

tamination ist bei Alginatabformmaterial aufgrund seiner Hydrophilie und Porosität besonders ausgeprägt, da die Mikroorganismen das Material leichter penetrieren können (de Castro et al., 2019). Hierdurch besteht die Gefahr von Kreuzkontaminationen von medizinischem oder Laborpersonal (Flanagan et al., 1998). Nach dem Abformprozess soll die Abformung unter fließend kaltem Wasser abgespült werden, um Speichel und gegebenenfalls Blut des Patienten zu entfernen (Nandini et al., 2008). Ein Abwaschen mit Wasser führt zwar zu einer Reduktion, jedoch nicht zu einer ausreichenden Entfernung der Mikroorganismen, weswegen eine anschließende Desinfektion der Abformung zwingend erforderlich ist (Al-Jabrah et al., 2007).

1.2 Desinfektionsverfahren

Gängige Verfahren für die Desinfektion von Alginatabformungen sind die Sprühtechnik oder die Tauchbaddesinfektion (Wang et al., 2007). Als Desinfektionsmittel werden Alkohole, Aldehyde, Natriumhypochlorid, Jodverbindungen oder quartäre Ammoniumsalze verwendet (Badrian et al., 2012). Während bei der Sprühdesinfektion unter Umständen nicht alle Bereiche der Abformung, wie zum Beispiel Unterschnitte, von dem Desinfektionsmittel erreicht werden, ist bei der Tauchbaddesinfektion die Desinfektion der gesamten Abformung gewährleistet (Al-Jabrah et al., 2007). Bei der letztgenannten besteht jedoch das Problem, dass es zu einer Absorption der Desinfektionslösung durch das Alginatmaterial kommt, welche auf die hydrophile Eigenschaft des Materials zurückzuführen ist. Die Folge ist ein Quellen des Materials. Das wiederum führt zu Dimensionsänderungen und auch die mechanischen Eigenschaften der Abformmasse werden beeinflusst (Badrian et al., 2012). Dieses Risiko ist bei der Sprühdesinfektion geringer (Al-Jabrah et al., 2007). Bei beiden Verfahren kommt es jedoch hauptsächlich zu einer Desinfektion der Oberfläche und in das Material eingeschlossene Mikroorganismen werden nicht erreicht (Wang et al., 2007).

Neben den Nachteilen, dass es, vor allem bei Nichteinhalten der Anwendungsrichtlinien, zu Dimensionsänderungen der Alginatabformung kommt (Rubel, 2007) und nur eine unzureichende Desinfektion gewährleistet ist (Wang et al., 2007), ist ein weiterer Nachteil, dass die Desinfektion einen zusätzlichen Arbeitsschritt nach der Abformung darstellt (Flanagan et al., 1998; Wang et al., 2007). Dieser ist von der Compliance des Anwenders

abhängig (Flanagan et al., 1998; Wang et al., 2007) und es besteht die Gefahr, dass dieser Arbeitsschritt im hektischen Praxisalltag vergessen oder nicht richtig durchgeführt wird, etwa, weil die Abformung in der Desinfektionslösung vergessen wird oder die Kontaktzeit zur Desinfektionslösung zu kurz ist. Dies würde im erst genannten Fall zu einer negativen Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des Alginats führen oder im anderen Szenario eine unzureichende Desinfektion bedingen.

Wenn das Desinfektionsmittel bereits im Vorhinein in das Material eingemischt wird, entweder durch Zugabe zum Alginatpulver oder zur Anmischflüssigkeit, und so eine intrinsische Desinfektion erreicht werden kann, kann auf den zusätzlichen Arbeitsschritt nach der Abformung verzichtet werden. Dies spart Zeit und der Desinfektionsprozess kann nicht vergessen werden (Flanagan et al., 1998). Zudem ist eine Desinfektion des kompletten Materials und nicht nur der Oberfläche gewährleistet (de Castro et al., 2019; Wang et al., 2007). In früheren Studien wurde gezeigt, dass zum Beispiel die Zugabe von Chlorhexidin zum Anmischwasser zu keiner Veränderung der Genauigkeit der Abformung führt (Ramer et al., 1993) und auch die Zugabe von Silbernanopartikeln die physikalischen Eigenschaften der Alginatabformmasse, wie zum Beispiel die Detailwiedergabe nicht negativ beeinflusst (Omidkhoda et al., 2019).

1.3 Silbernanopartikel

Silberionen sind schon seit langer Zeit für ihre antimikrobielle Eigenschaft gegenüber Bakterien, Viren und Pilzen bekannt. Die antimikrobielle ebenso wie die antiinflammatorische, die antiinfektiöse und die wundheilende Wirkung besteht bereits bei geringen Konzentrationen, die nicht schädlich für menschliche Zellen sind (Habeeb Rahuman et al., 2022). Silbernanopartikel haben aufgrund ihrer geringeren Größe im Vergleich zu makroskopischem Silber ein erhöhtes therapeutisches Potential. Je kleiner die Partikel sind, desto besser die Verteilung und desto größer das Oberflächen/Volumen-Verhältnis, was in einer besseren antimikrobiellen Aktivität resultiert (Mussin et al., 2021). Die Eigenschaften der Partikel, wie Reaktivität oder Haltbarkeit, werden durch Größe, Form und Struktur bestimmt (Khan et al., 2019).

Der genaue Wirkmechanismus von Silbernanopartikeln ist bisher nicht geklärt (Yin et al., 2020). Bekannt ist, dass sie die Zellwand penetrieren können und die Cytoplasmamembran zerstören, wodurch es zu Zellyse kommt (Barras et al., 2018). Auch kommt es unter anderem durch Zerstörung von Disulfidbrücken zu Interaktionen mit Proteinen (Jung et al., 2008). Die Bindung an Thiolgruppen von Proteinen und Enzymen hat eine Proteinaggregation zur Folge (Rahuman et al., 2021). Ein weiterer wichtiger Faktor für die antimikrobielle Wirkung der Silbernanopartikel ist die Freisetzung positiv geladener Silberionen, welche verschiedene Angriffspunkte haben. Sie interagieren elektrostatisch mit der negativ geladenen Zellwand und dringen in die Zelle ein. Dort setzen sie reaktive Sauerstoffspezies frei, was zu oxidativem Stress führt. Die Synthese von DNA und mRNA wird verhindert, die Proteinbiosynthese und Zellwandsynthese werden gehemmt. Die reaktiven Sauerstoffspezies schädigen die Mitochondrien und es kommt aufgrund der Schädigung der Zellmembran zum Austreten von Zellbestandteilen. Alle Mechanismen sorgen dafür, dass erst die Zellteilung verhindert wird und es letztlich zum Zelltod kommt (Jain et al., 2021).

Die Effektivität der Silbernanopartikel unterscheidet sich zwischen gramnegativen und grampositiven Bakterien. Aufgrund der dünneren Peptidoglykanschicht sind gramnegative Bakterien anfälliger für die Wirkung von Silbernanopartikeln, weil die Zellwand leichter zu durchdringen ist. Grampositive Bakterien besitzen eine dickere Peptidoglykanschicht, in der lineare Polysaccharidketten mit kurzen Peptiden quervernetzt sind und so einen starren Komplex bilden, der schwerer zu penetrieren ist (Liao et al., 2019).

1.4 Konzept der grünen Synthese

Für die Synthese von Silbernanopartikel kann man zwei Prinzipien unterscheiden - den „bottom-up“-Weg und das „top-down“-Verfahren. Während beim bottom-up-Weg die Nanopartikel aus Atomen und Molekülen aufgebaut werden und der Kern auf die Größe eines neuen Nanopartikels anwächst, wird beim top-down-Verfahren ein Ausgangsmaterial durch Zerkleinern auf die Größe von Nanopartikeln reduziert (Husen und Siddiqi, 2014). Gängige Herstellungsverfahren waren bisher chemischer oder physikalischer Natur.

Diese haben den Nachteil, dass sie viel Energie benötigen, teuer sind, giftige Nebenprodukte entstehen können und sie daher insgesamt als nicht umweltfreundlich beurteilt werden können (Siddiqi et al., 2018).

Aufgrund dieser Nachteile erfreut sich der grüne Syntheseweg zunehmender Beliebtheit. Hierbei werden Mikroorganismen, wie Bakterien, Pilze oder Hefen, Biopolymere, Pflanzen oder ihre Extrakte als Reduktions- und Ummantelungsmittel für die Synthese von Silbernanopartikel verwendet (Habeeb Rahuman et al., 2022). Im Allgemeinen bieten diese Verfahren den Vorteil, dass auf die Verwendung gefährlicher Chemikalien verzichtet werden kann, sie einen geringeren Energieaufwand erfordern und der Syntheseweg daher als umweltfreundlicher und nachhaltiger gilt. Die Verwendung von Pflanzenextrakten bietet gegenüber der Synthese durch Mikroorganismen den Vorteil, dass es sich um einen schnelleren, sichereren und günstigeren Syntheseweg handelt, der mit einfach verfügbaren, nachwachsenden Rohstoffen durchgeführt wird (Rafique et al., 2017). Silbernanopartikel, welche mithilfe von Pflanzenextrakten hergestellt werden, haben eine geringere Toxizität als solche, die in einem chemischen Syntheseweg hergestellt werden. Zudem weisen sie eine größere therapeutische Effektivität auf. Diese ist auf einen synergistischen Effekt von Silbernanopartikeln und pharmakologisch aktiven Bestandteilen der Pflanzenextrakte zurückzuführen (Majeed et al., 2022).

1.5 Medizinische Pflanzen

Die Verwendung sogenannter "medizinischer Pflanzen" ist bei der grünen Synthese beliebt (Majeed et al., 2022). Als medizinische Pflanzen werden Pflanzen bezeichnet, die viele verschiedene sekundäre Pflanzenstoffe, wie zum Beispiel Alkaloide, Tannine und Saponine, enthalten (Ugboko et al., 2020). Diese Metaboliten schützen die Pflanze, indem sie ihr ermöglichen, mit ihrer Umwelt zu interagieren (Kennedy und Wightman, 2011). Sie sind für die biologische Aktivität der Pflanzen verantwortlich und sorgen für das therapeutische Potential, welches unter anderem die antimikrobielle Aktivität aber auch antientzündliche Eigenschaften und die antioxidative Wirkung umfasst (Ugboko et al., 2020). In der Synthese von Silbernanopartikeln spielen sie eine entscheidende Rolle als Reduktions- und Ummantelungsmittel (Majeed et al., 2022).

Syzygium aromaticum (Gewürznelke) und *Zingiber officinale* (Ingwer) werden ebenfalls als medizinische Pflanzen eingestuft. Die Gewürznelke wird schon seit Jahrhunderten in der traditionellen chinesischen Medizin und der ayurvedischen Medizin aufgrund ihrer verschiedenen Wirkungen einschließlich ihrer antimikrobiellen und antiseptischen Aktivität angewendet (Vicidomini et al., 2021). Auch für die analgetische Wirkung ist sie bekannt. Die pharmakologische Aktivität ist hauptsächlich auf das enthaltene Eugenol zurückzuführen (Jardón-Romero et al., 2022).

Das Rhizom des Ingwers hat ebenfalls seit vielen Jahrhunderten eine große Bedeutung in der traditionellen Medizin und wird zur Behandlung diverser Krankheitsbilder eingesetzt. Es enthält eine Vielzahl an flüchtigen und nichtflüchtigen Verbindungen (Nikkhah Bodagh et al., 2018). Das im Ingwer enthaltene Gingerol, ein Phenol, ist ein wichtiger Bestandteil für die pharmakologischen Effekte des Ingwers, wie zum Beispiel die antioxidative und antimikrobielle Aktivität (Hu et al., 2022).

1.6 Fragestellung und Ziele

Ziel dieser Doktorarbeit war es, mithilfe von Pflanzenextrakten aus *Syzygium aromaticum* und *Zingiber officinale* Silbernanopartikel in einem grünen Syntheseweg herzustellen, welche im Folgenden zur Modifizierung eines Dentalalginats verwendet wurden. Diese zwei Gruppen wurden mit einem nicht modifizierten Alginat (Kontrollgruppe) und einem mit CHX modifizierten Alginat im Hinblick auf die antimikrobielle Aktivität, die Reißfestigkeit, das elastische Rückstellvermögen, die Detailwiedergabe, das Dimensionsverhalten und die Oberflächenrauheit von dentalen Gipsmodellen verglichen.

Folgende Fragestellungen sollten mit der vorliegenden Arbeit beantwortet werden:

- Besteht eine antimikrobielle Aktivität der modifizierten Gruppen?
- Welche chemischen Verbindungen sind in den Pflanzenextrakten enthalten und wie stellen sich die synthetisierten Silbernanopartikel dar?
- Werden die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Alginats durch die Modifikationen verändert?

2. Material und Methoden

Im Folgenden werden die verwendeten Materialien und die Versuchsgruppen vorgestellt. Die verschiedenen Alginatmodifikationen wurden auf ihre antimikrobielle Aktivität getestet und mit der Kontrollgruppe verglichen. Die Silbernanopartikel, welche in einem grünen Syntheseweg synthetisiert wurden, wurden hinsichtlich ihrer Größe, Struktur und Form analysiert. Auf Basis eines Reißfestigkeitsversuches, eines Versuches zum elastischen Rückstellvermögen, eines Detailwiedergabetestes, einer Untersuchung zum Dimensionsverhalten und der Untersuchung der Oberflächenrauheit von Gipsmodellen wurde getestet, ob sich die Eigenschaften des Alginats durch die Modifikationen verändert haben.

2.1 Verwendete Materialien

In den durchgeführten Versuchen wurde das staubfreie, normal abbindende Dentalalginat Blueprint Xcreme (Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz) verwendet, welches im Folgenden mit experimentell hergestellten antimikrobiellen Wirkstoffen modifiziert wurde. Chlorhexidin-digluconat Lösung (Sigma-Aldrich, St. Louis, Missouri, USA) und Silbernitratpulver ($\geq 99\%$, Sigma-Aldrich, St. Louis, Missouri, USA) wurden jeweils mit destilliertem Wasser gemischt, um die Lösungen für die Modifikationen zu erhalten. Für die Herstellung der Pflanzenextrakte wurden handelsübliche Gewürznelken und Ingwerwurzel verwendet. Das Gipspulver BonStone Super (Wiegmann Dental, Bonn) diente für die Herstellung der Gipsprobekörper.

2.2 Herstellung der Modifikationslösungen

Zuerst wurde die Chlorhexidin-Lösung für die Modifikation des Alginats hergestellt. Dafür wurde 1 g Chlorhexidin-digluconat-Lösung mit 500 ml destilliertem Wasser vermischt, um eine Konzentration von 0,2 % zu erhalten.

Für die Herstellung der Silbernitratlösung, welche im Anschluss für die grüne Synthese der Silbernanopartikel benötigt wurde, wurde 1 g des Silbernitratpulvers ebenfalls in

500 ml destilliertem Wasser gelöst und vermischt. Diese Silbernitratlösung mit einer Konzentration von 0,2 % wurde anschließend mit wässrigen Pflanzenextrakten aus *Syzygium aromaticum* bzw. *Zingiber officinale* vermischt.

Für die Herstellung des wässrigen Extraktes aus Gewürznelken wurden diese in einem Mixer zerkleinert. 25 g des entstandenen Pulvers wurden mit einer Lösung aus 80 % destilliertem Wasser und 20 % Ethanol mit einem Volumen von 150 ml aufgegossen und 72 Stunden ziehen gelassen. Anschließend wurde die Mischung filtriert (Whatman Papierfilter Grad 1, Maidstone, Großbritannien) und der so gewonnene wässrige Extrakt für die grüne Synthese der Silbernanopartikel verwendet.

Der wässrige Extrakt aus Ingwerwurzel wurde aus 20 g zerkleinerter Ingwerwurzel hergestellt, welche ebenfalls mit 150 ml einer Lösung aus 80 % destilliertem Wasser und 20 % Ethanol aufgegossen wurde. 72 Stunden später wurde die Mischung ebenfalls mit Whatman Filterpapier filtriert und der wässrige Ingwerextrakt für die Synthese der Silbernanopartikel weiterverwendet.

25 ml der 0,2 % Silbernitratlösung wurden mit jeweils 5 ml der wässrigen Pflanzenextrakte vermischt. Die Lösungen mit dem Mischungsverhältnis 5:1 wurden für 36 Stunden inkubiert. Der Farbumschlag der Lösungen von hell zu dunkel diente als Indikator für die Formation der Silbernanopartikel. Im Folgenden wurden die Mischungen aus Silbernitratlösung und Pflanzenextrakt für die Modifikation zwei weiterer Alginategruppen verwendet.

2.3 Versuchsgruppen

Es wurden folgende Gruppen untersucht:

Als Kontrollgruppe wurde das Alginat mit destilliertem Wasser angemischt. Für die CHX-Modifikation wurde anstelle des Wassers die 0,2 % Chlorhexidin-Lösung als Anmischflüssigkeit verwendet. Die Mischung aus Silbernitratlösung und Gewürznelken- bzw. Ingwerextrakt stellte den Wasserersatz zum Anmischen des Alginats bei den weiteren zwei Gruppen dar.

Bei jedem Versuch wurde das Alginat von Hand angemischt bis eine homogene Masse erreicht wurde. Hinsichtlich der Mengenverhältnisse von Alginatpulver und Anmischflüssigkeit wurden die Herstellerangaben eingehalten.

2.4 Chemische Analyse der Pflanzenextrakte

Am Agricultural Research Center, Giza, Ägypten wurden jeweils 1 ml des Gewürznelken- und Ingwerextrakts auf ihre chemischen Verbindungen hin untersucht. Hierfür wurden eine Gaschromatografie (Agilent 7890A, Agilent Technologies, Santa Clara, Kalifornien, USA) und eine Massenspektrometrie (MSD Agilent 7000, Agilent Technologies, Santa Clara, Kalifornien, USA) durchgeführt.

Der Gaschromatograf besteht aus einer Kapillarsäule mit einem Innendurchmesser von 0,25 mm. Diese ist mit polaren Agilent HP-5 %-Phenyl-Methylpolysiloxan als stationäre Phase in einer Schichtdicke von 0,25 µm beschichtet. Die Detektortemperatur betrug 25 °C, die Injektionstemperatur lag bei 200 °C. Als Trägergas wurde Helium mit einer linearen Geschwindigkeit von 1 ml/min verwendet. Der Erfassungsbereich des Massenspektrometers betrug 50-800 m/z, die Grenzflächentemperatur wurde auf 250 °C eingestellt.

Die Identifizierung der Verbindungen erfolgte durch den Vergleich der relativen Retentionszeiten der gefundenen Verbindungen mit bekannten Verbindungen. Zudem wurden die Spektraldaten mit denen in der Literatur abgeglichen.

2.5 Charakterisierung der Silbernanopartikel

Im Folgenden werden die Methoden zur Charakterisierung der Silbernanopartikel beschrieben.

2.5.1 Rasterelektronenmikroskopie

Die Rasterelektronenmikroskopie, welche an dem Rasterelektronenmikroskop Philips XL 30 (Philips, Eindhoven, Niederlande) des Zentrums ZMK Bonn durchgeführt wurde, diente zur Untersuchung der Struktur, Form und Größe der gebildeten Silbernanopartikel. Hierfür wurde jeweils ein Tropfen der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Mischung und der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Mischung als dünner Film auf ein Kontaktpad aufgetragen und trocknen gelassen. Die Proben wurden zunächst für 60 Sekunden im Scancoat Six (Edwards, Burgess Hill, Großbritannien), welches ein Gold-Platin Target besitzt, unter

Vakuum gesputtert. Anschließend wurden die Proben im Vakuum bei einer Spannung von 10 bis 25 kV und einer Spotgröße von 1,4 bis 3 im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die synthetisierten Silbernanopartikel wurden bei einer 20.000-fachen Vergrößerung gescannt und mithilfe der Software Image J (Version 1.53k, Wayne Rasband, NIH, Bethesda, Maryland, USA) vermessen.

2.5.2 UV-Vis-Spektroskopie

Die UV-Vis-Spektroskopie (UviLine 9400, Schott, Mainz) wurde zur Untersuchung des Farbumschlags der beiden Silbernitrat-Pflanzenextrakt-Mischungen verwendet. Diese Untersuchung wurde durch das IMMIP des Universitätsklinikums Bonn vorgenommen. Jeweils 1 ml Aliquot der beiden Proben wurde in verschiedenen Zeitabständen vermessen. Die erste Messung der Absorption erfolgte direkt nach dem Zusammenmischen von Silbernitrat mit je einem der beiden Pflanzenextrakte. Weitere Messungen folgten nach 1, 2, 4, 24, 48 und 72 Stunden. Als Referenz diente die Messung von destilliertem Wasser. Die Scangeschwindigkeit, mit der die Proben im Bereich von 200 bis 700 nm gescannt wurden, betrug 475 nm/min. Die optische Weglänge betrug 1 cm. Die Absorptionskurven wurden mithilfe von Microsoft Excel (Microsoft, Redmond, Washington, USA) erstellt.

2.6 Analyse der antimikrobiellen Aktivität

Die antimikrobielle Aktivität wurde mithilfe des Agar-Well-Diffusionstests unter fachkundiger Anleitung im IMMIP des Universitätsklinikums Bonn untersucht. Als Testkeime wurden *Streptococcus mutans* (DSM-Nr. 20523, IMMIP, Universitätsklinikum Bonn), Methicillin-resistenter *Staphylococcus aureus* (MRSA, USA 300-0114, NRS384, IMMIP, Universitätsklinikum Bonn), Methicillin-sensitiver *Staphylococcus aureus* (MSSA, DSM-Nr. 6247, Stammbezeichnung SG 511, IMMIP, Universitätsklinikum Bonn) und *Candida albicans* (DSM-Nr.70014, Stammbezeichnung Ca-0115, IMMIP, Universitätsklinikum Bonn) verwendet. Je Keim wurden drei Müller-Hinton-Agarplatten angelegt, auf denen jeweils die vier Gruppen getestet wurden. Für jeden Testkeim wurde eine Suspension angelegt, deren optische Dichte mit einem UV-Vis-Spektrometer bei 600 nm gemessen wurde und 0,1 betragen sollte. Jeweils 0,1 ml dieser Suspensionen wurde auf die Agarplatten gegeben,

nach 10 Minuten abpipettiert und die Platten wurden für 20 Minuten trocknen gelassen. Anschließend wurden in jeden Agar vier Vertiefungen mit 8 mm Durchmesser ausgestanzt, in welche die frisch angemischten Alginateproben mit sterilen Einweg-Plastikspateln eingefüllt wurden (Abb. 1 bis 4). Die befüllten Agarplatten wurden bei 37 ± 1 °C für 24 Stunden inkubiert. Im Anschluss wurden die Platten auf einer Unterlage, welche Referenzpunkte für eine Kalibrierung enthielt, fotografiert und die Hemmzonen um die Alginateproben mit der Software Image J digital ausgemessen. Jede Inhibitionszone wurde in vier Ausdehnungen vermessen und der Mittelwert notiert.



Abb. 1: Antimikrobielle Testung der Kontrollgruppe (oben links), der CHX-Gruppe (oben rechts), der SA+AgNPs-Gruppe (unten rechts) und einer nicht in die Versuchsreihe aufgenommenen Probe gegenüber *S. mutans*.



Abb. 2: Antimikrobielle Testung der Kontrollgruppe (unten rechts), der CHX-Gruppe (oben rechts), der SA+AgNPs-Gruppe (unten links) und einer nicht in die Versuchsreihe aufgenommenen Probe gegenüber MRSA.



Abb. 3: Antimikrobielle Testung der Kontrollgruppe (unten rechts), der CHX-Gruppe (unten links), der SA+ AgNPs-Gruppe (oben links) und einer nicht in die Versuchsreihe aufgenommenen Probe gegenüber MSSA.



Abb. 4: Antimikrobielle Testung der Kontrollgruppe (oben rechts), der CHX-Gruppe (oben links), der SA+ AgNPs-Gruppe (unten links) und einer nicht in die Versuchsreihe aufgenommenen Probe gegenüber C. albicans.

2.7 Reißfestigkeit

Getestet wurde die Reißfestigkeit des abgebundenen Alginats an der Werkstoffprüfmaschine Zwick (Zwick Zmart Pro, ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm). Für die Herstellung der Probekörper wurde eine Kunststoffform mit den Dimensionen von 10 cm Länge, 2 cm Breite und 4 mm Höhe nach DIN EN ISO 21563:2021 verwendet (Abb. 5). Das frisch angemischte Alginat wurde in die Form gestrichen, die auf einer mit Vaseline bestrichenen Glasplatte lag. Sobald das Alginat eingefüllt wurde, wurde eine weitere, mit Vaseline bestrichene, Glasplatte aufgelegt und mit einem Gewicht von 500 g beschwert. Dies ermöglichte ein Abfließen von überschüssigem Alginatmaterial und es wurde eine gleichmäßige Probendicke mit glatter Oberfläche erzielt. Nach dem Abbinden des Materials wurde der Probekörper aus der Form entnommen, auf Fehlstellen untersucht und 10 Minuten ruhen gelassen.



Abb. 5: Alginatprobekörper mit 10 cm Länge, 2 cm Breite und 4 mm Höhe zur Ermittlung der Reißfestigkeit.

Die Dicke der Probe wurde mithilfe einer digitalen Schieblehre bestimmt. Anschließend wurde der Probekörper in den Probenhalter der Zwick-Prüfmaschine eingespannt, um ihn einer Zugbelastung auszusetzen. Die Prüfung wurde mit einer Traversengeschwindigkeit von 500 mm/min bis zum Versagen der Probe durchgeführt. Das bedeutet, dass sich die bewegliche Traverse mit dieser Geschwindigkeit nach unten bewegt, sodass sich die beiden Probenhalter voneinander entfernen und der Probekörper auseinandergezogen wird. Bei Riss des Probekörpers stoppt die Traverse und die Kraft, bei der die Probe gerissen ist, wird abgespeichert. Anhand der Dicke (d) der Probe in Millimetern und der bei Riss der Probe angewendeten Höchstkraft (F) in Newton lässt sich die Reißfestigkeit (T_s) in N/mm mit der Formel 1 aus der DIN EN ISO 21563:2021 bestimmen:

$$T_s = \frac{F}{d} \quad (1)$$

Es wurden zehn Probekörper je Gruppe getestet.

2.8 Elastisches Rückstellvermögen

Das elastische Rückstellvermögen des Alginats wurde ebenfalls an der Zwick-Prüfmaschine getestet. Die Probekörper wurden gemäß DIN EN ISO 21563:2021 mithilfe einer geteilten Metallform aus Kupfer mit 20 mm Höhe und einem Durchmesser von 12,5 mm, welche zusätzlich von einem Stabilisierungsring aus Kunststoff umgeben ist, hergestellt

(Abb. 6). Die Form wurde dünn mit Vaseline bestrichen und auf eine mit Vaseline bestrichene Glasplatte gestellt. Das frisch angemischte Alginat wurde eingefüllt und mit einer zweiten, mit Vaseline bestrichenen, Glasplatte abgedeckt, welche zusätzlich mit einem 500 g schweren Gewicht beschwert wurde. Dadurch konnten ein Abfließen des überschüssigen Materials gewährleistet und Luftblasenbildung innerhalb der Form verhindert werden. Nach Abbinden des Alginats wurde der Probekörper aus der Form entnommen, auf Fehlstellen kontrolliert und 10 Minuten ruhen gelassen (Abb. 7).



Abb. 6: Geteilte Metallform mit 12,5 mm Durchmesser und 20 mm Höhe mit zusätzlichem Stabilisierungsring aus Kunststoff zur Herstellung der Alginatprobekörper für die Ermittlung des elastischen Rückstellvermögens.



Abb. 7: Alginatprobekörper für die Ermittlung des elastischen Rückstellvermögens.

Die Höhe des Probekörpers wurde mithilfe einer digitalen Schieblehre gemessen und der Probekörper im Anschluss in der Werkstoffprüfmaschine Zwick getestet (Abb. 8). Jeder Probekörper wurde für 5 Sekunden um 20 % seiner Ausgangslänge deformiert und anschließend ebenfalls gemäß DIN EN ISO 21563:2021 entlastet, um eine Erholung von der Verformung zu ermöglichen.

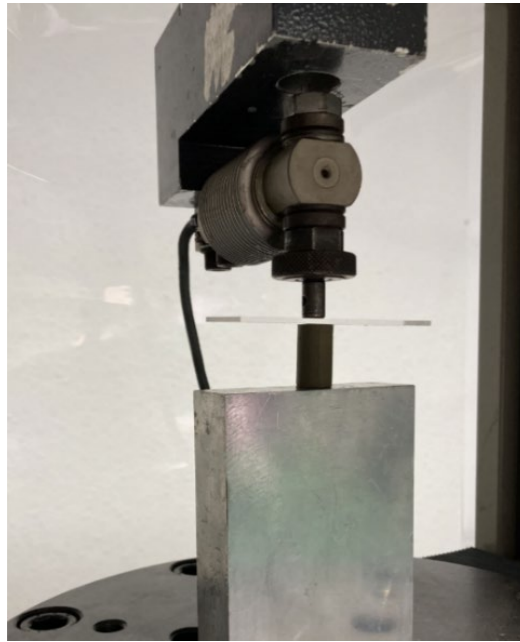


Abb. 8: Versuchsaufbau zur Ermittlung des elastischen Rückstellvermögens der Alginatprobekörper an der Werkstoffprüfmaschine Zwick.

Die Länge wurde erneut gemessen, um die Längenänderung zu berechnen. Mithilfe der Längenänderung und der Ausgangslänge wurde die elastische Rückstellung des Alginatprobekörpers ermittelt und in Prozent angegeben. Die Formel 2 aus der DIN EN ISO 21563:2021 zur Bestimmung der Rückstellung nach Verformung (K) wurde leicht modifiziert. Anstatt durch die Höhe der Form zu dividieren wurde die Probenhöhe vor der Deformation (h_1) zur Berechnung verwendet, h_2 stellt die Probenhöhe gemessen nach der Deformation dar.

$$K = 100 - \left(100 \cdot \frac{h_1 - h_2}{h_1} \right) \quad (2)$$

Es wurden zehn Probekörper je Gruppe untersucht.

2.9 Detailwiedergabe

Um die Detailwiedergabe zu testen, wurde das frisch angemischte Alginat auf eine dreiteilige Form aus rostfreiem Stahl gestrichen (Abb. 9). Auf der Oberfläche sind fünf horizontale Linien und gemäß DIN EN ISO 21563:2021 drei vertikale Linien eingraviert. Die

drei vertikalen Linien sind jeweils 25 mm lang, unterscheiden sich jedoch in ihrer Tiefe (20 μm , 50 μm , 75 μm). Um diesen Hauptkörper der Form wurde ein Ring gelegt, welcher Raum für das Einfüllen des Alginats bot. Nach Auftragen des Alginats wurde der Deckel der Form aufgelegt, angedrückt und alles mit einem Gewicht von 500 g beschwert, damit das überschüssige Material austreten kann und um den Abformungsprozess zu simulieren. Nach Abbinden des Alginats wurden der Deckel und der Ring entfernt und der Alginatprobekörper von der Form entnommen (Abb. 10), welcher dann unter dem Leica Stereo Wild Auflichtmikroskop (Leica Microsystems, Wetzlar) bei einer 12-fachen Vergrößerung begutachtet wurde. Der Test galt nach DIN EN ISO 21563:2021 als bestanden, wenn die 50 μm tiefe Linie in ihrer kompletten Länge im Alginat wiedergegeben wurde. Hierfür wurde lediglich eine „Ja“- bzw. „Nein“- Entscheidung getroffen. Es wurden zehn Probekörper je Gruppe untersucht.



Abb. 9: Dreiteilige Metallform mit drei vertikalen und fünf horizontalen Linien zur Herstellung der Alginatprobekörper für die Ermittlung der Detailwiedergabe und des Dimensionsverhaltens.



Abb. 10: Alginatprobekörper zur Untersuchung der Detailwiedergabe und des Dimensionsverhaltens.

2.10 Dimensionsverhalten

Für die Untersuchung des Dimensionsverhaltens wurden die gleichen Probekörper verwendet wie für die Prüfung der Detailwiedergabe. Die Probekörper wurden direkt nach dem Abbinden und Entformen unter dem Stereomikroskop bei einer 18-fachen Vergrößerung fotografiert. Es wurden die Stellen fotografiert, an denen die, von der Metallform auf den Probekörper übertragenen, vertikalen 50 μm - und 75 μm -Linien und die fünf horizontalen Linien Rechtecke bilden. Je Probekörper wurden zwei Fotos gemacht. Ein Foto für den oberen Abschnitt, auf welchem zwei Rechtecke untereinander zu erkennen sind (Abb. 11), und ein Foto für den unteren Abschnitt, auf welchem ein Rechteck abgebildet ist (Abb. 12). Es wurden Referenzpunkte auf den Linien festgelegt und die Abstände in der horizontalen und vertikalen Dimension gemessen, wobei im oberen Abschnitt die vertikale Ausdehnung beider Rechtecke gemeinsam gemessen wurde. Für jeden Probekörper wurde der Mittelwert aus den vier Messungen gebildet. Auch die Stahlform wurde bei 18-facher Vergrößerung unter dem Stereomikroskop fotografiert (Abb. 13, Abb. 14), auf die gleiche Weise vermessen und der Mittelwert der Messungen gebildet.

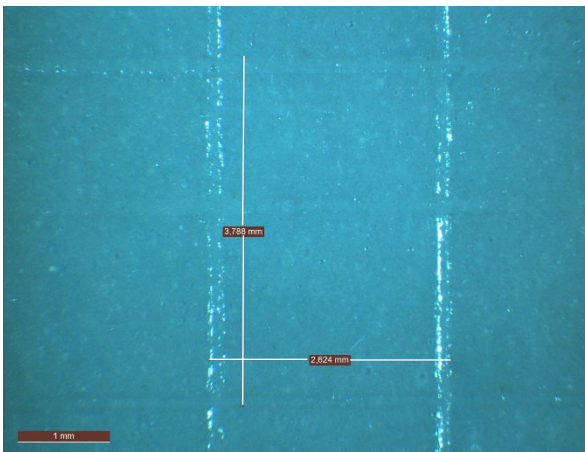


Abb. 11: Foto des oberen Abschnitts des Alginatprobekörpers bei 18-facher Vergrößerung zur Messung der vertikalen und horizontalen Ausdehnung der beiden Rechtecke für die anschließende Ermittlung des Dimensionsverhaltens.

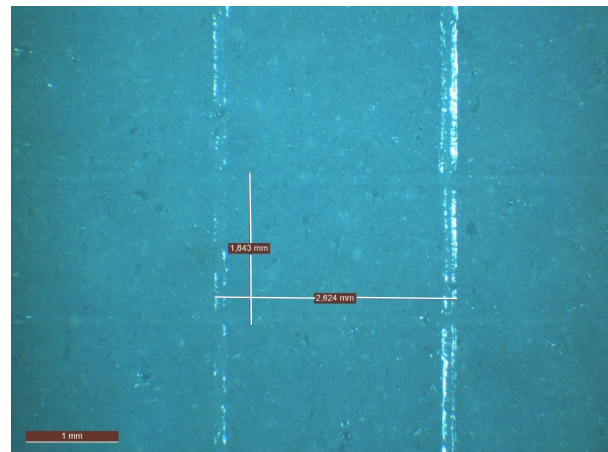


Abb. 12: Foto des unteren Abschnitts des Alginatprobekörpers bei 18-facher Vergrößerung zur Messung der vertikalen und horizontalen Ausdehnung des Rechteckes für die anschließende Ermittlung des Dimensionsverhaltens.

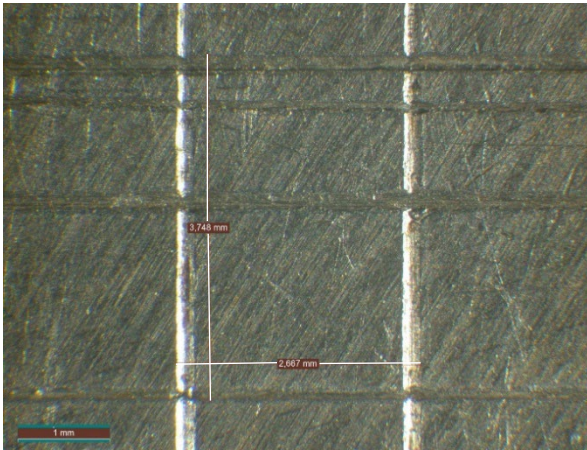


Abb. 13: Foto des oberen Abschnitts der Metallform bei 18-facher Vergrößerung zur Messung der vertikalen und horizontalen Ausdehnung der beiden Rechtecke für die anschließende Ermittlung des Dimensionsverhaltens.

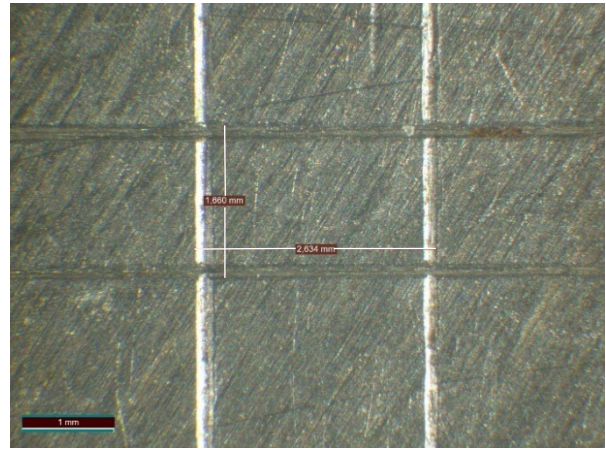


Abb. 14: Foto des unteren Abschnitts der Metallform bei 18-facher Vergrößerung zur Messung der vertikalen und horizontalen Ausdehnung des Rechteckes für die anschließende Ermittlung des Dimensionsverhaltens.

Die Dimensionsänderungen wurden bestimmt, indem die Mittelwerte der Messungen der Probekörper und der Metallform verglichen wurden. Hierfür wurden von den Mittelwerten der Messungen der Proben der Mittelwert der Metallform subtrahiert. Ein positiver Wert bedeutet also eine Expansion des Probekörpers im Vergleich zur Metallform, ein negatives Ergebnis zeigt eine Kontraktion des Probekörpers an.

Zusätzlich wurde die prozentuale lineare Dimensionsänderung mit Formel 3 gemäß DIN EN ISO 4823:2021

$$\Delta L = 100 \cdot \left(\frac{L1 - L2}{L1} \right) \quad (3)$$

berechnet, wobei L1 den Mittelwert der Metallform darstellt und L2 den des Probekörpers. Bei der Berechnung nach den Angaben in der DIN EN ISO 4823:2021 wird eine Kontraktion des Probekörpers also durch einen positiven Wert angezeigt und eine Expansion des Probekörpers im Vergleich zur Metallform durch ein negatives Ergebnis.

Pro Gruppe wurden zehn Probekörper vermessen und untersucht.

2.11 Oberflächenrauheit des Gipses

Mithilfe des optischen Profilometers MicroSpy der Firma FRT (FRT, Bergisch-Gladbach) wurde die Oberflächenrauheit von Gipsprobekörpern analysiert, indem der R_a -Wert (Mittenrauwert) ermittelt wurde. Dieser gibt einen Überblick über die Rauheit der Probe, indem das arithmetische Mittel aller Abweichungen von der Mittellinie des Rauheitsprofils innerhalb der Messlänge bestimmt wird (Dorner et al., 2014).

Für die Herstellung der Gipsprobekörper wurde ein kleines Kunststoffmodell, welches einen Eckzahn, zwei Prämolaren und einen Molaren auf einem Sockel darstellt, mit jeder Alginatgruppe abgeformt und anschließend mit Superhartgips Typ IV ausgegossen. Der Gips wurde nach Herstellerangaben verwendet. 20 g Gipspulver wurden mit 100 ml destilliertem Wasser zuerst kurz von Hand vermischt und anschließend für 30 Sekunden unter Vakuum maschinell angerührt. Im Anschluss wurden die Alginatabformungen auf einer Rüttelplatte ausgegossen. Nach 30 Minuten wurden die Gipsmodelle entformt und für die Untersuchung am Profilometer vorbereitet. Um zu gewährleisten, dass jede Probe an der gleichen Stelle untersucht wurde, wurde eine Schablone aus additionsvernetzendem Silikon hergestellt, in die ein 3 mm x 3 mm großes Fenster geschnitten wurde (Abb. 15). Mithilfe dieser Schablone wurde das Testfeld mit einem Fineliner auf jedem Probekörper im Bereich des Sockels auf Höhe des ersten Prämolaren markiert (Abb. 16). Im Testfeld jedes Probekörpers wurden fünf Messungen durchgeführt - eine Messung in jeder Ecke und eine Messung in der Mitte des Feldes. Die Messungen wurden mit der zum Profilometer zugehörigen Software FRT Mark III hinsichtlich der Oberflächenrauheit analysiert, wobei für jeden Probekörper der Mittelwert aus den fünf Messungen je Testfeld gebildet wurde.

Mit jeder Gruppe wurden zehn Alginatabformungen gemacht und zehn Probekörper hergestellt.

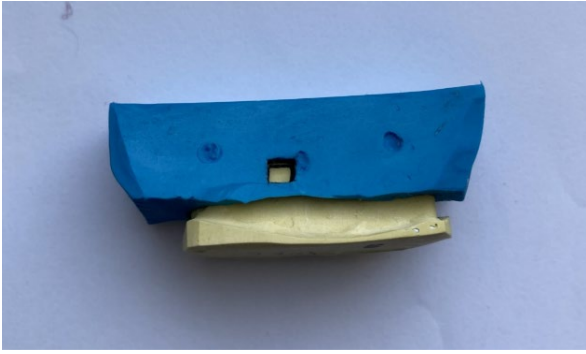


Abb. 15: Silikon-Schablone auf dem Gipsprobekörper zur Markierung des Testfeldes für die Bestimmung der Oberflächenrauheit.

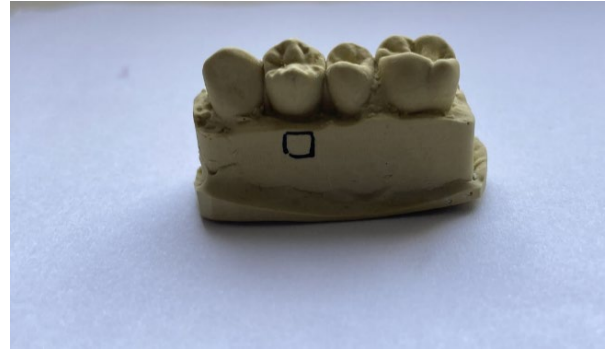


Abb. 16: Gipsprobekörper mit Testfeldmarkierung für die Bestimmung der Oberflächenrauheit.

2.12 Statistische Auswertung

Die Ergebnisse wurden mit der Software GraphPad Prism 10.1.2 (GraphPad, Boston, Massachusetts, USA) statistisch ausgewertet. Für jedes Ergebnis wurden der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt. Zum Nachweis, ob die Ergebnisse einer Normalverteilung folgen, diente der Shapiro-Wilk-Normalitätstest. Der ANOVA-Test wurde angewendet, um einen Vergleich zwischen den Gruppen zu ermitteln. Wenn der ANOVA-Test signifikant war, wurden die Gruppen im Anschluss mit dem Tukey post hoc-Test paarweise verglichen. Die Daten, die nicht normalverteilt waren, wurden im Weiteren mit dem Kruskal-Wallis-Test und dem Dunn post hoc-Test analysiert. Das Signifikanzlevel wurde bei jedem Test auf $p \leq 0,05$ festgelegt.

3. Ergebnisse

3.1 Chemische Analyse der Pflanzenextrakte

Die Gaschromatografie und die Massenspektrometrie ergaben im Falle des *Syzygium aromaticum* Extraktes 60 und im Falle des *Zingiber officinale* Extraktes 43 verschiedene chemische Verbindungen. Anhand der Retentionszeiten wurden die chemischen Verbindungen identifiziert. Die von dem Detektor angegebenen Flächenprozentage geben einen Anhaltspunkt für die jeweiligen Massenanteile in den Proben. Die Ergebnisse der chemischen Analyse sind den Tabellen 1 (*Syzygium aromaticum* Extrakt) und 2 (*Zingiber officinale* Extrakt) zu entnehmen.

Tab. 1: Chemische Verbindungen des *Syzygium aromaticum* Extraktes mit ihren Retentionszeiten und den Flächenprozentagen.

	Retentionszeit in min	Chemische Verbindung	Fläche in %
1	5,32	α -Cedrol	1,75
2	5,68	Caryophyllen	0,42
3	5,74	Methyleugenol	0,33
4	6,45	Gallussäure	1,89
5	6,73	Patchoulol	1,18
6	7,05	2-Heptanol	1,16
7	7,70	Longiborneol	0,47
8	7,81	Isobornylacetat	0,77
9	8,01	Kaffeensäure	0,96
10	8,80	Phytol	0,70
11	8,32	2-Hexadecanol	1,28
12	8,63	Salicylsäure	0,34
13	9,14	Carveol	2,20
14	9,51	β -Curcumene	0,89
15	9,79	Chavicol	1,14
16	9,86	Zimtalkohol	1,45
17	10,46	3',4',6,7-Tetramethoxyflavon	0,71
18	10,57	p-Cymen-7-ol	1,03
19	10,74	Cubebol	0,77
20	10,85	Ylangene	0,47
21	11,12	Eugenol	29,46
22	11,25	γ -Muurolen	1,61
23	11,28	α -Copaen	0,80
24	11,61	Isoeugenol	0,74

Tab. 1: Fortsetzung.

	Retentionszeit in min	Chemische Verbindung	Fläche in %
25	11,79	β -Caryophyllen	10,12
26	12,08	α -Humulen	2,26
27	12,13	β -Elemen	1,08
28	12,27	γ -Cadinen	0,58
29	12,51	Alloaromadendren	0,67
30	12,74	δ -Cadinen	3,72
31	12,86	α -Cubeben	0,42
32	12,90	α -Cedren	0,39
33	12,95	Retinol	0,38
34	13,11	Caryophyllenepoxid	0,58
35	13,16	α -Ionol	0,92
36	13,37	Widdrol	0,77
37	13,38	Elemol	1,00
38	13,41	Ledene	0,77
39	13,53	β -Patchoulene	2,57
40	13,88	α -Ylangen	0,59
41	13,94	Sclareol	0,39
42	13,99	β -Ionon	0,43
43	14,12	Epiglobulol	0,30
44	14,17	Thunbergol	0,67
45	14,31	Spathulenol	1,11
46	14,43	4'-Hydroxy-5-methoxyflavon	1,17
47	15,61	Shyobunol	0,87
48	15,86	Syringasäure	0,92
49	16,24	β -Carotin	1,87
50	16,64	Afromosin 7-O-glucosid	0,86
51	16,89	5-hydroxy-3,3',4',6,7-Pentamethoxyflavon	0,52
52	18,09	3',4',5',5,6,7-Hexamethoxyflavone	1,15
53	18,31	Ölsäure-Oleylester	2,05
54	18,63	Ascaridol	1,06
55	19,36	Vitexin	1,54
56	20,74	Homovanillinsäure	1,52
57	21,10	3,5,7-Trimethoxyflavon	1,18
58	21,61	γ -Selinen	1,12
59	22,77	Dehydrodieugenol	0,74
60	23,08	Geranylisovalerat	1,18

Tab. 2: Chemische Verbindungen des Zingiber officinale Extraktes mit ihren Retentionszeiten und den Flächenprozenten.

	Retentionszeit in min	Chemische Verbindung	Fläche in %
1	3,91	7-Hydroxy-4-methyl-3-phenylcoumarin	2,23
2	4,49	2',5'-Dimethoxyflavon	1,18
3	4,66	2-Hydroxychalkon	1,26
4	4,85	3',4',5',5,6,7-Hexamethoxyflavon	1,21
5	5,09	Clovane	1,32
6	5,46	Luteolin-6-C-glucosid	0,51
7	5,78	Swertisin	1,14
8	6,39	7,3',4',5'-Tetramethoxyflavanon	1,54
9	6,65	3,2',4',5'-Tetramethoxyflavon	0,72
10	6,99	Isopulegol	1,53
11	7,46	Cubebol	0,75
12	7,64	7,2',4'-Trimethoxyflavon	0,64
13	8,04	Gallussäure	1,44
14	8,32	Gentisinsäure	1,23
15	8,69	α -Cedrol	0,63
16	8,95	Epicubebol	2,25
17	9,16	Caryophyllenepoxid	1,17
18	9,51	Sclareol	1,46
19	9,64	3,6,3',4'-Tetramethoxyflavon	0,31
20	10,43	Casticin	1,01
21	11,17	Patchoulan	1,15
22	12,03	Caryophyllenoxid	5,21
23	12,29	3,7,8,2'-Tetramethoxyflavon	2,16
24	13,25	2-Cyclohexen-1-one	1,38
25	13,36	2,6-Dimethylphenol	2,03
26	13,72	2',4'-Dimethoxy-3-hydroxy-6-methylflavon	1,85
27	13,98	Calderol	1,49
28	14,50	3,6,2',3'-Tetramethoxyflavon	1,34
29	15,01	Vanillinsäure	2,51
30	15,17	3,5,7-Trimethoxyflavon	3,20
31	15,46	Gardenin	0,90
32	15,84	4',5,6,7-Tetramethoxyflavon	3,20
33	16,52	5,7,2'-Trimethoxyflavon	2,57
34	16,65	Ölsäure	3,78
35	16,96	Farnesol	2,08
36	17,22	Corymbolon	1,84
37	17,72	Digoxigenin	4,04
38	18,28	Isolongifolol	1,93
39	18,54	Decansäure	2,19

Tab. 2: Fortsetzung.

	Retentionszeit in min	Chemische Verbindung	Fläche in %
40	19,27	β -Carotin	0,75
41	21,57	β -Ionon	10,19
42	22,54	β -Stigmasterol	16,75
43	23,06	Betulin	5,25

3.2 Charakterisierung der Silbernanopartikel

3.2.1 Rasterelektronenmikroskopie

Die REM-Bilder, welche von den Silbernanopartikel-Pflanzenextrakt-Proben gemacht wurden, sind im Folgenden dargestellt. Die Abbildungen 17 bis 19 zeigen die Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Probe in verschiedenen Vergrößerungen, die Abbildungen 20 bis 22 stellen verschiedene Vergrößerungen der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Probe dar. Es sind hauptsächlich kugelförmige Partikelstrukturen und Zusammenschlüsse von Partikeln erkennbar. Die Größen der Partikel, welche auf den Fotos zu erkennen sind, reichen von 60 nm bis 1 μ m, wobei bei der Probe mit Ingwerextrakt vermehrt größere Partikel vorliegen, welche bereits bei geringerer Vergrößerung zu erkennen sind. Bei der Probe mit Gewürznelkenextrakt sind die Partikel erst bei höheren Vergrößerungen deutlicher voneinander abgrenzbar.

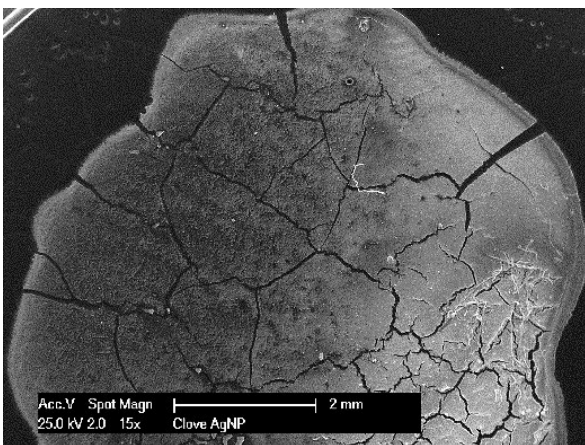


Abb. 17: Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Probe in 15-facher Vergrößerung.

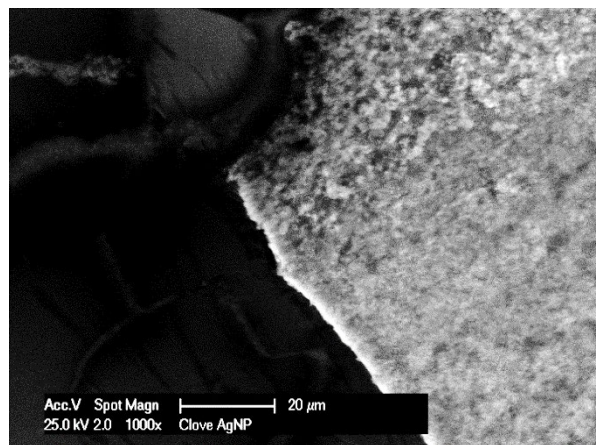


Abb. 18: Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Probe in 1000-facher Vergrößerung.

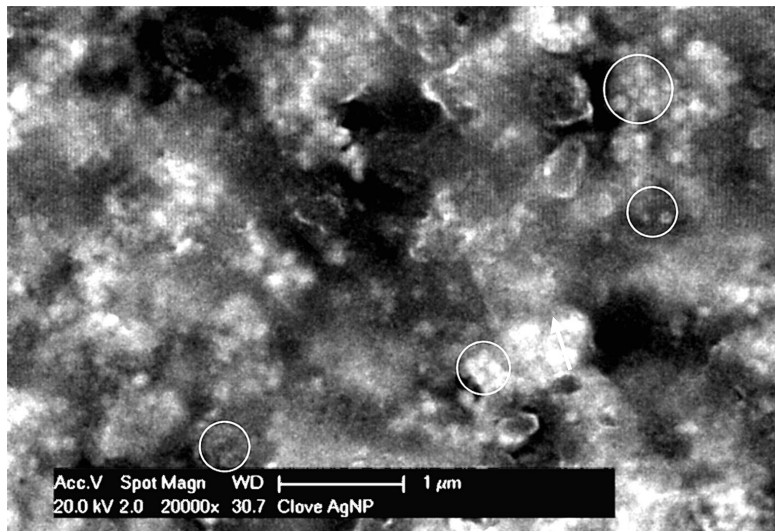


Abb. 19: Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Probe in 20.000-facher Vergrößerung. Mögliche Nanopartikel sind mit den Kreisen markiert.

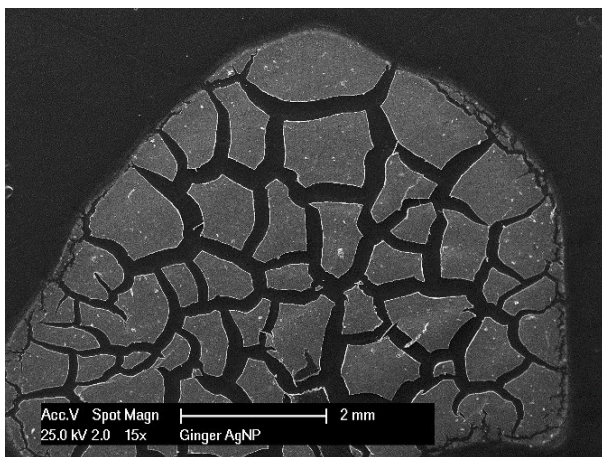


Abb. 20: Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Probe in 15-facher Vergrößerung.

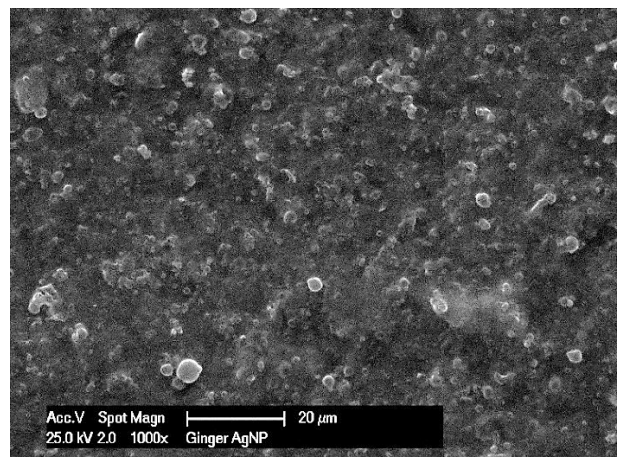


Abb. 21: Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Probe in 1000-facher Vergrößerung.

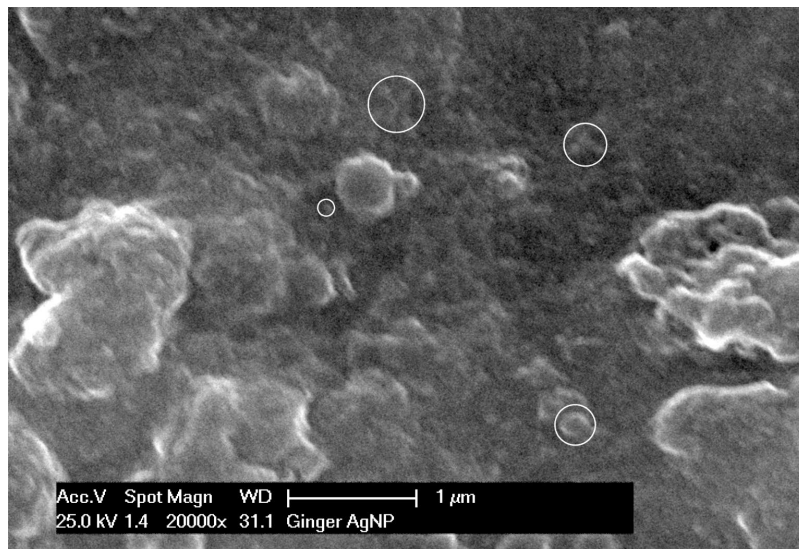


Abb. 22: Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Probe in 20.000-facher Vergrößerung. Mögliche Nanopartikel sind mit den Kreisen markiert.

3.2.2 UV-Vis-Spektroskopie

Die UV-Vis-Spektroskopie wurde jeweils nach 0, 1, 2, 4, 24, 48 und 72 Stunden nach Mischen der Silbernitratlösung mit den Pflanzenextrakten durchgeführt. Abbildung 23 stellt die wellenlängen- und zeitabhängige rel. Absorptionsintensität der Silbernitrat-Gewürnelkenextrakt-Mischung dar, Abbildung 24 die der Silbernitrat-Ingwerextrakt-Mischung. Die rel. Absorptionswerte der beiden Mischungen in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Zeit sind in den Tabellen 3 und 4 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass mit zunehmender Zeit auch die rel. Absorptionsintensität steigt.

Für die Mischung mit Gewürnelkenextrakt liegen die rel. Absorptionskurven nach 48 und 72 Stunden ab einer Wellenlänge von 300 nm deutlich über den rel. Absorptionswerten nach 0, 1, 2, 4 und 24 Stunden. Der höchste Wert liegt bei 6,327 und wurde nach 72 Stunden bei einer Wellenlänge von 380 nm gemessen. Nach diesem Peak fällt die rel. Absorptionsintensität, allerdings nicht weiter als auf 5,127 (440 nm), und verbleibt in einem rel. Absorptionsbereich zwischen 5 und 6. Die rel. Absorptionskurven nach 1, 2, 4 und 24 Stunden haben ihr Maximum bei 300 nm und fallen mit steigender Wellenlänge ebenfalls nicht stark ab. Die Kurve der Messung nach 24 Stunden verzeichnet ein erneutes leichtes Maximum im Bereich von 420 nm bis 440 nm.

Die Ergebnisse der UV-Vis-Spektroskopie der Silbernitrat-Ingwerextrakt-Mischung zeigen eine erhöhte rel. Absorptionsintensität nach 24, 48 und 72 Stunden. Der höchste Peak der Messungen nach 0, 2, 4, 24, 48 und 72 Stunden liegt im Bereich von 300 nm, der nach 1 Stunde bei 320 nm. Nach Abfall steigt die rel. Absorptionsintensität ab 340 nm im Falle der 48- und 72-Stunden-Kurve wieder an, erreicht ihr Maximum bei 440 nm (2,580 nach 48 Stunden, 2,940 nach 72 Stunden) und fällt anschließend mit zunehmender Wellenlänge wieder kontinuierlich ab. Die Messung nach 24 Stunden steigt bei 420 nm leicht auf 2,188 an, fällt danach aber ebenfalls ab.

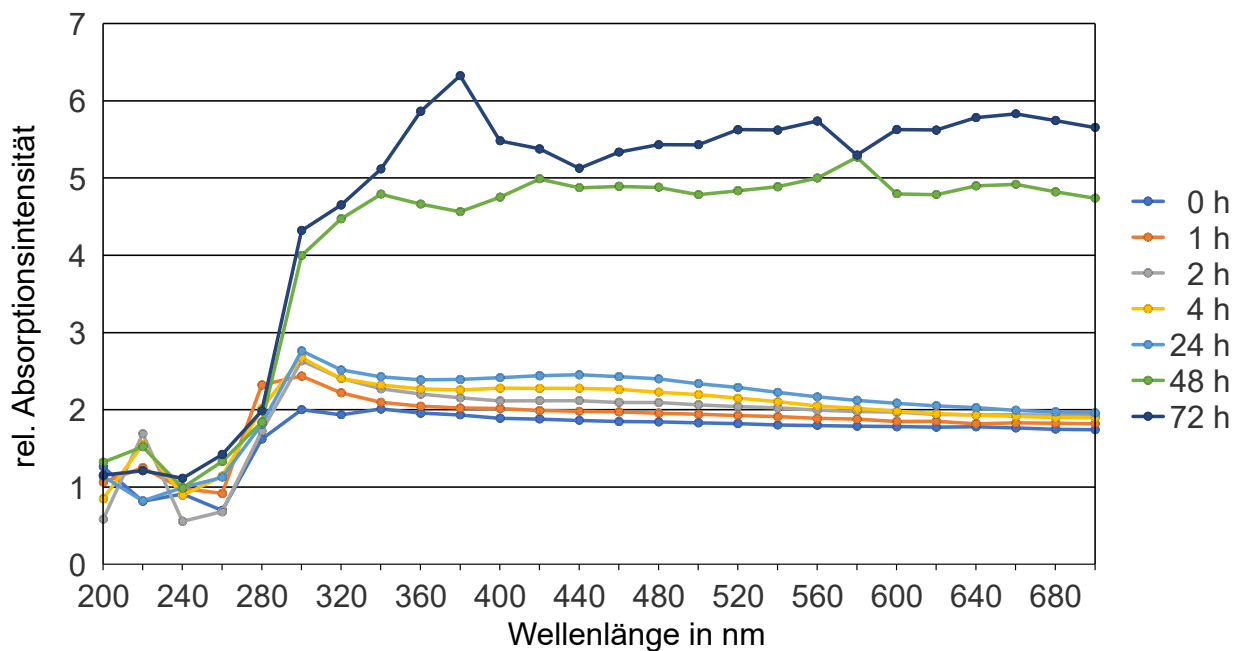


Abb. 23: Zeit- und wellenlängenabhängiges rel. Absorptionsspektrum der Silbernitrat-Gewürznelkenextrakt-Mischung.

Tab. 3: Rel. Absorptionsintensitäten der Silbernitrat-Gewürznelkenextrakt-Mischung bei 200 bis 700 nm nach 0, 1, 2, 4, 24, 48 und 72 Stunden nach dem Mischen.

λ in nm	rel. Absorptionsintensität nach						
	0 h	1 h	2 h	4 h	24 h	48 h	72 h
200	1,262	1,065	0,583	0,848	1,140	1,323	1,153
220	0,817	1,252	1,690	1,551	0,824	1,523	1,212
240	0,911	0,982	0,556	0,891	0,994	0,992	1,113
260	0,699	0,917	0,681	1,143	1,128	1,331	1,423
280	1,621	2,322	1,725	2,015	1,814	1,842	1,986
300	2,001	2,437	2,636	2,676	2,764	3,999	4,321
320	1,937	2,222	2,408	2,406	2,517	4,474	4,652
340	2,011	2,099	2,273	2,320	2,428	4,793	5,117
360	1,957	2,047	2,203	2,270	2,388	4,665	5,865
380	1,934	2,023	2,157	2,257	2,393	4,565	6,327
400	1,890	2,017	2,117	2,281	2,418	4,753	5,482
420	1,880	1,991	2,119	2,278	2,442	4,991	5,379
440	1,863	1,982	2,119	2,280	2,454	4,876	5,127
460	1,850	1,973	2,097	2,264	2,430	4,893	5,336
480	1,844	1,956	2,096	2,229	2,403	4,881	5,432
500	1,832	1,943	2,065	2,197	2,341	4,787	5,431
520	1,822	1,927	2,043	2,149	2,291	4,837	5,628
540	1,804	1,913	2,027	2,106	2,227	4,889	5,622
560	1,798	1,889	1,997	2,051	2,169	5,002	5,739
580	1,788	1,880	1,980	2,018	2,123	5,271	5,299
600	1,782	1,851	1,969	1,982	2,085	4,798	5,629
620	1,776	1,854	1,941	1,950	2,053	4,788	5,623
640	1,781	1,820	1,936	1,931	2,029	4,901	5,783
660	1,766	1,830	1,937	1,916	1,995	4,921	5,833
680	1,749	1,826	1,933	1,900	1,975	4,824	5,745
700	1,743	1,820	1,924	1,898	1,961	4,741	5,655

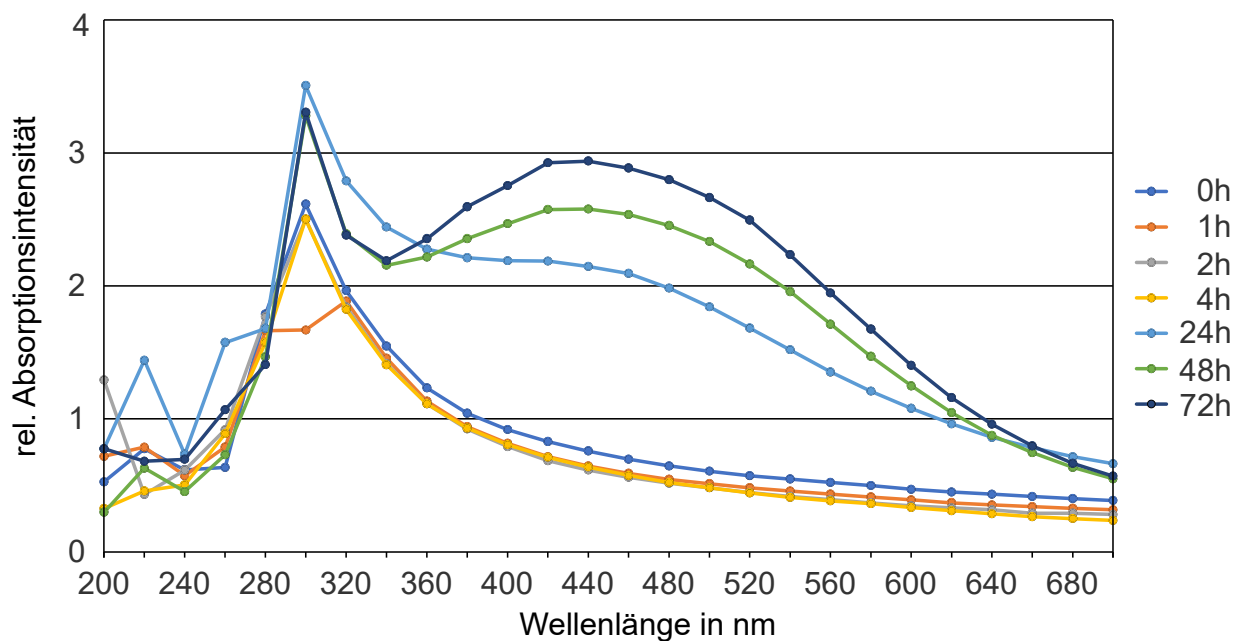


Abb. 24: Zeit- und wellenlängenabhängiges rel. Absorptionsspektrum der Silbernitrat-Ingwerextrakt-Mischung.

Tab. 4: Rel. Absorptionsintensitäten der Silbernitrat-Ingwerextrakt-Mischung bei 200 bis 700 nm nach 0, 1, 2, 4, 24, 48 und 72 Stunden nach dem Mischen.

λ in nm	rel. Absorptionsintensität nach						
	0 h	1 h	2 h	4 h	24 h	48 h	72 h
200	0,527	0,719	1,294	0,326	0,775	0,298	0,777
220	0,776	0,788	0,432	0,459	1,442	0,630	0,682
240	0,618	0,574	0,616	0,504	0,735	0,454	0,697
260	0,636	0,789	0,919	0,889	1,575	0,731	1,069
280	1,789	1,664	1,769	1,576	1,681	1,467	1,410
300	2,617	1,669	2,503	2,504	3,508	3,282	3,307
320	1,966	1,886	1,844	1,825	2,791	2,394	2,383
340	1,549	1,457	1,417	1,408	2,444	2,156	2,191
360	1,234	1,134	1,114	1,114	2,277	2,219	2,356
380	1,043	0,942	0,924	0,931	2,213	2,357	2,597
400	0,920	0,817	0,792	0,807	2,191	2,469	2,756
420	0,830	0,716	0,686	0,711	2,188	2,576	2,928
440	0,759	0,646	0,617	0,638	2,148	2,580	2,940
460	0,698	0,591	0,562	0,575	2,094	2,539	2,888
480	0,647	0,545	0,517	0,522	1,984	2,455	2,800
500	0,607	0,513	0,483	0,483	1,843	2,335	2,666

Tab. 4: Fortsetzung.

λ in nm	rel. Absorptionsintensität nach						
	0 h	1 h	2 h	4 h	24 h	48 h	72 h
520	0,573	0,483	0,447	0,444	1,684	2,165	2,496
540	0,548	0,458	0,418	0,410	1,520	1,958	2,235
560	0,523	0,435	0,393	0,384	1,353	1,713	1,948
580	0,499	0,414	0,369	0,363	1,209	1,471	1,676
600	0,471	0,392	0,347	0,334	1,080	1,249	1,403
620	0,451	0,370	0,331	0,310	0,963	1,048	1,161
640	0,434	0,354	0,317	0,286	0,861	0,877	0,960
660	0,417	0,341	0,291	0,265	0,784	0,746	0,798
680	0,401	0,328	0,291	0,250	0,716	0,636	0,667
700	0,387	0,317	0,282	0,237	0,664	0,550	0,570

3.3 Antimikrobielle Aktivität

Die vier Versuchsgruppen wurden auf ihre antimikrobielle Aktivität gegenüber *S. mutans*, MRSA, MSSA und *C. albicans* getestet. Tabelle 3 und Abbildung 25 stellen die Mittelwerte und Standardabweichungen der Inhibitionszonendurchmesser der vier Versuchsgruppen bei den vier Mikroorganismen vergleichend dar. Die Kontrollgruppe wies bei keinem der Mikroorganismen eine Inhibitionszone auf.

Tab. 5: Deskriptive Statistik der antimikrobiellen Aktivität der Versuchsgruppen anhand der Inhibitionszonendurchmesser in mm. Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe.

Mikroorganismus	Inhibitionszone in mm							
	Kontrolle		CHX		SA+AgNPs		ZO+AgNPs	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
<i>S. mutans</i>	0,00	0,00	10,40	0,99	8,25	0,80	3,93	0,39
MRSA	0,00	0,00	5,74	0,77	7,18	1,25	4,48	0,51
MSSA	0,00	0,00	5,04	0,59	6,56	1,96	5,08	0,41
<i>C. albicans</i>	0,00	0,00	4,71	1,48	11,90	2,33	7,60	0,30

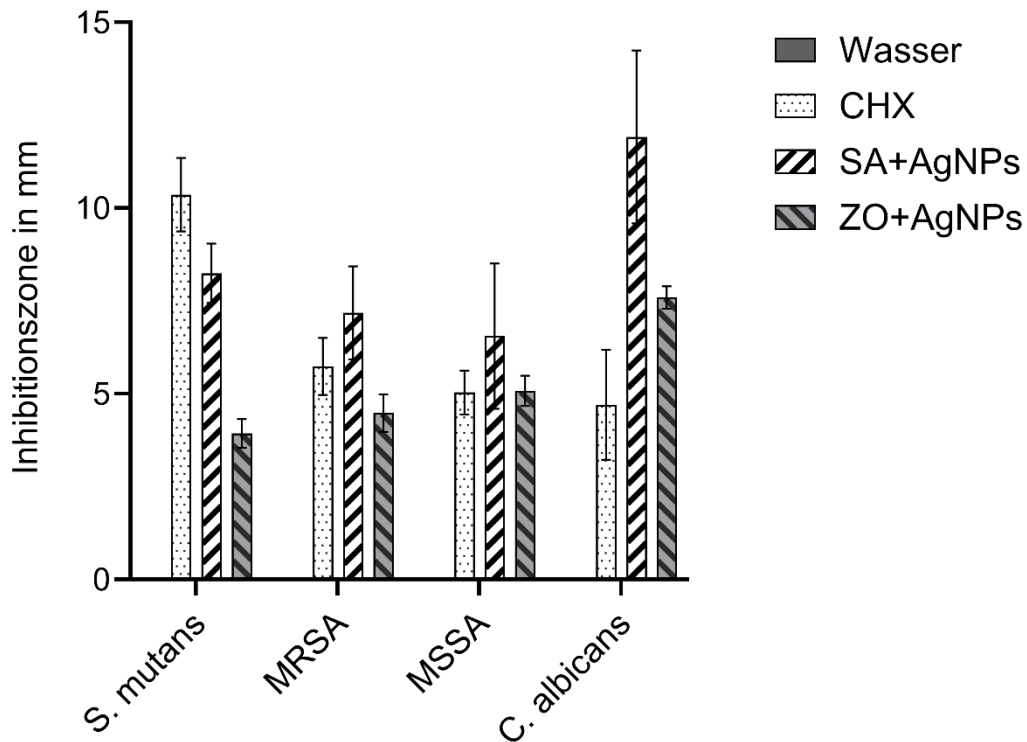


Abb. 25: Gegenüberstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Inhibitionszonendurchmesser der Versuchsgruppen bei den verschiedenen Mikroorganismen in mm als Maß für die antimikrobielle Aktivität. Die Kontrollgruppe (Wasser) bildete bei keinem Mikroorganismus eine Hemmzone aus. Die in der Legende dargestellte grafische Codierung der Versuchsgruppen wurde ebenfalls in den folgenden Abbildungen 26 bis 33 verwendet.

Die Ergebnisse bei *S. mutans*, MRSA und MSSA waren normal verteilt. Für *S. mutans* zeigte die CHX-Gruppe die stärkste antimikrobielle Aktivität mit einer mittleren Inhibitionszone von $10,40 \pm 0,99$ mm. Diese unterschied sich signifikant von den Hemmzonen der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe (SA+AgNPs) mit $8,25 \pm 0,80$ mm und der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Gruppe (ZO+AgNPs) mit $3,93 \pm 0,39$ mm. Alle drei Modifikationen waren signifikant wirkungsvoller als die Kontrollgruppe (Abb. 26).

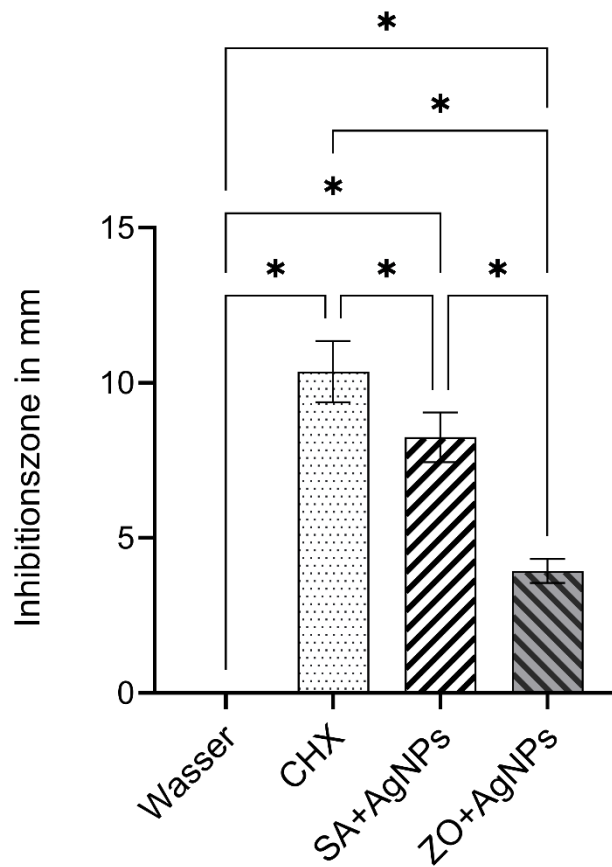


Abb. 26: Grafische Darstellung der Inhibitionszonendurchmesser der Versuchsgruppen in mm gegenüber *S. mutans*. Die Kontrollgruppe (Wasser) wies keine Hemmzone auf. Die drei modifizierten Alginatgruppen zeigten eine signifikant bessere antimikrobielle Aktivität im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die CHX-Gruppe wies eine signifikant größere Hemmzone als die beiden Silbernanopartikel-modifizierten Gruppen auf. Die Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe (SA+AgNPs) war signifikant wirkungsvoller als die Gruppe mit Silbernanopartikeln und Ingwerextrakt (ZO+AgNPs).

Auch bei MRSA zeigten die modifizierten Gruppen eine signifikant stärkere antimikrobielle Wirkung. Hier war die SA+AgNPs-Gruppe mit einer Inhibitionszone von $7,18 \pm 1,25$ mm am wirkungsvollsten, gefolgt von CHX mit $5,74 \pm 0,77$ mm und ZO+AgNPs mit $4,48 \pm 0,51$ mm (Abb. 27).

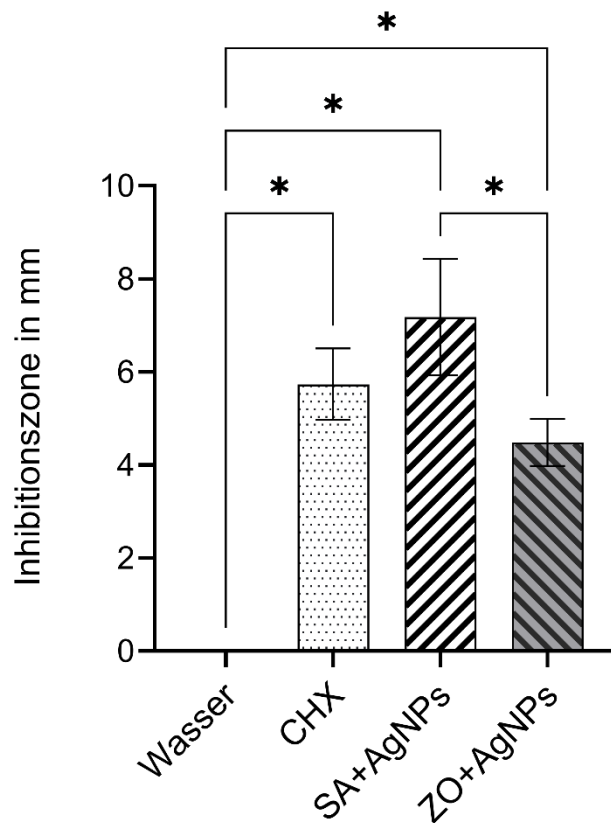


Abb. 27: Grafische Darstellung der Inhibitionszonendurchmesser der Versuchsgruppen in mm gegenüber MRSA. Die Kontrollgruppe (Wasser) wies keine Hemmzone auf. Die drei modifizierten Alginatgruppen zeigten signifikant bessere antimikrobielle Aktivität im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die ZO+AgNPs-Gruppe war signifikant wirkungsschwächer als die SA+AgNPs-Gruppe.

Die SA+AgNPs-Gruppe zeigte mit $6,56 \pm 1,96$ mm auch gegenüber MSSA die größte antimikrobielle Aktivität im Vergleich zu den anderen Gruppen. Die Inhibitionszone der CHX-Gruppe betrug im Mittel $5,04 \pm 0,59$ mm, die der ZO+AgNPs-Gruppe $5,08 \pm 0,41$ mm. Damit bestand auch im Falle von MSSA bei den modifizierten Alginatgruppen eine signifikante antimikrobielle Aktivität verglichen mit der Kontrollgruppe (Abb. 28).

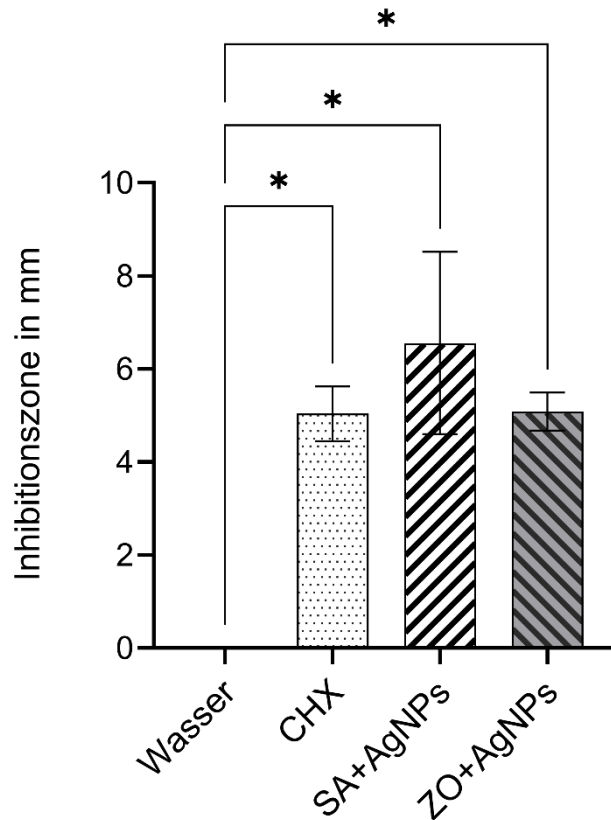


Abb. 28: Grafische Darstellung der Inhibitionszonen Durchmesser der Versuchsgruppen in mm gegenüber MSSA. Die Kontrollgruppe (Wasser) wies keine Hemmzone auf. Alle drei modifizierten Alginategruppen zeigten eine signifikant bessere antimikrobielle Aktivität im Vergleich zur Kontrollgruppe.

Im Falle von *C. albicans* zeigten die Ergebnisse keine Normalverteilung und wurden daraufhin mit dem Kruskal-Wallis-Test und dem Dunn post hoc-Test analysiert. Hier war lediglich die SA+AgNPs-Gruppe mit einer mittleren Inhibitionszone von $11,90 \pm 2,33$ mm signifikant wirkungsvoller als die Kontrollgruppe. Aber auch bei den anderen beiden Modifikationsgruppen konnte die Ausbildung von Inhibitionszonen in der antimikrobiellen Testung beobachtet werden. So betrug die Inhibitionszone bei der CHX-Gruppe im Durchschnitt $4,71 \pm 1,48$ mm und die durchschnittliche Größe der Inhibitionszone der ZO+AgNPs-Gruppe $7,60 \pm 0,30$ mm (Abb. 29).

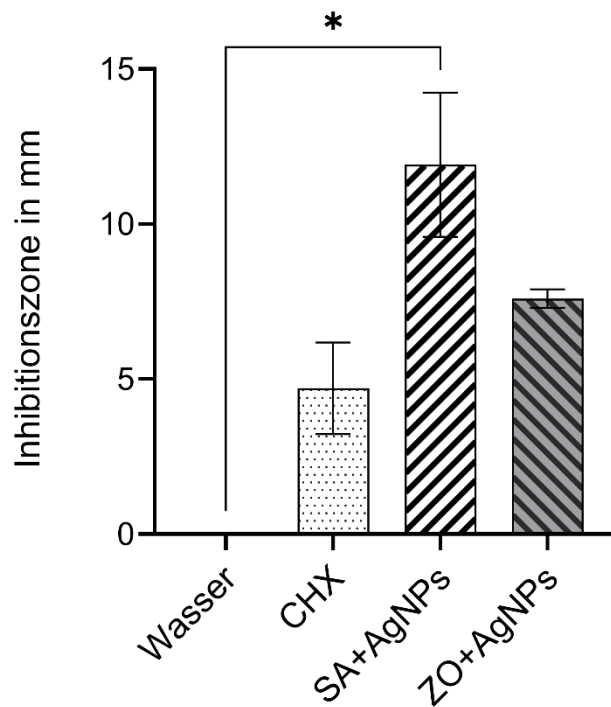


Abb. 29: Grafische Darstellung der Inhibitionszonendurchmesser der Versuchsgruppen in mm gegenüber *C. albicans*. Die Kontrollgruppe (Wasser) wies keine Hemmzone auf. Die SA+AgNPs-Gruppe war signifikant wirkungsvoller als die Kontrollgruppe.

3.4 Reißfestigkeit

Die Ergebnisse der Reißfestigkeitsprüfung folgten einer Normalverteilung und wurden daraufhin mit der ANOVA analysiert. Der p-Wert der ANOVA betrug 0,005, womit ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen deutlich wurde. Die ZO+AgNPs-Gruppe hatte im Vergleich zu den drei anderen Gruppen eine signifikant erhöhte Reißfestigkeit mit $0,94 \pm 0,17$ N/mm. Die anderen drei Gruppen unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind aus Tabelle 6 ersichtlich und in Abbildung 30 dargestellt.

Tab. 6: Deskriptive Statistik der Reißfestigkeit der Versuchsgruppen in N/mm. Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe.

	Versuchsgruppen			
	Kontrolle	CHX	SA+AgNPs	ZO+AgNPs
Mittelwert in N/mm	0,79	0,79	0,76	0,94
SD in N/mm	0,09	0,09	0,09	0,17
p-Wert (im Vgl. zu Kontrolle)	-	> 0,99	0,94	0,03

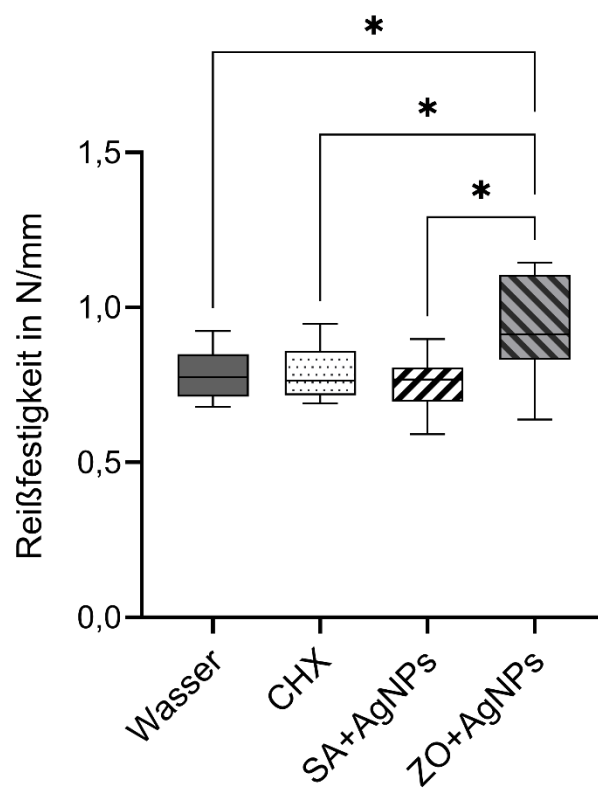


Abb. 30: Box-Plot-Diagramm der Reißfestigkeit der Versuchsgruppen in N/mm. Die ZO+AgNPs-Gruppe wies eine signifikant erhöhte Reißfestigkeit im Vergleich zur Kontrollgruppe (Wasser), der CHX-Gruppe und der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe auf.

3.5 Elastisches Rückstellvermögen

Der Shapiro-Wilk-Test ergab für die Messwerte des Versuchs zum elastischen Rückstellvermögen eine Normalverteilung. Mithilfe des Tukey post hoc-Tests wurden die Gruppen paarweise miteinander verglichen. Die drei Modifikationen zeigten jeweils im Vergleich zur Kontrollgruppe keine signifikante Veränderung des elastischen Rückstellvermögens. Die CHX-Gruppe hatte mit $98,5 \pm 0,4$ % das beste Rückstellvermögen. Darauf folgten die SA+AgNPs-Gruppe ($98,3 \pm 0,3$ %) und die Kontrollgruppe ($98,2 \pm 0,4$ %). Das Rückstellvermögen der ZO+AgNPs-Gruppe betrug $98,0 \pm 0,4$ % und war damit signifikant niedriger als das der CHX-Gruppe. Tabelle 7 beinhaltet die Mittelwerte und Standardabweichungen der Versuchsgruppen, welche ebenfalls in Abbildung 31 zu sehen sind.

Tab. 7: Deskriptive Statistik des elastischen Rückstellvermögens der Versuchsgruppen in %. Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe.

	Versuchsgruppen			
	Kontrolle	CHX	SA+AgNPs	ZO+AgNPs
Mittelwert in %	98,2	98,5	98,3	98,0
SD in %	0,4	0,4	0,3	0,4
p-Wert (im Vgl. zu Kontrolle)	-	0,21	0,92	0,81

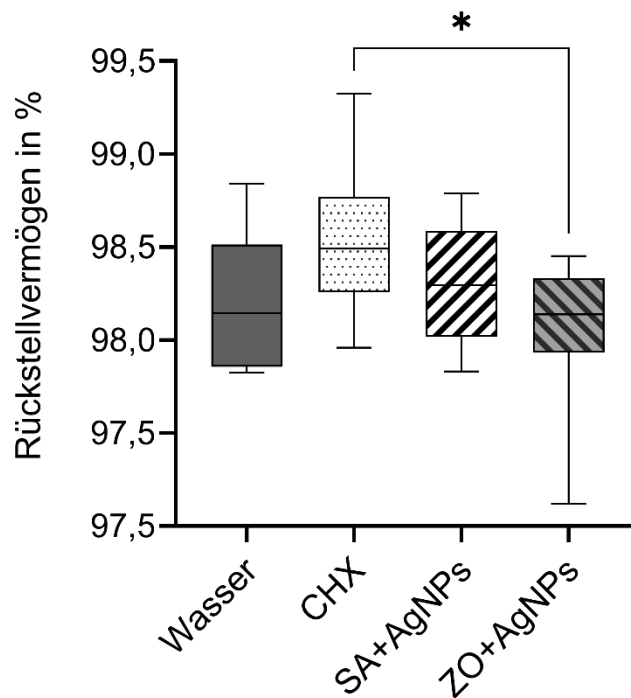


Abb. 31: Box-Plot-Diagramm des elastischen Rückstellvermögens der Versuchsgruppen in %. Die CHX-Gruppe wies ein signifikant höheres elastisches Rückstellvermögen im Vergleich zur ZO+AgNPs-Gruppe auf. Die Kontrollgruppe (Wasser) zeigte keine signifikanten Unterschiede zu den drei Alginatmodifikationen.

3.6 Detailwiedergabe

Es konnte kein Unterschied bezüglich der Detailwiedergabe zwischen den Gruppen festgestellt werden. Alle Proben haben die komplette Länge der 50 µm Linie der Metallform wiedergegeben und somit die Anforderung der DIN EN ISO 21563:2021 erfüllt.

3.7 Dimensionsverhalten

Die Ergebnisse bezüglich des Dimensionsverhaltens der Alginatgruppen wurden aus den arithmetischen Mittelwerten aus vier Messungen je Probe gebildet und die Differenz zum Mittelwert der Messungen der Metallform berechnet. Die Ergebnisse waren normal verteilt und wurden daraufhin mit der ANOVA und dem Tukey post hoc-Test analysiert. Die bei-

den Silbernanopartikel-Gruppen zeigten verglichen mit der Kontrollgruppe keinen signifikanten Unterschied in ihrem Dimensionsverhalten. In der Kontrollgruppe waren die Werte im Durchschnitt um $0,007 \pm 0,028$ mm kleiner als die der Metallform, die ZO+AgNPs-Gruppe zeigte eine Expansion der Proben um $0,002 \pm 0,006$ mm. Die durchschnittliche Dimensionsänderung der SA+AgNPs-Gruppe betrug $0,000 \pm 0,008$ mm. Die Alginatmodifikation mit CHX unterschied sich signifikant zu den anderen drei Gruppen. Die Proben zeigten eine Expansion um durchschnittlich $0,025 \pm 0,016$ mm. Abbildung 32 stellt die Mittelwerte und Standardabweichungen des linearen Dimensionsverhaltens in Millimetern dar, welche ebenfalls aus der Tabelle 8 zu entnehmen sind.

Das Dimensionsverhalten der Proben im Vergleich zur Metallform wurde zusätzlich in Prozent berechnet. Die durchschnittliche Kontraktion der Proben der Kontrollgruppe betrug $0,27 \pm 1,04$ %, die mittlere Expansion der Proben der CHX-Gruppe lag bei $0,92 \pm 0,61$ %. Die beiden mit Silbernanopartikel-Pflanzenextrakt-Mischung modifizierten Gruppen zeigten die geringste lineare Dimensionsänderung. Die Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe zeigte eine durchschnittliche Probenkontraktion von $0,01 \pm 0,29$ %, die Proben der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Gruppe waren im Mittel um $0,06 \pm 0,23$ % größer als die Metallform.

Tab. 8: Deskriptive Statistik des linearen Dimensionsverhaltens der Versuchsgruppen in mm. Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe.

	Versuchsgruppen			
	Kontrolle	CHX	SA+AgNPs	ZO+AgNPs
Mittelwert in mm	-0,007	0,025	-0,000	0,002
SD in mm	0,028	0,016	0,008	0,006
p-Wert (im Vgl. zu Kontrolle)	-	< 0,001	0,78	0,63

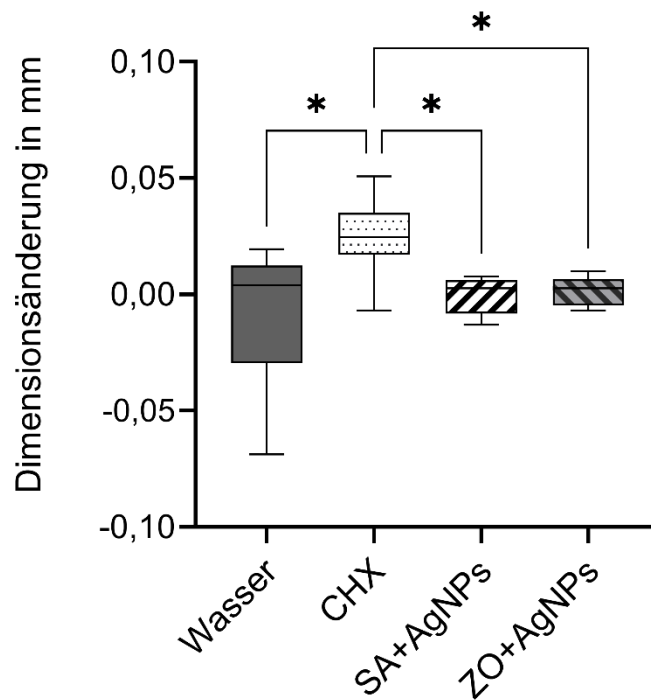


Abb. 32: Box-Plot-Diagramm des linearen Dimensionsverhaltens der Versuchsgruppen in mm. Die CHX-Gruppe zeigte eine signifikante Expansion der Probekörper im Vergleich zu der Kontrollgruppe (Wasser), der SA+AgNPs- und ZO+AgNPs-Gruppe. Zwischen der Kontrollgruppe und den beiden AgNPs-Gruppen bestand kein signifikanter Unterschied.

3.8 Oberflächenrauheit des Gipses

Die Oberflächenrauheit des Gipses wurde anhand des R_a -Wertes bestimmt. Die Ergebnisse waren normal verteilt und die ANOVA zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen ($p < 0,001$). Die Oberflächenrauheit der CHX-Gruppe war am niedrigsten und betrug $2,53 \pm 0,25 \mu\text{m}$. Damit unterschied sie sich signifikant von der SA+AgNPs-Gruppe ($3,48 \pm 0,45 \mu\text{m}$) und der ZO+AgNPs-Gruppe ($3,53 \pm 0,96 \mu\text{m}$), welche eine erhöhte Rauheit zeigten. Ein signifikanter Unterschied bestand zudem zwischen der ZO+AgNPs-Gruppe und der Kontrollgruppe ($2,79 \pm 0,44 \mu\text{m}$). Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 9 und Abbildung 33 dargestellt.

Tab. 9: Deskriptive Statistik der Gipsoberflächenrauheit der Versuchsgruppen in μm . Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe.

	Versuchsgruppen			
	Kontrolle	CHX	SA+AgNPs	ZO+AgNPs
Mittelwert in μm	2,79	2,53	3,48	3,53
SD in μm	0,44	0,25	0,45	0,96
p-Wert (im Vgl. zu Kontrolle)	-	0,74	0,06	0,04

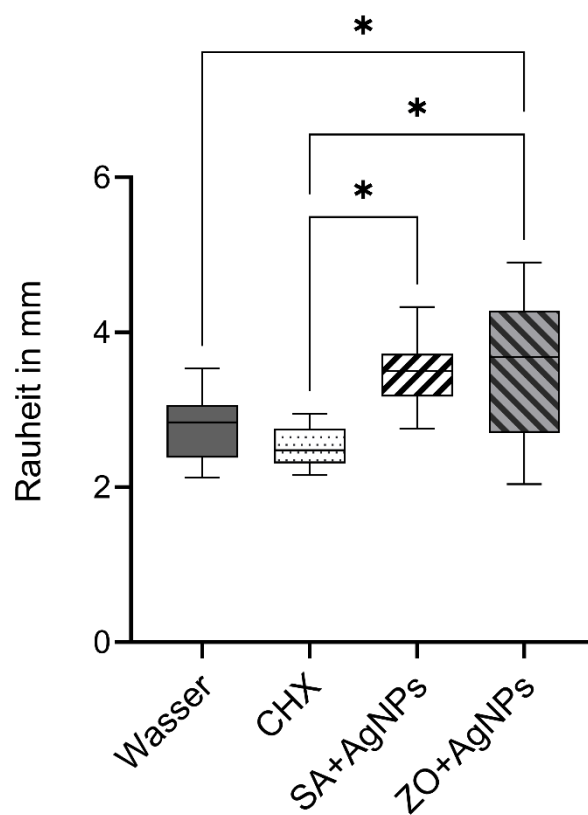


Abb. 33: Box-Plot-Diagramm der Gipsoberflächenrauheit der Versuchsgruppen in μm . Die ZO+AgNPs-Gruppe wies eine signifikant erhöhte Rauheit im Vergleich zur Kontrollgruppe (Wasser) und der CHX-Gruppe auf. Die CHX-Gruppe war signifikant weniger rau als die SA+AgNPs-Gruppe.

4. Diskussion

Im Folgenden werden die verwendeten Methoden und Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungen diskutiert. Vor dem Hintergrund der Vielzahl der verwendeten Methoden werden diese im Rahmen der Diskussion der entsprechenden Ergebnisse diskutiert.

4.1 Diskussion der chemischen Analyse der Pflanzenextrakte

Die Gaschromatografie und die Massenspektrometrie der Pflanzenextrakte ergaben 60 verschiedene chemische Verbindungen für den Extrakt aus Gewürznelke und 43 verschiedene chemische Verbindungen für den Ingwerextrakt. Die gefundenen chemischen Verbindungen können den sekundären Pflanzenstoffen zugeordnet werden und spielen einerseits eine Rolle für die grüne Synthese der Silbernanopartikel und sorgen andererseits für eine pharmakologische Aktivität der Pflanzenextrakte. Sie sind daher von besonderem Interesse, da es zu einem synergistischen Effekt mit den gebildeten Silbernanopartikeln kommen kann, welcher zu einer erhöhten therapeutischen Effektivität führt (Majeed et al., 2022).

Die gefundenen chemischen Verbindungen des Gewürznelkenextraktes lassen sich zum Großteil in die Stoffgruppe der Terpenoide, vor allem der Sesquiterpene, einordnen. Aber auch Phenolsäuren und Phenylpropanoide sind vertreten. Die antimikrobielle Aktivität von Terpenoiden geht auf fünf Wirkungsmechanismen zurück. Das Durchdringen und damit Zerstören der Zellmembran der Mikroorganismen ist ein wesentlicher Faktor. Dadurch kommt es zu einem Verlust von zellulären Bestandteilen und aufgrund der gestörten Integrität der Zellmembran können die physiologischen Aktivitäten der Mikroorganismen nicht aufrechterhalten werden. Der zweite Mechanismus, welcher die antimikrobielle Aktivität fördert, ist die „Anti-quorum Sensing“-Funktion. Damit ist die Unterbindung der Kommunikation der Bakterien untereinander gemeint, welches im weiteren Verlauf einen Schutz vor Resistenzbildung bietet. Als weiterer Wirkungsmechanismus für die antimikrobielle Aktivität ist die Hemmung von ATP zu nennen. Diese bewirkt, dass die Zellen keine Energie mehr haben, um ihre Funktionen auszuüben und daher absterben. Zuletzt bietet das Zusammenwirken verschiedener Terpenoide eine verstärkte Wirkung. So erleichtert das Binden der einen Substanz an der Zellmembran das Durchdringen der Membran

durch eine andere Substanz (Huang et al., 2022). Zwei weitere mögliche Angriffspunkte für Terpenoide sind die Sauerstoffaufnahme und die oxidative Phosphorylierung. Durch die Hemmung der Sauerstoffaufnahme haben aerobe Bakterien nicht genug Energie zu Wachsen. Die Änderung der Zellatmung führt daraufhin zu einer Entkopplung der oxidativen Phosphorylierung (Mahizan et al., 2019). Carveol, ein Terpenoid, welches im Gewürznelkenextrakt vorkommt, verursacht Membranschädigung in *S. aureus*-Zellen und es kommt zum Kaliumverlust. Die Hydroxylgruppe scheint entscheidend für die antimikrobielle Wirkung gegenüber *S. aureus* zu sein (Lopez-Romero et al., 2015).

Die für den Gewürznelkenextrakt charakteristischen Verbindungen Eugenol, Methyleugenol, Isoeugenol und Dehydrodieugenol zählen zu den Phenylpropanoiden. Es ist darauf hinzuweisen, dass Eugenol und Isoeugenol allergenes Potential besitzen (Frosch et al., 1995). Eugenol ist jedoch auch in anderen Materialien enthalten, welche häufig in der Zahnmedizin verwendet werden, da man die antimikrobielle und analgetische Wirkung ausnutzen möchte (Ulanowska und Olas, 2021). Das Vorkommen stellt daher kein Ausschlusskriterium dar, die Anwendung muss aber für jeden Patienten individuell geprüft werden. Bezüglich des Methyleugenols gibt es Richtlinien in der Europäischen Union, welche das Vorkommen in Lebensmitteln und kosmetischen Produkten betreffen. Die International Agency for Research on Cancer hat Methyleugenol im Sommer 2023 als für Menschen möglichen kanzerogenen Stoff der Gruppe 2A eingeteilt, Isoeugenol wurde in die Gruppe 2B eingeordnet. Für beide Stoffe lagen keine epidemiologischen Studien vor, weswegen der Nachweis für die Entstehung von Krebs bei Menschen nicht ausreichend war (Riboli et al., 2023). Nach der Verordnung (EG) Nr. 1334/2008 Anhang III darf kein Methyleugenol in Lebensmitteln zugesetzt sein. In abzuspülenden kosmetischen Mitteln dürfen nach der Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 Anhang III nur 0,0001 % Methyleugenol sowie 0,01 % Isoeugenol vorhanden sein. Es ist anzumerken, dass in dieser Studie beide vorgenannten Stoffe nicht künstlich zugesetzt worden sind, sondern natürlicherweise in dem Gewürznelkenextrakt vorkommen. Schwankungen der Konzentrationen sind möglich, da es sich um ein Naturprodukt handelt (Yeshi et al., 2022). Der Gewürznelkenextrakt stellt nur einen Teil der Anmischflüssigkeit für das Alginatpulver dar. Nach Anmischen des Alginats beträgt der Anteil an Gewürznelkenextrakt an einer Alginatabformung lediglich 0,07 %. Hiervon entfällt wiederum jeweils nur ein sehr geringer Anteil auf Methyleugenol bzw. Isoeugenol, was den Schluss zulässt, dass die definierten Grenzwerte kaum erreicht

werden. Zudem befindet sich das Alginat lediglich für die Zeit des Abbindens in der Mundhöhle des Patienten und die chemischen Verbindungen sind weiterhin innerhalb des Alginate gebunden. Unter Betrachtung dieser Tatsachen, dürfte nicht von einer gesundheitsschädlichen Wirkung auszugehen sein.

Die am häufigsten im Ingwerextrakt vertretene Stoffgruppe ist die Gruppe der Flavone und Flavonoide, welche zu den Polyphenolen gehören. Aber auch Phenolsäuren sind vorhanden. Die Hydroxylgruppen der Flavonoide und die Arten von Substituenten sind hauptverantwortlich für die antimikrobielle Aktivität dieser Untergruppe der sekundären Pflanzenstoffe. Hierbei werden hydrophoben Gruppen als Substituenten eine stärkere antimikrobielle Wirkung zugesprochen (Huang et al., 2022). Weiterhin sind die Hydroxylgruppen in Flavonoiden entscheidend für die grüne Synthese der Silbernanopartikel. Die Anzahl der Hydroxylgruppen und Struktur der Flavonoide bestimmen die Metallbindungskapazität. Die Hydroxylgruppen sind weiterhin wichtig für die Reduktion von Silber zu Silbernanopartikeln (Marstin et al., 2018). Es werden verschiedene Mechanismen diskutiert, welche für die antimikrobielle Aktivität der Flavonoide verantwortlich sind. Flavonoide wirken sowohl an der Zellmembran als auch auf DNA-Ebene und greifen ebenfalls in den Energiemetabolismus der Bakterien ein. Durch die Interaktion mit der Zellmembran und Störung ihrer Integrität wird die Permeabilität erhöht. Der DNA-Metabolismus wird gehemmt und die Expression von Virulenzfaktoren wird herabgesetzt, was wiederum die Pathogenität der Mikroorganismen herabsetzt (Huang et al., 2022).

Die dritte Hauptgruppe der sekundären Pflanzenstoffe sind die stickstoffhaltigen Verbindungen, zu denen auch die Alkaloide gehören (Yeshi et al., 2022), wovon in den beiden Pflanzenextrakten jedoch jeweils nur ein Vertreter nachgewiesen werden konnte. Alkaloide wirken unter anderem durch die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen mit Proteinen oder Enzymen und hemmen dadurch deren Aktivität. Dies ist auf das Stickstoffatom, welches als Protonenakzeptor wirkt, oder die Amin-Wasserstoffatome, die als Protonendonatoren fungieren, zurückzuführen. Weitere Wirkungsmechanismen sind die Inhibition von Effluxpumpen, die Hemmung der DNA-Synthese und -Reparatur und die Veränderung der Membranpermeabilität (Huang et al., 2022). Aufgrund der im Verhältnis zu den anderen Pflanzenstoffen geringen Menge, lässt sich die Vermutung äußern, dass sie bei der grünen Synthese und antimikrobiellen Aktivität nur eine untergeordnete Rolle spielen.

4.2 Diskussion der Charakterisierung der Silbernanopartikel

In der Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Pflanzenextrakt-Mischungen haben sich kugelförmige Partikel in der Größenordnung von 60 nm bis 1 μ m dargestellt. Partikel mit einer Größe von über 100 nm gelten laut Definition nicht mehr als Nanopartikel, da diese mit einer Größendimension von 1 nm bis 100 nm definiert sind (Habeeb Rahuman et al., 2022). Medda et al. (2015) nutzten einen Extrakt aus Aloe vera-Blättern für die Reduktion von Silbernitrat und erhielten Silbernanopartikel mit einer durchschnittlichen Größe von 70 nm, aber auch Partikelagglomerate mit einer Größe von 287,5 bis 293,2 nm. Shetty et al. (2014) erhielten durch die grüne Synthese mithilfe von Rindenextrakt aus *Alstonia scholaris* Silbernanopartikel mit einer mittleren Größe von 50 nm und Kudle et al. (2014) synthetisierten 11 bis 20 nm große Silbernanopartikel mithilfe eines Extraktes aus *Justicia adhatoda*. Banerjee et al. (2014) hingegen erhielten mit der grünen Synthese aus Extrakten aus *Ocimum tenuiflorum*, *Azadirachta indica* und *Musa balbisiana* Silbernanopartikel mit einer Größe von bis zu 200 nm.

Die Darstellung der Probe der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe erscheint unregelmäßiger als die der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Gruppe, bei der sich bei einer geringeren Vergrößerung bereits deutliche Partikelstrukturen voneinander abgrenzen lassen. Bei der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe sind die Partikelstrukturen hingegen erst bei einer höheren Vergrößerung zu erkennen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich innerhalb der Probe mit Gewürznelkenextrakt viele kleine Partikel befinden, die erst bei einer 20.000-fachen Vergrößerungen klar zu erkennen sind. Die Probe mit Ingwerextrakt scheint mehr größere Partikel zu enthalten, welche bereits bei einer geringeren Vergrößerung zu erkennen sind. Die Unterschiede der Partikel zwischen den beiden Proben sind auf die Art des Synthesewegs zurückzuführen. Es handelt sich beim grünen Syntheseweg mittels Pflanzen um einen Syntheseweg, welcher unter anderem von den Biomolekülen im Pflanzenextrakt und den Reaktionsbedingungen abhängig ist. Diese Faktoren beeinflussen unter anderem Größe und Form der gebildeten Partikel. Unterschiedliche in den Pflanzenextrakten vorkommende Biomoleküle führen zur Bildung unterschiedlicher Partikel. Welche genauen Biomoleküle für die Synthese verantwortlich sind, konnte bisher nicht eindeutig geklärt werden (Habeeb Rahuman et al., 2022). Da die bei der grünen Synthese verwendeten Pflanzenextrakte viele verschiedene Biomoleküle

enthalten, ist es schwierig, den Einfluss spezifischer Moleküle im Syntheseprozess zu identifizieren (Amini, 2019).

Die grüne Synthese der Silbernanopartikel wurde mithilfe der Extrakte aus Gewürznelke und Ingwer durchgeführt. Der Farbumschlag und damit die kontinuierliche Verdunklung der Flüssigkeit nach Mischen der zwei Komponenten gilt als Indikator der Bildung der Silbernanopartikel (Karuppiah und Rajmohan, 2013). Dieser Farbumschlag, welcher auf die Oberflächenplasmonenresonanz der Silbernanopartikel zurückzuführen ist, wurde mithilfe der UV-Vis-Spektroskopie zeit- und wellenlängenabhängig untersucht. Dabei handelt es sich um die Schwingung der freien Elektronen an der Grenzfläche von Metall und des umgebenden Mediums, welche durch die Interaktion mit Licht entsteht und ein elektrisches Feld an der Oberfläche erzeugt. Bei Übereinstimmung der Frequenz des einfallenden Lichtes mit der Oberflächenplasmonen resultiert ein Absorptionsmaximum im Absorptionsspektrum (Alzoubi et al., 2023).

Es ist zu beobachten, dass die Absorptionskurve bei beiden Proben nach 72 Stunden die höchsten Werte aufweist, gefolgt von der Messkurve nach 48 Stunden. Diese beiden Kurvenverläufe weisen im Falle der Silbernitrat-Gewürznelken-Mischung höhere Absorptionswerte auf als die Kurven 0, 1, 4 und 24 Stunden. Im Falle der Silbernitrat-Ingwerextrakt-Mischung liegt die Absorptionskurve nach 24 Stunden in ähnlicher Größenordnung wie die 72- und 48-Stunden-Kurve und die Absorptionswerte nach 0, 1, 2 und 4 Stunden folgen mit Abstand. Dieser zeitabhängige Anstieg der Absorptionsintensität kann damit erklärt werden, dass die Absorptionsintensität Aufschluss über die Menge an synthetisierten Partikeln gibt. Es kommt erst im Laufe der Inkubationszeit zu einer nachweisbaren Synthese an Silbernanopartikeln bzw. die Silbernanopartikel lassen sich erst nach einer gewissen Zeit anhand des Absorptionsspektrums nachweisen (Habeeb Rahuman et al., 2022). 72 Stunden nachdem die Silbernitratlösung mit den jeweiligen Pflanzenextrakten vermischt wurde, ist die höchste Absorptionsintensität und damit die größte Menge an Silbernanopartikeln zu verzeichnen.

Die Oberflächenplasmonenresonanzwerte für Silbernanopartikel liegen laut Literatur im Bereich von 391 nm bis 453 nm (Amirjani et al., 2020). Das Absorptionsverhalten der Silbernanopartikel wird unter anderem durch ihre Größe und Form beeinflusst (Alzoubi et al., 2023). Kommt es zur Bildung größerer Partikel oder zur Aggregation von Partikeln,

verschiebt sich das Maximum der Absorptionskurve hin zu höheren Wellenlängen (Evanoff und Chumanov, 2004). Das Auftreten von zusätzlichen Absorptionsmaxima bei höheren Wellenlängen ist bei der Bildung verschiedener Partikelformen zu beobachten (Lu et al., 2006).

Im Falle der Silbernitratlösung mit *Syzygium aromaticum*-Extrakt stellt sich zuerst ein Anstieg der Absorptionskurven dar, welcher jedoch nach dem Höhepunkt nicht wieder sofort abfällt. Die Messungen weisen zu allen Zeitpunkten weiterhin eine starke Absorption - in Relation zu den Absorptionswerten bis 300 nm - auf. Dass es auch noch im höheren Wellenlängenbereich, oberhalb des ultravioletten und blauen Bereichs, zu starker Absorption gekommen ist, lässt darauf schließen, dass Partikel unterschiedlicher Größe synthetisiert wurden.

Bei der Silbernitrat-Ingwerextrakt-Mischung befindet sich das erste Absorptionsmaximum aller Messkurven im Bereich von 300 bis 320 nm, bei der Silbernitrat-Gewürznelkenextrakt-Mischung trifft dies auf die Messkurven nach 0, 1, 2, 4 und 24 Stunden zu. Dieses erste Absorptionsmaximum ist auf die sekundären Pflanzenstoffe im Pflanzenextrakt zurückzuführen, welche ebenfalls Licht bestimmter Wellenlängen absorbieren (Guemari et al., 2022; Gujral, 2014). Nach 24, 48 und 72 Stunden fällt die Absorptionsintensität der Silbernitrat-Ingwerextrakt-Mischung mit steigender Wellenlänge zunächst wieder ab, doch kommt es zu einem erneuten Peak bei 420 bis 440 nm, welcher die Bildung von Silbernanopartikeln kennzeichnet. Der anschließende Abfall der Kurven bei höheren Wellenlängen lässt auf die Bildung kleiner Partikelgrößen und einheitlicher Formen schließen. Die Messergebnisse nach 0, 1, 2 und 4 Stunden zeigen nach dem ersten Peak keinen erneuten Anstieg der Absorptionsintensität. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass zu diesen Zeitpunkten noch keine Silbernanopartikel nachzuweisen waren.

Die Rückschlüsse aus den Ergebnissen der UV-Vis-Spektroskopie hinsichtlich der Partikelgröße unterscheiden sich zu denen der Rasterelektronenmikroskopie. Während es in der Rasterelektronenmikroskopie scheint, als ob bei der grünen Synthese mittels Gewürznelkenextrakt kleinere Partikel synthetisiert wurden als bei der Synthese mithilfe vom Ingwerextrakt, lässt die UV-Vis-Spektroskopie die Annahme zu, dass es bei der Synthese mit Ingwerextrakt zur Bildung kleinerer und einheitlicherer Partikel gekommen ist als bei der grünen Synthese mit Gewürznelkenextrakt. Diese unterschiedlichen Rückschlüsse sind vermutlich auf die Verwendung unterschiedlicher Proben zurückzuführen. Im Laufe

der Versuche wurden mehrfach neue Pflanzenextrakte hergestellt, die für die grüne Synthese verwendet wurden. Es kann zu Schwankungen der Konzentration der sekundären Pflanzenstoffe zwischen den genutzten Pflanzen gekommen sein (Yeshi et al., 2022), welche sich im weiteren Verlauf auf die Synthese der Silbernanopartikel ausgewirkt haben. Eine weitere Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse ist, dass nur sehr kleine Mengen der Silbernitrat-Pflanzenextrakt-Mischungen für die Untersuchung am Rasterelektronenmikroskop – ein Tropfen – und am Photometer – 1 ml – verwendet wurden. Dadurch wird nur ein kleiner Anteil der Gesamtprobe abgebildet und es kann zu starken Unterschieden kommen.

4.3 Diskussion der antimikrobiellen Aktivität

Die Ergebnisse der antimikrobiellen Testungen zeigen, dass die drei Modifikationen antimikrobielle Aktivität aufweisen, jedoch wirken die Modifikationen nicht bei allen getesteten Mikroorganismen gleich stark. Man kann also nicht von einer allgemeingültigen, gleichen Wirkung jeder Modifikation für alle Mikroorganismen ausgehen. Die Kontrollgruppe zeigte bei keinem der vier Mikroorganismen antimikrobielle Aktivität. Es ist zu beobachten, dass gegenüber *S. mutans* die Modifikation mit CHX signifikant am wirkungsvollsten ist und die größte Inhibitionszone aufweist. Im Falle der anderen drei Mikroorganismen – MRSA, MSSA und *C. albicans* – wies die Alginatmodifikation mit Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt die größten Hemmzonen auf. Dies war aber verglichen mit der CHX-Gruppe nicht signifikant.

Es ist zu beobachten, dass die Alginatmodifikation mit Gewürznelkenextrakt und Silbernanopartikeln eine stärkere antimikrobielle Aktivität aufweist als die Alginatmodifikation mit Ingwerextrakt und Silbernanopartikeln. Der Unterschied in der Effektivität dieser beiden Gruppen war jedoch nur bei *S. mutans* und MRSA signifikant. Diese Beobachtung der unterschiedlich starken Wirkung der beiden Silbernanopartikel modifizierten Gruppen kann möglicherweise auf die unterschiedlichen Partikelgrößen bzw. das Ausmaß der Partikelagglomeration der synthetisierten Nanopartikel zurückgeführt werden. Die Rückschlüsse aus den Ergebnissen der Rasterelektronenmikroskopie stützen diese Annahme. Es ist bekannt, dass kleinere Partikel bzw. eine geringere Partikelagglomeration eine größere Wirkung aufweisen, da sie ein größeres Oberflächen-Volumen-Verhältnis aufweisen

(Mussin et al., 2021; Panacek et al., 2006). Eine weitere Möglichkeit für die stärkere antimikrobielle Wirkung der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe wäre, dass der Gewürznelkenextrakt stärker antimikrobiell wirksam ist als der Ingwerextrakt und so eine höhere Gesamtaktivität und ein größerer synergistischer Effekt zwischen den Silbernanopartikeln und Gewürznelkenextrakt vorliegt als bei den Silbernanopartikeln und Ingwerextrakt. Dies könnte unter anderem auf das Vorhandensein von Eugenol im Gewürznelkenextrakt zurückzuführen sein. Buru et al. (2022) zeigten in ihrer Studie, dass es durch Eugenol zu einer Herauf- und Herunterregulation von Genen in MRSA-Keimen kommt, welche am Aminosäuremetabolismus und an Translationsprozessen beteiligt sind und damit entscheidend für das Überleben der Bakterien sind.

Gegenüber *C. albicans* zeigte nur die Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe signifikante antimikrobielle Wirkung, wobei auch die CHX- und die Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Gruppe Inhibitionszonen aufwies. Dass diese jedoch nicht als signifikant wirkungsvoller als die Kontrollgruppe gelten, liegt vermutlich daran, dass die Ergebnisse der Testungen gegenüber *C. albicans* keiner Normalverteilung folgten. Im Gegensatz dazu waren die Daten der anderen mikrobiellen Testungen normal verteilt. Durch die unterschiedliche Verteilung der Ergebnisse lässt sich die unterschiedliche Auswertung hinsichtlich der Signifikanz, trotz Vorhandensein von Inhibitionszonen in der gleichen Größendimension, erklären.

Die starke antimikrobielle Wirkung der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe gegenüber *C. albicans* ist auf die antifungale Aktivität der Gewürznelken zurückzuführen. Jardón-Romero et al. (2022) haben in ihrer Studie die antimikrobielle Wirkung von mithilfe von Gewürznelkenextrakt synthetisierten Silbernanopartikeln auf verschiedene orale Mikroorganismen untersucht. In der antimikrobiellen Testung konnten sie eine wachstumshemmende Wirkung auf *C. albicans* von Gewürznelkenextrakt allein nachweisen. Diese schon bestehende nachweisbare antifungale Wirkung der Gewürznelke wurde in dieser Arbeit durch die Silbernanopartikel verstärkt und führte zu der Ausbildung der großen Hemmzonen der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe.

Es ist darauf hinzuweisen, dass Silbernitrat, neben der antimikrobiellen Wirkung auch toxisch für den menschlichen Organismus ist. Diese Toxizität ist dosisabhängig und eine oral aufgenommene Menge von mehr als 2 g gilt als gefährlich, da es durch die Bildung von unlöslichem Silberchlorid zu einem Elektrolytungleichgewicht kommt (Gao et al.,

2018). Die in dieser Studie verwendete Konzentration von Silbernitrat ist mit 0,2 % sehr gering und das Silbernitrat liegt zudem nicht frei vor, sondern wurde im Rahmen der grünen Synthese durch den Pflanzenextrakt zu Silbernanopartikeln reduziert. Selbst wenn es nicht zu einer Reduktion des Silbernitrates kommt, enthält eine Alginatabformung, welche mit dem Gemisch aus Silbernitrat und Pflanzenextrakt im Verhältnis 5:1 durchgeführt wird, ca. 0,0566 g Silbernitrat. Diese Menge entspricht 2,83 % der gefährlichen Dosis, welche weiterhin nicht frei vorliegt, sondern innerhalb des Alginats gebunden ist. Des Weiteren kommt es nicht zu einer oralen Aufnahme der kompletten Menge. Aufgrund dieser Tatsachen kann nicht von einer Gefahr durch die Anwendung ausgegangen werden.

4.4 Diskussion der Alginateigenschaften

Im Folgenden wird der Einfluss der Modifikationslösungen auf die Eigenschaften des Alginates diskutiert.

4.4.1 Reißfestigkeit

Die Reißfestigkeit ist eine wichtige Eigenschaft von Abformmassen, welche eine gewisse Widerstandskraft des Materials sicherstellen soll. Diese ist vor allem beim Entformen aus dem Mund entscheidend, wenn es unterschneidige Bereiche gibt oder die Materialschichtstärke nicht ausreichend dick ist (Lu et al., 2004). Ein Entformen aus der Mundhöhle muss jedoch auch bei starken Unterschnitten, zum Beispiel bei festsitzenden kieferorthopädischen Apparaturen, weiterhin möglich bleiben, was bedeutet, dass die Reißfestigkeit nicht zu hoch sein darf (Wöstmann, 2018).

Die DIN EN ISO 21563:2021 fordert eine Reißfestigkeit von Alginatmaterial von mindestens 0,38 N/mm. Diese Anforderung wird von allen Gruppen übertroffen. Lediglich die Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Gruppe zeigte einen signifikanten Unterschied im Vergleich zu den anderen drei Gruppen, wobei die Reißfestigkeit erhöht war. Ginjupalli et al. (2016) haben den Einfluss der Zugabe von verschiedenen Konzentrationen von Silbernanopartikeln zu zwei Alginatabformmassen untersucht. Auch sie stellten fest, dass die Reißfestigkeit des Alginats nicht signifikant negativ beeinflusst wurde, mit Ausnahme bei der Zugabe von 5 % zu einer der beiden Alginatabformmassen. Hierbei zeigte die eine

Alginatabformmasse eine signifikant erhöhte Reißfestigkeit, während die Reißfestigkeit der anderen Abformmasse keine signifikante Veränderung aufwies. Den Unterschied der beiden Abformmassen führten sie auf das unterschiedliche Pulver-Wasser-Verhältnis zum Anmischen der beiden Alginatsorten zurück.

4.4.2 Elastisches Rückstellvermögen

Das elastische Rückstellvermögen beschreibt die Fähigkeit eines elastischen Materials nach einer Deformation in die ursprüngliche Form zurückzukehren. Es bietet Schutz vor permanenter Deformation und ist somit entscheidend für eine genaue Wiedergabe der abgeformten Strukturen. Je höher das elastische Rückstellvermögen ist, desto geringer ist die permanente Deformation und desto genauer ist die Abformung (Jörgensen, 1976). Verglichen mit der Kontrollgruppe zeigte keine der drei Modifikationen eine signifikante Veränderung hinsichtlich des elastischen Rückstellvermögens. CHX hatte im Vergleich zur Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Gruppe ein signifikant besseres Rückstellvermögen. Die Mindestanforderung für das elastische Rückstellvermögen von Alginat, welches in der DIN EN ISO 21563:2021 mit 95 % angegeben wird, wird von allen Gruppen übertroffen. Dieses Ergebnis wird durch andere Studien unterstützt. Ginjupalli et al. (2018) untersuchten den Einfluss von verschiedenen Konzentrationen und Partikelgrößen von Silbernanopartikeln in Alginat unter anderem auf die permanente Deformation von Alginat. Nur eine Konzentration von 5 % der Partikelgrößen 80-100 nm und 50-80 nm zeigte einen signifikanten Anstieg der permanenten Deformation im Vergleich zur Kontrollgruppe ohne Silbernanopartikel. Auch Singer und Bourauel (2023) zeigten in ihrer Studie, dass die Verwendung von Silbernanopartikeln für die intrinsische Desinfektion von Alginat keinen negativen Einfluss auf das elastische Rückstellvermögen der Abformmasse hat.

4.4.3 Detailwiedergabe

Für die Herstellung exakter Gipsmodelle ist eine genaue Abformung der intraoralen Strukturen entscheidend, welche unter anderem durch die Fähigkeit der Detailwiedergabe der Abformmasse bestimmt wird. Diese wird unter anderem durch die Viskosität und die Benetzbarkeit der Abformmasse beeinflusst (Kotsiomi et al., 2008). Eine geringe Viskosität sorgt für eine gute Fließfähigkeit der Abformmasse und bietet somit die Möglichkeit, feine Details wiederzugeben. Alle Probekörper von jeder Gruppe haben die 50 µm Linie in der kompletten Länge wiedergegeben, wie es in der DIN EN ISO 21563:2021 gefordert wird. Dies kann mit einer ausreichenden Fließfähigkeit des Alginats, welche auf eine nicht wesentlich veränderte Viskosität des Materials zurückgeführt werden kann, erklärt werden (Wöstmann, 2018). Da die Untersuchungen unter Laborbedingungen ohne das Vorhandensein von Speichel oder anderen Flüssigkeiten durchgeführt wurden, kann kein Rückschluss auf die Benetzbarkeit feuchter Oberflächen gezogen werden. Auch Omidkhoda et al. (2019), die Silbernanopartikel beim Anmischen von Alginat zugesetzt haben, konnten keine Veränderung der Detailwiedergabefähigkeit des Alginats beobachten.

4.4.4 Dimensionsverhalten

Das Dimensionsverhalten einer Abformmasse ist eine weitere wichtige Eigenschaft, um die Herstellung genauer Gipsmodelle sicherzustellen. Die DIN EN ISO 21563:2021 macht keine Angaben bezüglich der geforderten Dimensionsgenauigkeit für Alginatabformmasse, weswegen die Angaben für Elastomere, welche in der DIN EN ISO 4823:2021 angegeben sind, als Orientierung dienen. Elastomere werden für Präzisionsabformungen verwendet, um Modelle herzustellen, auf denen restaurative Arbeiten angefertigt werden (Rammelsberg und Ohlmann, 2011). Daher ist unter anderem ein gutes Dimensionsverhalten entscheidend, um eine exakte Passform und einen guten Halt der späteren Restauration zu gewährleisten (Kotsiomi et al., 2008; Rammelsberg und Ohlmann, 2011). Für Elastomere ist eine maximale lineare Dimensionsänderung von 1,5 % in der ISO-Norm festgelegt. Da die Indikationsbereiche von Alginatabformungen keine so hohe Präzision erfordern (Taylor et al., 2002), besteht die Annahme, dass für Alginat keine höheren Anforderungen bezüglich der maximalen linearen Dimensionsänderung - im Vergleich zu

Elastomeren - gelten. Alle untersuchten Alginatgruppen erfüllen die Anforderung. Die beiden mit Silbernanopartikeln modifizierten Gruppen zeigten sogar ein besseres Dimensionsverhalten als die Kontrollgruppe. CHX zeigte das schlechteste Dimensionsverhalten, welches aber auch noch innerhalb des als klinisch akzeptabel geltenden Bereiches lag.

4.4.5 Oberflächenrauheit des Gipses

Hinsichtlich der Oberflächenrauheit von Gipsmodellen macht die DIN EN ISO 21563:2021 keine Angaben und es sind bisher keine Werte bekannt, die als klinisch akzeptabel gelten. Die Oberflächenrauheit des Gipsmodells beeinflusst die Oberflächenrauheit der Arbeit, die auf diesem hergestellt wird (Chang et al., 2016). Auf der anderen Seite kann eine glattere Oberfläche auch ein Zeichen dafür sein, dass das Alginat nicht in der Lage war, feine Details wiederzugeben (King et al., 1994). Rentzia et al. (2011) untersuchten den Einfluss unterschiedlich langer Einwirkzeiten verschiedener Desinfektionslösungen auf Alginatabformmaterial. Sie beobachteten einen Anstieg des R_a -Wertes der rauen Probenoberfläche des erhaltenen Gipsmodells, gaben jedoch an, dass nicht geklärt ist, ob dies einen klinisch relevanten Einfluss hat.

Auch gibt es unterschiedliche Ansichten in der Literatur, welche Faktoren, neben der Rauheit des Abformmaterials und damit der Abformung, die Oberflächenrauheit des Gipses beeinflussen. Diskutiert werden unter anderem die Gipspartikelgröße und die Kompatibilität zwischen Abformmaterial und Gipspulver. Murata et al. (2004) zeigten in ihrer Studie, dass Alginatabformungen, welche mit Typ III-Gipspulver ausgegossen wurden, glattere Modelloberflächen aufwiesen als solche, die mit Typ IV-Gipspulver ausgegossen wurden. Keuter und Davidson (1986) konnten jedoch keinen Zusammenhang zwischen der Gipsrauheit und der Wahl des Gipspulvers sowie der Gipspartikelgröße feststellen. Chang et al. (2016) kamen zu dem Schluss, dass die Oberflächenrauheit des Gipses hauptsächlich durch das Alginatmaterial beeinflusst wird. In der vorliegenden Arbeit wurde für jeden Probekörper das gleiche Gipspulver verwendet, sodass die Gipskompatibilität des Alginatmaterials und die Gipspartikelgröße als Einflussfaktoren auf die unterschiedlichen Ergebnisse der Oberflächenrauheit auszuschließen sind. Es können lediglich Rückschlüsse auf die durch die verschiedenen Modifikationen veränderte Qualität des Alginatmaterials als Einflussfaktor auf die Oberflächenrauheit der Gipsprobekörper gezogen werden.

Für die CHX-Gruppe wurde eine glattere Oberfläche der Gipsprobekörper im Vergleich mit der Kontrollgruppe beobachtet, welche jedoch nicht signifikant war. Die beiden Silbernanopartikel-Gruppen zeigten eine signifikant erhöhte Rauheit verglichen mit CHX, wobei jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen der Silbernanopartikel-Gewürnelkenextrakt-Gruppe und der Kontrollgruppe bestand. Die Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Gruppe war signifikant rauer als die Kontrollgruppe, wobei die Differenz der Mittelwerte geringer als $1 \mu\text{m}$ war. Es stellt sich die Frage, ob dies eine klinische Relevanz hat. Nach Ansicht der Verfasserin ist diese Differenz verglichen mit der Kontrollgruppe im Hinblick auf die Indikationsbereiche von Alginatabformungen als klinisch akzeptabel anzusehen. Die Herstellung diagnostischer Modelle oder auch provisorischer Versorgungen sowie Gegenkieferabformungen erfordern nicht in dem Maße eine hohe Präzision, dass eine im Vergleich zur Kontrollgruppe erhöhte Oberflächenrauheit von weniger als $1 \mu\text{m}$ entscheidend ist.

4.4.6 Gemeinsame Betrachtung der vom Quervernetzungsgrad abhängigen Parameter

Die Reißfestigkeit, die Viskosität, die Elastizität und die Fähigkeit zur Rückstellung werden durch den Grad der Quervernetzung des abgebundenen Alginats und der Stärke der Polymerisation bestimmt. Die Stärke des Materials, welche zum Beispiel anhand der Reißfestigkeit bestimmt werden kann, steigt mit zunehmender Quervernetzung des Alginats. Eine erhöhte Quervernetzung bedingt jedoch wiederum auch eine erhöhte Viskosität, welche zu einer Reduktion der Elastizität führt und damit zu einer Abnahme des elastischen Rückstellvermögens (Hondrum und Fernandez, 1997). Zudem resultiert eine erhöhte Viskosität in einem reduzierten Fließverhalten des Materials und beeinträchtigt somit die Detailwiedergabe (German et al., 2008).

Eine signifikant erhöhte Reißfestigkeit war nur bei der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Gruppe zu beobachten, welche mit einer verstärkten Quervernetzung der Alginatketten erklärt werden kann. Das elastische Rückstellvermögen war jedoch im Vergleich zur Kontrollgruppe nicht signifikant verändert. Auch die Detailwiedergabe des Alginats war in allen Gruppen unverändert. Diese Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass es im Falle der Gruppe mit Ingwerextrakt zwar zu einer Veränderung der Quervernetzung des Alginats gekommen ist, diese aber nicht so stark ausgeprägt war, dass die Viskosität in einem

das Rückstellvermögen und die Detailwiedergabe beeinträchtigenden Ausmaß verändert wurde.

4.5 Limitationen und klinische Schlussfolgerung

Alle Untersuchungen wurden unter Laborbedingungen durchgeführt, welche nicht direkt mit der klinischen Situation vergleichbar sind. So wurden die Probekörper zum Beispiel ohne das Vorhandensein von Feuchtigkeit hergestellt, wie es hingegen bei der Abformung der intraoralen Situation der Fall ist. Das Vorkommen von Speichel ist ein determinierender Faktor bei der Abformung und hat unter anderem Einfluss auf die Detailwiedergabe, welche durch die Hydrophilie der Abformmasse bestimmt wird (Wöstmann, 2018).

Im Verlauf der Studie wurden mehrmals neue Pflanzenextrakte aus Gewürznelke und Ingwer hergestellt, um erneut Silbernanopartikel zu synthetisieren und das Gemisch für das Anmischen neuer Alginatproben zu verwenden. Die mikrobiellen und mechanischen Untersuchungen und die Untersuchungen, welche der Partikelcharakterisierung dienen, wurden demzufolge nicht alle mit denselben Gemischen aus Pflanzenextrakt und Silbernanopartikeln durchgeführt. Daher sind Variationen in der chemischen Zusammensetzung möglich (Yeshi et al., 2022) und infolgedessen auch Unterschiede in den Eigenschaften der synthetisierten Silbernanopartikel.

In Bezug auf die verschiedenen Untersuchungen der Alginatgruppen kann festgestellt werden, dass grün synthetisierte Silbernanopartikel mit Pflanzenextrakt eine ausreichende antimikrobielle Wirkung haben und keinen negativen Einfluss auf die Eigenschaften von Alginat aufweisen. Weitere Untersuchungen unter klinischen Bedingungen müssen jedoch im Anschluss folgen, um einen klinischen Einsatz zu prüfen.

5. Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es zu untersuchen, ob die Verwendung von grün synthetisierten Silbernanopartikeln mit Pflanzenextrakten zum Anmischen von Alginat zu einer intrinsischen Desinfektion der Abformmasse führt, ohne die mechanischen Eigenschaften des Alginats negativ zu beeinflussen.

Dazu wurden sowohl mikrobielle als auch physikalisch-mechanische Untersuchungen durchgeführt. Bei den Flüssigkeiten zum Anmischen des Alginats handelte es sich um destilliertes Wasser, CHX, ein Gemisch aus einem Extrakt aus *Syzygium aromaticum* (Gewürznelke) mit Silbernanopartikeln und ein Gemisch aus *Zingiber officinale* (Ingwer) Extrakt mit Silbernanopartikeln. Die beiden hergestellten Pflanzenextrakte wurden mithilfe einer Gaschromatografie und einer Massenspektrometrie auf ihre chemischen Verbindungen hin untersucht. Die synthetisierten Silbernanopartikel wurden anhand einer Rasterelektronenmikroskopie hinsichtlich ihrer Größe und Form charakterisiert. Mithilfe des Agar-Well-Diffusionstests wurde die antimikrobielle Aktivität der Gruppen anhand der gebildeten Inhibitionszonen bestimmt. Im Anschluss wurden die Gruppen hinsichtlich der Reißfestigkeit, des elastischen Rückstellvermögens, der Detailwiedergabe, des Dimensionsverhaltens und des Einflusses auf die Oberflächenrauheit von Gipsmodellen verglichen.

Die chemische Analyse ergab im Falle des *Syzygium aromaticum* Extraktes 60 und für den *Zingiber officinale* Extrakt 43 verschiedene chemische Verbindungen mit möglichem Einfluss auf die Synthese der Silbernanopartikel und die antimikrobielle Wirkung. In der Rasterelektronenmikroskopie stellten sich kugelförmige Partikel und Partikelzusammenschlüsse um die 100 nm dar. Alle drei Alginatmodifikationen zeigten im Gegensatz zur Kontrollgruppe signifikante antimikrobielle Aktivität gegenüber *S. mutans*, MRSA und MSSA, wobei die Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe bei MRSA ($7,18 \pm 1,25$ mm) und MSSA ($6,56 \pm 1,96$ mm) wirkungsvoller war als die anderen Gruppen. Im Falle von *C. albicans* konnte lediglich bei der Gruppe mit Silbernanopartikeln und Gewürznelkenextrakt eine signifikante antimikrobielle Wirkung ($11,90 \pm 2,33$ mm) nachgewiesen werden. Bei den physikalisch-mechanischen Untersuchungen zeigten alle drei Modifikationen keine signifikante Veränderung des elastischen Rückstellvermögens und der Detailwiedergabe des Alginats im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die Silbernanopartikel-

Ingwerextrakt-Gruppe zeigte eine erhöhte Reißfestigkeit von $0,94 \pm 0,17$ N/mm aber auch eine erhöhte Oberflächenrauheit des Gipses. Diese war zwar statistisch signifikant rauer als die der Kontrollgruppe, doch erscheint der Unterschied von weniger als $1 \mu\text{m}$ vor dem Hintergrund der Indikationsbereiche von Alginatabformungen klinisch nicht relevant.

Entscheidende Parameter wie das Dimensionsverhalten der Abformmasse, die Detailwiedergabe, das elastische Rückstellvermögen und die Reißfestigkeit des Alginats wurden durch die Modifikationen mit Silbernanopartikeln und Pflanzenextrakt nicht negativ beeinflusst. Vor diesem Hintergrund und der beobachteten antimikrobiellen Wirkung lässt sich schlussfolgern, dass die Verwendung von grün synthetisierten Silbernanopartikeln mit Pflanzenextrakten aus Gewürznelke bzw. Ingwer eine effektive Alternative zum bisherigen Desinfektionsverfahren von Alginatabformungen darstellt. Die Anwendung muss jedoch noch unter klinischen Bedingungen geprüft werden, um eine Empfehlung aussprechen zu können.

6. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1:** Antimikrobielle Testung der Kontrollgruppe (oben links), der CHX-Gruppe (oben rechts), der SA+AgNPs-Gruppe (unten rechts) und einer nicht in die Versuchsreihe aufgenommenen Probe gegenüber *S. mutans*. 18
- Abb. 2:** Antimikrobielle Testung der Kontrollgruppe (unten rechts), der CHX-Gruppe (oben rechts), der SA+AgNPs-Gruppe (unten links) und einer nicht in die Versuchsreihe aufgenommenen Probe gegenüber MRSA. 18
- Abb. 3:** Antimikrobielle Testung der Kontrollgruppe (unten rechts), der CHX-Gruppe (unten links), der SA+AgNPs-Gruppe (oben links) und einer nicht in die Versuchsreihe aufgenommenen Probe gegenüber MSSA. 19
- Abb. 4:** Antimikrobielle Testung der Kontrollgruppe (oben rechts), der CHX-Gruppe (oben links), der SA+AgNPs-Gruppe (unten rechts) und einer nicht in die Versuchsreihe aufgenommenen Probe gegenüber *C. albicans*. 19
- Abb. 5:** Alginatprobekörper mit 10 cm Länge, 2 cm Breite und 4 mm Höhe zur Ermittlung der Reißfestigkeit. 20
- Abb. 6:** Geteilte Metallform mit 12,5 mm Durchmesser und 20 mm Höhe mit zusätzlichem Stabilisierungsring aus Kunststoff zur Herstellung der Alginatprobekörper für die Ermittlung des elastischen Rückstellvermögens. 21
- Abb. 7:** Alginatprobekörper für die Ermittlung des elastischen Rückstellvermögens. 21
- Abb. 8:** Versuchsaufbau zur Ermittlung des elastischen Rückstellvermögens der Alginatprobekörper an der Werkstoffprüfmaschine Zwick. 22
- Abb. 9:** Dreiteilige Metallform mit drei vertikalen und fünf horizontalen Linien zur Herstellung der Alginatprobekörper für die Ermittlung der Detailwiedergabe und des Dimensionsverhaltens. 23
- Abb. 10:** Alginatprobekörper zur Untersuchung der Detailwiedergabe und des Dimensionsverhaltens. 23

- Abb. 11:** Foto des oberen Abschnitts des Alginatprobekörpers bei 18-facher Vergrößerung zur Messung der vertikalen und horizontalen Ausdehnung der beiden Rechtecke für die anschließende Ermittlung des Dimensionsverhaltens. 24
- Abb. 12:** Foto des unteren Abschnitts des Alginatprobekörpers bei 18-facher Vergrößerung zur Messung der vertikalen und horizontalen Ausdehnung des Rechteckes für die anschließende Ermittlung des Dimensionsverhaltens. 24
- Abb. 13:** Foto des oberen Abschnitts der Metallform bei 18-facher Vergrößerung zur Messung der vertikalen und horizontalen Ausdehnung der beiden Rechtecke für die anschließende Ermittlung des Dimensionsverhaltens. 25
- Abb. 14:** Foto des unteren Abschnitts der Metallform bei 18-facher Vergrößerung zur Messung der vertikalen und horizontalen Ausdehnung des Rechteckes für die anschließende Ermittlung des Dimensionsverhaltens. 25
- Abb. 15:** Silikonschablone auf dem Gipsprobekörper zur Markierung des Testfeldes für die Bestimmung der Oberflächenrauheit. 27
- Abb. 16:** Gipsprobekörper mit Testfeldmarkierung für die Bestimmung der Oberflächenrauheit. 27
- Abb. 17:** Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Probe in 15-facher Vergrößerung. 31
- Abb. 18:** Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Probe in 1000-facher Vergrößerung. 31
- Abb. 19:** Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Probe in 20.000-facher Vergrößerung. Mögliche Nanopartikel sind mit den Kreisen markiert. 32
- Abb. 20:** Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Probe in 15-facher Vergrößerung. 32
- Abb. 21:** Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Probe in 1000-facher Vergrößerung. 32
- Abb. 22:** Rasterelektronenmikroskopie der Silbernanopartikel-Ingwerextrakt-Probe in 20.000-facher Vergrößerung. Mögliche Nanopartikel sind mit den Kreisen markiert. 33

- Abb. 23:** Zeit- und wellenlängenabhängiges rel. Absorptionsspektrum der Silbernitrat-Gewürznelkenextrakt-Mischung. 34
- Abb. 24:** Zeit- und wellenlängenabhängiges rel. Absorptionsspektrum der Silbernitrat-Ingwerextrakt-Mischung. 36
- Abb. 25:** Gegenüberstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Inhibitionszonendurchmesser der Versuchsgruppen bei den verschiedenen Mikroorganismen in mm als Maß für die antimikrobielle Aktivität. Die Kontrollgruppe (Wasser) bildete bei keinem Mikroorganismus eine Hemmzone aus. Die in der Legende dargestellte grafische Codierung der Versuchsgruppen wurde ebenfalls in den folgenden Abbildungen 26 bis 33 verwendet. 38
- Abb. 26:** Grafische Darstellung der Inhibitionszonendurchmesser der Versuchsgruppen in mm gegenüber *S. mutans*. Die Kontrollgruppe (Wasser) wies keine Hemmzone auf. Die drei modifizierten Alginategruppen zeigten eine signifikant bessere antimikrobielle Aktivität im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die CHX-Gruppe wies eine signifikant größere Hemmzone als die beiden Silbernanopartikel-modifizierten Gruppen auf. Die Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe (SA+AgNPs) war signifikant wirkungsvoller als die Gruppe mit Silbernanopartikeln und Ingwerextrakt (ZO+AgNPs). 39
- Abb. 27:** Grafische Darstellung der Inhibitionszonendurchmesser der Versuchsgruppen in mm gegenüber MRSA. Die Kontrollgruppe (Wasser) wies keine Hemmzone auf. Die drei modifizierten Alginategruppen zeigten signifikant bessere antimikrobielle Aktivität im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die ZO+AgNPs-Gruppe war signifikant wirkungsschwächer als die SA+AgNPs-Gruppe. 40
- Abb. 28:** Grafische Darstellung der Inhibitionszonendurchmesser der Versuchsgruppen in mm gegenüber MSSA. Die Kontrollgruppe (Wasser) wies keine Hemmzone auf. Alle drei modifizierten Alginategruppen zeigten eine signifikant bessere antimikrobielle Aktivität im Vergleich zur Kontrollgruppe. 41

- Abb. 29:** Grafische Darstellung der Inhibitionszonen Durchmesser der Versuchsgruppen in mm gegenüber *C. albicans*. Die Kontrollgruppe (Wasser) wies keine Hemmzone auf. Die SA+AgNPs-Gruppe war signifikant wirkungsvoller als die Kontrollgruppe. 42
- Abb. 30:** Box-Plot-Diagramm der Reißfestigkeit der Versuchsgruppen in N/mm. Die ZO+AgNPs-Gruppe wies eine signifikant erhöhte Reißfestigkeit im Vergleich zur Kontrollgruppe (Wasser), der CHX-Gruppe und der Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt-Gruppe auf. 43
- Abb. 31:** Box-Plot-Diagramm des elastischen Rückstellvermögens der Versuchsgruppen in %. Die CHX-Gruppe wies ein signifikant höheres elastisches Rückstellvermögen im Vergleich zur ZO+AgNPs-Gruppe auf. Die Kontrollgruppe (Wasser) zeigte keine signifikanten Unterschiede zu den drei Alginatmodifikationen. 45
- Abb. 32:** Box-Plot-Diagramm des linearen Dimensionsverhaltens der Versuchsgruppen in mm. Die CHX-Gruppe zeigte eine signifikante Expansion der Probekörper im Vergleich zu der Kontrollgruppe (Wasser), der SA+AgNPs- und ZO+AgNPs-Gruppe. Zwischen der Kontrollgruppe und den beiden AgNPs-Gruppen bestand kein signifikanter Unterschied. 47
- Abb. 33:** Box-Plot-Diagramm der Gipsoberflächenrauheit der Versuchsgruppen in μm . Die ZO+AgNPs-Gruppe wies eine signifikant erhöhte Rauheit im Vergleich zur Kontrollgruppe (Wasser) und der CHX-Gruppe auf. Die CHX-Gruppe war signifikant weniger rau als die SA+AgNPs-Gruppe. 48

7. Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Chemische Verbindungen des <i>Syzygium aromaticum</i> Extraktes mit ihren Retentionszeiten und den Flächenprozenten.	28
Tab. 1:	Fortsetzung.	29
Tab. 2:	Chemische Verbindungen des <i>Zingiber officinale</i> Extraktes mit ihren Retentionszeiten und den Flächenprozenten.	30
Tab. 2:	Fortsetzung.	31
Tab. 3:	Rel. Absorptionsintensitäten der Silbernitrat-Gewürznelkenextrakt-Mischung bei 200 bis 700 nm nach 0, 1, 2, 4, 24, 48 und 72 Stunden nach dem Mischen.	35
Tab. 4:	Rel. Absorptionsintensitäten der Silbernitrat-Ingwerextrakt-Mischung bei 200 bis 700 nm nach 0, 1, 2, 4, 24, 48 und 72 Stunden nach dem Mischen.	36
Tab. 4:	Fortsetzung.	37
Tab. 5:	Deskriptive Statistik der antimikrobiellen Aktivität der Versuchsgruppen anhand der Inhibitionszonendurchmesser in mm. Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe.	37
Tab. 6:	Deskriptive Statistik der Reißfestigkeit der Versuchsgruppen in N/mm. Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe.	43
Tab. 7:	Deskriptive Statistik des elastischen Rückstellvermögens der Versuchsgruppen in %. Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürznelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe.	44

- Tab. 8:** Deskriptive Statistik des linearen Dimensionsverhaltens der Versuchsgruppen in mm. Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürnelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe. 46
- Tab. 9:** Deskriptive Statistik der Gipsoberflächenrauheit der Versuchsgruppen in μm . Aufgeführt sind Mittelwert, Standardabweichung (SD) und der p-Wert der CHX-, Silbernanopartikel-Gewürnelkenextrakt- (SA+AgNPs) und Silbernanopartikel-Ingwerextrakt- (ZO+AgNPs) Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe. 48

8. Literaturverzeichnis

Al-Jabrah O, Al-Shumailan Y, Al-Rashdan M. Antimicrobial effect of 4 disinfectants on alginate, polyether, and polyvinyl siloxane impression materials. *Int J Prosthodont* 2007; 20: 299-307

Alzoubi FY, Ahmad AA, Aljarrah IA, Migdadi AB, Al-Bataineh QM. Localize surface plasmon resonance of silver nanoparticles using Mie theory. *J Mater Sci Mater Electron* 2023; 34: 2128

Amini SM. Preparation of antimicrobial metallic nanoparticles with bioactive compounds. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* 2019; 103: 109809

Amirjani A, Firouzi F, Haghshenas DF. Predicting the Size of Silver Nanoparticles from their Optical Properties. *Plasmonics* 2020; 15: 1077-1082

Badrian H, Ghasemi E, Khalighinejad N, Hosseini N. The effect of three different disinfection materials on alginate impression by spray method. *ISRN Dent* 2012; 2012: 695151

Banerjee P, Satapathy M, Mukhopahayay A, Das P. Leaf extract mediated green synthesis of silver nanoparticles from widely available Indian plants: synthesis, characterization, antimicrobial property and toxicity analysis. *Bioresour Bioprocess* 2014; 1: 3

Barras F, Aussel L, Ezraty B. Silver and Antibiotic, New Facts to an Old Story. *Antibiotics (Basel)* 2018; 7: 79

Buru AS, Neela VK, Mohandas K, Pichika MR. Microarray Analysis of the Genomic Effect of Eugenol on Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*. *Molecules* 2022; 27: 3249

Carlo HL, Fonseca RB, Gonçalves L de S, Correr-Sobrinho L, Soares CJ, Sinhoreti MAC. Analysis of filler particle levels and sizes in dental alginates. *Mat Res* 2010; 13: 261–264

Chang YC, Yu CH, Liang WM, Tu MG, Chen SY. Comparison of the surface roughness of gypsum models constructed using various impression materials and gypsum products. J Dent Sci 2016; 11: 23-28

de Castro DT, Kreve S, Oliveira VC, Alves OL, Dos Reis AC. Development of an Impression Material with Antimicrobial Properties for Dental Application. J Prosthodont 2019; 28: 906-912

DIN EN ISO 21563: Zahnheilkunde – Hydrokolloidabformmaterialien (ISO 21563:2021). Berlin: Beuth-Verlag, 2021

DIN EN ISO 4823: Zahnheilkunde – Elastomere Abform- und Bissregistrierungsmaterialien (ISO 4823:2021). Berlin: Beuth-Verlag, 2021

Dorner AR, da Silva JMF, Uemura ES, Borges ALS, Fernandes VVB Jr, Yamamoto ETC. Effect of disinfection of irreversible hydrocolloid impression materials with 1 % sodium hypochlorite on surface roughness and dimensional accuracy of dental stone casts. Europ J Gen Dent 2014; 3: 113-119

Europäische Union, 2008: Verordnung (EG) Nr. 1334/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Aromen und bestimmte Lebensmittelzutaten mit Aromaeigenschaften zur Verwendung in und auf Lebensmitteln sowie zur Änderung der Verordnung (EWG) Nr. 1601/91 des Rates, der Verordnungen (EG) Nr. 2232/96 und (EG) Nr. 110/2008 und der Richtlinie 2000/13/EG, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32008R1334> (Zugriffsdatum: 02.06.2024)

Europäische Union, 2009: Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über kosmetische Mittel (Neufassung), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32009R1223> (Zugriffsdatum: 02.06.2024)

Evanoff DD, Chumanov G. Size-Controlled Synthesis of Nanoparticles. 2. Measurement of Extinction, Scattering, and Absorption Cross Sections. *J Phys Chem B* 2004; 108: 13957-13962

Flanagan DA, Palenik CJ, Setcos JC, Miller CH. Antimicrobial activities of dental impression materials. *Dent Mater* 1998; 14: 399-404

Frosch PJ, Pilz B, Andersen KE, Burrows D, Camarasa JG, Dooms-Goossens A, Ducombs G, Fuchs T, Hannusksela M, Lachapelle JM, Lahti A, Maibach HI, Menné T, Rycroft RJG, Shaw S, Wahlberg JE, White IR, Wilkinson JD. Patch testing with fragrances: results of a multicenter study of the European Environmental and Contact Dermatitis Research Group with 48 frequently used constituents of perfumes. *Contact Dermatitis* 1995; 33: 333-342

Gao SS, Zhao IS, Duffin S, Duangthip D, Lo ECM, Chu CH. Revitalising Silver Nitrate for Caries Management. *Int J Environ Res Public Health* 2018; 15: 80

German MJ, Carrick TE, McCabe JF. Surface detail reproduction of elastomeric impression materials related to rheological properties. *Dent Mater* 2008; 24: 951-956

Ginjupalli K, Alla RK, Tellapragada C, Gupta L, Upadhya Perampalli N. Antimicrobial activity and properties of irreversible hydrocolloid impression materials incorporated with silver nanoparticles. *J Prosthet Dent* 2016; 115: 722-728

Ginjupalli K, Shaw T, Tellapragada C, Alla R, Gupta L, Perampalli NU. Does the size matter? Evaluation of effect of incorporation of silver nanoparticles of varying particle size on the antimicrobial activity and properties of irreversible hydrocolloid impression material. *Dent Mater* 2018; 34: e158-e165

Guemari F, Laouini SE, Rebiai A, Bouafia A, Meneceur S, Tliba, A, Majrashi KA, Alshareef SA, Mena F, Barhoum A. UV-Visible Spectroscopic Technique-Data Mining Tool as a

Reliable, Fast, and Cost-Effective Method for the Prediction of Total Polyphenol Contents: Validation in a Bunch of Medicinal Plant Extracts. *Appl. Sci* 2022; 12: 9430

Gujral SS. Synthesis and characterization of Gold and Silver nano-particles using different leaf extracts namely *Catharanthus roseus*, *Datura metel* and *Azadirachta indica* and Estimation of antimicrobial activity of silver nano-particles using disc diffusion method. *Int. J. Drug Dev & Res* 2014; 6: 222-232

Habeeb Rahuman HB, Dhandapani R, Narayanan S, Palanivel V, Paramasivam R, Subbarayalu R, Thangavelu S, Muthupandian S. Medicinal plants mediated the green synthesis of silver nanoparticles and their biomedical applications. *IET Nanobiotechnol* 2022; 16: 115-144

Hondrum SO, Fernandez R Jr. Effects of long-term storage on properties of an alginate impression material. *J Prosthet Dent* 1997; 77: 601-606

Hu D, Gao T, Kong X, Ma N, Fu J, Meng L, Duan X, Hu CY, Chen W, Feng Z, Latif S. Ginger (*Zingiber officinale*) extract mediated green synthesis of silver nanoparticles and evaluation of their antioxidant activity and potential catalytic reduction activities with Direct Blue 15 or Direct Orange 26. *PLoS One* 2022; 17: e0271408

Huang W, Wang Y, Tian W, Cui X, Tu P, Li J, Shi S, Liu X. Biosynthesis Investigations of Terpenoid, Alkaloid, and Flavonoid Antimicrobial Agents Derived from Medicinal Plants. *Antibiotics (Basel)* 2022; 11: 1380

Husen A, Siddiqi KS. Phytosynthesis of nanoparticles: concept, controversy and application. *Nanoscale Res Lett* 2014; 9: 229

Jain AS, Pawar PS, Sarkar A, Junnuthula V, Dyawanapelly S. Bionanofactories for Green Synthesis of Silver Nanoparticles: Toward Antimicrobial Applications. *Int J Mol Sci* 2021; 22: 11993

Jardón-Romero EA, Lara-Carrillo E, González-Pedroza MG, Sánchez-Mendieta V, Salmerón-Valdés EN, Toral-Rizo VH, Olea-Mejía OF, López-González S, Morales-Luckie RA. Antimicrobial Activity of Biogenic Silver Nanoparticles from *Syzygium aromaticum* against the Five Most Common Microorganisms in the Oral Cavity. *Antibiotics (Basel)* 2022; 11: 834

Jørgensen KD. A new method of recording the elastic recovery of dental impression materials. *Scand J Dent Res* 1976; 84: 175-182

Jung WK, Koo HC, Kim KW, Shin S, Kim SH, Park YH. Antibacterial activity and mechanism of action of the silver ion in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Appl Environ Microbiol* 2008; 74: 2171-2178

Karuppiyah M, Rajmohan R. Green synthesis of silver nanoparticles using *Ixora coccinea* leaves extract. *Mater Lett* 2013; 97: 141–143

Kennedy DO, Wightman EL. Herbal extracts and phytochemicals: plant secondary metabolites and the enhancement of human brain function. *Adv Nutr* 2011; 2: 32-50

Keuter FM, Davidson CL. Surface roughness of dental stone casts from alginate impressions. *J Dent* 1986; 14: 23-8

Khan I, Saeed K, Khan I. Nanoparticles: Properties, Applications and Toxicities. *Arab J Chem* 2019; 12: 908-931

King BB, Norling BK, Seals R. Gypsum compatibility of antimicrobial alginates after spray disinfection. *J Prosthodont* 1994; 3: 219-227

Kotsiomiti E, Tziaila A, Hatjivasiliou K. Accuracy and stability of impression materials subjected to chemical disinfection - a literature review. *J Oral Rehabil* 2008; 35: 291-299

Kudle KR, Donda MR, Merugu R, Prashanthi Y, Rudra MP. Investigation on the cytotoxicity of green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Justicia adhatoda* leaves on human epitheloid carcinoma cells and evaluation of their antibacterial activity. *Int J Drug Dev Res* 2014; 6: 113-119

Liao C, Li Y, Tjong SC. Bactericidal and Cytotoxic Properties of Silver Nanoparticles. *Int J Mol Sci* 2019; 20: 449

Lopez-Romero JC, González-Ríos H, Borges A, Simões M. Antibacterial Effects and Mode of Action of Selected Essential Oils Components against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Evid Based Complement Alternat Med* 2015; 2015: 795435

Lu H, Nguyen B, Powers JM. Mechanical properties of 3 hydrophilic addition silicone and polyether elastomeric impression materials. *J Prosthet Dent* 2004; 92: 151-154

Lu L, Kobayashi A, Tawa K, Ozaki Y. Silver nanoplates with special shapes: controlled synthesis and their surface plasmon resonance and surface-enhanced Raman scattering properties. *Chem Mater* 2006; 18: 4894–4901

Mahizan NA, Yang SK, Moo CL, Song AA, Chong CM, Chong CW, Abushelaibi A, Lim SE, Lai KS. Terpene Derivatives as a Potential Agent against Antimicrobial Resistance (AMR) Pathogens. *Molecules* 2019; 24: 2631

Majeed M, Hakeem KR, Rehman RU. Synergistic effect of plant extract coupled silver nanoparticles in various therapeutic applications- present insights and bottlenecks. *Chemosphere* 2022; 288: 132527

Marslin G, Siram K, Maqbool Q, Selvakesavan RK, Kruszka D, Kachlicki P, Franklin G. Secondary Metabolites in the Green Synthesis of Metallic Nanoparticles. *Materials (Basel)* 2018; 11: 940

Medda S, Hajra A, Dey U, Bose P, Mondal NK. Biosynthesis of silver nanoparticles from Aloe vera leaf extract and antifungal activity against *Rhizopus* sp. and *Aspergillus* sp. *Appl Nanosci* 2015; 5: 875–880

Murata H, Kawamura M, Hamada T, Chimori H, Nikawa H. Physical properties and compatibility with dental stones of current alginate impression materials. *J Oral Rehabil* 2004; 31: 1115-1122

Mussin J, Robles-Botero V, Casañas-Pimentel R, Rojas F, Angiolella L, San Martín-Martínez E, Giusiano G. Antimicrobial and cytotoxic activity of green synthesis silver nanoparticles targeting skin and soft tissue infectious agents. *Sci Rep* 2021; 11: 14566

Nandini VV, Venkatesh KV, Nair KC. Alginate impressions: A practical perspective. *J Conserv Dent* 2008; 11: 37-41

Nikkhah Bodagh M, Maleki I, Hekmatdoost A. Ginger in gastrointestinal disorders: A systematic review of clinical trials. *Food Sci Nutr* 2018; 7: 96-108

Omidkhoda M, Hasanzadeh N, Soleimani F, Shafae H. Antimicrobial and physical properties of alginate impression material incorporated with silver nanoparticles. *Dent Res J (Isfahan)* 2019; 16: 372-376

Panacek A, Kvítek L, Pucek R, Kolar M, Vecerova R, Pizúrova N, Sharma VK, Nevecna T, Zboril R. Silver colloid nanoparticles: synthesis, characterization, and their antibacterial activity. *J Phys Chem B* 2006; 110: 16248-16253

Rafique M, Sadaf I, Rafique MS, Tahir MB. A review on green synthesis of silver nanoparticles and their applications. *Artif Cells Nanomed Biotechnol* 2017; 45: 1272-1291

Rahuman HBH, Dhandapani R, Palanivel V, Thangavelu S, Paramasivam R, Muthupandian S. Bioengineered phytomolecules-capped silver nanoparticles using *Carissa carandas* leaf extract to embed on to urinary catheter to combat UTI pathogens. *PLoS One* 2021; 16: e0256748

Ramer MS, Gerhardt DE, McNally K. Accuracy of irreversible hydrocolloid impression material mixed with disinfectant solutions. *J Prosthodont* 1993; 2: 156-158

Rammelsberg P, Ohlmann B. Kronen- und Brückenprothetik. in: Gernet W, Biffar R, Schwenzer N, Ehrenfeld M, Hrsg. *Zahnärztliche Prothetik*. Stuttgart: Thieme, 2011: 50-51

Rentzia A, Coleman DC, O'Donnell MJ, Dowling AH, O'Sullivan M. Disinfection procedures: their efficacy and effect on dimensional accuracy and surface quality of an irreversible hydrocolloid impression material. *J Dent* 2011; 39: 133-140

Riboli E, Beland FA, Lachenmeier DW, Marques MM, Phillips DH, Schernhammer E, Afghani A, Assunção R, Caderni G, Corton JC, de Aragão Umbuzeiro G, de Jong D, Deschasaux-Tanguy M, Hodge A, Ishihara J, Levy DD, Mandrioli D, McCullough ML, McNaughton SA, Morita T, Nugent AP, Ogawa K, Pandiri AR, Sergi CM, Touvier M, Zhang L, Benbrahim-Tallaa L, Chittiboyina S, Cuomo D, DeBono NL, Debras C, de Conti A, El Ghissassi F, Fontvieille E, Harewood R, Kaldor J, Mattock H, Pasqual E, Rigutto G, Simba H, Suonio E, Viegas S, Wedekind R, Schubauer-Berigan MK, Madia F. Carcinogenicity of aspartame, methyleugenol, and isoeugenol. *Lancet Oncol* 2023; 24: 848-850

Rubel BS. Impression materials: a comparative review of impression materials most commonly used in restorative dentistry. *Dent Clin North Am* 2007; 51: 629-642

Saji S, Hebden A, Goswami P, Du C. A Brief Review on the Development of Alginate Extraction Process and Its Sustainability. *Sustainability* 2022; 14, 5181

Shetty P, Supraja N, Garud M, Prasad TNVKV. Synthesis, characterization and antimicrobial activity of *Alstonia scholaris* bark-extract-mediated silver nanoparticles. *J Nanostruct Chem* 2014; 4: 161–170

Siddiqi KS, Husen A, Rao RAK. A review on biosynthesis of silver nanoparticles and their biocidal properties. *J Nanobiotechnology* 2018; 16: 14

Singer L, Bourauel C. Mechanical and Physical Properties of an Experimental Chemically and Green-Nano Improved Dental Alginate after Proven Antimicrobial Potentials. *Gels* 2023; 9: 429

Taylor RL, Wright PS, Maryan C. Disinfection procedures: their effect on the dimensional accuracy and surface quality of irreversible hydrocolloid impression materials and gypsum casts. *Dent Mater* 2002; 18: 103-110

Ugboko HU, Nwinyi OC, Oranusi SU, Fatoki TH, Omonhinmin CA. Antimicrobial Importance of Medicinal Plants in Nigeria. *ScientificWorldJournal* 2020; 2020: 7059323

Ulanowska M, Olas B. Biological Properties and Prospects for the Application of Eugenol- A Review. *Int J Mol Sci* 2021; 22: 3671

Vicidomini C, Roviello V, Roviello GN. Molecular Basis of the Therapeutical Potential of Clove (*Syzygium aromaticum* L.) and Clues to Its Anti-COVID-19 Utility. *Molecules* 2021; 26: 1880

Wang J, Wan Q, Chao Y, Chen Y. A self-disinfecting irreversible hydrocolloid impression material mixed with chlorhexidine solution. *Angle Orthod* 2007; 77: 894-900

Wilson HJ. Some properties of alginate impression materials relevant to clinical practice. *Br Dent J* 1966; 121: 463-467

Wöstmann B. Abformmaterialien. in: Rosentritt M, Ilie N, Lohbauer U, Hrsg. Werkstoffkunde in der Zahnmedizin – Moderne Materialien und Technologien. Stuttgart: Thieme, 2018: 24-27

Yeshi K, Crayn D, Ritmejeryté E, Wangchuk P. Plant Secondary Metabolites Produced in Response to Abiotic Stresses Has Potential Application in Pharmaceutical Product Development. *Molecules* 2022; 27: 313

Yin IX, Zhang J, Zhao IS, Mei ML, Li Q, Chu CH. The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry. *Int J Nanomedicine* 2020; 15: 2555-2562

9. Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich herzlich bei allen Menschen, die mich bei der Erstellung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. C. Bourauel für die Bereitstellung des Themas und der benötigten Mittel. Herzlichen Dank, dass Sie mir die Möglichkeit gegeben haben, meine Doktorarbeit unter Ihrer Betreuung zu schreiben. Auch für die wertvolle Unterstützung während dieser Zeit sowie die wissenschaftlichen Ratschläge und kritischen Anmerkungen danke ich Ihnen sehr.

Ein besonderer Dank gebührt auch Frau Dr. L. Singer für die stetige Betreuung und umfassende Unterstützung bei meiner Arbeit sowie die geduldige Beantwortung meiner Fragen.

Ein großes Dankeschön geht an Frau A. Weber, die mir insbesondere während der Arbeit am REM mit Rat und Tat zur Seite stand und auch darüber hinaus eine große Hilfe war. Ebenso danke ich Herrn Dr. A. Fouda für die Erklärung der technischen Geräte und die Einführung in das Statistikprogramm sowie Herrn Dr. L. Keilig für die Hilfestellung am REM.

Frau Dr. S. Karacic aus dem IMMIP danke ich für die Bereitstellung der benötigten Mittel zur Durchführung der mikrobiellen Testungen und die freundliche Unterstützung hierbei.

Schließlich danke ich auch von ganzem Herzen meiner Familie für die Ermutigung und die Unterstützung, meinen Weg zu gehen.