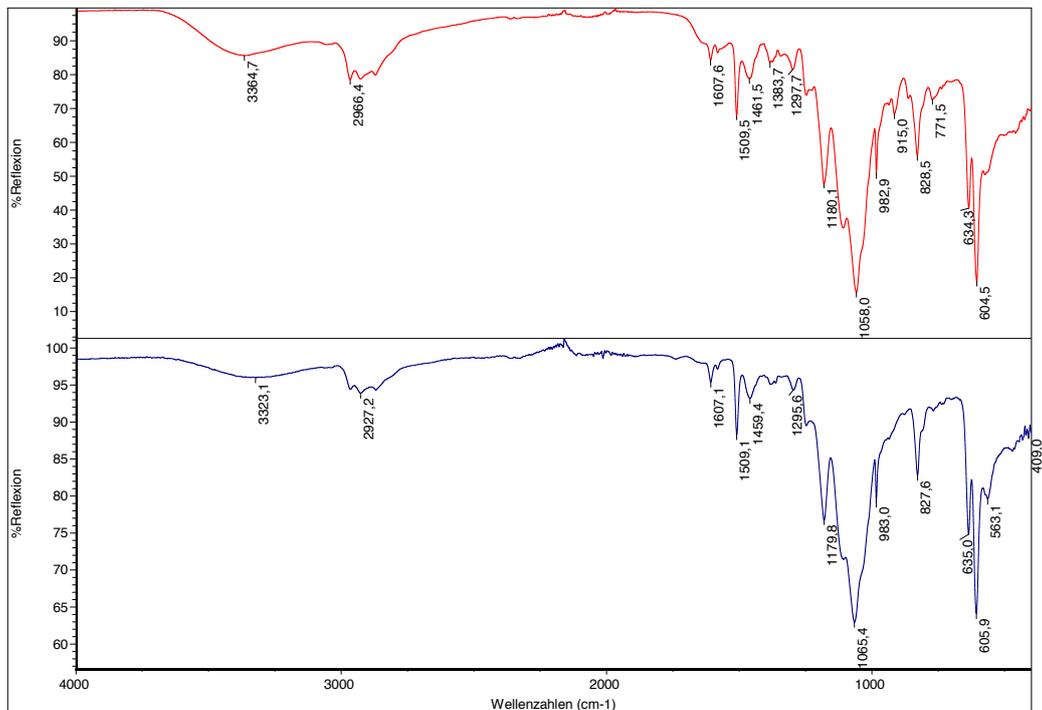


Graph. V 6.1 *Boxplot Diagramm zur Darstellung der optischen Dichte der Probekörper; die höchste Röntgenopazität ist bei AH Plus® zu verzeichnen (Fallzahl: 3)*

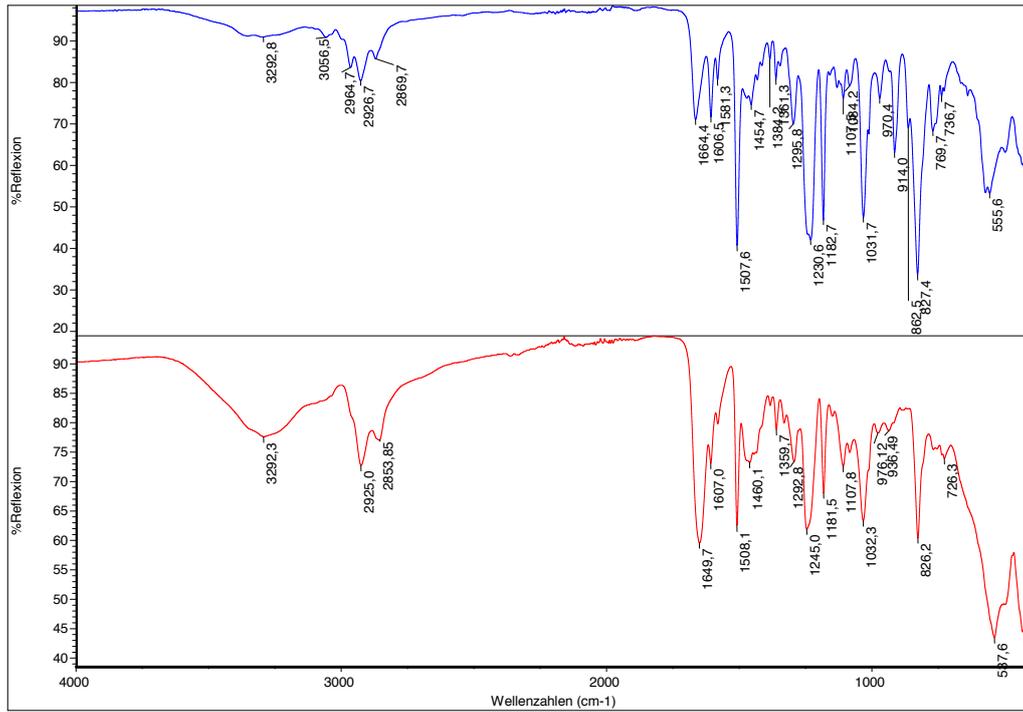
## V 5.1.6 Infrarotspektroskopie



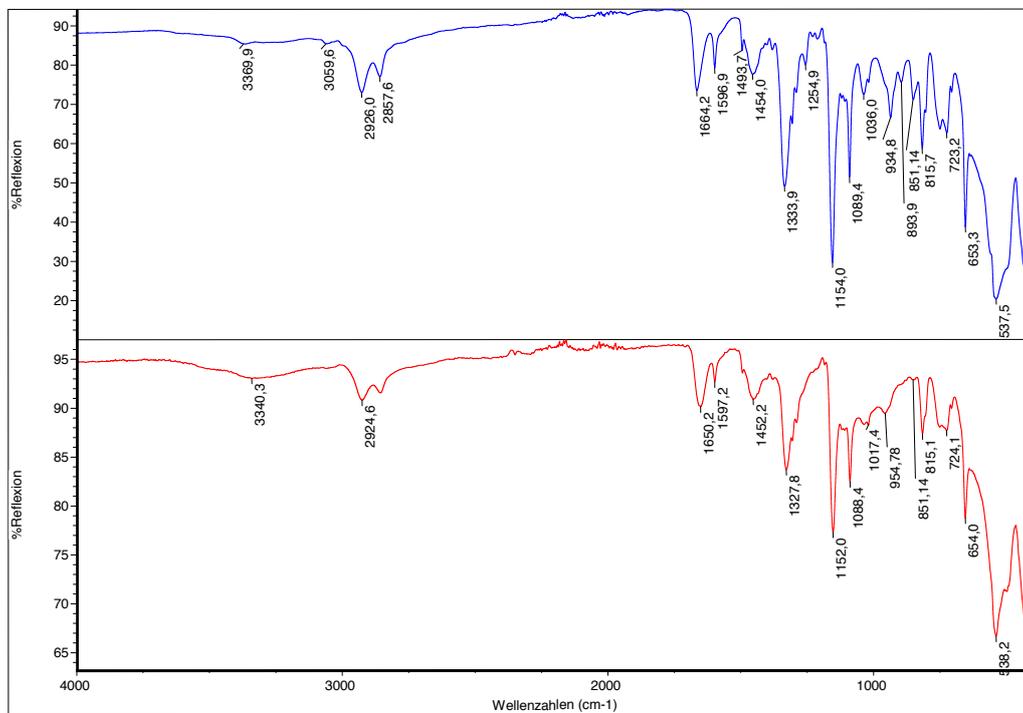
Graph. V 7 IR-Spektren von AH Plus® (Mischungsverhältnis 1:1) oben direkt nach Anmischung und unten nach einer Woche



Graph. V 8 IR-Spektren von EasySeal® (Mischungsverhältnis 1:1) oben direkt nach Anmischung und unten nach einer Woche



Graph. V 9 IR-Spektren von *EvoSeal A* (Mischungsverhältnis 1:1) oben direkt nach Anmischung und unten nach einer Woche



Graph. V 10 IR-Spektren von *EvoSeal B* (Mischungsverhältnis 1:1) oben direkt nach Anmischung und unten nach einer Woche

Der Beweis eines chemischen Reaktionsablaufs der beiden Pasten eines Epoxidharz-Basis Sealers sollte auch mit Hilfe der Infrarotspektroskopie erbracht werden. In den Graphiken V 7 - V 10 sind die Ergebnisse der chemischen Reaktion durch IR-Spektren aufgezeigt. Alle Spektren haben gemeinsam, dass sie die Aushärtung der getesteten Epoxidharz-Sealer darstellen und beweisen, dass die beiden Komponenten aller Sealer miteinander chemisch reagieren und zu einer Aushärtung führen.

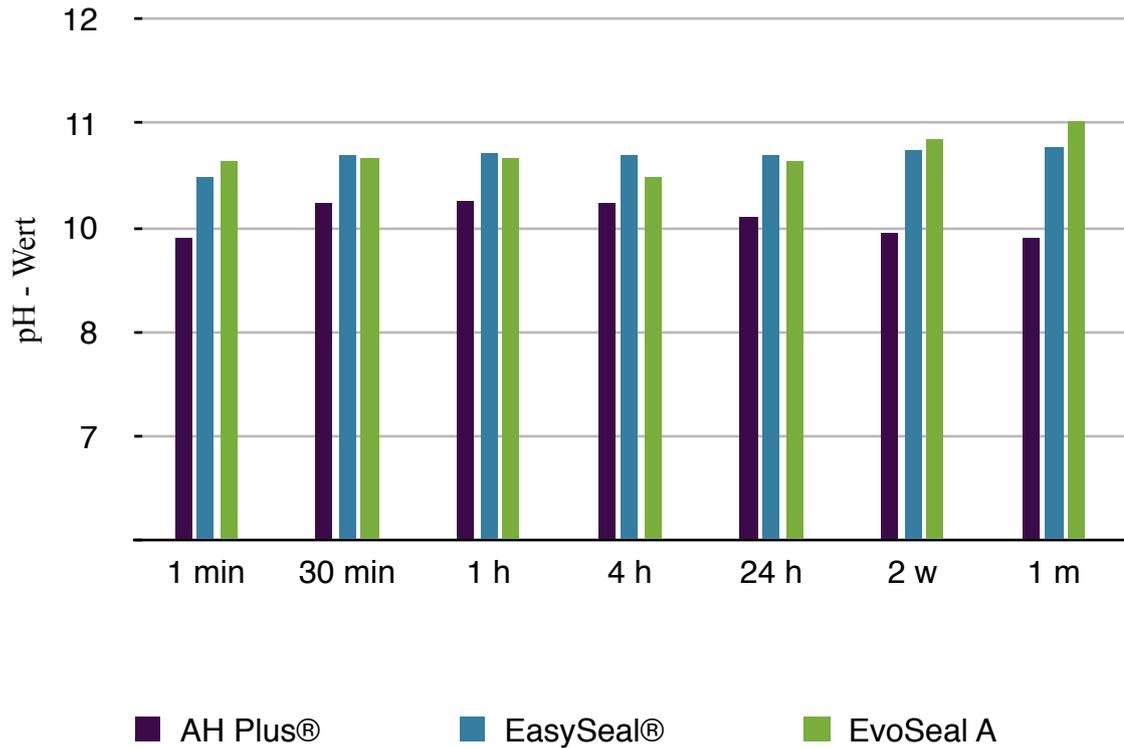
Graphik V 7 zeigt Unterschiede durch die Aushärtung im Fingerprintbereich. Beispielsweise verschwindet die Bande bei  $915,3 \text{ cm}^{-1}$  komplett. Auch bei  $826 \text{ cm}^{-1}$  bzw.  $800 \text{ cm}^{-1}$  sind Unterschiede vorhanden. Eine Verschiebung der Bande bei  $1182,6 \text{ cm}^{-1}$  auf  $1181,3 \text{ cm}^{-1}$  ist sichtbar. Die übrigen Banden sind weitgehend identisch. In Graphik V 8 zeigt *EasySeal*® eine Aromaten-Bande bei  $1607 \text{ cm}^{-1}$  und eine Ether-Bande bei  $1058 \text{ cm}^{-1}$ , die sich durch die Aushärtung zu einer intensiven Bande auf  $1065 \text{ cm}^{-1}$  verschiebt. Eine intensive Bande bei  $1604 \text{ cm}^{-1}$  wird durch die Aushärtung auf  $1605,9 \text{ cm}^{-1}$  verschoben. Der experimentelle Sealer *EvoSeal A* zeigt in der Graphik V 9 vor der Aushärtung eine C=O Amid-Bande bei  $1664,4 \text{ cm}^{-1}$ , die sich durch die Aushärtung intensiviert und auf  $1649,7 \text{ cm}^{-1}$  verschiebt. Eine Aromatenbande bei  $1606,5 \text{ cm}^{-1}$  bleibt nahezu erhalten und verschiebt sich nur auf  $1607,0 \text{ cm}^{-1}$ . Durch die Aushärtung taucht eine neue intensive Bande bei  $537,6 \text{ cm}^{-1}$  auf, die im Ausgangsmaterial nicht vorhanden ist. *EvoSeal B* zeigt in Graphik V 10 eine Amid-Bande bei  $1664,2 \text{ cm}^{-1}$ , die sich durch die Aushärtung auf  $1650,2 \text{ cm}^{-1}$  verschiebt. Die Aromaten-Bande bei  $1596,9 \text{ cm}^{-1}$  verschiebt sich nur geringfügig auf  $1597,2 \text{ cm}^{-1}$ . Die intensive Bande bei  $1154,0$  verschiebt sich auf  $1152,0 \text{ cm}^{-1}$ .

## V 5.2 Chemische Eigenschaften

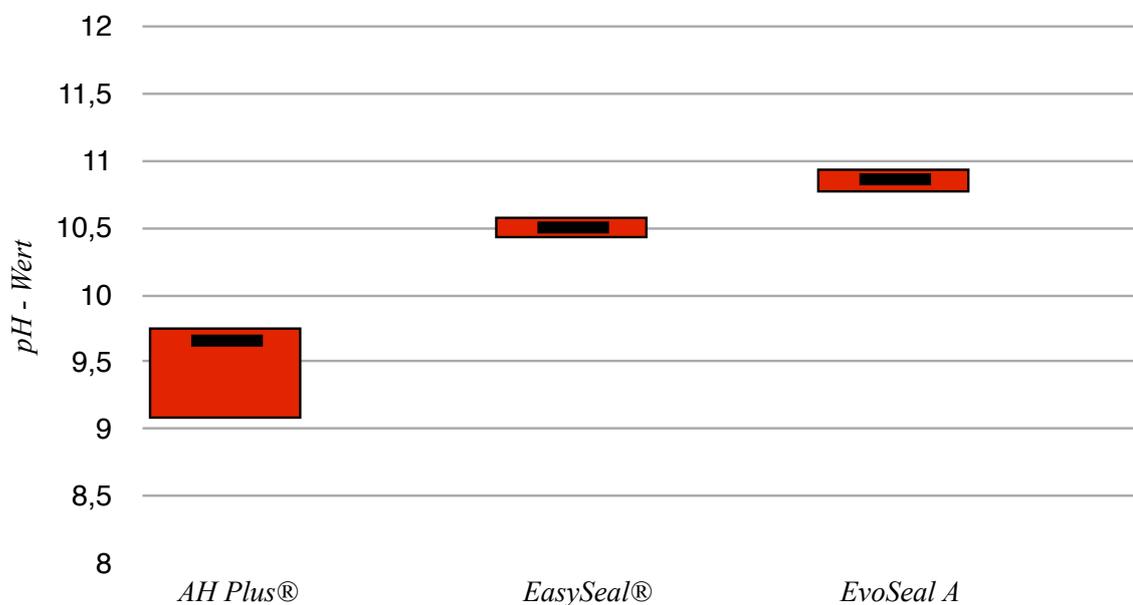
### V 5.2.1 pH-Wert Messung

Drei Sealer wurden bezüglich ihrer pH-Werte zu sieben verschiedenen Zeitpunkten vom Beginn des Anmischens an untersucht.

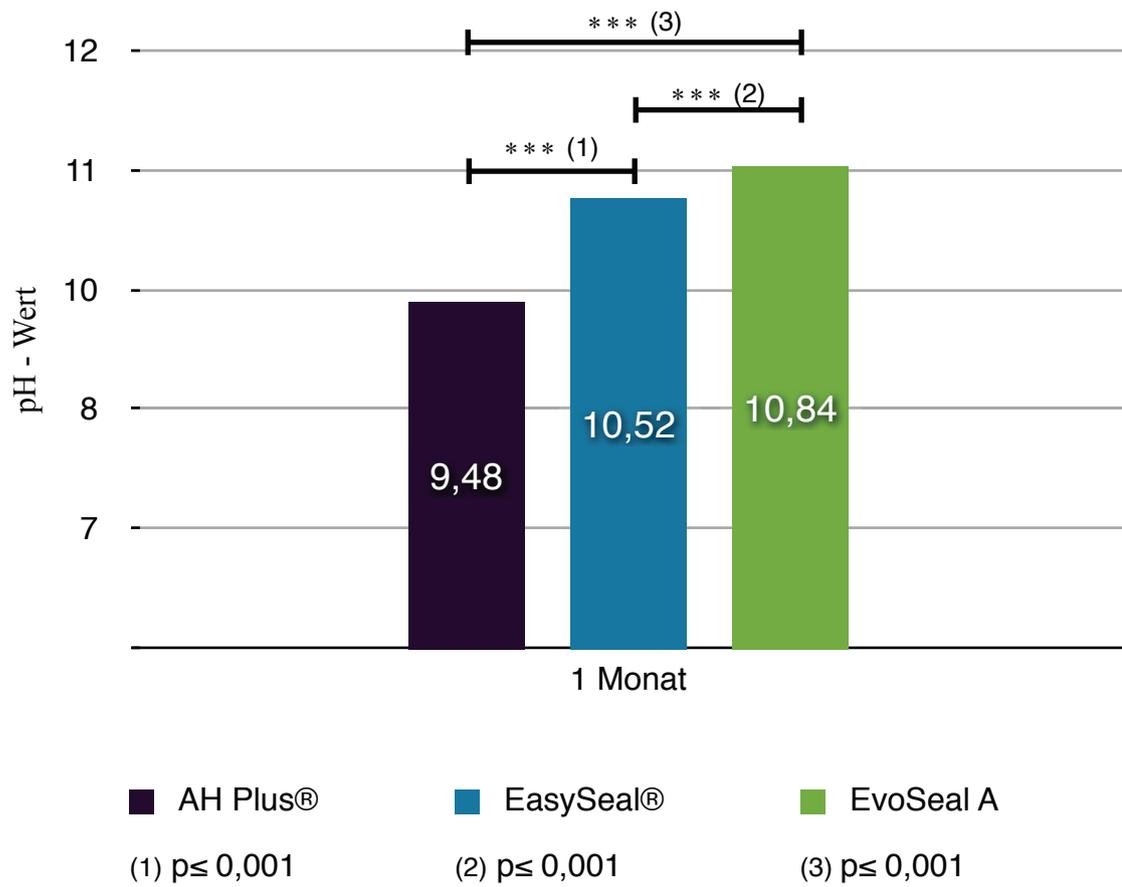
Es wurden jeweils fünf verschiedene Proben (n 5) für jeden Sealer erstellt und sowohl der Mittelwert als auch der Median hieraus errechnet, wie aus der Tabelle V 6 ersichtlich wird. Bei allen getesteten Sealern konnte direkt nach dem Anmischen ein alkalischer pH-Wert gemessen werden, welcher über den ermittelten Zeitraum von einem Monat konstant blieb (s. Graphik V 11). Der geringste pH-Wert konnte über die gesamte Messdauer bei *AH Plus*® ermittelt werden. Dieser lag nach einem Monat, errechnet nach dem Mittelwert, bei 9,48 und, errechnet nach dem Median, bei 9,61. Die gemessenen pH-Werte von *EasySeal*® und *EvoSeal A* erwiesen sich im Vergleich zu *AH Plus*® etwas höher und lagen bei *EasySeal*® bei 10,52 (Mittelwert) / 10,50 (Median) und bei *EvoSeal A* bei 10,83 (Mittelwert) / 10,84 (Median). In der Graphik V 11 werden die Mittelwerte der pH-Werte der getesteten Sealer zu allen Messzeitpunkten dargestellt. Die Graphik V 11.1 stellt im Sinne eines Boxplot Diagramms die Mediane der ermittelten pH-Werte nach einem Monat dar. In der Graphik V 11.2 sind neben den Mittelwerten der pH-Werte der Probekörper nach einem Monat auch die Signifikanzen dargestellt. Es konnten bei allen Messergebnissen Signifikanzen (\*\*\*) festgestellt werden.



Graph. V 11 Mittelwerte der pH-Werte der Probekörper zu verschiedenen Zeitpunkten (Fallzahl: 5)



Graph. V 11.1 Boxplot Diagram zu den ermittelten pH-Werten der Probekörper nach einem Monat (Fallzahl: 5)

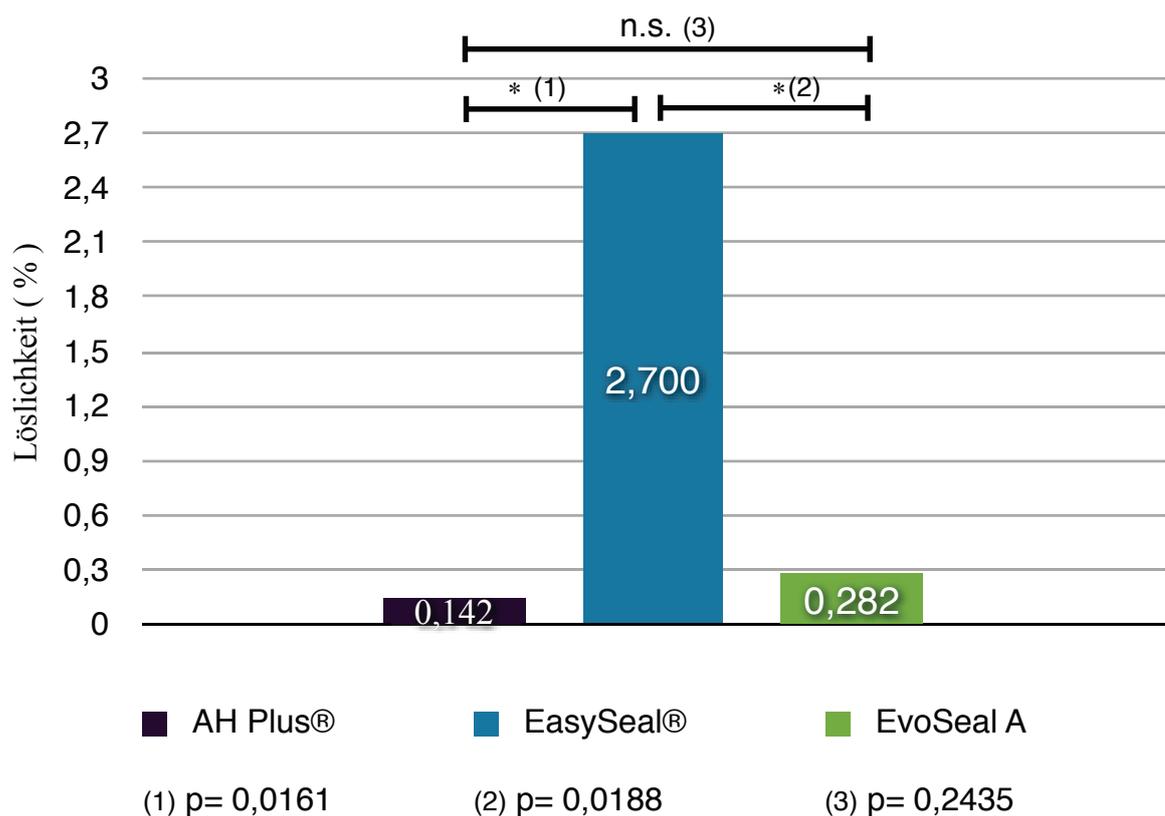


Graph. V 11.2 Mittelwerte und Signifikanzen der pH-Werte der Probekörper nach einem Monat (Fallzahl: 5)

## V 5.2.2 Löslichkeit

Nach den Vorgaben des Norm-Entwurfs 2010-08-30 (*DIN EN ISO 6876*) wurde die Löslichkeit von *AH Plus®*, *EasySeal®* und *EvoSeal A* ermittelt.

In den Tabellen V 7.1 bis V 7.6 sind die ermittelten Daten zur Löslichkeit der Sealer dargestellt. Der gelöste Sealeranteil ermittelte sich jeweils aus der Massendifferenz der Schalen vor und nach dem Löslichkeitsversuch. Es ergab sich folgende Reihenfolge der berechneten Mittelwerte der Löslichkeit, beginnend mit dem niedrigsten: *AH Plus®* (0,142 %) < *EvoSeal A* (0,282 %) < *EasySeal®* (2,700 %). In der Graphik V 12 sind die ermittelten Daten anschaulich dargestellt. Es konnten Signifikanzen festgestellt werden ( $p= 0,0161$  und  $p= 0,0188$ ). Das Messergebnis *AH Plus®* zu *EvoSeal A* ist nicht signifikant ( $p= 0,2435$ ).

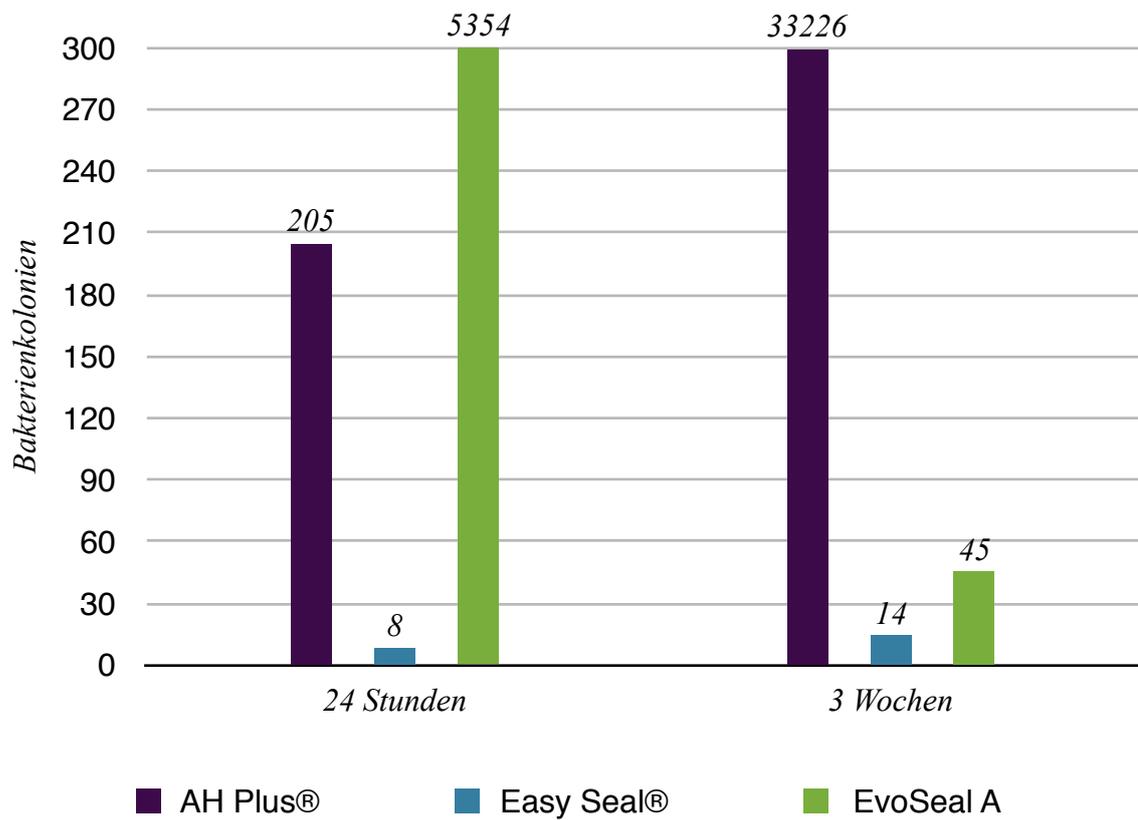


Graph. V 12 Löslichkeit der Probekörper sowie die Darstellung der Signifikanzen der Messwerte (Fallzahl: 2)

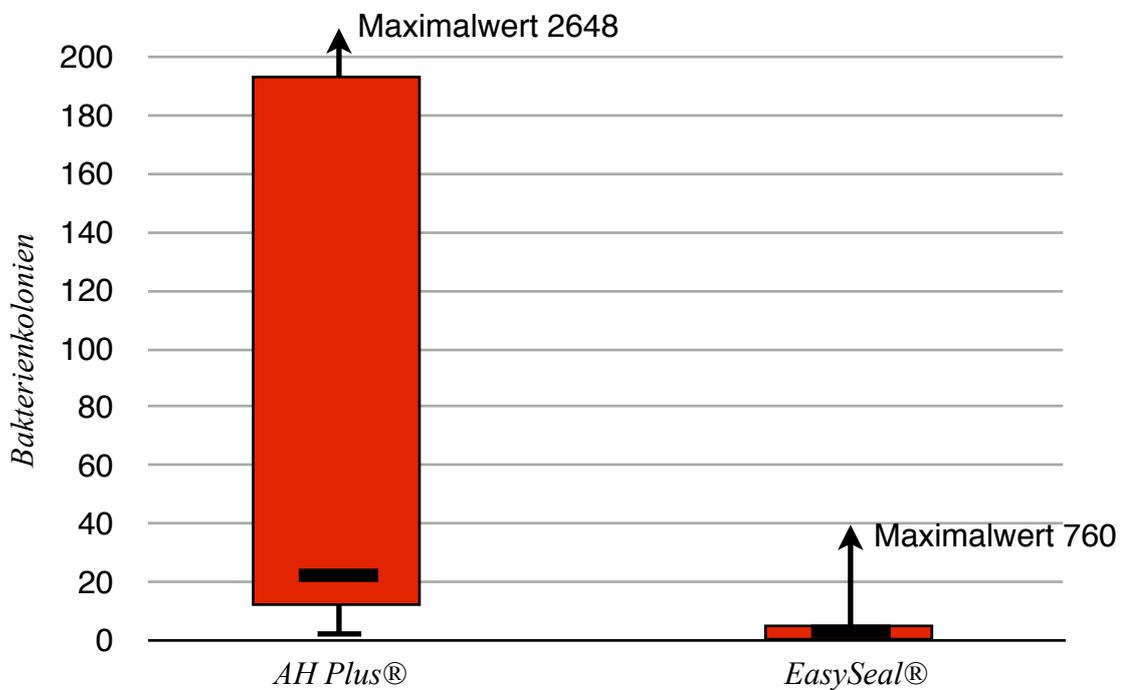
### V 5.3 Biologische Eigenschaften

#### V 5.3.1 Antibakterielle Wirksamkeit

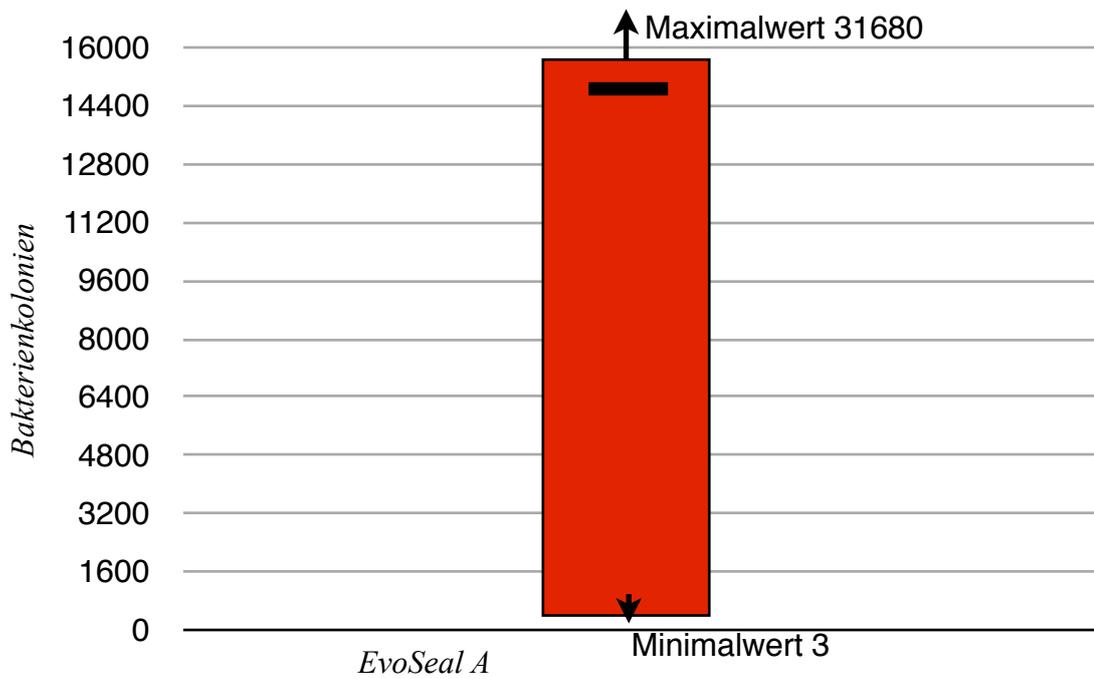
In der Tabelle V 8.1 wird dargestellt, wie viele Bakterienkolonien nach der 24 stündigen Inkubation mit dem Testsealer auf der Agarplatte gezählt werden konnten. Ebenfalls wird die zu Versuchsbeginn mit Hilfe des Photometer *Bio-RAD SmartSpec™ Plus Spectrophotometer*® ermittelte optische Bakteriendichte und die vorherige Materialaushärtezeit in der Tabelle V 8.1 dargestellt. Wie aus den Tabellen V 8.2, V 8.3 und den Graphiken V 13 bis V 13.4 hervorgeht, konnte zum ersten Untersuchungszeitpunkt nach 24 h Materialaushärtung die höchste antibakterielle Wirksamkeit auf den Keim *Streptococcus oralis* bei *EasySeal*® mit durchschnittlich 45 (Mittelwert) gezählten Kolonien (Median: 0 Kolonien) ermittelt werden, gefolgt von *AH Plus*® mit 253 (Mittelwert) / 24 (Median) gezählten Kolonien. Die geringste antibakterielle Wirkung zeigte das Testmaterial *EvoSeal A* nach 24 h Aushärtezeit. Hier konnten im Durchschnitt 6404 (Mittelwert) / (Median: 1491) Kolonien auf den Nährböden ermittelt werden. Nach 3 wöchiger Sealeraushärtung stellten sich die Ergebnisse wie folgt dar: das geringste durchschnittliche Bakterienwachstum mit 37 (Mittelwert) / (Median: 0) Kolonien wurde wiederholt auf *EasySeal*® festgestellt. *EvoSeal A* zeigte zu dem genannten Messzeitpunkt eine höhere antibakterielle Wirksamkeit mit durchschnittlich 59 (Mittelwert) / (Median: 17) gezählten *Streptococcus oralis* Kolonien, während nach der Versuchsdurchführung bei *AH Plus*® nach 3 wöchiger Aushärtezeit durchschnittlich 33193 (Mittelwert) / (Median: 34217) Kolonien auf den Nährböden gezählt werden konnten. In der Graphik V 13.5 werden das Wachstum sowie die Signifikanzen der Messwerte nach 3 Wochen Aushärtezeit der Testsealer graphisch dargestellt. Es konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden (\*\*\*) . Keine Signifikanz bestand bei *EasySeal*® zu *EvoSeal A* (p= 0,540). In den Abbildungen V 16 bis V 21 wird beispielhaft zu beiden Messzeitpunkten für jedes Material das Bakterienwachstum auf den Agarplatten dargestellt.



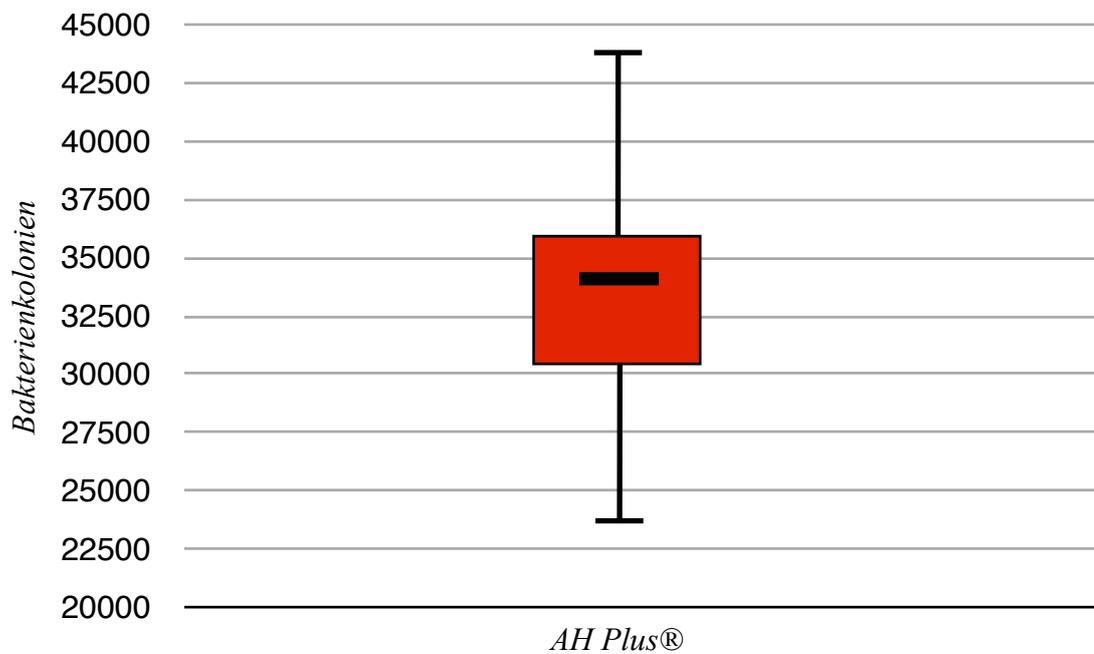
Graph. V 13 Darstellung des Wachstums von *Streptococcus oralis* - Kolonien nach 24 Stunden Aushärtezeit und 3 Wochen Aushärtezeit der Testsealer (Fallzahl: 20)



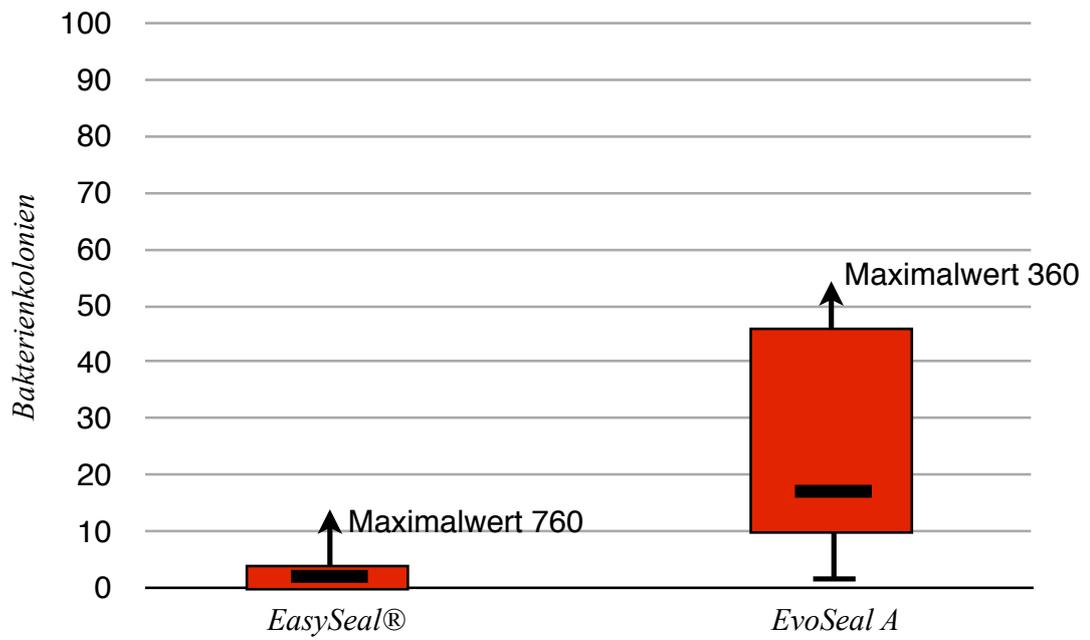
Graph. V 13.1 Boxplot Diagramm zur Darstellung des Wachstums von *Streptococcus oralis* - Kolonien nach 24 h Aushärtezeit der Testsealer AH Plus® und EasySeal® (Fallzahl: 20)



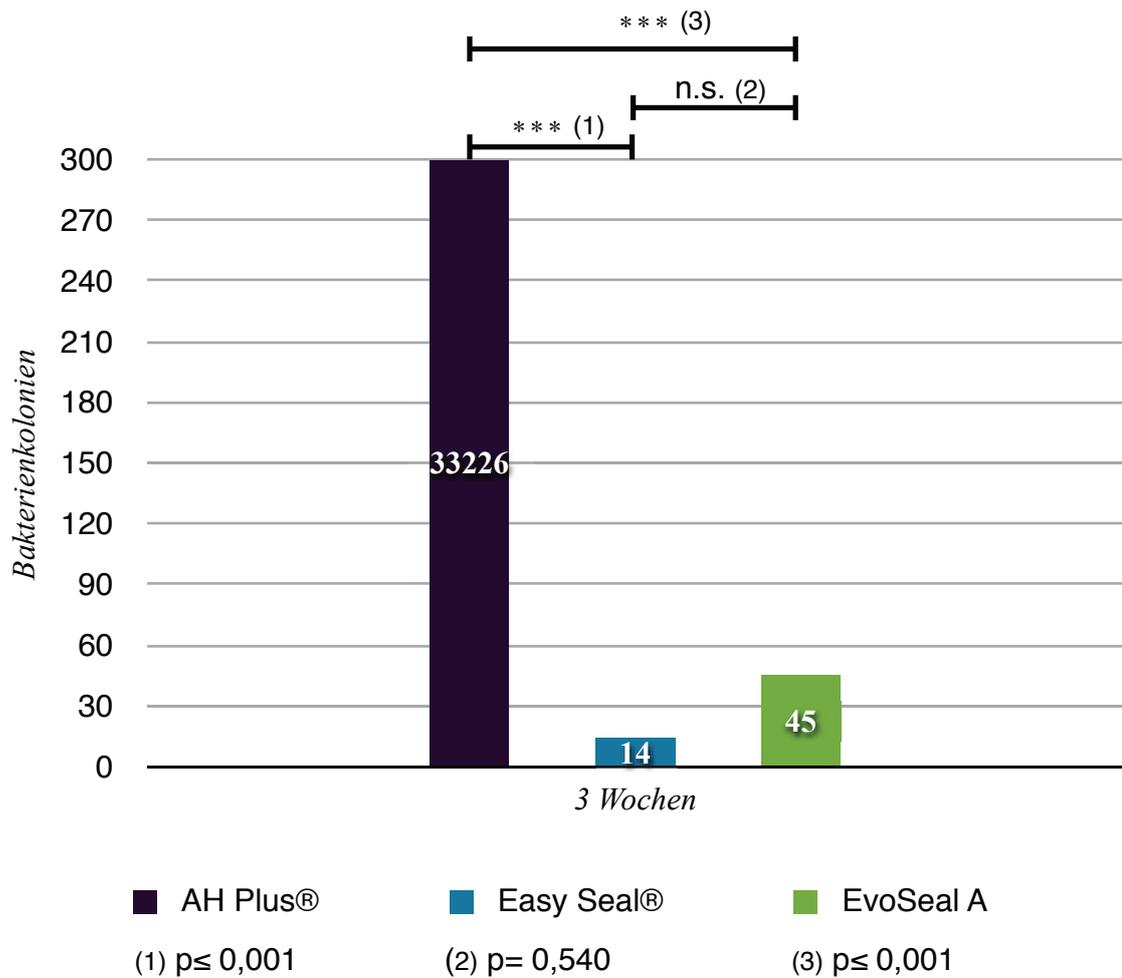
Graph. V 13.2 *Boxplot Diagramm zur Darstellung des Wachstums von Streptococcus oralis - Kolonien nach 24 h Aushärtezeit des experimentellen Testsealers EvoSeal A (Fallzahl: 20)*



Graph. V 13.3 *Boxplot Diagramm zur Darstellung des Wachstums von Streptococcus oralis - Kolonien nach 3 Wochen Aushärtezeit des Testsealers AH Plus® (Fallzahl: 20)*



Graph. V 13.4 *Boxplot Diagramm zur Darstellung des Wachstums von Streptococcus oralis - Kolonien nach 3 Wochen Aushärtezeit der Testsealer EasySeal® und EvoSeal A (Fallzahl: 20)*



Graph.V 13.5 Darstellung des Wachstums sowie Signifikanzen der Messwerte von *Streptococcus oralis* - Kolonien, nach 3 Wochen Aushärtezeit der Testsealer (Fallzahl: 20)

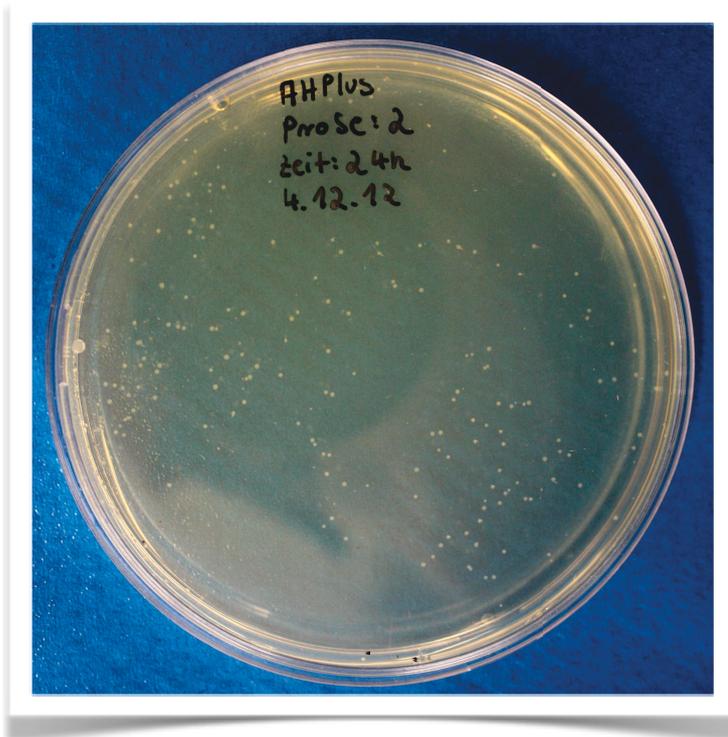


Abb. V 16 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 2 / 24 h / 232 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von AH Plus® nach 24 Stunden Aushärtezeit

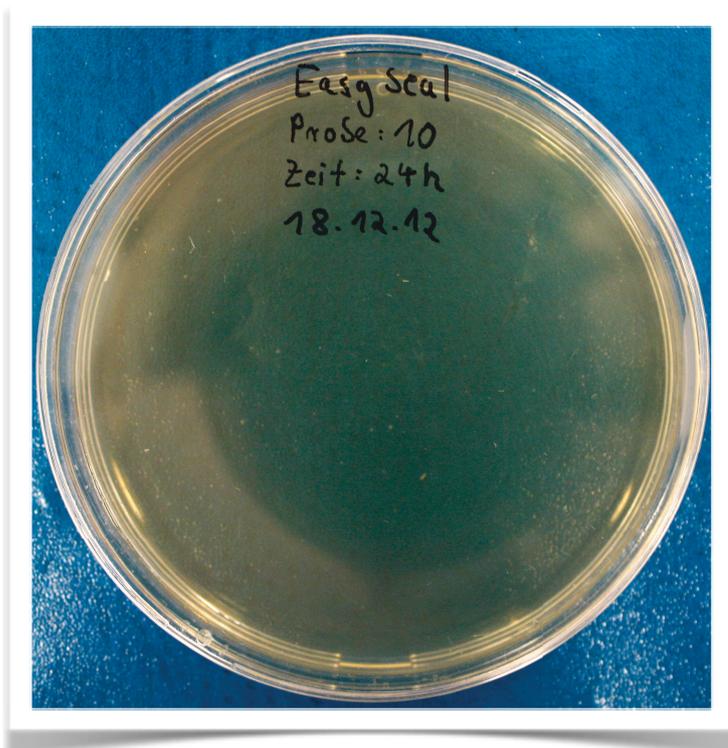


Abb. V 17 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 10 / 24 h / 14 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von EasySeal® nach 24 Stunden Aushärtezeit

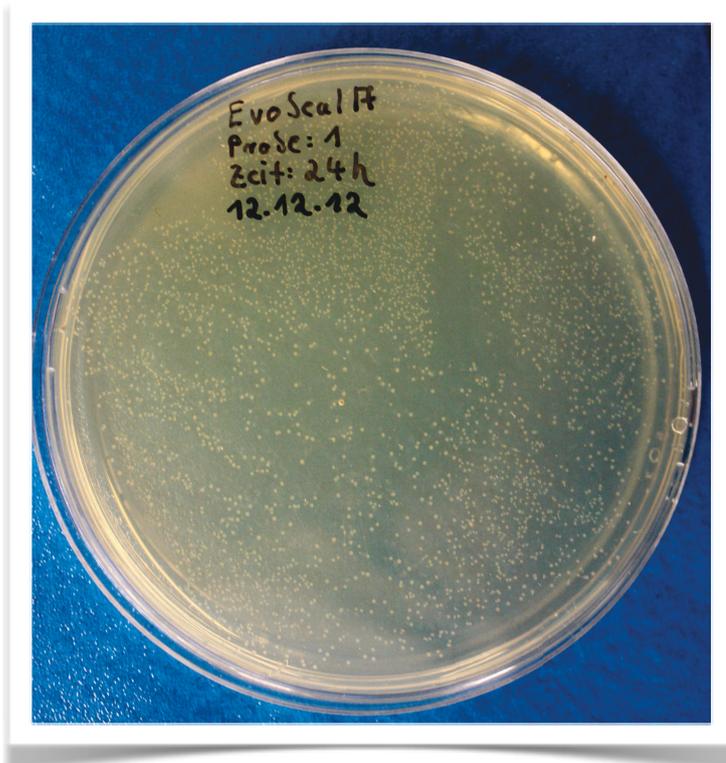


Abb. V 18 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 1 / 24 h / 1764 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von EvoSeal A nach 24 Stunden Aushärtezeit



Abb. V 19 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 12 / 3 Wochen / 32412 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von AH Plus® nach 3 Wochen Aushärtezeit



Abb. V 20 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 3 / 3 Wochen / 3 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von EasySeal® nach 3 Wochen Aushärtezeit



Abb. V 21 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 16 / 3 Wochen / 45 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von EvoSeal A nach 3 Wochen Aushärtezeit

## VI Diskussion

### VI 6.1 Diskussion der Problemstellung

Auf Grund der Zielsetzung einer endodontischen Therapie, nämlich des vollständigen hermetischen Verschlusses eines Wurzelkanals und der Verhinderung der apikalen und auch koronalen Reinfektion des Zahnes, ist es wichtig, neue und ggf. verbesserte Wurzelfüllmaterialien zu entwickeln. Aus diesem Grund sollte es Ziel der vorliegenden *in vitro* Studie sein, physikalische, chemische und biologische Eigenschaften eines experimentellen Epoxidharzbasis Sealers im Vergleich zu zwei konventionellen Sealmaterialien auf Epoxidharzbasis (*AH Plus®*, *Dentsply DeTrey* und *EasySeal®*, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, *Komet*) zu untersuchen. Ein weiterer experimenteller Sealer, *EvoSeal B*, sollte ein erstes Modell eines noch weiter zu entwickelnden Sealers darstellen und wurde daher nur eingeschränkt untersucht. Ziel bei der Entwicklung des experimentellen modifizierten Epoxidharzbasis Sealers war, eine verlängerte antibakterielle und antiseptische Wirkung zu erreichen sowie chemische und physikalische Eigenschaften, die den aktuellen Sealmaterialien auf Epoxidharzbasis nicht nachstehen. Die vorliegende Problemstellung und Zielsetzung lässt zahlreiche Forschungsansätze zu. Sowohl im Bereich der verwendeten Materialien als auch in der Methodik bei der endodontischen Therapie lässt sich großer Innovations- und Forschungsbedarf aufzeigen. In der vorliegenden Arbeit wurde auf den Forschungs- und Verbesserungsbedarf im Bereich der Wurzelkanalfüllpasten auf Epoxidharzbasis eingegangen. Hier sollte die Entwicklung eines experimentellen Sealers nicht zu einer grundlegend anderen Wurzelkanalfüllpaste führen, sondern es sollten naturstoffbasierte Monomere verwendet werden; ebenso sollten die antibakteriellen so wie die chemischen und physikalischen Eigenschaften beibehalten oder sogar verbessert werden. Bezüglich der gewählten Zielsetzung gilt es als kritisch zu beleuchten, dass selbst bei Erreichen der gesetzten Ziele der experimentelle Sealer nicht zwingend zu einer besseren Wurzelfüllung führt.

Viele Faktoren, wie beispielsweise das Immunsystem des Patienten, die spezielle Anamnese des zu behandelnden Zahnes, die Wurzelkanalkonfiguration, die Aufbereitungstechnik, die verwendeten Spüllösungen, die medikamentöse Einlage, die Fülltechnik oder die verwendeten Wurzelfüllmaterialien, spielen eine entscheidende Rolle beim Erfolg der endodontischen Behandlung. Jedoch ist zu bedenken, dass auch kleine Verbesserungen und Innovationen in einem sehr komplexen Gebiet wie der Endodontie zu einer Erhöhung der Erfolgsquote beitragen können. Ebenfalls in Bereichen, wie zum Beispiel der medikamentösen Einlage, der Wurzelkanalfüllstifte, der Wurzelkanalaufbereitungstechniken oder der Aufbereitungsinstrumente, sind weitere Verbesserungsmöglichkeiten in der Zukunft denkbar. Das Ziel aller Verbesserungen und Innovationen im Gebiet der Endodontie soll ein möglichst langer, entzündungs- und schmerzfreier Erhalt der eigenen wurzelkanalbehandelten Zähne sein.

## *VI 6.2 Diskussion von Material und Methodik*

In der vorliegenden Arbeit dienten als Testmaterial zwei handelsübliche Sealer-materialien auf Epoxidharzbasis sowie zwei durch Naturstoffmonomer modifizierte experimentelle Sealer. Hierbei fand bei *EvoSeal A* eine Modifizierung der Aminbasis und bei *EvoSeal B*, welcher einen Forschungsausblick darstellen sollte, eine Modifikation der Epoxidbasis statt. Das Ziel der Modifikation sollte eine längere antibakterielle Wirksamkeit und eine schnellere Aushärtezeit der Testsealer sein. Als Testmethodik wurden standardisierte Methoden nach *DIN 6876: 2010-08-30*, *DIN 13907: 2007-01* und *ISO 22196: 2011 (E)* gewählt. Die Vorteile der Standardisierung sind eine gute Reproduzierbarkeit und Vergleichsmöglichkeit der *in vitro* Versuche. Es wird dadurch eine hohe Aussagekraft der Ergebnisse erzielt. Hierbei wurde die Filmdicke, Fließfähigkeit, Abbindezeit, Röntgensichtbarkeit und die Löslichkeit nach den Vorgaben des Norm-Entwurfs 2010-08-30 (*DIN EN ISO 6876*) durchgeführt. In Anlehnung an die Norm *DIN 13907 2007-01* wurde die Volumenschrumpfung der Testmaterialien untersucht.

Bei der Versuchsdurchführung zur Volumenschrumpfung der Sealmaterialien ist kritisch zu bewerten, dass die Versuche nur in Anlehnung an die Normvorschriften durchgeführt wurden. Hierbei wurde lediglich nur, wie in der Norm beschrieben, die Volumenschrumpfung über die Dichteänderung der Probekörper mit Hilfe des Dichtebstimmungssets ermittelt. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Norm *DIN 13907 2007-01* ein Testverfahren für die Ermittlung der Polymerisationsschrumpfung von Füllungswerkstoffen beschreibt. In der vorliegenden Studie sollte aber die Schrumpfung von Wurzelkanalsealern ermittelt werden. Dies setzt neben einem unterschiedlichen Aushärtungsmechanismus auch eine andere Handhabung mit den völlig unterschiedlichen Materialien voraus. Demnach wurde die nach Norm beschriebene Versuchsdurchführung der in IV 4.1.3 beschriebenen Durchführung angepasst und modifiziert. Die Testung der antibakteriellen Wirksamkeit der Sealmaterialien wurde in Anlehnung an die Norm *ISO 22196: 2011 (E)* durchgeführt. Auch in diesem Fall ist zu kritisieren, dass die Normvorgaben für die vorliegenden Versuche bezüglich der zu verwendenden Bakterienspezies, des Versuchsaufbaus und auch in der Versuchsdurchführung nach einigen Vorversuchen modifiziert wurden. Es sollte sichergestellt werden, dass eine genaue Abstimmung der Versuchsdurchführung auf die Materialeigenschaften und die verwendeten Bakterienkolonien stattfindet. Dies musste demnach zu einer Veränderung der beschriebenen Versuchsdurchführung der Norm *ISO 22196: 2011* führen. Die Messung des pH-Wertes und der Infrarotspektroskopie erfolgte nicht nach Norm-Vorgaben. Ebenso ist kritisch zu bewerten, dass die Methodik der Materialtests *in vitro* unter standardisierten Bedingungen durchgeführt wurde. Sealmaterialien werden im Wurzelkanal menschlicher Zähne in unterschiedlichem Milieu angewandt, so dass die physikalischen, biologischen und chemischen Eigenschaften der Materialien in ihrem eigentlichen Einsatzgebiet nur erahnt werden können, solange sie nicht *in vivo* getestet werden. *In vivo* Untersuchungen werden beispielsweise durchgeführt, um eine Aussage über die Dichtigkeit von Wurzelkanalsealern mit Hilfe von Penetrationsuntersuchungen machen zu können. Ebenso sind derartige Untersuchungen auch *in vitro* möglich.

Eine *in vivo* Studie von *Shipper et al.* aus dem Jahre 2005 an Hundezähnen beschäftigte sich mit den Abdichtungseigenschaften eines auf Polyester basierenden thermoplastischen Wurzelfüllmaterials („*Resilon*®-System“) im Vergleich zu einer Wurzelkanalfüllung mit *AH 26*® und Guttapercha; sie zeigte eine signifikant bessere Abdichtung mit dem *Resilon*®-System. Das Prinzip dieses Systems, welches 2003 auf den Markt gebracht wurde, besteht darin, dass über einen gering viskosen Sealer ein adhäsiver Verbund zwischen dem Wurzelkanalentin und der Guttapercha als Kernmaterial entsteht und sich ein so genannter „Monoblock“ ausbildet<sup>138</sup>. In einer weiteren Studie von *Shipper et al.* konnte gezeigt werden, dass eine bessere Verbindung zwischen dem *Epiphany*® -Sealer und dem Füllmaterial *Resilon*® im Vergleich zu *AH Plus*® und Guttapercha bestand<sup>114</sup>. Bezüglich der Abdichtungseigenschaften konnte jedoch *Paqué et al.* bessere Eigenschaften für Wurzelfüllungen mit Guttapercha und *AH Plus*® im Vergleich zu Wurzelfüllungen mit dem *Resilon*®-System ermitteln. Über einen Zeitraum von 16 Monaten wurden hierzu 90 Unterkiefer Prämolaren untersucht<sup>119</sup>.

## VI 6.3 Diskussion der Ergebnisse

### VI 6.3.1 Filmdicke

Die Filmdicke eines Sealmaterials spielt eine wichtige Rolle bei den Abdichtungseigenschaften einer Wurzelkanalfüllung. Sobald die Filmdicke des Sealers bzw. dessen Partikelgröße größer ist als der Spalt zwischen der Wurzelkanalwand und dem Guttaperchastift, kann es zu einer ungünstigen Verdrängung des Sealers kommen, welche ebenfalls die Dichte der Wurzelkanalfüllung negativ beeinflussen kann<sup>120</sup>. Eine geringe Filmdicke eines Wurzelkanalsealers kann demnach eine Relevanz bei der Dichtigkeit einer Wurzelkanalfüllung haben. Trotz einer geringen Filmdicke sollten andere physikalische und chemische Eigenschaften des Sealers nicht negativ beeinflusst werden. Um eine Aussage über die Relevanz der Filmdicke eines Wurzelkanalsealers bei der Dichtigkeit einer Wurzelkanalfüllung treffen zu können, wären Dichtigkeitsuntersuchungen zum Beispiel im Sinne von Penetrationsuntersuchungen (Farbstoffpenetrationstests, Bakterienpenetrationstest oder Glucosepenetrationstests) notwendig. Hierbei verfolgen die Testmethoden das Ziel, die Dichtigkeit einer Wurzelfüllung danach zu beurteilen, wie stark verschiedene Penetrationsindikatoren (Farbstoffe, Bakterien, Glucose) die Passage entlang der Wurzelkanalfüllung durchlaufen können. Die Versuche müssten dann mit verschiedenen Filmdicken eines Sealers, bei gleichem Versuchsaufbau durchgeführt werden.

Allerdings wird auch die Methodik der verschiedenen Penetrationstests in der Literatur kritisch bewertet. Viele Ergebnisse zu Dichtigkeitsuntersuchungen weisen widersprüchliche Ergebnisse auf<sup>138</sup>. Gründe für die Differenzen der Ergebnisse sind fehlende einheitliche standardisierte Testmethoden. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gestaltet sich daher als schwierig und lässt demnach keine direkten Vergleiche zu<sup>139</sup>. Auch bei Ergebnissen zu *in vitro* Untersuchungen der Penetrationsfähigkeit in Abhängigkeit von der Filmdicke eines Sealers müsste die klinische Anwendbarkeit mit *in vivo* Untersuchungen bestätigt werden.

Die *DIN EN ISO 6876: 2010-08-30* definiert für die Prüfung nach dem vorgegebenen Testverfahren von Sealmaterialien eine Filmdicke, welche nicht stärker sein darf als 50 µm. Nach Angaben der Norm muss für jedes Wurzelfüllmaterial die Filmdicke dreimal gemessen werden und aus den Ergebnissen der Mittelwert berechnet werden. In der vorliegenden Versuchsreihe wurde für die getesteten Materialien *AH Plus®*, *EasySeal®* und *EvoSeal A* die Filmdicke sechsmal ermittelt. Alle Ergebnisse entsprachen den Normvorgaben mit einer Filmdicke unter 50 µm. Die Filmdicken ergaben im Median folgende Ergebnisse: *EasySeal®* mit einer Filmdicke von 6 µm zeigte die geringste Filmdicke und damit das beste Ergebnis auf. Die Messung der Filmdicke von *AH Plus®* ergab einen Medianwert von 8 µm, gefolgt von *EvoSeal A* mit 27 µm. Mit Hilfe der standardisierten Methode zur Filmdickenmessung können reproduzierbare Ergebnisse genannt werden, die jedoch keine Aussage über das *in vivo* Verhalten bezüglich der Filmdicke zulassen. Positiv hervor zu heben ist jedoch, dass die Ergebnisse direkte Vergleiche und Bewertungen zwischen den getesteten Sealmaterialien zulassen. Alternative Methoden zur Messung der Filmdicke von Wurzelkanalsealern sind neben dem in IV 4.1.1 beschriebenen Verfahren möglich. Eine Möglichkeit, Schichtdicken zu bestimmen, ist das Verfahren der „Durchstrahlung und Absorption“. Hiermit kann eine Filmdicke eines Materials darüber bestimmt werden, wie sich das Verhältnis von eingehender Strahlung (z.B. Röntgenstrahlung) und der gemessenen ankommenden Strahlung hinter dem Material darstellt. Zukünftig könnte ebenfalls die klinische Relevanz der Filmdicke, wie bereits oben diskutiert, mit Hilfe von *in vivo* Untersuchungen ermittelt werden.

### VI 6.3.2 Fließfähigkeit

Wurzelfüllmaterialien sollten eine optimale Fließfähigkeit aufweisen, um kleine akzessorische Dentinkanälchen sowie Unebenheiten zwischen dem Guttaperchastift und der Wurzelkanalwand aufzufüllen. Aus diesem Grund stellt sich die Fließfähigkeit eines Sealers als relevant dar. Das Fließverhalten eines Stoffes ist abhängig vom Fließwiderstand und somit abhängig von inneren Reibungsvorgängen zwischen den Molekülen und Partikeln. Unter anderem ergeben sich Schererwärmungen an der Messprobe. Daher ist eine konstante Temperatur während der Versuche notwendig, um vergleichbare Ergebnisse der verschiedenen Proben zu erhalten. Kritisch zu bedenken ist bei dieser physikalischen Eigenschaft des Sealers, das Fließen des Materials über den Apex hinaus. Aus diesem Grunde sollte der Sealer nicht zu fließfähig sein, sondern auch eine gewisse Viskosität aufweisen. Ebenfalls spielt das Einbringen des Materials in den Wurzelkanal eine wichtige Rolle. Mit Hilfe von Papierspitzen oder auch des Masterpoints, Feilen oder Lentulos kann der Sealer kontrolliert in den Wurzelkanal eingebracht werden. Eine Spirale im Sinne des *EZ-Fill bidirectional spiral*® (*Essential Dental Systems, INC*) stellt eine weitere Methode dar. Hierbei handelt es sich um eine gegenläufige Spirale, die im koronalen und im mittleren Drittel gegenläufig zum apikalen Drittel gestaltet ist. Durch dieses Design wird der Sealer im koronalen und apikalen Drittel an die Wurzelkanalwand gepresst und nach apikal eine Extrusion verhindert. Durch genau passende Guttaperchastifte kann der genannte Effekt verstärkt werden, wobei zusätzlich eine große Haftfläche zwischen dem Sealer und der Kanalwand entsteht<sup>140</sup>. Nach *DIN EN ISO 6876: 2010-08-30* ist die Fließfähigkeit eines Sealers dann adäquat, wenn eine Menge von  $0,05 \pm 0,005$  ml Sealer zwischen zwei definierten Glasplatten und einem Gewicht von 100 g eine Scheibe von 17 mm ergibt. Der Versuch soll laut Normvorgaben dreimal durchgeführt und der Mittelwert hieraus berechnet werden. Ebenso wurden die Medianwerte ermittelt, um im Vergleich zum arithmetischen Mittel robuster gegenüber stark abweichenden Werten zu sein. In dieser *in vitro* Studie wurde der Versuch für jedes getestete Sealermaterial insgesamt fünfzehnmal durchgeführt.

Die Ergebnisse zu den durchgeführten Versuchen entsprachen alle den Normvorgaben mit einer entstandenen Sealerscheibe von mindestens 17 mm Größe.

Alle Ergebnisse weisen nur sehr geringe Unterschiede bezüglich ihrer Fließfähigkeit auf. Unter standardisierten Bedingungen konnte nach Ermittlung des Medians für alle Testsealer das gleiche Ergebnis bezüglich der Fließfähigkeit ermittelt werden: ein Medianwert von 17,6 mm. Verwendet man zur Berechnung den Mittelwert, ergibt sich für den Testsealer *AH Plus*® und *EasySeal*® das beste Ergebnis mit einer Fließfähigkeit von 18 mm und für *EvoSeal A* von 17 mm. Die kritische Betrachtung der Versuchsergebnisse zeigt, dass die fünfzehn Werte einer jeden Versuchsreihe ähnliche Ergebnisse zeigen. Dies lässt vermuten, dass die Ergebnisse bei exakt gleicher Versuchsdurchführung (nach *DIN EN ISO 6876*) gut reproduzierbar und vergleichbar sind. Das Ergebnis zur Fließfähigkeit aller getesteten Sealer entspricht zwar den Vorgaben der Norm, lässt aber auch in diesem Fall keine Schlüsse auf das Fließverhalten *in vivo* zu. Faktoren wie eine erhöhte Luftfeuchtigkeit, zB. durch die Atemluft des Patienten, Mikroleakage von Bakterien im Wurzelkanal, die Sealer-Applikationsmethode oder auch die Rauheit der Wurzelkanalinnenwand, können das Fließverhalten beeinflussen.

Aus diesem Grund stellt das vorliegende Ergebnis eine reine *in vitro* Beurteilung unter standardisierten Bedingungen zum Fließverhalten dar. Ein alternatives Testverfahren könnte aus dem Bereich der Tests für das Fließverhalten von zahnärztlichen Abformmaterialien angewandt werden. Das Verfahren wird als „Haifischflossen-Test“ bezeichnet.

Hierzu wird das zu testende Material in ein rundes Gefäß gefüllt. Ein Messinstrument, bestehend aus einem Zylinder mit einem Kolben, wird auf das runde Gefäß mit dem Material aufgesetzt. Die Arretierung des Kolbens wird gelöst und der Kolben eines spezifischen Gewichtes sinkt langsam in das zu testende Material ein. Der Kolben besitzt einen inneren Schlitz, der es zulässt, dass das Material unter dem Druck des Kolbens langsam in den Hohlraum des Kolbens fließt. Im Falle der Untersuchung von Abformmaterialien ergibt sich folglich im Inneren des Kolbens ein Prüfkörper in Form einer Haifischflosse, da das Material schnell aushärtet. Der Prüfkörper in Form der Flosse gibt über die Höhe an, wie fließfähig ein Abformmaterial im Vergleich zu anderen Materialien ist<sup>141</sup>.

Bei der Anwendung des beschriebenen Versuchsaufbaus auf die Testung der Fließfähigkeit von Sealmaterialien könnte nicht die Höhe der „Haifischflosse“, sondern das Gewicht des eingedrungenen Sealmaterials innerhalb des Kolbens zur Auswertung und dem Vergleich mit anderen Materialien dienen.

### VI 6.3.3 Schrumpfung

Die Dimensionsstabilität der Testsealer wurde in Anlehnung an die Vorgaben des *Deutschen Instituts für Normung e.V.* „Polymerisationsschrumpfung von Füllungswerkstoffen“ DIN 13907: 2007-01 über einen Zeitraum von einer Woche durchgeführt. Die DIN 13907: 2007-01 beschreibt ein Testverfahren zur Bestimmung der Polymerisationsschrumpfung von Füllungswerkstoffen wie Kompositen und ist daher nicht explizit für Wurzelfüllmaterialien ausgelegt. Bereits in VI 6.2 wurde diskutiert, warum die Versuchsdurchführung in Anlehnung an die Norm durchgeführt wurde. Der Beobachtungszeitraum von einer Woche wurde ausgewählt, da nach dieser Zeit von einer vollständigen Aushärtung und demnach von keiner weiteren Volumenänderung eines Epoxidharzbasis Sealers ausgegangen werden kann. Bestätigt wird dies in den Ergebnissen zur Infrarotspektroskopie (V 5.1.6), wo bereits erläutert und graphisch dargestellt wurde, dass eine vollständige Aushärtung der zwei Komponenten eines Epoxidharzbasis Sealers nach einer Woche stattfindet. In der Vergangenheit konnten erhöhte Schrumpfwerte bei *AH 26*® und dem daraus resultierenden Nachfolger *AH Plus*® reduziert werden, was sich auch an guten Ergebnissen im Sinne von Dichtigkeitsuntersuchungen an Wurzelkanalfüllungen mit *AH Plus*® zeigte<sup>142</sup>. Eine gute Dimensionsstabilität von Wurzelfüllmaterialien spielt eine wichtige Rolle, da sie zur vollständigen Obturation in Verbindung mit einem Guttaperchafüllmaterial beiträgt. Durch die Verwendung der Guttaperchastifte soll einerseits das Sealmaterial gleichmäßig an die Wurzelkanalinnenwand verteilt werden, um kleine Dentinkanälchen aufzufüllen, andererseits soll die Menge an Sealer mit seiner unvermeidlichen Schrumpfungseigenschaft möglichst gering gehalten werden<sup>121</sup>.

Wird der Sealeranteil bei einer Wurzelfüllung unverhältnismäßig groß, kann es zu Porositäten und mangelnder Randständigkeit, bedingt durch die Schrumpfung des Sealers, im Bereich der Wurzelfüllung kommen. Hierzu kann es zum Beispiel bei der Anwendung der Zentralstifttechnik kommen, wenn die genormten Guttaperchastifte nicht genau der Form des aufbereiteten Wurzelkanals entsprechen<sup>143</sup>. Die Versuche zur Volumenänderung der Sealermaterialien ergeben nach Ermittlung der Medianwerte folgende Ergebnisse, beginnend mit den geringsten Schrumpfwerten:

*EvoSeal A*: 1,84 % < *AH Plus*®: 2,20 % < *EvoSeal B*: 2,42 % < *EasySeal*®: 3,39 %.

Ein deutlich anderes Ergebnis ergibt sich, wenn der Mittelwert der Ergebnisse zur Beurteilung der Schrumpfung herangezogen wird: *AH Plus*® zeigt nach einer Woche die geringste volumetrische Schrumpfung von nur 2,27 % auf. Der experimentelle Sealer *EvoSeal A* zeigt mit 3,54 % Schrumpfung nach einer Woche etwas schlechtere Werte. Bei *EasySeal*® konnten nach einer Woche ähnliche Schrumpfwerte wie bei *EvoSeal A*, nämlich von 3,68 %, ermittelt werden. Eine deutlich größere Schrumpfung von 4,42 % nach einer Woche Beobachtungszeit bei *EvoSeal B* weist auf eine wesentlich schlechtere volumetrische Stabilität nach Anmischung des Sealermaterials hin. Zu diskutieren ist in diesem Fall, dass die Medianwerte von den Mittelwerten abweichen und sich folglich andere Ergebnisse darstellen. Bei den experimentellen Sealern, *EvoSeal A* und *EvoSeal B*, sind die Differenzen am deutlichsten. Betrachtet man jedoch die Ergebnisse zu den Schrumpfwerten genauer (s. Tabellen V 3.1.1 bis V 3.4.6) und betrachtet man das Boxplot Diagramm „Graph. V 4.1 Boxplot Diagramm zur Schrumpfung der Probekörper nach einer Woche“, wird ersichtlich, warum die Medianwerte bei *EvoSeal A* und *EvoSeal B* so deutlich von den Mittelwerten abweichen. Wie bereits beschrieben wurde, ist der Median einer Messreihe im Vergleich zum Mittelwert gegenüber stark abweichenden Werten robuster. Bei den genannten experimentellen Sealern liegen einige stark abweichenden Werte vor, die in der Medianberechnung weniger stark ins Gewicht fallen. Bei Messwerten, die innerhalb einer Versuchsreihe deutlich abweichen, ist häufig von einem Messfehler oder einem nicht berechenbaren Fehler auszugehen. Der Medianwert stellt daher gerade bei solchen Messreihen ein geeignetes Mittel zur Auswertung der Ergebnisse dar und ist dem Mittelwert vorzuziehen.

Ein weiteres Verfahren zur volumetrischen Messung des Dimensionsverhaltens von Stoffen ist die von *Smith et al.* beschriebene dilatometrische Methode aus dem Jahre 1953<sup>144</sup>. Ein Dialometer (Wärmeausdehnungsmessgerät) für Flüssigkeiten ist ein Glasgefäß, welches vollständig mit Quecksilber gefüllt ist und über eine Kapillare mit der Umgebungsluft verbunden ist. Zur Messung des Dimensionsverhaltens eines Stoffes wird dieser in das Gefäßlumen gegeben. Bei einer volumetrischen Änderung des zu testenden Materials wird dies auf der Kapillarsäule des Dialometers angezeigt, indem das Quecksilber in der Kapillare steigt oder sinkt. *Bandyopadhyay* veränderte das Verfahren dahingehend, dass anstatt Quecksilber destilliertes Wasser verwendet wurde. Dies hat den Vorteil, dass das gegenüber von Temperaturschwankungen anfällige und gesundheitsschädliche Quecksilber ersetzt wird<sup>145</sup>.

Bei einer weiteren Methode zur Messung des Dimensionsverhaltens von Stoffen wird statt der beschriebenen Verwendung einer Flüssigkeit Heliumgas eingesetzt. Die Messung wird in einem sogenannten Gaspyknometer durchgeführt und beruht auf der Druckänderung des Heliumgases durch die volumetrische Ausdehnung des Testmaterials. Diese Methodik wurde 1999 von *Cook et al.* beschrieben und zeigt den Vorteil auf, dass kein flüssiges Medium zur Messung verwendet wird, welches einen Einfluss auf feuchtigkeitsempfindliche Testmaterialien haben kann<sup>146</sup>. Die in dieser *in vitro* Studie angewandte Versuchsmethodik, wie sie in IV 4.1.3 beschrieben ist, geht auf eine von *Attin et. al* und *Danesh et al.* beschriebene Vorgehensweise zurück<sup>147, 148</sup>. Das Prinzip beruht auf der hydrostatischen Wägung, bei der jeder Körper nach dem Archimedischen Prinzip in einer Flüssigkeit einen Auftrieb erfährt, der dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit entspricht. Die Volumenänderung wird aus der Veränderung der Dichte bestimmt. Vorteile der angewandten Technik sind zum einen die Verwendung von Polyethelen-Tütchen, in die die Sealer vakuumdicht eingeschweißt wurden, um somit nicht dem Einfluss des destillierten Wassers, in dem die Wägung unter anderem stattfand, zu unterliegen. Ein weiterer Vorteil der Tütchenverschweißung ist die gute Handhabung der anfangs pastenförmigen Sealmaterialien. Zusammenfassend ist zu bemerken, dass bei Betrachtung der Medianwerte verdeutlicht wird, dass der experimentelle Sealer *EvoSeal A* bezüglich seiner Volumenschrumpfung ein dezent besseres Ergebnis als der herkömmliche Sealer *AH Plus®* aufzeigt und demnach der Fragestellung nach einem gleichwertigen oder besseren Sealer im Vergleich zu einem herkömmlichen Sealer bezüglich der Schrumpfungseigenschaften gerecht wird.

### VI 6.3.4 Abbindezeit

Die Abbindezeit eines Sealers ist nach Definition der *DIN EN ISO 6876: 2010-08-30* ein Zeitraum, gemessen nach Anmischen des Sealers bis zum Aushärten der Wurzelkanalfüllpaste nach den in IV 4.1.4 beschriebenen Kriterien. Gefordert wird laut *ISO 6876*, dass die Abbindezeit nicht mehr als 110 % der vom Hersteller angegebenen Zeit betragen darf. Ist vom Hersteller eine Abbindezeit von mehr als 30 min und bis zu 72 Stunden angegeben, muss die ermittelte Zeit in diesem angegebenen Bereich liegen. Eine standardisierte genaue Abbindezeit für Sealmaterialien gibt es nicht. Die kürzeste Abbindezeit von 2,95 Stunden konnte bei *EvoSeal A* ermittelt werden.

Da der Sealer ein experimentelles Produkt ist, sind hier noch keine Herstellerangaben vorhanden. *EasySeal®* liegt mit einer mittleren Abbindezeit von 4,1 Stunden bei 37 °C innerhalb der Vorgaben des Herstellers, der die vollständige Aushärtung innerhalb von 24 Stunden angibt. *EvoSeal B* als weiterer experimenteller Sealer härtet nach 8,16 Stunden vollständig aus. Laut Herstellerangaben / Produktinformation der *Dentsply DeTrey GmbH* beträgt die Aushärtezeit von *AH Plus®* mindestens 8 Stunden. Ein Zeitfenster wird nicht benannt. In der vorliegenden Studie wurde eine mittlere Abbindezeit von 24 Stunden ermittelt. *McComb et. al.* stellten den Vorteil einer langen Abbindezeit, wie sie bei *AH Plus®* vorliegt, dar. Bei einer Indikation zur Revision einer Wurzelkanalbehandlung, wie es zum Beispiel bei dem Überpressen von Wurzelfüllmaterialien in den *sinus maxillaris* oder in den *canalis mandibularis* vorkommt, zeichnet sich ein Sealmaterial mit einer langen Abbindezeit dadurch positiv aus, dass es anfangs leichter revidiert werden kann<sup>57</sup>.

Ebenso wird vermutet, dass lange Abbindezeiten von Epoxidharzbasis Sealern, die Ausbildung adhäsiver Kräfte zum Kanalwanddentin ermöglichen<sup>149</sup>. Jedoch kann auch eine kurze Abbindezeit als Vorteil angesehen werden. Bei einer kürzeren Abbindezeit verändert sich auch die Fließfähigkeit des Materials, was zu einem schnelleren Aushärten der Wurzelfüllung in seiner Endposition führt. Ebenso könnte eine Applikation eines Wurzelstiftes zu einem früheren Zeitpunkt erfolgen, was voraussetzt, dass ein Teil der erhärteten Wurzelfüllung im koronalen Bereich wieder entfernt werden kann. Eine Abbindezeit von zwei Stunden wurde von *Grossman 1976* als optimal beschrieben<sup>150</sup>.

Abhängig ist die Abbindezeit der Wurzelkanalsealer von deren konstituierten Bestandteilen, der umgebenden Temperatur und Feuchtigkeit sowie der Teilchengröße des Materials<sup>151</sup>. Die in IV 4.1.4 beschriebene Versuchsmethodik stellt ein standardisiertes und einfaches Verfahren zur Ermittlung der Abbindezeit von Wurzelkanalsealern dar, wodurch es Fehlerquellen relativ robust gegenüber steht. Die einheitlichen Ergebnisse deuten auf ein sicheres Verfahren zur Ermittlung der Abbindezeit hin.

### VI 6.3.5 Röntgensichtbarkeit

Um eine erfolgreiche Röntgendiagnostik von zahnärztlichen Füllungsmaterialien durchführen zu können, müssen diese die Eigenschaft der Radioopazität besitzen. Neben der Verwendung von röntgenopaken Elementen spielen ebenfalls die Dicke und die Dichte eines Materials in der röntgenologischen Darstellung eine Rolle. Zur Verwendung kommen zum Beispiel Elemente, die im Periodensystem eine hohe Ordnungszahl aufweisen, wie Barium, Strontium, Zirkonium oder Bismuth. Ebenso kommt einer röntgenologischen Differenzierbarkeit bei Verschlucken oder Aspiration von zahnärztlichen Materialien eine forensische Bedeutung zu. Materialien können so von körpereigener Substanz differenziert, lokalisiert und eventuell entfernt werden<sup>152</sup>. Um die Qualität einer Wurzelfüllung beurteilen zu können, müssen die Wurzelfüllmaterialien wie der Sealer und die Guttapercha eine deutliche Röntgenopazität aufweisen, welche sich von der des Dentins deutlich abhebt.

Die auf dem Markt erhältlichen Sealmaterialien zeigen unterschiedliche Röntgenopazitäten auf, welche eine dem Dentin gleiche bzw. bis zu elffache Stärke zeigen<sup>153</sup>. Laut *DIN EN ISO 6876: 2010-08-30* muss 1 mm Wurzelfüllpaste mindestens 3 mm Aluminium im Sinne der Röntgendichte entsprechen. Die Methodik bei der Messung der Radioopazität geht unter anderem auf die Verwendung eines Densitometers zurück, welches in der Lage ist, das Verhältnis von einfallendem und durchgelassenem Licht eines Röntgenfilms zu messen. Diesen Messwerten, welche die optische Dichte darstellen, wird eine stetige mathematische Funktion zugewiesen, die Interpolante, welche dann den Äquivalenzwert in Millimeter Aluminium aufzeigt. Auf Grund der guten Reproduzierbarkeit der Aluminiumstärke als Referenzmaterial können

die unterschiedlichen Röntgendichten von Sealeramaterialien bei Anwendung der gleichen Versuchsmethodik, wie sie in IV 4.1.5 dargestellt ist, verglichen werden. Bei der Testung der Sealermaterialien, *AH Plus*®, *EasySeal*® und *EvoSeal A*, stellten sich deutliche Ergebnisse dar. Diese sind in den Tabellen V 5.1 bis V 5.3 dargestellt. *AH Plus*® wies die stärkste Röntgensichtbarkeit auf, mit einem Median für die optische Dichte von 0,4 im Vergleich zu einem Medianwert von 0,93 für 3 mm Aluminium. Dies entspricht den Vorgaben der *Norm 6876*. *EvoSeal A*, mit einem Medianwert der optischen Dichte von 0,72 im Vergleich zu einem Wert von 0,86 für 3 mm Aluminium, entspricht demnach ebenfalls den Normvorgaben. In dieser Versuchsreihe entsprach die Röntgensichtbarkeit von *EasySeal*® nicht den Vorgaben der *DIN EN ISO 6876: 2010-08-30*. Der Medianwert der optischen Dichte von *EasySeal*® ergab einen Wert von 0,96, während der Median des Dichtewertes für 3 mm Aluminium 0,90 ergab. Da der Wert für den Prüfkörper unter dem Wert für 3 mm Aluminium liegen muss, entspricht dies nicht den Vorgaben der *Norm 6876*. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass der experimentelle Sealer *EvoSeal A* bezüglich der Röntgensichtbarkeit den Normvorgaben gerecht wird. Im Vergleich zu *AH Plus*® zeigt sich jedoch eine geringere Röntgensichtbarkeit. Der experimentelle Sealer ist *EasySeal*® überlegen. Die angewandte Messmethodik zeigt bei mehrmaliger Anwendung stabile Ergebnisse innerhalb einer Messreihe, was die Versuchsmethodik positiv bewerten lässt und auf eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hinweist.

### VI 6.3.6 Infrarotspektroskopie

Der Nachweis einer Aushärtungsreaktion kann im IR-Spektrum eindeutig verifiziert werden. Insbesondere im „Fingerprint Bereich“ ( $1500\text{ cm}^{-1}$  und  $400\text{ cm}^{-1}$ ) sind charakteristische Unterschiede zu erkennen. Zum Beispiel die C-O Schwingungsbande, die in der Epoxid-Gruppe (Startmaterial) erscheint, aber auch im ausgehärteten Reaktionsprodukt in Form einer C-OH Bindung auftritt, verschiebt sich von  $1058\text{ cm}^{-1}$  auf  $1068\text{ cm}^{-1}$  (s. Graph. V 7). Dies beweist eindeutig, dass eine chemisch - strukturelle Veränderung durch den Aushärtungsprozess stattgefunden hat. Da durch den Aushärtungsprozess die restlichen Molekülkomponenten nicht verändert werden, sind die übrigen Banden in den IR-Spektren nahezu identisch geblieben. Allen Spektren gemeinsam ist die Existenz einer Bande bei  $1606\text{ cm}^{-1}$ , die auf die Existenz von Benzolringen zurückzuführen ist. Dies deckt sich damit, dass die im Handel befindlichen Sealer im Wesentlichen Bisphenol A Strukturen enthalten. Lediglich der Sealer *EvoSeal B* hat eine Aromaten-Bande bei  $1596,9\text{ cm}^{-1}$  bzw.  $1597,2\text{ cm}^{-1}$ , was auf die Verwendung neuartiger Epoxid-System hindeutet. Die Anwendung der IR-Spektroskopie stellt ein in der Durchführung schnelles Verfahren zur Analyse von Substanzen dar. Bei der Darstellung des IR-Spektrums werden mittels der Banden und deren Intensität Informationen über alle Verbindungen in der Probe angezeigt. Ein besonderer Vorteil der IR-Spektroskopie liegt darin, dass für die zu untersuchende Probe keine Reagenzien zur Derivatisierung angewandt werden müssen, sondern die Probe in ihre Ursprungsform verwendet werden kann. Ebenfalls kann jede Probe beliebig oft zur Analyse verwendet werden. Klinische Anwendungen der IR-Spektroskopie erfolgen zum Beispiel bei der Analyse von Blut/Serum, Urin oder Speichel. Mit Hilfe eines IR-Spektrums lassen sich im Blut Stoffe wie Albumin, Harnstoff, Glucose, Cholesterol, Triglyzeride oder das Gesamtprotein darstellen und werten. Alle diagnostisch bedeutsamen Verbindungen haben ebenfalls charakteristische IR-Spektren. So ist eine Analyse des Blutes sogar im Gemisch möglich. Mit Hilfe der IR-Spektroskopie ist es möglich, im Urin die Menge an Harnstoff zu ermitteln und somit Rückschlüsse auf mögliche Nierenfunktionsstörungen zu ziehen. Auch bei der Analyse von Speichel kann zum Beispiel die Thiocyanatkonzentration gemessen werden, welche bei  $2058\text{ cm}^{-1}$  eine charakteristische IR-Bande hervorruft.

Verglichen mit anderen klinischen Methoden, ist die IR-Spektroskopie bezüglich der Schnelligkeit der Durchführung oft überlegen. Kritisch zu bewerten ist, dass bei der Analyse von biologischen Proben nahezu immer Wasser in den Proben enthalten ist, welches im IR-Spektrum eine breite intensive Bande darstellt. Abhilfe kann durch Trocknung der zu untersuchenden Proben geschaffen werden. Bezugnehmend auf die vorliegende Untersuchung stellt die Analyse im Sinne einer IR-Spektroskopie der Sealmaterialien ein geeignetes und sehr präzises Testverfahren zur Darstellung der chemischen Strukturen vor und nach der Aushärtung dar.

### VI 6.3.7 pH-Wert Messung

Über einen Zeitraum von einem Monat wurden die pH-Werte der drei Testsealer (*AH Plus*®, *EasySeal*® und *EvoSeal A*) in regelmäßigen Abständen ermittelt. Ziel der Untersuchung sollte es sein, den genauen pH-Wert eines jeden Sealers zu ermitteln und pH-Wertänderungen über den Beobachtungszeitraum festzustellen. Bei allen Testsealern ist ein konstantes alkalisches Milieu festgestellt worden. In einem stark alkalischen Milieu sind die Mehrzahl endopathogener Bakterien nicht in der Lage zu überleben, da es zur Aufspaltung der Fettsäuren in der Zellwand der meisten gramnegativen Keime kommt<sup>154</sup>. Daher ist die alkalische Eigenschaft der Sealer als positiv zu bewerten. Alle Testsealer wurden in destilliertes Wasser appliziert und der pH-Wert mittels eines pH-Meters ermittelt. Bei dem experimentellen Sealer *EvoSeal A*, der sich am meisten alkalisch darstellte, zeigte sich bereits nach einer Minute ein pH-Wert von 10,37 und nach einem Monat von 10,84.

Bei *EasySeal*® wurde nach einem Monat ein pH-Wert von 10,50 und bei *AH Plus*® der niedrigste pH-Wert von 9,61 ermittelt. Alle Messungen blieben über den Zeitraum von einem Monat nahezu konstant.

Die Fragestellung nach einer pH-Wertänderung der Testsealer innerhalb eines Zeitraums von einem Monat lässt sich damit beantworten, dass keine pH-Wertänderung stattfindet. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist anzuführen, dass bei dem experimentellen Sealer *EvoSeal A* der alkalischste pH-Wert ermittelt werden konnte. Wie bereits beschrieben, führt dies zu einer Abtötung zahlreicher endopathogener Keime.

Daher ist die Frage nach gleicher oder besserer Eigenschaft bezüglich des pH-Wertes bei dem experimentellen Sealer als positiv zu beantworten. Als Vorteil ist die Methodik der Testreihe zu bewerten, da durch einen einfachen Versuchsaufbau Fehler vermieden oder schnell erkannt werden können.

### VI 6.3.8 Löslichkeit

Eine geringe Löslichkeit von Wurzelkanalsealern stellt ein wichtiges Kriterium eines Wurzelfüllmaterials dar. Nach den Vorgaben der *DIN EN ISO 6876: 2010-08-30* darf ein Sealmaterial die Löslichkeit von 3 % seines Massenanteils nicht überschreiten. Sealmaterialien können im Wurzelkanal und periapikal Gewebeflüssigkeiten ausgesetzt sein, welche zu einer Lösung eines Sealmaterials führen können. Das vitale Gewebe resorbiert die löslichen Anteile und es kann folglich zu einer Reinfektion des Endodonts kommen<sup>70</sup>. Ebenfalls kann eine Lösung des Sealmaterials zu Undichtigkeiten der Wurzelkanalfüllung führen. Auf Grund der genannten Gegebenheiten war es wichtig, die Löslichkeit der in dieser *in vitro* Studie getesteten Sealmaterialien zu ermitteln. Wie von der *DIN EN ISO 6876* beschrieben, wurden die Materialien anstatt einer Gewebeflüssigkeit Wasser ausgesetzt, um die Löslichkeit zu ermitteln. Weitere Versuche mit Gewebeflüssigkeiten oder Lösungsmitteln verschiedenen pH-Wertes könnten zur genaueren Ermittlung der Löslichkeit der Sealer beitragen. Die Ergebnisse in der vorliegenden Studie zeigen, dass alle Sealmaterialien innerhalb der geforderten Norm liegen und die Löslichkeit von 3% des Massenanteils eines jeden Sealers nicht überschreiten. Die geringste Löslichkeit konnte bei *AH Plus*® mit nur 0,142 % ermittelt werden. Ebenfalls nahezu unlöslich stellte sich das Testmaterial *EvoSeal A* mit 0,282 % Löslichkeit dar. *EasySeal*® wies die höchste Löslichkeit von 2,700 % auf.

Zur Eigenschaft der Löslichkeit ist ebenfalls die Überfüllung von Wurzelkanalmaterial zu diskutieren, da stärker lösliche Sealer auch leichter ins periapikale Gewebe gelangen können. Bei dem Fall der Überfüllung ist nicht immer zwangsläufig eine chirurgische Intervention im Sinne einer Wurzelspitzenresektion indiziert. Bei Gelangen von Guttapercha und / oder Sealer in das periapikale Gewebe werden diese in den meisten Fällen toleriert<sup>155</sup>. *AH Plus*® und einige Kalziumhydroxyd-Sealer werden sogar

resorbiert. Das Überfüllen von Wurzelfüllmaterial wird auch als „apikaler puff“ bezeichnet und ist bei einigen Behandlungstechniken sogar erwünscht<sup>156</sup>. Sobald das Wurzelfüllmaterial jedoch in den *canalis mandibularis* gelangt, kann es folglich zu Sensibilitätsstörungen des *n. mandibularis* im Sinne von Hyp-, Par- oder Anästhesien kommen. In diesem Fall ist das überfüllte Material sofort zu entfernen<sup>157</sup>.

Auf Grund der genannten Vorteile einer geringen Löslichkeit von Wurzelfüllmaterialien präsentieren *AH Plus*® und auch der experimentelle *EvoSeal A* ein sehr gutes Ergebnis. *EasySeal*® hingegen ist im Vergleich zu den anderen Sealern wesentlich stärker löslich. Die angewandte Methodik ist dahingehend zu kritisieren, dass die Löslichkeit der Testmaterialien in Wasser ermittelt wird. Im periapikalen Milieu liegen jedoch häufig Bakterien und deren Stoffwechselprodukte, Gewebeflüssigkeiten und Exsudate vor. Eine Untersuchung bezüglich der Löslichkeit der Testmaterialien in einem Milieu mit den genannten Materialien wäre daher sinnvoll, um reale Bedingungen zu imitieren.

#### VI 6.3.9 Antibakterielle Wirksamkeit

Verschiedene Testmethoden zu antibakteriellen Effekten von Sealmaterialien oder Spüllösungen sind in der Literatur beschrieben. In der vorliegenden *in vitro* Untersuchung wurde die antibakterielle Wirksamkeit in Anlehnung an die Vorgaben der *International Organisation of Standardisation* „Messung von antibakterieller Aktivität auf Kunststoff- und anderen porenfreien Oberflächen“ Norm-Entwurf 2011-08 (*ISO 22196*) durchgeführt. Unter anderem anders als in der Norm beschrieben, wurden die Tests an der Bakterienspezies *Streptococcus oralis* durchgeführt. Getestet werden sollte, wie sich die Sealmaterialien *AH Plus*®, *EasySeal*® und *EvoSeal A* bezüglich ihrer antibakteriellen Wirkung 24 Stunden und 3 Wochen nach Anmischung der Sealmaterialien verhalten. Der Testzeitpunkt, 3 Wochen nach der Sealeraushärtung, sollte aufzeigen, ob die Materialien auch nach der vollständigen Aushärtung noch antibakterielle Wirkungen erzielen. Hierbei sollten eventuell toxische Abbindeprodukte keine Rolle mehr spielen. Wie in IV 4.3 beschrieben, wurden die Versuchsreihen durchgeführt und die entstandenen Bakterienkolonien auf den Agarplatten ausgezählt. Die entstandenen Bakterienkolonien stellten sich nach dem Median nach 24 Stunden Sealeraushärtung folgend dar: *EasySeal*® (1 Kolonie), *AH Plus*® (23 Kolonien) und

*EvoSeal A* (1491 Kolonien), nach 3 Wochen in folgender Reihenfolge: *EasySeal*® (1 Kolonie) *EvoSeal A* (17 Kolonien) und *AH Plus*® (34217 Kolonien). Dieses Ergebnis zeigt, dass *AH Plus*® 24 Stunden nach Anmischung eine antibakterielle Wirkung auf den Keim *Streptococcus oralis* ausübt, während nach einer Aushärtezeit von 3 Wochen keine antibakterielle Wirkung mehr von *AH Plus*® auf den genannten Keim ausgeht. *EasySeal*® hingegen zeigt eine deutliche antibakterielle Wirkung sowohl 24 Stunden als auch 3 Wochen nach Anmischung des Sealers. Der Testsealer *EvoSeal A* weist nach den vorliegenden Ergebnissen keine antibakterielle Wirkung 24 Stunden nach Sealeranmischung auf, wobei in der zweiten Versuchsreihe nach 3 Wochen eine deutliche antibakterielle Wirkung von *EvoSeal A* auf den Keim, *Streptococcus oralis*, ausgeht. Zu beobachten war, dass trotz exakt gleicher Versuchsdurchführung die zwanzig Ergebnisse einer Versuchsreihe nicht immer einheitlich waren und einzelne Proben deutlich außerhalb des Durchschnitts lagen (s. Tabelle V 8.1).

Aus diesem Grunde eignet sich für Beurteilung der Ergebnisse jeweils der Medianwert. Für die graphische Darstellung stellt das Boxplot-Diagramm eine gute Methode dar, da dem Betrachter unter anderem die Extremwerte sowie der Median direkt ersichtlich werden. Auch stellten sich die positiv-Kontrollen in allen Versuchsreihen sehr unterschiedlich dar. Zu diskutieren ist daher, welche Aussagekraft die Versuchsreihe „Antibakterielle Wirksamkeit“ auf Grund der teilweise sehr unterschiedlichen Ergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe hat. Unerkannte Fehlerquellen in der Bakterienhandhabung oder der Versuchsmethodik könnten ein Grund für die Differenzen sein. Ebenfalls ist zu diskutieren, ob die deutlich höhere Löslichkeit von *EasySeal*® mehr Materialanteile in die aufgebrachte Bakteriensuspension diffundieren lässt und somit zu deutlich besseren antibakteriellen Eigenschaften führt. Bei einer antibakteriellen Wirksamkeit von Stoffen muss auch die Gewebereaktion dieser Materialien kritisch untersucht werden. Es existieren nur wenige und teilweise widersprüchliche, tierexperimentelle Studien zur Gewebereaktion von *AH Plus*®. Eine Studie von *Koulaouzidou et al.* untersuchte die Reaktion von *AH Plus*® und *AH 26*® auf Pulpazellen von Ratten und Hautfibroblasten von Mäusen. Hierbei stellte sich heraus, dass *AH Plus*® eine wesentlich geringere zytotoxische Wirkung als *AH 26*® auf die Zellen hat<sup>158</sup>. Bezüglich eines mutagenen Effektes von *AH Plus*® wurde eine Studie von *Leyhausen* durchgeführt, der zwar einen Beweis für eine Beeinträchtigung von Zellen erbringen, nicht aber einen mutagenen Effekt nachweisen konnte<sup>103</sup>.

Ein widersprüchliches Ergebnis lieferte eine Studie von *Huang et al.*, die mit Hilfe einer sensitiven Methode DNA-Schädigungen an Zellen, hervorgerufen durch drei Epoxidharz-Sealer (*AH Plus*® , *TopSeal*® , *AH 26*®), feststellte. Durch alle drei getesteten Sealer wurden innerhalb der ersten 24 Stunden nach Anmischung der Materialien dosisabhängige DNA-Schädigungen hervorgerufen.

Nach 24 Stunden waren keine mutagenen Effekte mehr nachweisbar. Diskutiert wird, ob der mutagene Effekt auf unpolymersierte Bestandteile der Epoxid-Komponente zurückgeht<sup>104</sup>. Anders als bei *AH 26*® wird vom Hersteller bei *AH Plus*® kein Hexamethylentetramin, welches für die Freisetzung von Formaldehyd verantwortlich ist, mehr angegeben. Hexamethylentetramin wird aus Formaldehyd und Ammoniak synthetisiert und spaltet im sauren Milieu Formaldehyd ab. Die zytotoxische und DNA schädigende Wirkung von Formaldehyd wurde in vielen Studien belegt<sup>159,160</sup>. Wie bereits oben erwähnt, sind bezüglich der angewandten Versuchsmethodik weitere Alternativen zu diskutieren. In einer Studie von *Eldeniz et. al.* aus dem Jahre 2006 wurde ebenfalls die antibakterielle Eigenschaft von sechs Sealern (*EndoREZ*®, *AH 26*®, *Diaket*®, *Sultan*®, *Apexit*® *RoekoSeal*®) untersucht. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass die Sealer *EndoREZ*®, *Apexit*® sowie *RoekoSeal*® keine antibakterielle Aktivität zeigen<sup>161</sup>.

*AH 26*® und *Sultan*® hingegen erwiesen sich als potente Hemmer des bakteriellen Wachstums. Das Studiendesign stellt ein anderes als das in dieser Arbeit vorgestellte dar und könnte eine Alternative für zukünftige Studien sein. Die Auswahl der Bakterien bestand aus den Keimen *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus* und *Pseudomonas aeruginosa*. Zur Anwendung kam der „Agardiffusionstest“. Hierzu wurde eine Bakterienmenge von 200 µl auf den Agarplatten ausgestrichen und das zu testende Sealmaterial in einen vorgestanzten Bereich der Agarplatte eingefüllt. Es fand nach festgelegten Zeitpunkten eine Hemmhofbestimmung statt. Ebenfalls wurde in der zitierten Studie der „Direkte-Kontakt-Test“ angewandt, der ähnlich wie in der vorliegenden *in vitro* Studie durchgeführt wurde. Weitere Versuchsreihen mit eventuell anderen Bakterienspezies und/oder anderer Versuchsmethodik wären zukünftig notwendig, um eine genauere Aussage über die antibakterielle Wirksamkeit der hier getesteten Sealmaterialien treffen zu können. Auch sind für eine Beurteilung der Zytotoxizität und Mutagenität der experimentellen Sealer *in vivo* Untersuchungen durchzuführen.

## VII Zusammenfassung

### Hintergrund und Ziele

Im Rahmen der endodontischen Therapie spielen die verwendeten Wurzelfüllmaterialien eine wichtige Rolle für den Erfolg der Wurzelkanalbehandlung. Daher ist die stetige Weiterentwicklung und Verbesserung dieser Materialien wichtig. Das Ziel einer Wurzelfüllung besteht darin, mit Hilfe der Füllmaterialien einen dichten, gewebeverträglichen, möglichst antibakteriellen Verschluss des Wurzelkanalsystems zu erreichen. In dieser in vitro Studie wurden die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften eines experimentellen Wurzelfüllsealers (*EvoSeal A* [EA]) mit denen zweier gebräuchlicher Sealer (*AH Plus* [AP] und *EasySeal* [ES]) verglichen. Ziel der Untersuchung war es, die chemisch-physikalischen sowie die antibakteriell-antiseptischen Eigenschaften zu ermitteln, und diese mit zwei auf dem Markt befindlichen Sealern auf Epoxidharzbasis zu vergleichen.

### Material und Methode

Der Testsealer EA wurde im Vergleich zu den Sealern AP (Goldstandard) und ES in Bezug auf Filmdicke, Fließfähigkeit, Abbindezeit, Röntgensichtbarkeit und die Löslichkeit der Testmaterialien nach den Vorgaben des Norm-Entwurfs 2010-08-30 (DIN EN ISO 6876) getestet. Die angewandte Versuchsmethodik wurde nach den Vorgaben des „Deutschen Institutes für Normung“ (DIN) durchgeführt, um standardisierte, vergleichbare und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. In Anlehnung an die Norm DIN 13907 2007-01 wurde der Volumenschwund der Sealer ermittelt. Die Testung der antibakteriellen Wirksamkeit der Materialien wurde in Anlehnung an die Norm ISO 22196: 2011 (E) durchgeführt, während die Messung der pH-Werte nach einem auf die fließfähigen Sealer angepassten Verfahren erfolgte.

## Ergebnisse

EA entspricht allen geforderten Normvorgaben im Sinne der DIN EN ISO 6876, 2010-08-30 in Bezug auf Filmdicke, Fließfähigkeit, Abbindezeit, Röntgensichtbarkeit sowie der Löslichkeit. EA weist signifikant die größte Filmdicke im Vergleich zu AP und ES auf ( $p \leq 0.001$ ). Eine signifikant geringere Fließfähigkeit hat EA im Vergleich zu AP ( $p = 0,0353$ ). Die kürzeste Abbindezeit wurde bei EA mit 2,95 h im Vergleich zu AP (24 h) und ES (4,1 h) signifikant ermittelt ( $p \leq 0.001$ ). EA zeigt eine signifikant bessere Röntgensichtbarkeit als ES ( $p \leq 0.001$ ) und eine geringere als AP ( $p \leq 0.001$ ). Die Messergebnisse zur Löslichkeit lieferten bei EA eine signifikant geringere als bei ES ( $p = 0,0188$ ). Zwischen EA und AP konnten bezüglich der Löslichkeit keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Der signifikant alkalischste pH-Wert wurde nach einem Messzeitraum von einem Monat bei EA im Vergleich zu AP und ES ermittelt ( $p \leq 0.001$ ). Keine signifikanten Unterschiede lieferten die Ergebnisse zur Volumenschrumpfung. Die mikrobiologische Untersuchung zeigte bei ES ermittelt nach dem Median mit 0 gewachsenen Kolonien, die deutlichsten antibakteriellen Eigenschaften. AP wies nur kurz nach der Materialanmischung und EA nur 3 Wochen nach der Sealeranmischung eine antibakterielle Wirkung auf den Testkeim auf.

## Schlussfolgerungen

In dieser in vitro Studie wurde gezeigt, dass der Testsealer EA bezüglich der untersuchten physikalischen und chemischen Eigenschaften vergleichbare Ergebnisse wie die gebräuchlichen Sealer AP und ES erreicht. Der Sealer könnte somit sowohl auf den Markt gebracht, als auch für weitere Optimierungen und in vivo Versuche verwendet werden. Für die Beurteilung der antibakteriellen Eigenschaften sind weitere Versuche notwendig.

## VII Summary

### Background and Objectives

As part of endodontic therapy the root canal material used plays an important role in the success of root canal treatment. Therefore the continuous development and improvement of these materials is important. The target of a root filling is to obtain a dense, tissue-compatible and preferably antibacterial occlusion of the root canal system with the aid of fillers. In this in vitro study the physical, chemical and biological properties of an experimental root canal sealer (*EvoSeal A* [EA]) were compared with those of two common sealers (*AH Plus* [AP] and *EasySeal* [ES]). The aim of this study was to determine the physico-chemical and antibacterial antiseptic properties and to compare these with two commercial sealers based on epoxy.

### Materials and methods

The test sealer EA was tested in comparison to the sealers AP (gold standard) and ES in terms of film thickness, flowability, setting time, radiopacity and solubility of the test materials according to the requirements of the draft standard 2010-08-30 (ISO 6876). The test method was performed in compliance with the provisions of the "German Institute for Standardization" (DIN) to obtain standardized, comparable and meaningful results. In accordance with the standard DIN 13907 2007-01, the volume shrinkage of the sealer was determined. The testing of the antibacterial activity of the materials was performed based on the standard ISO 22196: 2011 (E). Measuring the pH values was carried out according to the flowable sealer method.

## Results

EA meets all the required standard specifications of DIN EN ISO 6876, 2010-08-30 in terms of film thickness, flowability, setting time, radiopacity and solubility. EA significantly has the largest film thickness compared to AP and ES ( $p \leq 0.001$ ). EA has a significantly lower flowability compared to AP ( $p = 0.0353$ ). The shortest setting time was significantly determined ( $p \leq 0.001$ ) at EA with 2.95 h compared to AP (24 h) and ES (4.1 h). EA shows a significantly better radiopacity than ES ( $p \leq 0.001$ ) and a lower one than AP ( $p \leq 0.001$ ). The measurement results for the solubility of EA were significantly lower than in ES ( $p = 0.0188$ ). No significant differences in solubility could be determined between EA and AP. The significantly most alkaline pH was measured after a period of one month at EA compared to AP and ES ( $p \leq 0.001$ ). The results concerning the volume shrinkage showed no significant differences. The microbiological investigation showed the most significant antibacterial properties with ES. It was determined according to the median of 0 grown colonies. AP only had an antibacterial effect on the test organism shortly after the material mixing, EA only 3 weeks after the sealer mixing.

## Conclusions

This in vitro study showed that the experimental sealer EA achieved comparable results to the conventional sealer AP and ES with respect to the studied physical and chemical properties. The sealer could thus be brought to the market as well as be used for further optimization and in vivo experiments. For the assessment of the antibacterial properties further tests are necessary.

## IX Literaturverzeichnis

1. Andresen V:  
Verbesserte Methoden der Wurzelkanalbehandlung.  
Dtsch Mschr Zahnheilk 30, 200-216 (1912).
2. Harndt R:  
Pulpitis an nicht kariösen Zähnen.  
Dtsch Zahnärztekalendar 26, 87-95 (1967).
3. Europäische Gesellschaft für Endodontologie:  
Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlungen.  
Endodontie 15 (4), 387- 401 (2006).
4. DGZMK, DGZ Wissenschaftliche Stellungnahme:  
Wurzelkanalaufbereitung.  
Dtsch Zahnärztl Z 55, 719 (2000).
5. Schäfer E:  
Wurzelkanalfüllmaterialien - Ein Überblick.  
Endodontie 10 (4), 337-348 (2001).
6. McMichen FRS, Pearson G, Rahbaran S, Gulabivala K:  
A comparative study of selected physical properties of five root-canal sealers.  
Int Endod J 36, 629-635 (2003).
7. Huuonen S, Lenander-Lumikari M, Sigurdsson A, Ostravik D:  
Healing of apical periodontitis after endodontic treatment:  
a comparison between a silicone-based and zinc oxide-eugenol-based sealer.  
Int Endod J 36, 296-301 (2002).
8. DGZMK, DGZ Wissenschaftliche Stellungnahme:  
Wurzelkanalfüllpasten und Füllstifte.  
Dtsch Zahnärztl Z 55, 9-11 (2000).
9. Hellwig E, Klimek J, Attin T:  
Einführung in die Zahnerhaltung, 4. Auflage.  
München: Elsevier Urban und Fischer, 303-344 (2007).
10. European Society of Endodontology (ESE):  
Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the  
European Society of Endodontology.  
Endodontie 263, 759-761 (2004).

11. DGZMK, DGZ Wissenschaftliche Stellungnahme:  
Wurzelkanalaufbereitung.  
Dtsch Zahnärztl Z 55 (2000).
12. Wesselink PR:  
Die Wurzelkanalfüllung.  
Endodontie 4, 181-188 (1995).
13. Schäfer, E:  
Wurzelkanalinstrumente für den manuellen Einsatz; Schneideleistung und  
Formgebung gekrümmter Kanalabschnitte.  
Berlin: Quintessenz (1998).
14. Clem WH:  
Endodontics: the adolescent patient.  
Dent Clin North Am 13, 483 (1969).
15. Schäfer E, Lohmann D:  
Efficiency of rotary nickel-titanium FlexMaster instruments compared  
with stainless steel hand K-Flexofile - Part 2. Cleaning effectiveness and  
instrumentation results in severely curved root canals of extracted teeth.  
Int Endod J 35, 514-21 (2002).
16. Georig AC, Michelich RJ, Schultz HH:  
Instrumentation of root canals in molar using the Step-down technique.  
Int Endod J 8, 550-554 (1982).
17. Young GR, Parashos P, Messer HH:  
The principles of techniques for cleaning root canals.  
Austr Dent J Suppl 52, 52-63 (2007).
18. Beer R, Baumann MA:  
Endodontie.  
In: Rateitschak, K. H., Wolf, HF (Hrsg):  
Farbatlant der Zahnmedizin. Band 7  
Stuttgart, New York: Thieme (1997).
19. Inan U, Gonulol N:  
Deformation and fracture of Mtwo rotary nickeltitanium instruments  
after clinical use.  
Int Endod J 35, 1396-1399 (2009).
20. Andreasen GF, Marrow RE:  
Laboratory and clinical analyses of nitinol wire.  
American J Orthodont 73, 142-151 (1978).

21. Sonntag D, Delschen S, Stachniss V:  
Root-canal shaping with manual and rotary Ni-Ti files performed by students.  
*Int Endod J* 36, 715-23 (2003).
22. Sonntag D, Guntermann A, Kim SK, Stachniss V:  
Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students.  
*Int Endod J* 36, 246-55 (2003).
23. Gluskin AH, Brown DC, Buchanan LS:  
A reconstructed computerized tomographic comparison of Ni-Ti rotary GT files versus traditional instruments in canals shaped by novice operators.  
*Int Endod J* 34, 476-84 (2001).
24. Byström A, Sundqvist G:  
Bacteriologic evaluation of the efficacy of mechanical root canal instrumentation in endodontic therapy.  
*Scand J Dent Res.* 89, 321-328 (1981).
25. Schäfer E:  
Antimikrobielle Wurzelkanalspülung.  
*Dtsch Zahnärztl Z* 60 (3), 127-128 (2005).
26. Hülsmann M:  
Die Wurzelkanalspülung - Ziele, Mittel, Techniken.  
*Endodontie* 1, 47-62 (1997).
27. Abou-Rass, M, Piccinino MV:  
The effectiveness of four clinical irrigation methods on the removal of root canal debris.  
*Oral Surg Med Oral Pathol* 54, 323-328 (1982).
28. Vianna ME, Horz HP, Gomes BP, Conrads G:  
In vivo evaluation of microbial reduction after chemo-mechanical preparation of human root canals containing necrotic pulp tissue.  
*Int Endod J* 39, 484-492 (2006).
29. Europäische Gesellschaft für Endodontologie:  
Qualitätsrichtlinien endodontische Behandlungen.  
*Endodontie* 13 (1994).
30. Schäfer E:  
Wurzelkanalfüllmaterialien.  
*Dtsch Zahnärztl Z* 55, 15 - 25 (2000).
31. Guldener PHA, Langeland K:  
In: Endodontologie.  
Stuttgart, New York: Thieme, 197-211 (1993).

32. Wu MK, Özok AR, Wesselink PR:  
Sealer distribution in root canals obturated by three techniques.  
Int Endod J 26, 340-345 (2000).
33. Die Guttaperchafüllung des gekrümmten Wurzelkanals.  
ZWR 102, 413-420 (1993).
34. Wesselink PR:  
Conventional root canal therapy, III: root filling.  
Endodontics in clinical practice (ed: Harty, F. J.) Wright, Sevenoaks (1990).
35. Roggendorf MJ, Ebert J, Petschelt A, Frankenberger R:  
Influence of moisture on the apical seal root canal fillings with five different types of sealer.  
Int Endod J 33, 31-33 (2007).
36. Wong M, Peters DD, Lorton L, Bernier WE:  
Comparison of guttapercha filling techniques: three chloroform-guttapercha filling techniques, Part II.  
Int Endod J 8, 4-9 (1982).
37. O'Neil KJ, Pitts DL, Harrington GW:  
Evaluation of the apical seal produced by the McSpradden compactor and by lateral condensation with chloroform-softened primary cone.  
Int Endod J 9, 190-197 (1983).
38. Russin TP, Zardiachas LD, Reader A, Mencke RA:  
Apical seals obtained with laterally condensed chloroform-softened guttapercha and laterally condensed gutta-percha and Grossman's sealer.  
Int Endod J 6, 678-682 (1980).
39. Schilder H:  
Filling Root Canals in Three Dimension.  
Dent Clin N Am 11, 723-744 (1967).
40. Gençoglu N, Garip Y, Bas M, Samani S:  
Comparison of different guttapercha root filling techniques : Thermafil, Quickfill, System B and lateral condensation.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 93, 333-336 (2002).
41. Jacobson HL, Xia, T, Baumgartner JC, Marshall JG, Beeler WJ:  
Microbial leakage evaluation of the continuous wave of condensation.  
Int Endod J 28, 269-271 (2002).
42. Stoll R, Stachniss V:  
Vertikale Kondensationstechniken für thermisch plastifizierte Guttapercha.  
Zahnärztl Mitt 8, 40-44 (2006).

43. Heidemann D:  
Die Wurzelfüllung – manuell – maschinell.  
Dtsch Zahnärztl Z 44, 414-416 (1989).
44. Hülsmann M:  
Die Wurzelkanalfüllung mit Silberstiften.  
Endodontie 4, 49-62 (1995).
45. Schäfer E:  
Wurzelkanalfüllmaterialien – Ein Überblick (Teil 2).  
Endodontie 11, 55-64 (2002).
46. Dummer PM, Kelly T, Meghji A, Sheikh I, Vanitchai JT:  
An in vitro study of the quality of root fillings in teeth obturated by lateral condensation of guttapercha or Thermafil obturators.  
Int Endod J 26, 99-105 (1993).
47. Weine FS:  
Canal filling with semisolid materials.  
In: Weine FS, editors. Endodontic Therapy. 5th ed. St. Louis  
Mosby Year Book, 423-477 (1996).
48. Friedman CM, Sandrik JL, Heuer MA, Rapp GW:  
Composition & mechanical properties of gutta-percha endodontic points.  
J Dent Res 54, 921-925 (1975).
49. Hülsmann M:  
Guttapercha – Geschichte, Chemie, Eigenschaften und Verarbeitung.  
Endodontie 2, 115-125 (1993).
50. Mannocci F, Ferrari M:  
Apical seal of roots obturated with laterally condensed gutta-percha, epoxy resin cement and dentin bonding agent.  
Int Endod J 24, 41-44 (1998).
51. Schroeder A:  
Mitteilungen über die Abschlußdichtigkeit von Wurzelfüllmaterialien und erster Hinweis auf ein neuartiges Wurzelfüllmittel.  
Monatsschr Zahnmed Schweiz 64, 921-31(1954).
52. Ørstavik D, Kerekes K, Eriksen HM:  
The periapical index: a scoring system for radiographic assessment of apical periodontitis  
Endod Dent Traumatol 2, 20-34 (1986).

53. Nakamura H, Sakakibara F, Matsumoto Y, Hirano S, Hayakawa H, Sakai K, Morris Y:  
Study on the cytotoxicity of root canal filling materials.  
J Endod 12, 156 (1986).
54. Briseno B M, Willershausen B:  
Root canal sealer cytotoxicity on human gingival fibroblasts. II. Silicone- and resin- based sealers.  
J Endod 17, 537 (1991).
55. Klaiber B, Mittermayer C, Kaden P, Schwechten I:  
Toxizitätsbestimmung von Wurzelfüllmaterialien und deren einzelnen Komponenten in der Zellkultur.  
Dtsch Zahnärztl Z 36, 212 (1981).
56. Rödiger T, Attin T, Hülsmann M:  
Die Wurzelkanalsealer AH26, AH Plus und RoekoSeal-  
Eine Literaturübersicht  
Endodontie 14, 153-176 (2005).
57. Mc Comb D, Smith DC:  
Comparison of physical properties of polycarboxylate-based and conventional root canal sealers.  
Int Endod J 2, 228-235 (1976).
58. Van Meerbeek B., Braem M., Lambrechts P., Vanherle G:  
Dentinhaftung: Mechanismen und klinische Resultate.  
Dtsch Zahnärztl Z 49, 977-984 (1994).
59. Kouvas V, Liolios E, Vassiliadis L, Parissis-Messimeris S, Boutsoukis A:  
Influence of smear layer on depth of penetration of three endodontic sealers: an SEM study  
Endod Dent Traumatol 14, 191-195 (1998).
60. Yamada RS, Armas A, Goldman M, Lin PS:  
A scanning electron microscopic comparison of a high volume final flush with several irrigating solutions: Part 3.  
Int Endod J 9, 137-142 (1983).
61. Eldeniz U, Erdemir A, Belli S:  
Shear bond strength of three resin based sealers to dentin with and without the smear layer.  
Int Endod J 31, 293-296 (2005).
62. Osborn J F:  
Biomaterials and their application to implantation.  
SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd 89, 1138-1139 (1979).

63. De Moor RJ, De Bruyne MA:  
The longterm sealing ability of AH 26 and AH Plus used with three guttapercha obturation techniques.  
Quintessence Int 35, 326-331 (2004).
64. Barthel CR, Noack MJ, Roulet JF:  
Die Dichtigkeit von Ketac Endo und AH26 in Abhängigkeit der Wurzelfülltechnik in vitro.  
Dtsch Zahnärztl Z 49, 285-288 (1994).
65. De Almeida WA, Leonardo MR, Tanamaru Filho M, Silva LA:  
Evaluation of apical sealing of three endodontic sealers.  
Int Endod J 33, 25-27 (2000).
66. Limkangwalmongkol S, Burtscher P, Abbott PV, Sandler AB, Bishop BM:  
A comparative study of the apical leakage of four root canal sealers and laterally condensed gutta-percha.  
Int Endod J 17, 495-499 (1991).
67. Krüger T:  
Einfluss verschiedener Obturationstechniken und Sealer auf die apikale Dichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen.  
Hochschulschrift Halle, Univ., Medizinische Fakultät, Diss. (2009).
68. Rucker N:  
Dichtigkeitsuntersuchung von sechs unterschiedlichen Wurzelkanalfüllmaterialien - eine Langzeitstudie.  
Hochschulschrift Erlangen-Nürnberg, Univ., Medizinische Fakultät, Diss. (2001).
69. Ørstavik D:  
Weight loss of endodontic sealers, cements and pastes in water.  
Scand J Dent Res 91, 316-319 (1983).
70. Ørstavik D, Kerekes K, Eriksen HM:  
Clinical performance of three endodontic sealers.  
Endod Dent Traumatol 3, 178-186 (1987).
71. Leonardo MR, da Silva LA, Almeida WA, Utrilla, LS:  
Tissue response to an epoxy resin-based root canal sealer.  
Endod Dent Traumatol 15, 28-32 (1999).
72. Geurtsen W, Leyhausen G:  
Biological aspects of root canal filling materials - histocompatibility, cytotoxicity, and mutagenicity.  
Clin Oral Investig 1, 5-11 (1997).

73. Gerosa, R, Borin M, Menegazzi G, Puttini M, Cavalleri G:  
In vitro evaluation of the cytotoxicity of pure eugenol.  
Int Endod J 22, 532-534 (1996).
74. Guigand M, Pellen-Mussi P, Vulcain JM, Bonnaura-Mallet M:  
Evaluation of the cytocompatibility of three endodontic materials.  
Int Endod J 25, 419-423 (1999).
75. Schäfer E:  
Wurzelkanalfüllmaterialien  
Stomatologie 3, 73-85 (2000).
76. Wrbas KT, Kielbassa AM, Hellwig E:  
Das Wasseraufnahmeverhalten verschiedener Wurzelkanalsealer.  
Dtsch Zahnärztl Z 53,146-150 (1998).
77. Tagger M, Tagger E, Tjan AHL, Bakland LK:  
Measurement of adhesion of endodontic sealers to dentin.  
Int Endod J 28, 351-354 (2002).
78. Ersev H, Schmalz G, Bayirli G, Schweikl H:  
Cytotoxic and mutagenic potencies of various root canal filling materials  
in eukaryotic and procaryotic cells invitro.  
Int Endod J 25, 359-363 (1999).
79. Wu MK, Wesselink PR, Boersma J:  
A1-year follow-up study on leakage of four root canal sealers at different  
thicknesses.  
Int Endod J 28, 185-189 (1995).
80. Ray H, Seltzer S:  
A new glass ionomer root canal sealer.  
Int Endod J 17, 598 (1991).
81. Ørstavik D, Mjör IA:  
Histopathology and X-ray microanalysis of the subcutaneous tissue  
response to endodontic sealers.  
Int Endod J 14, 13 (1988).
82. Matsumoto K, Inoue K, Matsumoto A:  
The effect of newly developed root canal sealers on rat dental pulp cells in  
primary culture.  
Int Endod J 15, 60 (1989).
83. Olsson B, Wennberg A:  
Early tissue reaction to endodontic filling materials.  
Endod Dent Traumatol 1, 138 (1985).

84. Thoden Van Velzen SK, Genet PR, Kersten HW, Moorerw R, Wesselink PR:  
Endodontie, Deutscher Ärzte-Verlag, Köln 1988.
85. Gambarini G, Andreasi-Bassi M, Bolognini G, Testarelli L, Nacca G, Ceccarelli L, Scatena R, Lupi A, Castagnola M:  
Cytotoxicity of a new endodontic filling material.  
Aust Endod J 29, 17-19 (2003).
86. Tagger M, Tagger E., Kfir A:  
A release of calcium hydroxyl ions from set endodontic sealers containing calcium hydroxide.  
Int Endod J 14, 588-591 (1988).
87. Caicedo R, Von Fraunhofer JA:  
The properties of endodontic sealer cements.  
Int Endod J 14, 527 (1988).
88. Llmkangwalmongkol S, Abbott PV, Sandler AB:  
Apical dye penetration with four root canal sealers and gutta-percha using longitudinal sectioning.  
Int Endod J 18, 535 (1992).
89. Barkhordar RA, Bui T, Watanabe L:  
An evaluation of sealing ability of calcium hydroxide sealers.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 68, 88 (1989).
90. Jacobsen EL, Begole EA, Vitkus DD, Daniel JC:  
An evaluation of two newly formulated calcium hydroxide cements:  
a leakage study.  
Int Endod J 13, 164 (1987).
91. Zmener O:  
Evaluation of the apical seal obtained with two calcium hydroxide based endodontic sealers.  
Int Endod J 20, 87 (1987).
92. Tronstad L, Barnett F, Flax M:  
Solubility and biocompatibility of calcium hydroxide-containing root canal sealers.  
Endod Dent Traumatol 4, 152 (1988).
93. Withworth J:  
Sealer selection: a considered approach.  
Endod Prac 2, 31 (1999).

94. Ebert J, Loeffler H, Zels H, Petschelt A:  
Sealing ability of RoekoSeal-Automix under different conditions.  
Posterpräsentation,  
ESE Kongress, Göteborg, Schweden (1997).
95. Ebert J, Petschelt A:  
Sealing ability of a new silicone-based sealer under different conditions.  
Posterpräsentation,  
IADR-Tagung, Vancouver, Kanada (1999).
96. Gençoglu N, Türkmen C, Ahiskali R:  
A new silikon-based root canal sealer (RoekoSeal®-Automix).  
J Oral Rehabil 30, 753-755 (2003).
97. Ørstavik D, Nordahl I, Tibballs JE:  
Dimensional change following setting of root canal sealer materials.  
Dent Mater 17, 512-519 (2001).
98. Gebrauchsanweisung GuttaFlow:  
Coltene-Whaledent, Langenau, Deutschland (2008).
99. Bouillaguet S, Shaw L, Barthelemy J, Krejci I, Wataha JC:  
Long term saeling ability of Pulp Canal Sealer, AH-Plus, GuttaFlow and  
Epiphany.  
Int Endod J 41, 219-226 (2008).
100. Ørstavik D, Nordahl I, Tibballs JE:  
Dimensional change following setting of root canal sealer material.  
Scand J Dent Res 91, 316-319 (2001).
101. ElAyouti A, Achleithner C, Löst C, Weiger R:  
Homogeneity and adaptation of a new gutta-percha paste to root canal walls.  
Int Endod J 31, 687-690 (2005).
102. Ozok AR, van der Sluis LW, Wu MK, Wesselink PR:  
Saeling ability of a new polydimethylsiloxane-based root canal filling material.  
Int Endod J 34, 204-207 (2008).
103. Leyhausen G, Heil J, Reifferscheid G, Waldmann P, Geurtsen W:  
Genotoxicity and cytotoxicity of the epoxy resin-based root canal sealer AH Plus.  
J Endod 25, 109-113 (1999).
104. Huang FM, Tai KW, Chou MY, Chang YC:  
Cytotoxicity of resin-, zinc oxide- eugenol-, and calcium hydroxide-based root  
canal sealers on human periodontal ligament cells and permanent V79 cells.  
Int Endod J 35, 153-158 (2002).

105. Tagger M, Katz A, Tamse A:  
Apical seal using the GPII method in straight canals compared with lateral condensation, with or without sealer.  
Org Surg Oral Med Oral Pathol 78, 225-231 (1994).
106. Hülsmann M, Meyer G:  
Preparation of root canals.  
Zahnärztl Mitt 81, 864-870 (1991).
107. Bhambhani SM, Sprechman K:  
Microleakage comparison of Thermafil versus vertical condensation using two different sealers.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 78, 105-108 (1994).
108. Peters DD:  
Two-year in vitro solubility of four gutta-percha sealer obturation techniques.  
J Endod 12, 139-145 (1986).
109. Wu MK, Wesselink PR, Boersma J:  
A 1-year follow-up study on leakage of four root canal sealers at different thicknesses.  
Int Endod J 28, 185-189 (1995).
110. Greene HA, Wong M, Ingram TA:  
Comparison of the sealing ability of four obturation techniques.  
J Endod 9, 423-428 (1990).
111. Langeland K:  
Root canal sealers and pastes.  
Dent Clin North Am 18, 309-327 (1974).
112. Thonemann B, Federlin M, Schmalz G:  
Die adhäsive Wurzelkanalfüllung.  
Bayrisches Zahnärzteblatt April, 29-31 (2007).
113. Barnett F, Trope M:  
Resilon: A novel material to replace gutta percha.  
Contemp Endod 1, 16-19 (2004).
114. Shipper G, Ørstavik D, Teixeira FB, Trope M:  
An evaluation of microbial leakage in roots filled with a thermoplastic synthetic polymer-based root canal filling material (Resilon).  
J Endod 30, 342-347 (2004).
115. Shipper G, Teixeira FB, Arnold RR, Trope M:  
Periapical inflammation after coronal microbial inoculation of dog roots filled with gutta-percha or Resilon.  
J Endod 31, 91-96 (2005).

116. Teixeira FB, Teixeira ECN, Thompson JY, Trope M:  
Fracture resistance of roots endodontically treated with a new resin filling material.  
J Am Dent Assoc 135, 646-652 (2004).
117. Tay FR, Pashley DH, Williams MC, Raina R, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF, King NW:  
Susceptibility of a polycaprolactone-based root canal filling material to degradation. I. Alkaline hydrolysis.  
J Endod 31, 593-598 (2005).
118. Tay FR, Loushine RJ, Lambrechts P, Weller RN, Pashley DH:  
Geometric factors affecting dentin bonding in root canals: A theoretical modeling approach.  
J Endod 31, 584-589 (2005).
119. Paqué F, Sirtes G:  
Apical sealing ability of Resilon/Epiphany versus gutta-percha/AH Plus: immediate and 16-months leakage.  
Int Endod J 40, 722-729 (2007).
120. Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR:  
Leakage of AH26 and Ketac-Endo used with injected warm gutta-percha.  
J Endod 23, 331-336 (1997).
121. Facer SR, Walton RE:  
Intracanal distribution patterns of sealers after lateral condensation.  
J Endod 29, 832-834 (2003).
122. DGZMK, Wissenschaftliche Stellungnahme:  
Anwendung aldehydfreisetzender zahnärztlicher Materialien.  
Dtsch Zahnärztl Z 52, 772 (1997).
123. Brodin P, RØed A, Aars H, Ørstavic D:  
Neurotoxic effects of root filling materials on rat phrenic nerve in vitro.  
J Dent Res 61, 1020 (1982).
124. Hongy C, Wang JT, Hong CY, Brown WE, Chow LC:  
The periapical tissue reactions to a calcium phosphate cement in the teeth of monkeys.  
J Biomed Mater Res 25, 485 (1991).
125. Wayman BE, Murata SM, Aleida RJ, Fowler CB:  
A bacteriological and histological evaluation of 58 periapical lesions.  
Int Endod J 18, 152 (1992).

126. DGZMK, DGZ Wissenschaftliche Stellungnahme zu der Anfrage des Bundesinstituts für Arzneimittel und Medizinprodukte über die Anwendung (para)-formaldehydhaltiger Präparate vom 21.9.1998.
127. Buddecke E:  
Grundriss der Biochemie, 6. Aufl. de Gruyter, Berlin (1980).
128. Kaiser H:  
Cortisonderivate in Klinik und Praxis, 6. Aufl. Thieme, Stuttgart (1973).
129. Spector RG:  
Pharmacological properties of the glucocorticoids.  
Int Dent J 31, 152 (1981).
130. Gieve AR, Parkholm JDO:  
The sealing properties of root filling cements: Further studies.  
Br Dent J 135, 327 (1973).
131. Tepel J, Darwisch M, Hoppe W:  
Reaction of inflamed periapical tissue to intracanal medicaments and root canal sealers.  
Endod Dent Traumatol 10, 233 (1994).
132. Tepel J, Hoppe W, Darwisch M:  
Der Einfluss von Wurzelfüllpaste auf das periapikale Gewebe bei tierexperimenteller apikaler Parodontitis.  
Endodontie 2, 131 (1994).
133. Uhl M, Gans O, Grillitsch B, Fürhacker M, Kreuzinger N:  
Grundlagen zur Risikoabschätzung für quaternäre Ammoniumverbindungen.  
Umweltbundesamt Berichte BE-271 Wien (2005).
134. Stedman RL, Kravitz E, King JD:  
J Bacteriol 1957, 73, 655-660; US Patent 3836669 (1974).
135. Klüppel H, Plöger W, Rutzen H, Lehmann R:  
Mouth and tooth care compositions.  
European Patent EP0150374 (1991).
136. Arweiler N:  
Der wirksamste antibakterielle Wirkstoff in der Zahnmedizin.  
Zahnärzteblatt Baden-Württemberg (2009).
137. Ehrenberg E, Hussain S:  
Genetic toxicity of some important epoxides.  
Mutation Res 86, 1-113 (1981).

138. Shipper G, Teixeira FB, Arnold RR, Trope M:  
Periapical inflammation after coronal microbial inoculation of dog roots filled with gutta-percha or Resilon.  
J Endod 31, 91-96 (2005).
139. Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR, Moorer WR:  
Fluid transport and bacterial penetration along root canal fillings.  
Int Endod J 26, 203-208 (1993).
140. Herstellerangaben  
EZ-Fill bidirectional spiral EDS,  
South Hackensack, New Jersey, USA (2006).
141. 3M Espe Österreich:  
Haifischflossen-Test macht Fließfähigkeit von Abformmaterialien sichtbar  
Pressemitteilung (2005).
142. Kardon BP, Kuttler S, Hardigan P, Dorn SO:  
An in vitro evaluation of the sealing ability of a new root-canal-obturation system.  
J Endod 29, 658-66 (2003).
143. Barthel CR, Lösche GM, Zimmer S, Roulet JF:  
Dye penetration in root canals filled with AH26 in different consistencies.  
J Endod 20, 436-439 (1994).
144. Smith DL, Schoonover IC:  
Direct filling resins: Dimensional changes resulting from polymerizationshrinkage and water sorption.  
J Amer Dent Ass 46, 540 –544 (1953).
145. Bandyopphay S:  
A study of the volumetric setting shrinkage of some dental materials.  
J Biomed Mat Res 16, 135-144 (1982).
146. Cook W, Forrest M, Goodwin AA:  
A simple method for the measurement of polymerization shrinkage in dental composites.  
Dent Mater 15, 447-449 (1999).
147. Attin T, Buchalla W, Kielbassa AM, Hellwig E:  
Curing shrinkage and volumetric changes of resin-modified glass ionomer restorative materials.  
Dent Mater 11, 359-362 (1995).

148. Danesh G, Lippold C, Mischke KL, Varzideh B, Reinhardt KJ, Dammaschke T, Schäfer E:  
Polymerization characteristics of light- and auto-curing resins for individual splints.  
*Dent Mater* 20, 1-8 (2005).
149. De Gee AJ, Wu MK, Wesselink PR:  
Sealing properties of Ketac-Endo glass ionomer cement and AH26 root canal sealers. *Int Endod J* 27, 239-244 (1994).
150. Grossman LI:  
Physical properties of root canal cements.  
*J Endod* 2, 166-175 (1976).
151. Uhrich IM, Moser IB, Heuer MA:  
The rheology of selected root canal sealer cements.  
*J Endod* 4, 373-379 (1978).
152. Wenzel A, Hintze P, Horsted-Bindslev P:  
Discrimination between restorative dental materials by their radiopacity measured in film radiographs and digital images.  
*J of Forensic Odontostomatology*, 16, 8-13 (1998).
153. Tagger M, Katz A:  
A standard for radiopacity of root-end (retrograde) filling materials is urgently needed.  
*Int Endod J* 37, 260-264 (2004).
154. Heithersay GS:  
Calcium hydroxide in the treatment of pulpless teeth with associated pathology.  
*J Brit Endod Soc* 8, 74-93 (1975).
155. Baumann MA:  
In: Heidemann D, *Die Wurzelkanalfüllung, Praxis der ZHK Bd.3, Endodontie*  
München, Urban & Fischer, 128 (2001).
156. Weiger R:  
Erfolgsaussichten einer Wurzelkanalbehandlung.  
*Die Quintessenz* 10, 140 (2005).
157. Nentwig GH:  
In: Horch HH, *Wurzelspitzenresektion, Praxis der ZHK Bd 9*  
*Zahnärztliche Chirurgie*  
München, Urban & Fischer, 186 (2003).
158. Koulaouzidou EA, Papazisis KT, Beltes P, Geromichalos GD, Kortsaris AH:  
Cytotoxicity of three resin-based root canal sealers: an in vitro evaluation.  
*Endod Dent Traumatol* 14, 182-185 (1998).

159. Barker S, Weinfeld M, Murray D:  
DNA-protein crosslinks: their induction, repair, and biological consequences.  
*Mutat Res* 589, 111- 135 (2005).
160. Lu K, Collins LB, Ru H, Bermudez E, Swenberg JA:  
Distribution of DNA adducts caused by inhaled formaldehyde is consistent with  
induction of nasal carcinoma but not leukemia.  
*Toxicol Sci* 116, 441-451 (2010).
161. Eldeniz AU, Erdemir A, Hadimli HH, Belli S, Erganis O:  
Assessment of antibacterial activity of EndoREZ.  
*Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 102, 119-126 (2006).

## X Anhang

### X 10.1 Messergebnisse

Tabelle V 1.1 Messergebnisse zur Filmdicke von AH Plus® (Fallzahl: 6)

AH Plus® (Messung)	Filmdicke ( $\mu\text{m}$ )	Median ( $\mu\text{m}$ )	Mittelwert ( $\mu\text{m}$ )	Median Filmdicke ( $\mu\text{m}$ )	Mittelwert Filmdicke ( $\mu\text{m}$ )
1	8	8	8	8	7,66
2	8				
3	8				
1	8				
2	8				
3	6				

Tabelle V 1.2 Messergebnisse zur Filmdicke von EasySeal® (Fallzahl: 6)

EasySeal® (Messung)	Filmdicke ( $\mu\text{m}$ )	Median ( $\mu\text{m}$ )	Mittelwert ( $\mu\text{m}$ )	Median Filmdicke ( $\mu\text{m}$ )	Mittelwert der Filmdicke ( $\mu\text{m}$ )
1	6	6	6	6	6,33
2	6				
3	4				
1	6				
2	6				
3	10				

Tabelle V 1.3 Messergebnisse zur Filmdicke von EvoSeal A (Fallzahl: 6)

<b>EvoSeal A (Messung)</b>	<b>Filmdicke (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Median (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Mittelwert (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Median Filmdicke (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Mittelwert der Filmdicke (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<i>1</i>	26	26	29,66	27	27,16
<i>2</i>	38				
<i>3</i>	25				
<i>1</i>	28	28	24,66		
<i>2</i>	28				
<i>3</i>	18				

Tabelle V 2.1 Messergebnisse zur Fließfähigkeit von AH Plus® (Fallzahl: 15)

AH Plus® (Messung)	Min. Ø (mm)	Max. Ø (mm)	Mittelwert (mm)	Median (mm)	Fließfähigkeit (mm)
1	17	17	17		
2	16	17	16,5	17	18
3	19	19	19		
1	19	19	19		
2	19	19,5	19,25	19	19
3	19	19	19		
1	18	18	18		
2	18,5	19	18,75	18	18
3	18	18	18		
1	18	18	18		
2	16,5	17	16,75	17	18
3	18,5	19	18,75		
1	19	19	19		
2	17	17	17	17	18
3	17	17	17		

Tabelle V 2.2 Messergebnisse zur Fließfähigkeit von EasySeal® (Fallzahl: 15)

EasySeal® (Messung)	Min. Ø (mm)	Max. Ø (mm)	Mittelwert (mm)	Median (mm)	Fließfähigkeit (mm)
1	19	19,5	19,25		
2	19	19	19	19	19
3	18	18	19		
1	18	18	18		
2	17	17,5	17,25	17	18
3	17,5	18	17,75		
1	17	18	17,5		
2	18	18,5	18,25	18	18
3	17	17	17		
1	17	17	17		
2	17	17,5	17,25	17	17
3	17	17	17		
1	17	17	17		
2	16,5	17	16,75	17	17
3	16,5	17	16,75		

Tabelle. V 2.3 Messergebnisse zur Fließfähigkeit von EvoSeal A (Fallzahl: 15)

<b>EvoSeal A (Messung)</b>	<b>Min. Ø (mm)</b>	<b>Max. Ø (mm)</b>	<b>Mittelwert (mm)</b>	<b>Median (mm)</b>	<b>Fließfähigkeit (mm)</b>
1	17	17	17		
2	17	18	17,5	18	18
3	18	19	18,5		
1	16	16	16		
2	18	18	18	17	17
3	16	17	16,5		
1	17	17	17		
2	18	18	18	17	17
3	17	17	17		
1	17	17	17		
2	16	17	16,5	17	17
3	17	18	17,5		
1	16	16	16		
2	19	19	19	19	18
3	19	20	19,5		

Tabelle V 3.1.1 *Dichte von AH Plus® 30 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*

<b>AH Plus® 30 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,4847	0,3174	2,889	0
2	0,3482	0,2256	2,832	0
3	0,1484	0,0925	2,647	0
4	0,1976	0,1229	2,637	0
5	0,2997	0,1952	2,86	0

Tabelle V 3.1.2 *Dichte von AH Plus® 60 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*

<b>AH Plus® 60 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,4853	0,3204	2,934	1,56
2	0,3492	0,2283	2,88	1,67
3	0,1504	0,0929	2,608	-1,49
4	0,1934	0,121	2,663	0,97
5	0,2999	0,1952	2,856	-0,12

Tabelle V 3.1.3 Dichte von AH Plus® 120 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)

AH Plus® 120 min (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,4858	0,3205	2,934	1,54
2	0,3485	0,2256	2,827	-0,16
3	0,1501	0,0929	2,616	-1,17
4	0,1933	0,123	2,742	3,8
5	0,3	0,1933	2,803	-2

Tabelle V 3.1.4 Dichte von AH Plus® 180 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 26 °C (Fallzahl: 5)

AH Plus® 180 min (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,485	0,3204	2,937	1,65
2	0,3479	0,2292	2,922	3,07
3	0,1498	0,0947	2,71	2,33
4	0,1934	0,125	2,818	6,42
5	0,2998	0,1958	2,873	0,49

Tabelle V 3.1.5 Dichte von AH Plus® 1440 min (24 h) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)

AH Plus® 24 h (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,484	0,3208	2,957	2,31
2	0,3477	0,2269	2,87	1,33
3	0,1495	0,0964	2,807	5,71
4	0,193	0,1238	2,781	5,15
5	0,3041	0,1945	2,767	-3,36

Tabelle V 3.1.6 Dichte von AH Plus® 10080 min (1 Woche) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 21 °C (Fallzahl: 5)

AH Plus® 1 Woche (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,4842	0,3244	3,024	2,97
2	0,3476	0,2287	2,918	1,3
3	0,1491	0,0933	2,667	2,2
4	0,1929	0,1247	2,823	5,65
5	0,2994	0,1941	2,838	-0,65

Tabelle V 3.1.7 Mittelwertdarstellung / Median der Dichteänderung und der daraus berechneten Schrumpfung von AH Plus® in Abhängigkeit vom Beginn des Anmischens (Fallzahl: 5)

AH Plus® (min)	Median der Dichte ( $\rho$ )	Mittelwert der Dichte ( $\rho$ )	Median der Schrumpfung ( % )	Mittelwert der Schrumpfung ( % )
30	2,832	2,789	0	0
60	2,856	2,788	0,97	-0,03
120	2,803	2,785	-0,16	-0,17
180	2,873	2,852	2,33	2,21
24 h	2,807	2,836	2,31	1,66
1 Woche	2,838	2,854	2,2	2,27

Tabelle V 3.2.1 Dichte von EasySeal® 30 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)

EasySeal® 30 min (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,3807	0,1632	1,745	0
2	0,4084	0,1716	1,72	0
3	0,3079	0,1322	1,747	0
4	0,3441	0,148	1,75	0
5	0,2265	0,0922	1,682	0

Tabelle V 3.2.2 Dichte von EasySeal® 60 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)

EasySeal® 60 min (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,3817	0,1632	1,742	-0,2
2	0,4084	0,1757	1,75	1,73
3	0,309	0,1331	1,752	0,24
4	0,3446	0,1501	1,767	0,96
5	0,2286	0,0912	1,659	-1,37

Tabelle V 3.2.3 Dichte von EasySeal® 120 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)

EasySeal® 120 min (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,3809	0,1643	1,753	0,47
2	0,4088	0,1733	1,731	0,65
3	0,3083	0,132	1,744	-0,21
4	0,3452	0,1512	1,774	1,39
5	0,2269	0,0951	1,717	2,03

Tabelle V 3.2.4 Dichte von EasySeal® 180 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 26 °C (Fallzahl: 5)

EasySeal® 180 min (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,381	0,1633	1,744	-0,06
2	0,4079	0,1759	1,753	1,88
3	0,308	0,1344	1,769	1,2
4	0,3448	0,1505	1,769	1,09
5	0,2263	0,096	1,733	2,94

Tabelle V 3.2.5 Dichte von EasySeal® 1440 min (24 h) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)

EasySeal® 24 h (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,3773	0,1668	1,787	2,35
2	0,4046	0,1735	1,746	1,49
3	0,3055	0,135	1,787	2,2
4	0,3413	0,1531	1,808	3,24
5	0,2239	0,0952	1,735	3,06

Tabelle V 3.2.6 Dichte von EasySeal® 10080 min (1 Woche) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 21 °C (Fallzahl: 5)

EasySeal® 1 Woche (Probe)	Gewicht in Luft (g)	Gewicht in Wasser (g)	Berechnete Dichte ( $\rho$ )	Schrumpf (%)
1	0,3708	0,1654	1,802	3,32
2	0,3926	0,175	1,788	2,11
3	0,3001	0,1349	1,813	3,39
4	0,3372	0,155	1,847	4,36
5	0,2193	0,0956	1,769	6,24

Tabelle V 3.2.7 Mittelwertdarstellung / Median der Dichteänderung und der daraus berechneten Schrumpfung von EasySeal® in Abhängigkeit vom Beginn des Anmischens (Fallzahl: 5)

<b>EasySeal® (min)</b>	<b>Median der Dichte ( ρ )</b>	<b>Mittelwert der Dichte ( ρ )</b>	<b>Median der Schrumpfung ( % )</b>	<b>Mittelwert der Schrumpfung ( % )</b>
30	1,745	1,737	0	0
60	1,75	1,734	0,24	-0,21
120	1,744	1,744	0,65	0,36
180	1,753	1,753	1,2	0,91
24 h	1,787	1,772	2,35	1,98
1 Woche	1,802	1,804	3,39	3,68

Tabelle V 3.3.1 *Dichte von EvoSeal A 30 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 19,5 °C (Fallzahl: 5)*

<b>EvoSeal A 30 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,2152	0,0948	1,784	0
2	0,3135	0,1397	1,801	0
3	0,1568	0,0687	1,777	0
4	0,2187	0,0958	1,777	0
5	0,1449	0,0646	1,801	0

Tabelle V 3.3.2 *Dichte von EvoSeal A 60 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 19,5 °C (Fallzahl: 5)*

<b>EvoSeal A 60 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,2156	0,0992	1,849	3,5
2	0,3134	0,1413	1,818	0,95
3	0,1567	0,0695	1,794	0,96
4	0,2185	0,0973	1,8	1,29
5	0,1449	0,0648	1,806	0,25

Tabelle V 3.3.3 *Dichte von EvoSeal A 120 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 20,5 °C (Fallzahl: 5)*

<b>EvoSeal A 120 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,2215	0,0969	1,774	-0,57
2	0,3137	0,1419	1,901	5,28
3	0,1571	0,0699	1,798	1,19
4	0,2185	0,0987	1,82	2,41
5	0,1449	0,0663	1,84	2,1

Tabelle V 3.3.4 *Dichte von EvoSeal A 180 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 21 °C (Fallzahl: 5)*

<b>EvoSeal A 180 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,2154	0,0977	1,824	2,18
2	0,3134	0,1434	1,838	2,01
3	0,1569	0,0703	1,806	1,62
4	0,2182	0,0978	1,807	1,66
5	0,1449	0,0663	1,838	1,97

Tabelle V 3.3.5 Dichte von *EvoSeal A 1440 min (24 h)* nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 19,5 °C (Fallzahl: 5)

<b>EvoSeal A 24 h (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,2155	0,1	1,863	4,2
2	0,3136	0,1435	1,841	2,16
3	0,1566	0,0713	1,833	3,05
4	0,2183	0,0996	1,836	3,24
5	0,1441	0,0656	1,833	1,7

Tabelle V 3.3.6 Dichte von *EvoSeal A 10080 min (1 Woche)* nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 19,5 °C (Fallzahl: 5)

<b>EvoSeal A 1 Woche (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,2157	0,0984	1,836	-0,73
2	0,3139	0,1447	1,852	1,84
3	0,1565	0,0705	1,817	1,25
4	0,2185	0,1001	1,842	2,31
5	0,145	0,0695	1,917	5,81

Tabelle V 3.3.7 Mittelwertdarstellung / Median der Dichteänderung und der daraus berechneten Schrumpfung von EvoSeal A in Abhängigkeit vom Beginn des Anmischens (Fallzahl: 5)

<b>EvoSeal A (min)</b>	<b>Median der Dichte ( <math>\rho</math> )</b>	<b>Mittelwert der Dichte ( <math>\rho</math> )</b>	<b>Median der Schrumpfung ( % )</b>	<b>Mittelwert der Schrumpfung ( % )</b>
30	1,784	1,787	0	0
60	1,806	1,804	0,96	1,44
120	1,82	1,82	2,1	2,16
180	1,824	1,827	1,97	1,92
24 h	1,836	1,836	3,05	2,91
1 Woche	1,842	1,837	1,84	3,54

Tabelle V 3.4.1 *Dichte von EvoSeal 30 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 17,5 °C (Fallzahl: 5)*

<b>EvoSeal B 30 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,1686	0,0729	1,757	0
2	0,208	0,0959	1,85	0
3	0,2216	0,0981	1,789	0
4	0,1699	0,0761	1,806	0
5	0,1946	0,0873	1,808	0

Tabelle V 3.4.2 *Dichte von EvoSeal B 60 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 16 °C (Fallzahl: 5)*

<b>EvoSeal B 60 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,1685	0,0745	1,787	1,72
2	0,2079	0,0986	1,897	2,45
3	0,2217	0,0993	1,806	0,94
4	0,17	0,0766	1,815	0,49
5	0,1949	0,0878	1,814	0,34

Tabelle V 3.4.3 *Dichte von EvoSeal B 120 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 18,5 °C (Fallzahl: 5)*

<b>EvoSeal B 120 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,169	0,0769	1,83	3,99
2	0,2075	0,0972	1,876	1,37
3	0,2215	0,1003	1,011	-77
4	0,17	0,0779	1,84	1,87
5	0,1946	0,0908	1,869	3,26

Tabelle V 3.4.4 *Dichte von EvoSeal B 180 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 18 °C (Fallzahl: 5)*

<b>EvoSeal B 180 min (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpf (%)</b>
1	0,1685	0,0812	1,927	8,86
2	0,2079	0,0983	1,894	2,33
3	0,2217	0,101	1,834	2,46
4	0,1701	0,0781	1,847	2,24
5	0,1947	0,0898	1,853	2,44

Tabelle V 3.4.5 Dichte von EvoSeal B 10080 min (1 Woche) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 17 °C (Fallzahl: 5)

<b>EvoSeal B 1 Woche (Probe)</b>	<b>Gewicht in Luft (g)</b>	<b>Gewicht in Wasser (g)</b>	<b>Berechnete Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Schrumpfung (%)</b>
1	0,1685	0,0796	1,893	5,59
2	0,2078	0,1007	1,938	2,14
3	0,2215	0,103	1,867	3,27
4	0,17	0,0787	1,86	2,42
5	0,1946	0,0896	1,851	1,98

Tabelle V 3.4.6 Mittelwertdarstellung / Median der Dichteänderung und der daraus berechneten Schrumpfung von EvoSeal B in Abhängigkeit vom Beginn des Anmischens (Fallzahl: 5)

<b>EvoSeal B (min)</b>	<b>Median der Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Mittelwert der Dichte (<math>\rho</math>)</b>	<b>Median der Schrumpfung (%)</b>	<b>Mittelwert der Schrumpfung (%)</b>
30	1,806	1,799	0	0
60	1,814	1,803	0,94	1,38
120	1,84	1,846	1,87	-6,73
180	1,853	1,857	2,44	3,89
1 Woche	1,867	1,887	2,42	4,42

Tabelle V 4 *Abbindezeiten der unterschiedlichen Probekörper (Fallzahl: 3)*

<b>Sealer</b>	Probe I (min)	Probe II (min)	Probe III (min)	Mittelwert (min)	Median (h)	Abbindezeit (h)
<i>EasySeal®</i>	246	246	246	246	4,1	4,1
<i>AH Plus®</i>	14040	14040	14040	14040	24	24
<i>EvoSeal A</i>	177	177	177	177	2,95	2,95
<i>EvoSeal B</i>	490	490	490	490	8,16	8,16

Tabelle V 5.1 Röntgensichtbarkeit von *AH Plus®*, angegeben als optische Dichte (Fallzahl: 3)

<b>AH Plus®</b>	Probe I optische Dichte	Probe II optische Dichte	Probe III optische Dichte	Median	Mittelwert
<i>1 mm Aluminium</i>	1,08	1,22	1,21	1,21	1,17
<i>3 mm Aluminium</i>	0,87	0,97	0,95	0,95	0,93
<i>Prüfkörper</i>	0,37	0,4	0,45	0,4	0,4

Tabelle V 5.2 Röntgensichtbarkeit von *EasySeal®*, angegeben als optische Dichte (Fallzahl: 3)

<b>EasySeal®</b>	Probe I optische Dichte	Probe II optische Dichte	Probe III optische Dichte	Median	Mittelwert
<i>1 mm Aluminium</i>	1,07	1,13	1,15	1,13	1,11
<i>3 mm Aluminium</i>	0,85	0,9	0,92	0,9	0,89
<i>Prüfkörper</i>	0,9	0,96	0,97	0,96	0,94

Tabelle V 5.3 *Röntgensichtbarkeit von EvoSeal A, angegeben als optische Dichte (Fallzahl: 3)*

<b>EvoSeal A</b>	Probe I optische Dichte	Probe II optische Dichte	Probe III optische Dichte	Median	Mittelwert
<i>1 mm Aluminium</i>	1,07	1,09	1,06	1,07	1,07
<i>3 mm Aluminium</i>	0,86	0,86	0,88	0,86	0,86
<i>Prüfkörper</i>	0,71	0,76	0,72	0,72	0,73

Tabelle V 6 *Mittelwerte / Median der pH-Werte zu unterschiedlichen Zeitpunkten*  
(Fallzahl: 5)

<b>Zeit</b>	<i>EasySeal®</i>		<i>AH Plus®</i>		<i>EvoSeal A</i>		<b>n</b>
	<i>Median</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Median</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Median</i>	<i>Mittelwert</i>	
1 min	10,18	10,18	9,49	9,49	10,37	10,38	5
30 min	10,43	10,42	9,94	9,87	10,4	10,4	5
1h	10,48	10,47	9,84	9,9	10,43	10,39	5
4 h	10,42	10,43	9,95	9,89	10,22	10,2	5
24 h	10,43	10,43	9,83	9,72	10,37	10,38	5
2 w	10,45	10,48	9,66	9,54	10,65	10,61	5
1 m	10,5	10,52	9,61	9,48	10,84	10,83	5

Tabelle V 7.1 Darstellung der in Lösung gegangenen AH Plus® Anteile (Fallzahl: 2)

AH Plus®	Probekörper Gewicht ( g )	Schale vor Versuch ( g )	Schale nach Versuch ( g )	gelöster Anteil ( g )	gelöster Anteil ( % )
Probe 1	2,833	148	148,005	0,005	0,176
Probe 2	2,771	144,82	144,823	0,003	0,108

Tabelle V 7.2 Auf Basis der Messwerte aus Tab. V 7.1 berechnete Löslichkeit von AH Plus®, angegeben in Prozent

AH Plus®	Median gelöster Anteil ( g )	Mittelwert gelöster Anteil ( g )	Median gelöster Anteil ( % )	Mittelwert gelöster Anteil ( % )
	0,004	0,004	0,145	0,142

Tabelle V 7.3 Darstellung der in Lösung gegangenen EasySeal® Anteile (Fallzahl: 2)

EasySeal®	Probekörper Gewicht ( g )	Schale vor Versuch ( g )	Schale nach Versuch ( g )	gelöster Anteil ( g )	gelöster Anteil ( % )
Probe 1	1,853	148	148,056	0,056	3,022
Probe 2	1,722	144,819	144,86	0,0408	2,369

Tabelle V 7.4 Auf Basis der Messwerte aus Tab. V 7.3 berechnete Löslichkeit von EasySeal®, angegeben in Prozent

EasySeal®	Median gelöster Anteil ( g )	Mittelwert gelöster Anteil ( g )	Median gelöster Anteil ( % )	Mittelwert gelöster Anteil ( % )
	0,048	0,048	2,679	2,7

Tabelle V 7.5 Darstellung der in Lösung gegangenen EvoSeal A Anteile (Fallzahl: 2)

<b>EvoSeal A</b>	Probekörper Gewicht ( g )	Schale vor Versuch ( g )	Schale nach Versuch ( g )	gelöster Anteil ( g )	gelöster Anteil ( % )
Probe 1	1,387	148,004	148,009	0,005	0,36
Probe 2	1,472	93,409	93,412	0,003	0,204

Tabelle V 7.6 Auf Basis der Messwerte aus Tab. V 7.5 berechnete Löslichkeit von EvoSeal A, angegeben in Prozent

<b>EvoSeal A</b>	Median gelöster Anteil ( g )	Mittelwert gelöster Anteil ( g )	Median gelöster Anteil ( % )	Mittelwert gelöster Anteil ( % )
	0,005	0,005	0,327	0,282

Tabelle V 8.1 *Ermittelte Bakterienkolonien in Abhängigkeit zur Aushärteszeit der Testsealers, der zu Beginn gemessenen optischen Bakteriendichte (OD) und des Materials (Fallzahl: 20)*

<b>AH Plus®</b>	24 Stunden OD: 1,035	3 Wochen OD: 1,083	<b>EasySeal ®</b>	24 Stunden OD: 1,097	3 Wochen OD: 1,085	<b>EvoSeal A</b>	24 Stunden OD: 1,096	3 Wochen OD: 1,074
Probe 1	13	30624	Probe 1	77	0	Probe 1	1764	4
Probe 2	232	34211	Probe 2	0	30	Probe 2	58	11
Probe 3	25	36012	Probe 3	0	1	Probe 3	8040	51
Probe 4	9	42363	Probe 4	0	1	Probe 4	3	10
Probe 5	14	37832	Probe 5	2	0	Probe 5	5	104
Probe 6	15	23435	Probe 6	0	3	Probe 6	154	21
Probe 7	2648	29722	Probe 7	0	1	Probe 7	12025	20
Probe 8	1204	37826	Probe 8	3	496	Probe 8	640	14
Probe 9	11	30780	Probe 9	0	212	Probe 9	10560	200
Probe 10	192	35604	Probe 10	14	1	Probe 10	11550	8
Probe 11	29	27914	Probe 11	2	0	Probe 11	31680	4
Probe 12	4	32412	Probe 12	33	0	Probe 12	524	15
Probe 13	22	34223	Probe 13	6	6	Probe 13	3156	223
Probe 14	2	32402	Probe 14	0	0	Probe 14	14500	4
Probe 15	216	36025	Probe 15	0	0	Probe 15	2320	360
Probe 16	21	27046	Probe 16	760	0	Probe 16	4	45
Probe 17	43	26111	Probe 17	0	2	Probe 17	240	8
Probe 18	24	36954	Probe 18	0	0	Probe 18	29520	19
Probe 19	13	35104	Probe 19	0	1	Probe 19	105	40
Probe 20	356	37271	Probe 20	0	1	Probe 20	1218	12
positiv Kontrolle	1262	6750	positiv Kontrolle	12	über- wachsen	positiv Kontrolle	612	1092
negativ Kontrolle	0	0	negativ Kontrolle	0	0	negativ Kontrolle	0	0

Tabelle V 8.2 *Darstellung der Mittelwerte der entstandenen Bakterienkolonien in Abhängigkeit zur vorherigen Aushärtezeit des Sealers und des Materials (Fallzahl: 20)*

	Bakterienkolonien <b>AH Plus®</b>	Bakterienkolonien <b>EasySeal®</b>	Bakterienkolonien <b>EvoSeal A</b>
nach 24 Stunden Sealeraushärtung	253	45	6404
nach 3 Wochen Sealeraushärtung	33193	37	59

Tabelle V 8.3 *Darstellung der Medianwerte der entstandenen Bakterienkolonien in Abhängigkeit zur vorherigen Aushärtezeit des Sealers und des Materials (Fallzahl: 20)*

	Bakterienkolonien <b>AH Plus®</b>	Bakterienkolonien <b>EasySeal®</b>	Bakterienkolonien <b>EvoSeal A</b>
nach 24 Stunden Sealeraushärtung	23	0	1491
nach 3 Wochen Sealeraushärtung	34217	1	17

Tabelle V 9.1 95%-Konfidenzintervall (CI) und Standardabweichung (SD) von AH Plus®, EasySeal® und EvoSeal A in Abhängigkeit vom jeweiligen Versuch und der Fallzahl (n)

<b>Versuch</b>	<b>AH Plus®</b>		<b>EasySeal®</b>		<b>EvoSeal A</b>		<b>n</b>
	<i>SD</i>	<i>CI</i>	<i>SD</i>	<i>CI</i>	<i>SD</i>	<i>CI</i>	
<b>Filmdicke</b>	0,745	0,596	1,795	1,436	5,899	4,721	6
<b>Fließfähigkeit</b>	0,946	0,479	0,831	0,420	1,003	0,508	15
<b>Schrumpfung</b> (nach 1 Woche)	2,068	1,813	1,377	1,207	2,126	1,864	5
<b>Röntgen-</b> <b>sichtbarkeit</b>	0,033	0,037	0,031	0,035	0,022	0,024	3
<b>pH-Wert</b> (nach 1 Monat)	0,187	0,164	0,035	0,031	0,043	0,038	5
<b>Löslichkeit</b>	0,034	0,047	0,327	0,452	0,078	0,108	2
<b>Antibakteriell</b> <b>Wirksamkeit</b> (nach 3 Wochen)	4594,08	2013,41	114,76	50,3	92,12	40,37	20

## **X 10.2 Tabellenverzeichnis**

1. Tabelle II 1 *Handinstrumente im Vergleich*  
Schäfer E:  
Root canal instruments for manual use: a review.  
Endod Dent Traumatol 13, 51 (1997).
2. Tabelle V 1.1 *Messergebnisse zur Filmdicke von AH Plus® (Fallzahl: 6)*
3. Tabelle V 1.2 *Messergebnisse zur Filmdicke von EasySeal® (Fallzahl: 6)*
4. Tabelle V 1.3 *Messergebnisse zur Filmdicke von EvoSeal A (Fallzahl: 6)*
5. Tabelle V 2.1 *Messergebnisse zur Fließfähigkeit von AHPlus® (Fallzahl: 15)*
6. Tabelle V 2.2 *Messergebnisse zur Fließfähigkeit von EasySeal® (Fallzahl: 15)*
7. Tabelle V 2.3 *Messergebnisse zur Fließfähigkeit von EvoSeal A (Fallzahl: 15)*
8. Tabelle V 3.1.1 *Dichte von AH Plus® 30 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*
9. Tabelle V 3.1.2 *Dichte von AH Plus® 60 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*
10. Tabelle V 3.1.3 *Dichte von AH Plus® 120 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*
11. Tabelle V 3.1.4 *Dichte von AH Plus® 180 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 26 °C (Fallzahl: 5)*
12. Tabelle V 3.1.5 *Dichte von AH Plus® 1440 min (24 h) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*
13. Tabelle V 3.1.6 *Dichte von AH Plus® 10080 min (1 Woche) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 21 °C (Fallzahl: 5)*
14. Tabelle V 3.1.7 *Mittelwertdarstellung / Median der Dichteänderung und der daraus berechneten Schrumpfung von AH Plus® in Abhängigkeit vom Beginn des Anmischens (Fallzahl: 5)*
15. Tabelle V 3.2.1 *Dichte von EasySeal® 30 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*
16. Tabelle V 3.2.2 *Dichte von EasySeal® 60 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*

17. *Tabelle V 3.2.3 Dichte von EasySeal® 120 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*
18. *Tabelle V 3.2.4 Dichte von EasySeal® 180 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 26 °C (Fallzahl: 5)*
19. *Tabelle V 3.2.5 Dichte von EasySeal® 1440 min (24 h) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 25 °C (Fallzahl: 5)*
20. *Tabelle V 3.2.6 Dichte von EasySeal® 10080 min (1 Woche) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 21 °C (Fallzahl: 5)*
21. *Tabelle V 3.2.7 Mittelwertdarstellung / Median der Dichteänderung und der daraus berechneten Schrumpfung von EasySeal® in Abhängigkeit vom Beginn des Anmischens (Fallzahl: 5)*
22. *Tabelle V 3.3.1 Dichte von EvoSeal A 30 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 19,5 °C (Fallzahl: 5)*
23. *Tabelle V 3.3.2 Dichte von EvoSeal A 60 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 19,5 °C (Fallzahl: 5)*
24. *Tabelle V 3.3.3 Dichte von EvoSeal A 120 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 20,5 °C (Fallzahl: 5)*
25. *Tabelle V 3.3.4 Dichte von EvoSeal A 180 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 21 °C (Fallzahl: 5)*
26. *Tabelle V 3.3.5 Dichte von EvoSeal A 1440 min (24 h) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 19,5 °C (Fallzahl: 5)*
27. *Tabelle V 3.3.6 Dichte von EvoSeal A 10080 min (1 Woche) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 19,5 °C (Fallzahl: 5)*
28. *Tabelle V 3.3.7 Mittelwertdarstellung / Median der Dichteänderung und der daraus berechneten Schrumpfung von EvoSeal A in Abhängigkeit vom Beginn des Anmischens (Fallzahl: 5)*
29. *Tabelle V 3.4.1 Dichte von EvoSeal 30 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 17,5 °C (Fallzahl: 5)*
30. *Tabelle V 3.4.2 Dichte von EvoSeal B 60 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 16 °C (Fallzahl: 5)*
31. *Tabelle V 3.4.3 Dichte von EvoSeal B 120 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 18,5 °C (Fallzahl: 5)*

32. *Tabelle V 3.4.4 Dichte von EvoSeal B 180 min nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 18 °C (Fallzahl: 5)*
33. *Tabelle V 3.4.5 Dichte von EvoSeal B 10080 min (1 Woche) nach Anmischung bei einer Temperatur des Wasserbads von 17 °C (Fallzahl: 5)*
34. *Tabelle V 3.4.6 Mittelwertdarstellung / Median der Dichteänderung und der daraus berechneten Schrumpfung von EvoSeal B in Abhängigkeit vom Beginn des Anmischens (Fallzahl: 5)*
35. *Tabelle V 4 Abbindezeiten der unterschiedlichen Probekörper (Fallzahl: 3)*
36. *Tabelle V 5.1 Röntgensichtbarkeit von AH Plus®, angegeben als optische Dichte (Fallzahl: 3)*
37. *Tabelle V 5.2 Röntgensichtbarkeit von EasySeal®, angegeben als optische Dichte (Fallzahl: 3)*
38. *Tabelle V 5.3 Röntgensichtbarkeit von EvoSeal A, angegeben als optische Dichte (Fallzahl: 3)*
39. *Tabelle V 6 Mittelwerte / Median der pH-Werte zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Fallzahl: 5)*
40. *Tabelle V 7.1 Darstellung der in Lösung gegangenen AH Plus® Anteile (Fallzahl: 2)*
41. *Tabelle V 7.2 Auf Basis der Messwerte aus Tab. V 7.1 errechnete Löslichkeit von AH Plus®, angegeben in Prozent*
42. *Tabelle V 7.3 Darstellung der in Lösung gegangenen EasySeal® Anteile (Fallzahl: 2)*
43. *Tabelle V 7.4 Auf Basis der Messwerte aus Tab. V 7.3 errechnete Löslichkeit von EasySeal®, angegeben in Prozent*
44. *Tabelle V 7.5 Darstellung der in Lösung gegangenen EvoSeal A Anteile (Fallzahl: 2)*
45. *Tabelle V 7.6 Auf Basis der Messwerte aus Tab. V 7.5 errechnete Löslichkeit von EvoSeal A, angegeben in Prozent*
46. *Tabelle V 8.1 Ermittelte Bakterienkolonien in Abhängigkeit zur Aushärteszeit der Testsealers, der zu Beginn gemessenen optischen Bakteriendichte (OD) und des Materials (Fallzahl: 20)*

47. *Tabelle V 8.2 Darstellung der Mittelwerte der entstandenen Bakterienkolonien in Abhängigkeit zur vorherigen Aushärtungszeit des Sealers und des Materials (Fallzahl: 20)*
48. *Tabelle V 8.3 Darstellung der Medianwerte der entstandenen Bakterienkolonien in Abhängigkeit zur vorherigen Aushärtezeit des Sealers und des Materials (Fallzahl: 20)*
49. *Tabelle V 9.1 95%-Konfidenzintervall (CI) und Standardabweichung (SD) von AH Plus®, EasySeal® und EvoSeal A in Abhängigkeit vom jeweiligen Versuch und der Fallzahl (n)*

## **X 10.3 Graphikverzeichnis**

1. Graph. V *Erläuterung des Boxplot Diagramms*
2. Graph. V 1 *Mittelwerte und Signifikanzen der Filmdicken der Probekörper (Fallzahl: 6)*
3. Graph. V 1.1 *Boxplot Diagramm zu den Filmdicken der Probekörper (Fallzahl: 6)*
4. Graph. V 2 *Mittelwerte / Signifikanzen der Fließfähigkeit der Probekörper (Fallzahl: 15)*
5. Graph. V 2.1 *Boxplot Diagramm zu der Fließfähigkeit der Probekörper (Fallzahl: 15)*
6. Graph. V 3 *Mittelwerte der Dichte aller Proben in Abhängigkeit von der Zeit (Fallzahl: 5)*
7. Graph. V 3.1 *Boxplot Diagramm zur Dichteänderung der Proben nach einer Woche im Vergleich zum Ausgangszeitpunkt nach 30 min (Fallzahl: 5)*
8. Graph. V 4 *Schrumpfung der Probekörper (Fallzahl: 5)*
9. Graph. V 4.1 *Boxplot Diagramm zur Schrumpfung der Probekörper nach einer Woche (Fallzahl: 5)*
10. Graph. V 4.2 *Schrumpfung der Probekörper nach einer Woche und Darstellung der Signifikanzen (Fallzahl: 5)*
11. Graph. V 5 *Mittelwerte und Signifikanzen der Abbindezeit der Probekörper (Fallzahl: 3)*
12. Graph. V 6 *Mittelwerte und Signifikanzen der optischen Dichte der Probekörper (Fallzahl: 3)*
13. Graph. V 6.1 *Boxplot Diagramm zur Darstellung der optischen Dichte der Probekörper die höchste Röntgenopazität ist bei AH Plus® zu verzeichnen (Fallzahl: 3)*
14. Graph. V 7 *IR-Spektren von AH Plus® (Mischungsverhältnis 1:1) oben direkt nach Anmischung und unten nach einer Woche*
15. Graph. V 8 *IR-Spektren von EasySeal® (Mischungsverhältnis 1:1) oben direkt nach Anmischung und unten nach einer Woche*

16. Graph. V 9 *IR-Spektren von EvoSeal A (Mischungsverhältnis 1:1) oben direkt nach Anmischung und unten nach einer Woche*
17. Graph. V 10 *IR-Spektren von EvoSeal B (Mischungsverhältnis 1:1) oben direkt nach Anmischung und unten nach einer Woche*
18. Graph. V 11 *Mittelwerte der pH-Werte der Probekörper zu verschiedenen Zeitpunkten (Fallzahl: 5)*
19. Graph. V 11.1 *Boxplot Diagramm zu den ermittelten pH-Werten der Probekörper nach einem Monat (Fallzahl: 5)*
20. Graph. V 11.2 *Mittelwerte und Signifikanzen der pH-Werte der Probekörper nach einem Monat (Fallzahl: 5)*
21. Graph. V 12 *Löslichkeit der Probekörper sowie die Darstellung der Signifikanzen der Messwerte (Fallzahl: 2)*
22. Graph. V 13 *Darstellung des Wachstums von Streptococcus oralis - Kolonien nach 24 Stunden Aushärtezeit und 3 Wochen Aushärtezeit der Testsealer (Fallzahl: 20)*
23. Graph. V 13.1 *Boxplot Diagramm zur Darstellung des Wachstums von Streptococcus oralis - Kolonien nach 24 h Aushärtezeit der Testsealer AH Plus® und EasySeal® (Fallzahl: 20)*
24. Graph. V 13.2 *Boxplot Diagramm zur Darstellung des Wachstums von Streptococcus oralis - Kolonien nach 24 h Aushärtezeit des experimentellen Testsealers EvoSeal A (Fallzahl: 20)*
25. Graph. V 13.3 *Boxplot Diagramm zur Darstellung des Wachstums von Streptococcus oralis - Kolonien nach 3 Wochen Aushärtezeit des Testsealers AH Plus® (Fallzahl: 20)*
26. Graph. V 13.4 *Boxplot Diagramm zur Darstellung des Wachstums von Streptococcus oralis - Kolonien nach 3 Wochen Aushärtezeit der Testsealer EasySeal® und EvoSeal A (Fallzahl: 20)*
27. Graph. V 13.5 *Darstellung des Wachstums sowie Signifikanzen der Messwerte von Streptococcus oralis - Kolonien, nach 3 Wochen Aushärtezeit der Testsealer (Fallzahl: 20)*

## **X 10.4 Abbildungsverzeichnis**

1. *Abb. IV 1 Mikrometerschraube mit den Glasplatten zur Filmdickenmessung*
2. *Abb. IV 2 Messung der Filmdicke der Testsealer mit der Mikrometerschraube*
3. *Abb. IV 3 Materialien zur Ermittlung der Fließfähigkeit von EasySeal®*
4. *Abb. IV 4 Dichtebestimmungsset Sartorius® zur Ermittlung der Dichte der Probekörper*
5. *Abb. IV 5 In Tütchen verschweißtes Sealmaterial zur Ermittlung der Dichte des Probekörpers*
6. *Abb. IV 6 Metallblock mit einer mit AH Plus® befüllten Ringform zur Abbindung in der Klimakammer*
7. *Abb. IV 7 Gilmore-Prüfnadel zur Ermittlung der Abbindezeit der Testsealer*
8. *Abb. IV 8 Densitometer® zur Ermittlung der optischen Dichte der Testmaterialien*
9. *Abb. IV 9 Versuchsaufbau, bestehend aus dem Al-Stufenkeil, Metallring, Folie und Röntgenfilm zur Ermittlung der Röntgensichtbarkeit der Testsealer*
10. *Abb. IV 10 Infrarotspektrometer zur spektroskopischen Darstellung des Reaktionsablaufs der beiden Pasten eines Epoxidharz-Basis Sealers*
11. *Abb. IV 11 pH Meter zur Messung der pH-Werte der Testsealer*
12. *Abb. IV 12 Darstellung der Filtrationsapparatur zur Ermittlung der Löslichkeit der Testsealer*
13. *Abb. IV 13 sterile Arbeitsbank zur Handhabung der Versuche zur antibakteriellen Wirksamkeit von Sealern eines Testsealers mit Streptococcus oralis*
14. *Abb. IV 14 Versuchsaufbau zur Inkubation eines Testsealers mit Streptococcus oralis*
15. *Abb. V 15 Darstellung des entwickelten Röntgenbildes (AH Plus Probe 1) mit Metallring, Sealer und Aluminiumkeil*
16. *Abb. V 16 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 2 / 24 h / 232 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von AH Plus nach 24 Stunden Aushärtezeit*

17. *Abb. V 17 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 10 / 24 h / 14 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von EasySeal nach 24 Stunden Aushärtezeit*
18. *Abb. V 18 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 1 / 24 h / 1764 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von EvoSeal A nach 24 Stunden Aushärtezeit*
19. *Abb. V 19 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 12 / 3 Wochen / 32412 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von AH Plus nach 3 Wochen Aushärtezeit*
20. *Abb. V 20 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 3 / 3 Wochen / 3 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von EasySeal nach 3 Wochen Aushärtezeit*
21. *Abb. V 21 Beispielhafte Darstellung des Bakterienwachstums (Probe 16 / 3 Wochen / 45 gezählte Bakterienkolonien) nach 24 Stunden, nach der Inkubation von EvoSeal A nach 3 Wochen Aushärtezeit*

## X 10.5 Abkürzungsverzeichnis

<b>Abb</b>	Abbildung	<b>sek</b>	Sekunde
<b>CHX</b>	Chlorhexidindigluconat	<b>µl</b>	Mikroliter
<b>°C</b>	Grad Celsius	<b>µm</b>	Mikrometer
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung	<b>ρ</b>	Dichte
<b>EDTA</b>	Ethylendiamin- tetraessigsäuredinatriumsalz	<b>%</b>	Prozent
<b>g</b>	Gramm		
<b>Graph</b>	Graphik		
<b>h</b>	Stunde		
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	Wasserstoffperoxid		
<b>ISO</b>	International Organisation for Standardization		
<b>kg</b>	Kilogramm		
<b>KV</b>	Kilovolt		
<b>mm</b>	Millimeter		
<b>min</b>	Minute		
<b>ml</b>	Milliliter		
<b>N</b>	Newton		
<b>n</b>	Anzahl der Proben		
<b>NaOCl</b>	Natriumhypochlorit		
<b>OD</b>	optische Dichte		
<b>ppm</b>	parts per million		
<b>pH</b>	negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionen-Aktivität		

## **X 10.6 Danksagung**

Herrn PD Dr. D. Sonntag und Herrn Univ.- Prof. Dr. Dr. T. Beikler, Direktor der Poliklinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Endodontologie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, möchte ich für die Möglichkeit zur Erstellung dieser Dissertation und für die kompetente und sympathische wissenschaftliche Unterstützung danken.

Bei Herrn Fischer, Herrn Burkhardt und Herrn Mondrzyk aus dem Institut für Organische und Makromolekulare Chemie möchte ich mich für die Unterstützung und anregenden Diskussionen während des experimentellen Teils meiner Arbeit herzlichst bedanken. Ebenfalls möchte ich meinen Dank Frau Dr. Peters, Frau Hoffmann und Frau Heier für die freundliche und hilfreiche Betreuung im wissenschaftlichen Labor aussprechen.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie für die stetige liebevolle Unterstützung und meiner Frau Anna für die vielen motivierenden Worte und den immer liebenswerten Beistand.

## Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere an Eides statt, dass die Dissertation selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erstellt worden ist und die hier vorgelegte Dissertation nicht von einer anderen Medizinischen Fakultät abgelehnt worden ist.

Datum, Vor- und Nachname

Unterschrift