

Aus dem Lehrstuhl  
für Zahnärztliche Prothetik  
Prof. Dr. Sebastian Hahnel  
der Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

Einfluss verschiedener Polymerisationszeiten auf das Politurergebnis und die  
Oberflächeneigenschaften von Kompositen

Inaugural – Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Zahnmedizin

der  
Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

vorgelegt von  
Christina Boehres

2024



Aus dem Lehrstuhl  
für Zahnärztliche Prothetik  
Prof. Dr. Sebastian Hahnel  
der Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

Einfluss verschiedener Polymerisationszeiten auf das Politurergebnis und die  
Oberflächeneigenschaften von Kompositen

Inaugural – Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Zahnmedizin

der  
Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

vorgelegt von  
Christina Boehres

2024

Dekan:

Prof. Dr. Dirk Hellwig

1. Berichterstatter:

Prof. Dr. Dipl.-Ing. (FH) Martin Rosentritt

2. Berichterstatter:

Prof. Dr. Dr. Peter Proff

Tag der mündlichen Prüfung:

08.07.2024

## Hinweis

Die im nachfolgenden Text genannten Handelsnamen, Warenbezeichnungen und Gebrauchsbezeichnungen sind teilweise patent- und urheberrechtlich geschützt. Aus dem Fehlen eines besonderen Hinweises bzw. des Zeichens ® darf nicht geschlossen werden, dass kein patent- oder urheberrechtlicher Schutz besteht.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	6
2	Grundlagen .....	8
2.1	Komposite.....	8
2.1.1	Die organische Matrix .....	8
2.1.2	Füllkörper .....	9
2.1.3	Haftvermittler .....	10
2.1.4	Bulk-Fill-Komposite .....	10
2.1.5	VOCO VisCalor; VOCO GmbH; Deutschland .....	12
2.2	Lichtpolymerisation.....	13
2.3	Politur .....	15
2.3.1	VOCO Dimanto Polierer .....	16
2.3.2	NTI Unique Polierer.....	17
2.4	Glanz.....	18
2.5	Oberflächenrauheit .....	21
2.6	Härte .....	23
2.6.1	Optische Vermessung .....	24
2.6.2	Vickershärte (HV) ISO 6507 .....	25
2.6.3	Martenshärte (HM) ISO 14577 .....	25
2.7	Verfärbungsneigung und Farbe.....	27
2.7.1	Verfärbung.....	27
2.7.2	Farbe.....	27
2.7.3	L* a* b*-Farbraum.....	28
3	Material und Methoden .....	30
3.1	Material.....	30
3.2	Vorversuche – Eignung des Versuchsaufbaus.....	31
3.3	Herstellung der Prüfkörper .....	33

3.3.1	Prüfkörpergruppen.....	33
3.3.2	Formgebung .....	34
3.3.3	Polymerisation.....	35
3.4	Politur .....	35
3.4.1	VOCO Dimanto Polierer .....	36
3.4.2	NTI Unique Polierer .....	37
3.5	Messverfahren .....	37
3.5.1	Glanzmessung .....	38
3.5.2	Bestimmung der Rauheit.....	39
3.5.3	Härteprüfung .....	40
3.5.4	Farbmessung.....	41
3.5.5	Rasterelektronenmikroskop.....	43
3.5.6	Statistische Auswertung .....	43
4	Ergebnisse .....	44
4.1	Glanz.....	44
4.2	Arithmetischer Mittenrauwert (Ra-Wert) .....	48
4.3	Gemittelte Rautiefe (Rz-Wert).....	52
4.4	Härte .....	56
4.5	Verfärbung, numerische Differenz zweier Farben $\Delta E$ .....	60
4.6	Rasterelektronenmikroskop .....	64
5	Diskussion .....	75
5.1	Diskussion der Methode .....	75
5.1.1	Auswahl der Materialien .....	75
5.1.2	Auswahl der Prüfkörperform und Herstellung der Prüfkörper .....	76
5.1.3	Gestaltung des Polymerisationsprozesses .....	77
5.1.4	Lagerung der Prüfkörper .....	78
5.1.5	Gestaltung des Politurprozesses .....	78

5.1.6	Glanzmessung .....	80
5.1.7	Rauheitsmessung.....	81
5.1.8	Härte .....	81
5.1.9	Verfärbungsneigung .....	82
5.1.10	Rasterelektronenmikroskop.....	83
5.2	Diskussion der Ergebnisse.....	84
5.2.1	Glanz .....	84
5.2.2	Rauheit (Ra- und Rz-Wert).....	88
5.2.3	Härte .....	93
5.2.4	Verfärbung.....	98
5.2.5	REM .....	104
6	Schlussfolgerung .....	106
7	Zusammenfassung.....	108
8	Literaturverzeichnis.....	110
9	Anhang .....	125
A.	Abbildungsverzeichnis .....	125
B.	Tabellenverzeichnis .....	127
C.	Abkürzungs- und Formelverzeichnis.....	128
D.	Versuchsablauf – Herstellung Prüfkörper (groß).....	130
E.	Email Antwort von der VOCO GmbH .....	131
	Lebenslauf.....	133
	Danksagung.....	134



## 1 Einleitung

In der heutigen konservierenden Zahnheilkunde stellt die Füllungstherapie mit Hilfe von Kompositen eine etablierte und unerlässliche Therapieform dar (1). Dabei spielt die Ästhetik eine wichtige Rolle: direkte, minimalinvasive, zahnfarbene Restaurationen besitzen einen hohen Stellenwert. Die Qualität einer Kompositfüllung zeichnet sich durch die optimale Farbanpassung an die Zahnfarbe, Dichtigkeit und Langlebigkeit aus. Diese Anforderungen können nur erfüllt werden, wenn neben der lege artis ausgeführten zahnärztlichen Exkavation, Präparation, Trockenlegung und dem korrekten Einbringen des Füllungsmaterials in Inkrementtechnik eine adäquate Politur und Polymerisation des Materials erfolgt. Komposite zeichnen sich durch ein vielfältiges Einsatzgebiet, die Möglichkeit eines minimalinvasiven Vorgehens, Reparaturfähigkeit und einen geringeren Zeit- und Kostenaufwand gegenüber indirekten Restaurationen aus (1). Daher sollte, wenn die Indikation für eine direkte adhäsive Versorgung gegeben ist, besonders bei Jüngeren, dieser in der Regel der Vorzug gegenüber einer invasiven, mehr Zahnhartsubstanz opfernden Präparation gewährt werden (2).

Um eine optimale, blasenfreie Anlagerung des Komposits an die Kavitätenwand zu gewährleisten, wurde bisher im Rahmen der „Schnee-pflug-Technik“ zuerst etwas fließfähiges Komposit in den Bereich des Kavitätenbodens und im Anschluss darüber ein stopfbares Komposit appliziert (3). Die Firma VOCO hat mit den thermoviskosen Materialien VisCalor und VisCalor bulk eine neue Art des Komposits auf den Markt gebracht, welches die beiden Eigenschaften der Fließfähigkeit und Stopfbarkeit in einem Material miteinander vereint. Hierfür wird das Material mittels Kompositofen oder Dispenser vor der Applikation auf 65-68°C erwärmt und wechselt von einer hochviskosen in eine niedrigviskose, fließfähige Konsistenz. Während dem Applikationsprozess kühlt das Material ab und wird wieder hochviskos und modellierbar (4).

Komposite werden in einzelnen Inkrementen in eine Kavität appliziert und polymerisiert. Die bei der Polymerisation entstehende Polymerisationsschrumpfung und einhergehenden Spannungen im Material werden somit verringert und die Durchhärtungstiefe der Kompositmaterialien nicht überschritten (5). Eine Methode die Mehrschichttechnik besonders auch bei großen und tiefen Kavitäten zu vereinfachen, ist die Verwendung eines Bulk-Fill-Komposits. Hierbei können Inkrementenschichten von 4-5mm auf einmal polymerisiert werden, da diese Materialien eine höhere Transluzenz und gesteigerte Durchhärtungstiefe besitzen. Normalerweise sind Bulk-Fill-Komposite entweder in niedrigviskos oder mittel- bis hochviskos erhältlich, wobei die niedrig viskosen Bulk-Fill-Komposite okklusal mit einer

zusätzliche Deckschicht abgedeckt werden müssen. VisCalor bulk vereint diese beiden Viskositätsstufen in einem Material (1).

Forschungsergebnisse zeigen, dass unter anderem die Wahl der Polymerisationslampe, der ordnungsgemäße Ablauf des Polymerisationsvorganges und eine Mindestpolymerisationszeit einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften einer Kompositversorgung haben (6, 7). Für die Langlebigkeit, Qualität und mechanischen Eigenschaften einer Kompositversorgung ist ebenso eine gute Politur von großer Bedeutung (8). Die Wahl eines geeigneten Poliersystems beeinflusst die Verfärbungsneigung eines Kompositmaterials (9) sowie die erzielbare Oberflächenrauheit (10). Bisher liegen keine Studienergebnisse vor, in der die Auswirkung von verschiedenen Polymerisationszeiten auf den Glanz, die Oberflächenrauheit, die Härte und die Verfärbungsneigung kombiniert betrachtet werden. Auch das Prinzip von thermoviskosen Materialien stellt auf dem Markt eine neue Form des Komposits dar, zu denen in dieser Hinsicht noch keine hinreichenden Forschungsarbeiten veröffentlicht wurden.

In den Versuchsreihen dieser Dissertation wurden verschiedene Prüfkörper aus thermoviskosen Kompositen bezogen auf die Parameter Glanz, Oberflächenrauheit, Härte und Verfärbungsneigung bei unterschiedlich verwendeten Polymerisationszeiten und Poliersystemen miteinander verglichen. Dabei war die zentrale Fragestellung, welchen Einfluss verschiedene Polymerisationszeiten auf das Politurergebnis und auf die Oberflächeneigenschaften von Kompositen nehmen. Die in dieser Studie untersuchten Hypothesen sind, dass die Variation der Polymerisationsdauer wie auch das Variieren des Poliersystems zu unterschiedlichem Glanz, Oberflächenrauheit, Härte und Verfärbungsneigung führen.

## **2 Grundlagen**

In diesem Kapitel erfolgt eine Übersicht über die grundlegenden Thematiken dieser Dissertation. Dabei wird nacheinander auf Komposite, die Polymerisation, die Politur, den Glanz, die Oberflächenrauheit, die Härte und die Verfärbungsneigung eingegangen.

### **2.1 Komposite**

Abgeleitet von dem lateinischen Wort *compositus* und seiner Bedeutung als „Zusammengesetztes“ (11, 12), versteht man in der Zahnmedizin unter dem Begriff Komposit einen Werkstoff, dessen Basis aus einem Gemisch von Kunststoff, Glas und Keramik zusammengesetzt ist (13). Grundsätzlich lassen sich Komposite in klinischer Hinsicht als direkte, im Patienten Mund verarbeitete oder indirekte und somit außerhalb des Patientenmundes verarbeitete Materialien einteilen. Füllungsmaterialien sind somit klinisch der Kategorie der direkten Komposite zugeordnet. Komposite sind im Allgemeinen aus drei hauptsächlichen Bestandteilen aufgebaut. Sie bestehen aus der organischen Matrix, Füllkörpern und Haftvermittlern. Weitergehend werden noch Initiatoren in Form von Peroxiden und Diketonen, Akzeleratoren in Form von aliphatischen und aromatischen Aminen und Inhibitoren in Form von substituierten Phenolen und Hydrochinonen zugefügt, um die Polymerisationsreaktion des Komposits zu steuern. Zusätzlich beinhalten sie Additive in Form von Konservierungsmitteln, Pigmenten und Farbstoffen (13).

#### **2.1.1 Die organische Matrix**

Bei der organischen Matrix handelt es sich um ein Polymer. Es besteht entweder aus einer Monomerart, dem sogenannten Unipolymer, oder verschiedenen Monomertypen, die zusammen als Heteropolymer bezeichnet werden. Der Grundbaustein eines Polymers setzt sich vorwiegend aus makromolekularen, organischen Verbindungen zusammen. Dabei bilden aufeinanderfolgende, sich mehrfach wiederholende Monomereinheiten Makromoleküle aus. Die Verbindung untereinander erfolgt meist über kovalente Bindungen oder Wasserstoffbrückenbindungen. Bei den Kompositen wird vor allem den Methacrylaten die größte Bedeutung unter den Monomeren zugemessen. Damit sich einzelne Monomere zu Polymeren vereinigen können, ist ein Polymerisationsvorgang notwendig (13).

Anhand der vorhandenen Methacrylatgruppen eines Monomers werden die Methacrylate in sogenannte mono- und multifunktionale Methacrylate unterschieden, die in der Lage sind, dreidimensionale Netzwerke zu bilden. In der Regel weist die Matrix der marktgeläufigen Komposite ein Gemisch komplexer mono- und multifunktionaler Moleküle auf. Die

dreidimensionalen Netzwerke der mono- und bifunktionellen Methacrylate entstehen durch Kettenbildung und Verschlaufung, die der multifunktionalen hingegen mit Hilfe fester Verknüpfungen. Häufig verwendete Monomere sind das Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat (Bis-GMA), das Bisphenol-A-Ethoxydimethacrylat (Bis-EMA) sowie das Urethandimethacrylat (UDMA) und das Triethylenglycoldimethacrylat (TEGDMA), die in den meisten Kompositen gemeinsam beinhaltet sind. Um einen zusätzlichen Einfluss auf die Eigenschaften der Komposite in Form von einer Verringerung der Polymerisationsschrumpfung oder Förderung einer antibakteriellen und antikariogenen Wirkung zu nehmen, werden zu diesen vier Monomeren noch zusätzliche Monomere beigefügt (13).

### **2.1.2 Füllkörper**

Als anorganische Füllkörper fungieren unter anderem Glaskeramik, Quarz, Silikate, Metalloxide und Gläser. Diese sind in die organische Matrix eingelagert und beeinflussen mitunter die funktionellen und mechanischen Eigenschaften der Komposite. Sie variieren in Größe, Form und Anordnung (13).

Eine Möglichkeit Komposite zu klassifizieren, beruht auf ihrer Einteilung nach der Größe der Basisfüllkörper. So lassen sie sich in Makrofüller mit großen anorganischen Füllkörpern und einer Größe von 10-50 $\mu$ m einteilen. Diese gelten allerdings in der heutigen Zeit auf Grund ihrer schlechten Politurfähigkeit und niedriger Abrasionsfestigkeit als obsolet. Des Weiteren gibt es Mikrofüller mit einer Größe zwischen 40 bis 50nm, die sich nochmal in homogene und inhomogene Mikrofüllerkomposite aufteilen lassen. Im Gegensatz zu den Makrofüllerkompositen weisen diese durch den Bestandteil an kolloidalem Siliziumdioxid gute Politureigenschaften auf. Homogene Mikrofüllerkomposite weisen allerdings mit maximal 35Gew.-% einen niedrigen Anteil an anorganischen Füllkörpern auf, was in schlechten mechanischen Eigenschaften resultiert und sich zudem in einer erhöhten Polymerisationsschrumpfung widerspiegelt. Damit ein erhöhter Füllkörperanteil von 50-60Gew.-% erreicht wird, sind als zusätzlicher Bestandteil Prepolymerisate enthalten. In diesem Fall spricht man von den sogenannten inhomogenen Mikrofüllerkompositen. Sie weisen eine niedrige Polymerisationsschrumpfung auf, sind allerdings durch eine erhöhte Bruchgefahr nicht für eine Benutzung im Seitenzahnbereich indiziert. Als weitere Klasse gibt es die Gruppe der Hybridkomposite, die weiterhin in drei Kategorien unterteilt werden. Dabei gibt es die Grobpartikelhybridkomposite mit unterschiedlichen Füllkörpergrößen von 40nm sowie zwischen 1-10 $\mu$ m, die Feinpartikelhybridkomposite, die Füllkörpergrößen von 40nm und welche zwischen 0,6-1 $\mu$ m aufweisen, sowie die Nano-Hybridkomposite mit Füllkörpergrößen

zwischen 5-100nm und 0,6-1 $\mu$ m. Die in der heutigen Füllungstherapie gängigen Komposite sind Nano-Hybridkomposite und Nanogefüllte Komposite. Sie sind unter anderem durch ihre gute mechanische Beschaffenheit für die Versorgung der Blackklassen I bis V geeignet (13).

Eine weitere Einteilungsmöglichkeit der Komposite kann auf Grund ihres Viskositätsverhaltens vorgenommen werden. So werden niedrigviskose Komposite von hochviskosen Kompositen unterschieden. Zusätzlich lassen sich Komposite nach der empfohlenen Inkrementschichtung von 4-5mm in Bulk-Fill-Komposite oder von bis zu 2mm in herkömmliche Kompositen gliedern (13).

### **2.1.3 Haftvermittler**

Bei den Haftvermittlern handelt es sich um organofunktionelle Silane und verzweigte Multimethacrylate, die für die Verknüpfung der vorwiegend anorganischen Füllkörper und der organischen Matrix verantwortlich sind. Dies erfolgt mit Hilfe von chemischen Bindungen. Um gute mechanische Eigenschaften der Komposite zu gewährleisten ist eine stabile Einheit zwischen Füllstoffen und organischer Matrix gewünscht. Schlüsselstelle der organofunktionellen Silane ist das Silizium, das auf der einen Seite über die siliziumfunktionelle Gruppe mit aktiven Stellen der anorganischen Füllkörper reagieren kann und auf der anderen Seite über seine organofunktionelle Gruppe den Verbund zur organischen Matrix gewährleistet. Dabei gilt das 3-Methacryloxidpropyltrimethoxysilan ( $\gamma$ -MPS) als am häufigsten verwendeter Haftvermittler (13).

### **2.1.4 Bulk-Fill-Komposite**

Komposite werden in eine Kavität appliziert und polymerisiert. Während dem Polymerisationsprozess findet eine Volumenschrumpfung des Materials statt, seine innere Spannung erhöht sich. Der Konfigurationsfaktor (c-Faktor) stellt das Verhältnis von gebundener Komposit- zu freier Kompositoberfläche dar und steigt mit zunehmend gebundener Oberfläche, der Schrumpfungstress erhöht sich. Es kommt zu Spannungen zwischen dem Kompositmaterial und der Kavitätenwand und Spaltbildungen können resultieren. Die Inkrementschichtung hat das Ziel, die bei dem Polymerisationsprozess entstehende und nicht vermeidbare Polymerisationsschrumpfung zu mindern. Zudem wird vermieden die Durchhärtungstiefe der Komposite zu überschreiten (5).

Die Verwendung von Bulk-Fill-Kompositen ermöglicht eine Erhöhung der Schichtstärke der Inkremente von Kompositen. Diese kann im Gegensatz zu der für herkömmliche Komposite empfohlenen Schichtung von bis zu 2mm je Inkrement auf 4-5mm erhöht werden. Somit findet

eine Vereinfachung der Füllungstherapie statt. Dabei führt eine gesteigerte Transluzenz des Komposits und die Verwendung angepasster Fotoinitiatoren zu einer gesteigerten Durchhärtungstiefe der Bulk-Fill-Komposite. Indiziert sind Bulk-Fill-Komposite für die Verwendung im Seitenzahnbereich. Sie stellen sowohl für minimalinvasive Kavitäten als auch für ausgeprägte, tiefe Kavitäten ein geeignetes Füllungsmaterial dar (14).

Unterteilt werden Bulk-Fill-Komposite ebenfalls in niedrigviskose, die meist einen geringeren Füllkörperanteil besitzen und fließfähig erscheinen sowie in hochviskose, formbare Bulk-Fill-Komposite. Hochviskose Bulk-Fill-Komposite können als alleiniges Füllungsmaterial verwendet werden. Niedrigviskose hingegen müssen, bedingt durch den reduzierten Füllkörperanteil, als letzte Schicht mit einem mindestens 2mm hohen Inkrement eines Hybridkomposits überschichtet werden. Hierdurch soll eine gute mechanische Stabilität der gesamten Füllung gewährleistet werden. Dabei muss auf eine ausreichende Polymerisationszeit bei der Materialanwendung geachtet werden, die in der Regel zwischen 20 bis 30s liegt. Klinisch stellen Bulk-Fill-Materialien eine Alternative zu herkömmlichen Hybridkompositen dar (14).

Chemisch weisen Bulk-Fill-Komposite keinen großen Unterschied zu den gängigen Kompositen auf. Sie besitzen ebenfalls als Hauptbestandteile eine organische Matrix aus Bis-GMA, UDMA, TEGDMA oder EBPDMA, sowie vorwiegend anorganische Füllkörper und Haftvermittler. Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Transluzenz und der im Komposit enthaltenen Menge an Füllkörpern, sodass durch den Gehalt und die Größe der beinhalteten Füllkörper die Durchhärtungstiefe für diese Materialgruppe bestimmt wird. Größere Füllkörper führen während der Polymerisation zu einer geringeren Streuung von Licht. Bedingt durch die verringerte Grenzschicht zwischen der organischen Matrix und den Füllkörpern können die für die Aushärtung verantwortlichen Photonen in tiefere Inkrementschichten vordringen. Die gesteigerte Transluzenz der Bulk-Fill-Materialien ist ein Grund für die erhöhte Polymerisationstiefe dieser Materialgruppe. Dies kann zum einen über den reduzierten Füllkörpergehalt und zum anderen über einen geringen Unterschied im Brechungsindex zwischen organischer Matrix und Füllkörpern erreicht werden. Zusätzlich fördern kontinuierliche, geometrische Füllkörper und silanisierte Füllkörper, die einen geringen Brechungsindex zwischen Matrix und Füllkörpern begünstigen, die Durchlässigkeit von Licht. Die Lichtdurchlässigkeit eines Komposits muss bei dem Polymerisationsvorgang Berücksichtigung finden und es sollte jedes Inkrement für sich ausreichend polymerisiert werden (15).

### **2.1.5 VOCO VisCalor; VOCO GmbH; Deutschland**

Die Firma VOCO hat mit ihrem Komposit VisCalor, erhältlich in den Farben A1, A2, A3, A3,5, GA3,25, A4, B1, B2, OA2, Inzisal und BL, und VisCalor bulk, erhältlich in den Farben U, A1, A2 und A3, zwei röntgenopake, lighthärtende Nano-Hybridkomposite auf den Markt gebracht. Diese schaffen durch ihre thermoviskosen Eigenschaften einen neuen klinischen Ansatz in der Füllungstherapie. Der anorganische Füllkörpergehalt liegt für VisCalor und VisCalor bulk bei 83Gew.-%. VisCalor kann in Inkrementenschichten von bis zu 2mm appliziert werden und für die Black Klassen I bis V Verwendung finden. VisCalor bulk hingegen kann in Schichten von bis zu 4mm appliziert werden und für die Versorgung der Black Klassen I, II und V genutzt werden (16, 17). Die Materialien unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung nur anhand des zugefügten Pigmentgehaltes in Form von Titanoxid, Graphit und Eisenoxid (18). Titandioxidpigmente tragen zur weißen Farbgebung bei, während Eisenoxidpigmente eine Abnahme der Transluzenz des Komposits bewirken und sich für dunklere Farbtöne eignen (19).

Durch die vom Hersteller als „Thermo-viscous-technology“ beschriebene Nutzung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität können die VisCalor Materialien zwischen zwei Viskositätsstufen wechseln. Die generelle Viskositätsabnahme, die während der Materialerwärmung auftritt, wurde von VOCO modifiziert und verstärkt, indem die Oberfläche, der auf die Matrix abgestimmten Füllkörper eine spezielle, vom Hersteller nicht näher erläuterte Bearbeitung erfahren hat (4). Bei Zimmertemperatur liegen die VisCalor Komposite in einem hochviskosen Zustand vor und werden mit Hilfe eines Erwärmungsprozesses mit einem speziellen Kompositofen oder Dispenser auf 65-68°C erhitzt und gehen in einen niedrigviskosen Zustand über. Somit bietet der niedrigviskose Zustand bei der Applikation in die Kavität den Vorteil, dass das Material optimal an die Wände der Kavität appliziert werden kann und besonders auch in schwerzugängliche Bereiche gelangt. Bei dem Kontakt mit der Zahnwand findet während der Applikation ein Abkühlungsvorgang statt und das Material wird dadurch wieder hochviskos und modellierbar. Durch diese Kombination von zweierlei Viskositätsstufen in einem Material, wird eine vorherige Applikation eines niedrigviskosen Materials und anschließend eines hochviskosen Materials überflüssig und auch das Bulk-Fill-Material muss nicht mit einer zusätzlichen Deckschicht abgedeckt werden. Eine Überhitzungsgefahr für die Pulpa besteht durch das erwärmte Komposit nicht (1).

## 2.2 Lichtpolymerisation

Die Lichtpolymerisation nimmt einen großen Einfluss auf die Qualität einer Versorgung mit lighthärtenden Kompositen. Unzureichend polymerisierte Versorgungen können toxisch sein, ein Defizit in den mechanischen Eigenschaften aufweisen, sich stärker verfärben, im Bereich der Füllungsänder zu einem wiederholten Auftreten von Karies führen, sowie Hypersensibilitäten nach sich ziehen und somit den Erfolg einer Füllungstherapie drastisch mindern (6).

Die Aushärtung der lighthärtenden Komposite erfolgt über eine Polymerisationsreaktion, bei der sich die einzelnen Monomere zu Polymeren verbinden und somit ein festes Polymer Netzwerk entsteht. Dabei ist im dentalen Bereich die radikalische Polymerisation von entscheidender Bedeutung. Damit eine Polymerisation ablaufen kann, sind den dentalen Kompositen Initiatoren, Akzeleratoren und Inhibitoren beigefügt. Inhibitoren und Stabilisatoren verhindern das vorzeitige Polymerisieren des Komposits und ermöglichen somit die Lagerung des Werkstoffs. Für eine Lichtpolymerisation sind den Kompositen Fotoinitiatoren beigemischt. Hier ist Campherchinon (CQ) mit Aminien kombiniert der weitverbreitetste Fotoinitiator von Kompositen. Bei Fotoinitiatoren handelt es sich um chemische Verbindungen, die bedingt durch das abgegebene Licht einer Polymerisationslampe in einer Fotolysereaktion gespalten werden und entweder Kationen oder Radikale bilden und eine Initiierung der Polymerisation nach sich ziehen. Im Hinblick auf die radikalische Polymerisation und der Bildung von Radikalen unterscheidet man Typ-1-Fotoinitiatoren von Typ-2-Fotoinitiatoren. Typ-1-Fotoinitiatoren bestehen aus einer Komponente, hier werden durch die Spaltung einer Bindung zwei Radikale gewonnen. Bei CQ und Aminien handelt es sich um Typ-2-Fotoinitiatoren, die aus zwei Komponenten bestehen. Hier wird für die Radikalbildung ein Proton von einer Donorbindung abgespalten. Der Zusatz von tertiären Aminien ermöglicht eine Zunahme der Reaktivität und die Erzeugung von Startradikalen (13).

Für den Beginn der Polymerisation benötigt man eine spezielle Polymerisationslampe. Dabei kommen in der Zahnmedizin besonders LED-Lampen zum Einsatz, die Licht im benötigten Wellenlängenbereich aussenden. Es werden blaue LED-Lampen, die optimal und ausschließlich auf das Absorptionsspektrum von CQ abgestimmt sind, von violett-blauen LED-Lampen unterschieden. Das ausgesandte Licht der Polymerisationslampe muss von seinem Spektrum her auf das Absorptionsspektrum des beinhalteten Fotoinitiators ausgerichtet sein. Dieses Absorptionsspektrum liegt für CQ im Bereich zwischen 360-550nm mit der maximalen Absorption bei 468nm. Durch den Beleuchtungsvorgang liegt CQ durch die Aufnahme des



Lichtes in einem angeregten Zustand vor und kann somit mit dem tertiären Amin einen angeregten Molekülkomplex (CQ\*-Amin-Exciplex) ausbilden. Aus diesem gehen bedingt durch Protonenabspaltung CQ-Kethylradikale und freie Radikale hervor, durch die die Polymerisation gestartet wird. Insgesamt läuft die radikalische Polymerisation in den Abschnitten der Start-, der Wachstums- und der Abbruchreaktion ab. Bei der Startreaktion kommt es durch die entstandenen Radikale und deren Reaktion mit einem Monomermolekül zu der Ausbildung eines Monomerradikals. Es folgt die Wachstumsreaktion, bei der an das Monomerradikal weitere Monomere angeschlossen werden, indem die radikale Eigenschaft weitergegeben werden. Somit findet ein Wachstum der Polymerkette statt. Zuletzt erfolgt zum Beispiel mit dem Aufeinandertreffen zweier Radikale oder eines Radikals mit einem Inhibitor- oder Initiator-molekül die Abbruchreaktion der entstandenen Kette (13).

Das persönliche Vorgehen des Behandlers während der Polymerisation spielt genauso wie das Benutzen einer angemessenen Polymerisationslampe mit ausreichender Lichtstärke eine große Rolle für die Erfolgsaussichten einer lichthärtenden Kompositfüllung. Ein reduzierter Aushärtungsgrad der Füllung kann zu einem verstärkten Abrasionsverhalten führen. Bei der Energiedichte (E), die bei einem Polymerisationsvorgang auf die Füllung abgegeben wird, handelt es sich um das Produkt aus der Bestrahlungsdauer (t) in Sekunden und der Lichtstärke der Polymerisationslampe (I). Herstellerangaben beziehen sich dabei in der Regel auf optimale Bedingungen mit minimalem Abstand der Lichtquelle zur Kompositoberfläche. Dabei werden Lokalisation und Tiefe der zu füllenden Kavität und das persönliche Vorgehen des Behandlers außer Acht gelassen und auch die Angabe für den benötigten Wellenlängenbereich werden häufig auf einen zu ungenauen Bereich ausgelegt. Eine Erhöhung der Lichtstärke der Polymerisationslampe mit gesteigerter Polymerisationszeit kann zu einem erhöhten Risiko einer Pulpaschädigung führen (20). Durch eine Erhöhung der Lichtstärke kann keine Reduktion der Polymerisationszeit erreicht werden (7).

Während des Polymerisationsvorgangs nimmt die Lichtdurchlässigkeit des lichthärtenden Komposits durch die Umwandlung von Monomeren in Polymere zu und das Licht der Polymerisationslampe erreicht somit einen tieferen Inkrementbereich. Bei einer verkürzten Polymerisationszeit kommt weniger Licht in tieferen Inkrementen an, als bei einer längeren Polymerisationszeit. Dies hat defizitäre mechanische Eigenschaften zur Folge (7). Eine erhöhte Polymerisationszeit kann zu einer gesteigerten Durchhärtungstiefe von Kompositen führen (21). Dabei zeigte sich für getestete Bulk-Fill-Komposite, dass die

Durchhärtungstiefe neben der Polymerisationszeit von dem verwendeten Material beeinflusst wird (22).

### **2.3 Politur**

Für eine ästhetische und langlebige Kompositversorgung ist der Politurvorgang ein wichtiger und unverzichtbarer Bestandteil einer erfolgreichen Füllungstherapie. Im Allgemeinen versteht man unter einer Politur die Glättung und Verdichtung der Oberfläche des Werkstoffs. Durch den Politurvorgang findet ein unterschiedlich starker Abtrag von der Werkstoffoberfläche statt. Es wird die von der Qualität geringwertige oberste Kompositschicht abgetragen und Rauigkeiten in der Oberflächenstruktur werden geglättet. Dabei sind die Glanzeigenschaften von der Füllkörpergröße des verwendeten Komposits abhängig und das Politurergebnis hängt von den Eigenschaften des Komposits ab (23). Besonders die Art der Füllkörper, ihre Größe und Formgebung nehmen Einfluss auf das erzielbare Ergebnis bei den Glanz- und Rauheitseigenschaften. Die Füllkörper an der Oberfläche werden während dem Politurvorgang herausgelöst, angeschliffen oder sie bleiben bestehen und ragen an der Oberfläche heraus. An der Kompositoberfläche bewirkt ein hoher Bestand an kleinen, runden, dicht angeordneten, anorganischen Füllkörper während dem Politurvorgang eine Verdichtung der Oberfläche und hat somit einen positiven Effekt auf das Politurergebnis (24).

Nach dem letzten Polymerisationsvorgang verbleibt auf der Kompositoberfläche als oberflächlichste, minderwertige Schicht, die Sauerstoffinhibitionsschicht. Sie ist durch die ungewünschte Reaktion der Polymermoleküle mit dem Luftsauerstoff entstanden und weist ungenügende Materialeigenschaften auf. Diese Schicht wird beim Ausarbeitungsprozess der Füllung entfernt (13).

Für die erste Bearbeitung der Kompositoberfläche werden häufig rotierende Instrumente genutzt, wobei Überschüsse entfernt, die Füllung konturiert und geglättet wird. Dabei werden Hartmetallinstrumente oder diamantierte Stahlinstrumente verwendet, die es in vielen verschiedenen Formen gibt. Instrumente mit einer groben Struktur, tragen mehr von der Kompositoberfläche ab, wohingegen feinere Instrumente eine glattere Oberfläche schaffen. Des Weiteren gibt es keramisch gebundene Instrumente, zu denen, die natürlich gewonnenen Arkansassteinchen zählen, die besonders auf die Ausarbeitung von Keramik und hochgefüllten Kompositen ausgelegt sind. Sie weisen jedoch ein hohes Verschleißverhalten auf und es besteht das Risiko, dass die auszuarbeitende Kompositoberfläche nicht symmetrisch abgetragen wird und Teile herausgelöst werden (13).

Im Anschluss erfolgt die weitere Politur normalerweise mit Hilfe spezieller Polierer, bei denen Abrasionskörper in Chloroprenen, Polyamiden, Silikonkautschuk oder anderen Bindungssystemen eingearbeitet sind. Diese sind in verschiedenen Formen als Kelche, Spitzen und in Sonderformen erhältlich. Die Kelchform eignet sich besonders für die Politur von Flächen und Höckern. Mit den Spitzen lassen sich sogar schlechter zugängliche Stellen polieren und linsen- und scheibenförmige Polierer erleichtern die Politur zum Approximalraum hin. Des Weiteren gibt es noch Polierer in Bürstenform und spezielle Einweg Polierscheiben, die mit Schleifkörpern unterschiedlicher Körnung belegt sind und ein mehrstufiges Poliersystem darstellen (13). Generell haben sich mehrstufige Poliersysteme bewährt (25). Es gilt für jede Kompositfüllung, dass sie in den routinemäßigen Kontrolluntersuchungen nachkontrolliert werden und bei Bedarf nachpoliert werden muss (24).

Während der Ausarbeitung der Kompositfüllung ist auf eine ausreichende Wasserkühlung zu achten, um eine Erhitzung der Pulpa und Schädigung der Kompositoberfläche zu verhindern. Ebenfalls sollte der vom Hersteller empfohlene Drehzahlbereich und die Anpresskraft beachtet werden, da es ansonsten zu einer Überhitzung, Minderung des Politurergebnisses, Bruch oder starkem Verschleiß des Instrumentes kommen kann. Die menschliche Zunge kann Rauheiten in einem Bereich zwischen 0,3-0,5µm spüren. Damit die Füllung von den Patienten nicht als störend empfunden wird, eine möglichst geringe Plaqueakkumulation besteht und ein langlebiges Restaurationsergebnis erzielt werden kann, ist eine gute Politur unerlässlich. Zusätzlich kann eine ausbleibende Politur zur Schädigung des Antagonisten führen und damit eventuell Probleme im Kiefergelenksbereich nach sich ziehen (13).

### **2.3.1 VOCO Dimanto Polierer**

Der VOCO Dimanto Polierer (VOCO GmbH) ist ein Silikonpolierer, der einen Diamantpulverbestandteil enthält und sich für die Politur aller Kompositmaterialien eignet. Es handelt sich um ein einstufiges Poliersystem, das sich sowohl für die Vor- als auch für die Hochglanzpolitur von finierten Kompositoberflächen anbietet. Dabei sollte zu Beginn mit einem mittleren Druck gearbeitet werden, der für die Hochglanzpolitur reduziert wird. Die Politur kann mit oder ohne Wasserkühlung erfolgen, wobei eine Überhitzung des Komposits und der Pulpa unbedingt vermieden werden muss. Dafür sollte der empfohlene Drehzahlbereich zwischen 3000-8000U/min eingehalten, beziehungsweise für einen Politurvorgang ohne Wasserkühlung reduziert werden. Der Polierer ist autoklavierbar und damit für den wiederholten Gebrauch geeignet (26). Insgesamt ist er in fünf unterschiedlichen Formen erhältlich (siehe Abbildung 1). Die kleinen und großen Spitzen eignen sich besonders für die

Politur der Okklusalfäche und den Zahnhalsbereich. Die kleinen und großen Kelche bieten sich besonders für die Bearbeitung großer Füllungsflächen und den Höckerabhang an. Der linsenförmige Polierer dient zur Ausarbeitung von großen Füllungsflächen, Schneidekanten und für den Übergang zum Approximalbereich (27).

**Abbildung 1. VOCO Dimanto Polierer in den Formen kleine, große Spitze, kleiner, großer Kelch und Linse (von links nach rechts) (27)**



### 2.3.2 NTI Unique Polierer

Der NTI Unique Polierer (NTI-Kahla GmbH) ist ein diamantierter Polierer mit mittlerer Körnung, der während des Politurprozesses abtragende Polierteilchen absondert und eine hochglänzende Kompositoberfläche erzielt. Es handelt sich um ein einstufiges Poliersystem, das ausschließlich mit Wasserkühlung bei einer Umdrehung von maximal 7000U/min benutzt werden kann. Der Kautschukbestandteil ermöglicht mit seiner Elastizität eine arealunabhängige Politur und durch seine Fähigkeit Wärme aufzunehmen, wird eine Beschädigung der Füllungsänder verhindert. Der Polierer kann für die Politur von Kompositen und Verblendkunststoffen Verwendung finden. Insgesamt ist der NTI Unique Polierer in vier Formen erhältlich, kleine, große Spitze, Kelch und Linse (siehe Abbildung 2) (28).

**Abbildung 2. NTI Unique Polierer, erhältlich als große, kleine Spitze, Kelch und Linse (von links nach rechts) (28)**

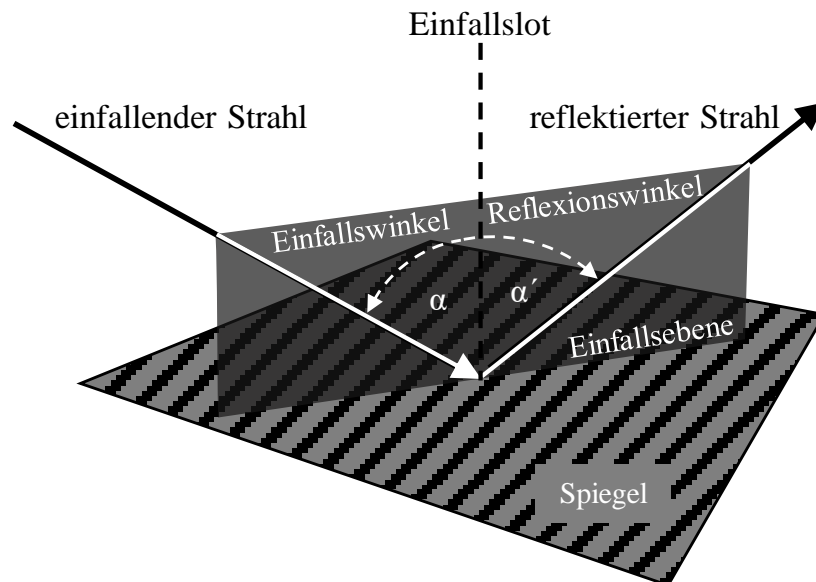


## 2.4 Glanz

Es ist nicht nur das Ausmaß der Politur, sondern auch die Materialzusammensetzung eines Werkstoffs für den Glanzeindruck entscheidend. Die Glanzwahrnehmung ist zusätzlich ein individueller Sinneseindruck, der von Person zu Person unterschiedlich wahrgenommen wird, unter anderem bedingt durch persönliche und äußere Einflüsse. Wie glänzend eine Oberfläche erscheint hängt auch mit der Glattheit einer Oberfläche zusammen. Im Bereich der dentalen Komposite haben die Füllkörpergröße, Füllkörperdichte und die Formgebung einen entscheidenden Einfluss darauf, wie glänzend eine Oberfläche eingestuft wird. Es lässt sich nicht jedes Kompositmaterial hochglänzend polieren (29). Optisch wird eine Oberfläche als hochglänzend wahrgenommen, wenn jegliche Rauigkeiten geglättet sind und die Teilchengröße auf der polierten Kompositoberfläche geringer ausfällt, als der Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts. Der optische Eindruck des Spiegelglanzes ist nur für nano- oder mikrogefüllte polierte Komposite zu erzielen (23). Wird Licht auf eine Oberfläche projiziert, besteht die Möglichkeit der Reflexion, dabei wird das Licht zurückgeworfen, der Remission, dabei wird das Licht von dem beleuchteten Material teilweise aufgenommen und der Rest wieder reflektiert oder der Absorption, dabei wird das Licht von dem Material aufgenommen. Der Glanz beschreibt eine optische Eigenschaft einer Oberfläche, mit der Fähigkeit Licht teils oder vollständig zu reflektieren, beruhend auf dem Gesetz der Reflexion (30). Wird ein Lichtstrahl auf einen Spiegel gerichtet, wird der Lichtstrahl reflektiert und es kommt zu einer Veränderung der Lichtausbreitung. Dabei charakterisiert das Reflexionsgesetz die weitere Ausbreitungsrichtung des Lichtes, in welche Richtung das Licht reflektiert wird und wohin es

sich weiter ausbreitet. Licht wird als einfallender Strahl auf die Materialoberfläche projiziert, dabei kommt es zu einer Abänderung der Ausbreitungsrichtung und das Licht wird an der Materialoberfläche reflektiert, der sogenannte reflektierte Strahl. Die Senkrechte zur Materialoberfläche, bei der das einfallende Licht auf der Oberfläche aufkommt und reflektiert wird, wird als Einfallslot bezeichnet. Der Winkel, der zwischen dem Einfallslot und dem einfallenden Lichtstrahl entsteht, ist der Einfallswinkel  $\alpha$ , der Winkel, der zwischen dem Einfallslot und dem reflektierten Strahl gebildet wird, beschreibt den Reflexionswinkel  $\alpha'$ . Die Ebene, die den einfallenden Strahl, das Einfallslot und den reflektierten Strahl enthält, wird mit dem Begriff der Einfallsebene beschrieben (siehe Abbildung 3). Laut dem Reflexionsgesetz entspricht der Einfallswinkel  $\alpha$  dem Ausfallswinkel  $\alpha'$  innerhalb einer flachen und ebenen Fläche (31).

**Abbildung 3. Graphische Darstellung des Reflexionsgesetzes [angelehnt an (31)]**



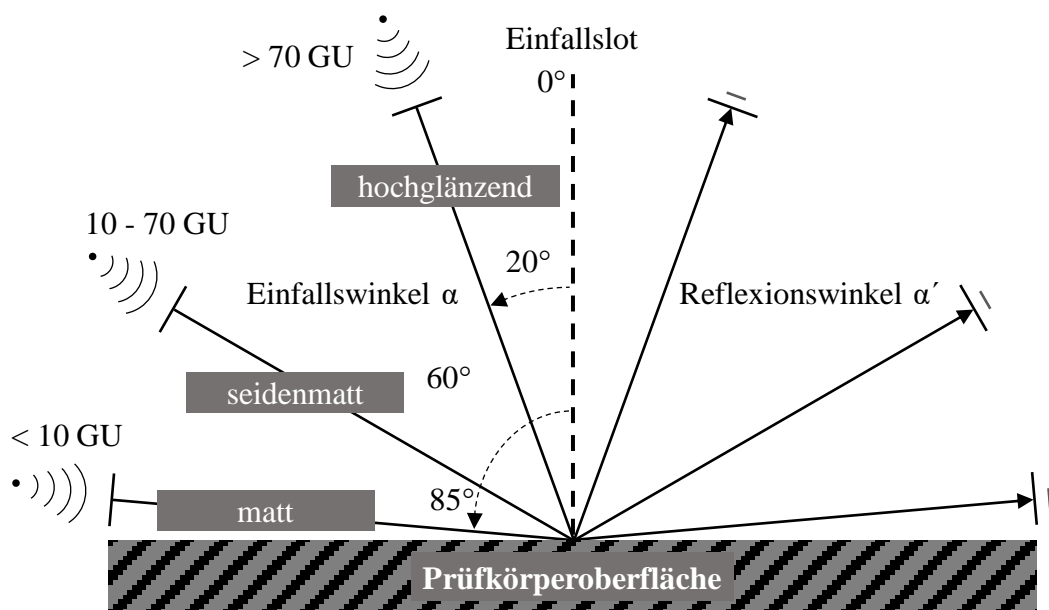
Dabei beeinflusst die Wellenlänge des ausgesandten Lichts die Reflexion. Unterschiede in der Helligkeit der Materialoberfläche führen zu einer Glanzwahrnehmung. Der Glanzeindruck fällt umso stärker aus, je ausgeprägter und gerichteter die Lichtreflexion ist. Besitzt die Oberfläche Unebenheiten, weist die Reflexion einen ungerichteten Anteil auf. Zusätzlich spielen die Farbgebung und die transluzenten Eigenschaften des getesteten Werkstoffs eine Rolle für die Glanzwahrnehmung (29).

Der Glanzwert kann mit Hilfe von Glanzmessgeräten, den sogenannten Reflektometern gemessen werden. Dazu wirft das Gerät Licht in einem bestimmten Winkel auf die Oberfläche des zu testenden Materials und bestimmt die gerichtete Reflexion in einem begrenzten Areal

des Reflexionswinkels. Die eingestrahlte Lichtmenge stellt dabei nicht die Basis für die Glanzmessung dar, sondern die Messergebnisse leiten sich vom Lichtbrechungsindex eines schwarzen Glasstandard ab, der eine Glanzeinheit von 100 besitzt (29). Von einer Spiegelreflexion ist die Rede, wenn der Einfallswinkel des projizierten Lichtes mit dem Reflexionswinkel übereinstimmt. Je ebener und polierter eine Oberfläche erscheint, umso mehr dominiert die Spiegelreflexion. Liegen jedoch Unebenheiten der Oberfläche vor, liegt eine diffuse Reflexion vor, bei der das Licht nicht gerichtet reflektiert wird. Je stärker die Unebenheiten der Oberfläche sind, desto größer ist der Anteil der diffusen Reflexion. Die Glanzmessung erfolgt in der Regel mit Hilfe dreier festgelegter Messwinkel, der Winkel wird dabei anhand des jeweiligen Glanzbereiches ausgewählt. Ein Messwinkel von  $20^\circ$  wird für hochglänzende Materialien mit einem Glanzwert von über 70 Glanzeinheiten (GU), ein Messwinkel von  $60^\circ$  für Materialien mit einem seidenmatten Glanz mit einem Glanzwert zwischen 10 bis 70GU und ein Messwinkel von  $85^\circ$  wird für die Glanzmessung von matten Oberflächen mit einem Glanzwert von unter 10GU verwendet (32–34) (siehe Abbildung 4).

**Abbildung 4. Schemazeichnung Messprinzip eines Reflektometers [angelehnt an (33)]**

**Reflektometer sendet Licht in einem festgelegten Messwinkel aus**



Die Politur beeinflusst das Glanzverhalten einer Kompositfüllung und ist ein wichtiger Faktor für ihren klinischen Erfolg, sie nimmt unter anderem Einfluss auf die Plaqueakkumulation. In Versuchen konnten die höchsten Glanzwerte für den gegen die Matrize oder eine Glasplatte geschichteten Kompositanteil verzeichnet werden (29, 30).

## 2.5 Oberflächenrauheit

Bei der Rauheit handelt es sich neben der Welligkeit und der Rillenausrichtung um eine Oberflächeneigenschaft. Diese Oberflächeneigenschaften bestimmen das Ursprungsprofil einer Oberfläche. Die Rillenausrichtung beschreibt wie die Oberfläche ausgerichtet ist, kleine Unebenheiten der Oberfläche bedingt durch ausarbeitende Verfahren werden als Oberflächenrauheit beschrieben (13). Unter der Welligkeit versteht man sich wiederholende Unregelmäßigkeiten auf einer nicht idealen Oberfläche. Die Oberflächenunregelmäßigkeiten treten im Vergleich zur Rauheit mit gesteigerten Entfernung auf (35).

Das Politurergebnis steht im direkten Zusammenhang mit der Oberflächenrauheit. Ob eine Kompositoberfläche matt oder glänzend erscheint spiegelt sich in der vorliegenden Oberflächenrauheit wider. Der Politurprozess geht mit einer Bearbeitung der obersten Kompositenschicht einher, wobei ein unterschiedlich großer Abtrag der Materialoberfläche erfolgt. Unterschiedliche Oberflächenrauheiten können das optische Erscheinungsbild der Kompositoberfläche beeinflussen, dabei spielen die im Komposit enthaltenen Füllkörper eine entscheidende Rolle (23). Das Profil einer Oberfläche wird durch die Bestimmung der Oberflächenrauheit näher charakterisiert. Die Oberfläche weist Erhöhungen und Vertiefungen auf, wobei der Bereich um eine Vertiefung als Tal und der Bereich um eine Erhöhung als Spitze bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um mikroskopisch kleine Unregelmäßigkeiten auf der Materialoberfläche. Die auf einer Oberfläche vorliegenden kontinuierlichen Täler und Spitzen können unterschiedlich hoch beziehungsweise tief sein und unterschiedliche Abstände zueinander aufweisen (13).

Betrachtet man ein Rauheitsprofil und möchte Parameter der Oberflächenrauheit bestimmen, werden die anderen Oberflächeneigenschaften wie Welligkeit und Rillenausrichtung mit Hilfe bestimmter elektrischer Filter während dem Messvorgang gemindert (36). Durch den Produktions-, Ausarbeitungs- und Politurvorgang besitzt eine Materialoberfläche hochfrequente Wellenlängen, was als Rauheit definiert ist. Dabei beziehen sich R-Parameter auf eine zweidimensionale Oberflächenanalyse von einem Profil oder einer Linie, also bestimmen sie die Amplitude von Höhen und Tiefen auf einer Strecke, wohingegen die S-Parameter diese Amplitude als dreidimensionale Flächenanalyse durchführen (13).

In einem Rauheitsprofil beschreibt der Parameter  $R_z$  die gemittelte Rautiefe nach DIN EN ISO 4287. Die einzelnen Oberflächenrauheitsparameter  $R_{zn}$  ( $R_{z1}$  bis  $R_{zn}$ ) aus den jeweils zugehörigen Einzelmessstrecken  $l_n$  ( $l_1$  bis  $l_n$ ) (siehe Abbildung 5) lassen sich durch die



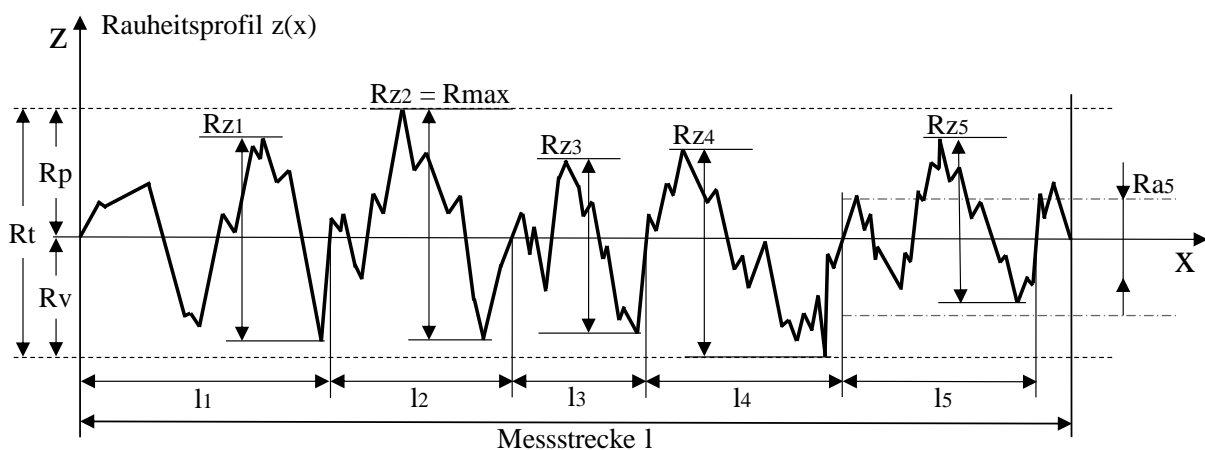
Addition der maximalen Profilspitzenhöhe  $R_{pn}$  ( $R_{p1}$  bis  $R_{pn}$ ) mit der maximalen Profiltaltiefe  $R_{vn}$  ( $R_{v1}$  bis  $R_{vn}$ ) berechnen (siehe Abbildung 5). Der Gesamtwert des Oberflächenrauheitsparameter  $R_z$  ergibt sich dann durch den Mittelwert aller gebildeten  $R_{zn}$ 's der Einzelmessstrecken  $l_n$ , wobei die Anzahl der Einzelmessstrecken normalerweise  $n = 5$  ist:

$$\text{Formel } R_z = \frac{1}{n} \cdot (R_{z1} + R_{z2} + \dots + R_{zn})$$

$R_t$  bezeichnet die Summe aus der maximalen Profilspitzenhöhe und der maximalen Profilspitzentiefe innerhalb der gesamten Messstrecke z.B.  $R_t = R_{p1} + R_{v4}$ , aus Abbildung 5 (35, 37).

Erhöhte Messwerte der maximalen Rauheit können in einer Abnahme der Festigkeit resultieren (13).

**Abbildung 5. Darstellung der maximalen Profiltaltiefe  $R_v$ , der maximalen Profilspitzenhöhe  $R_p$ , der gemittelten Rautiefe  $R_z$  und des arithmetischen Mittenrauwertes  $R_a$  [angelehnt an (35)]**



Der Parameter  $R_a$  beschreibt den arithmetischen Mittenrauwert nach DIN EN ISO 4287. Es wird der Durchschnitt der Absolutwerte von Tälern und Spitzen bezogen auf eine Einzelmessstrecke aufgezeichnet (siehe Abbildung 5) (35). Er bezieht sich auf den Mittelwert der Tiefen und Spitzenaufzeichnung, die von einer Mittellinie abweichen (37). Ein größerer Unterschied zwischen Tälern und Spitzen führt zu einer erhöhten Oberflächenrauheit. Je kleiner der bestimmte Wert für den Parameter  $R_a$  ist, desto glatter erscheint eine Oberfläche. Die Aufzeichnung der  $R_a$ - und  $R_z$ -Werte erfolgen in  $\mu\text{m}$  (38). Die Bestimmung des  $R_a$ -Wertes sagt wenig über das Ausmaß der Profilspitzen und Profiltäler aus (39).

Die Rauheit kann mit Hilfe von Kontaktmessgeräten oder kontaktlosen Messgeräten bestimmt werden (39). Kontaktmessgeräte besitzen eine diamantene Tasterspitze oder eine aus Saphir.

Sie besitzen häufig eine kegelform mit einer kugelförmigen Messspitze mit einem Durchmesser von ca. 10µm. Diese Messspitze wird mit wenig Druck auf die zu untersuchende Prüfkörperoberfläche aufgebracht, sie tastet dabei die Oberfläche ab und ihre Bewegung in vertikaler Richtung wird mittels elektrischer Signale aufgezeichnet. Es folgt eine Verstärkung, Digitalisierung und Verarbeitung dieser elektrischen Signale. Das taktile Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenrauheit ermöglicht eine Darstellung des vorliegenden Rauheitsprofils in 2D. Wird die Rauheit mit Hilfe eines optischen Verfahrens bestimmt, kann die Oberfläche des Werkstoffs in einem 3D Verfahren analysiert und anschließend daraus auch die 2D Parameter abgeleitet werden. Bei den kontaktlosen Messgeräten wird an Stelle einer Messspitze Licht auf die Materialoberfläche projiziert. Bei dem KEYENCE 3D Lasermikroskop der Linie VK-X wird die zu untersuchende Oberfläche mit Hilfe eines Lasers, der Licht auf die Materialoberfläche projiziert abgetastet (40). Vorteilig ist hier, dass durch die fehlende Tasterspitze keine Beschädigung der Werkstoffoberfläche stattfinden kann und auch feine Oberflächenrauheiten messbar sind (37). Die Bestimmung der Rauheit erfolgt bei Kontaktmessgeräten nach ISO 4287 und ISO 13565, bei kontaktlosen Messgeräten können die zweidimensionalen Kenngrößen nach ISO 25178 abgeleitet werden (39).

Grundsätzlich sagen ähnliche Werte bei der Rauheitsmessung nicht aus, dass die Oberflächen übereinstimmen müssen (41). Die vorliegende Oberflächenrauheit kann unter anderem von dem verwendeten Komposit beeinflusst werden und sich durch die Lagerung in Lösungsmitteln verändern (42). Eine gesteigerte Oberflächenrauheit kann eine erhöhte Plaqueakkumulation an der Kompositoberfläche bedingen (43). Die Art des Poliersystems, des Kompositmaterials und der Farbstofflösung nahmen in einer in vitro Versuchsreihe Einfluss auf die resultierende Rauheit (44).

## **2.6 Härte**

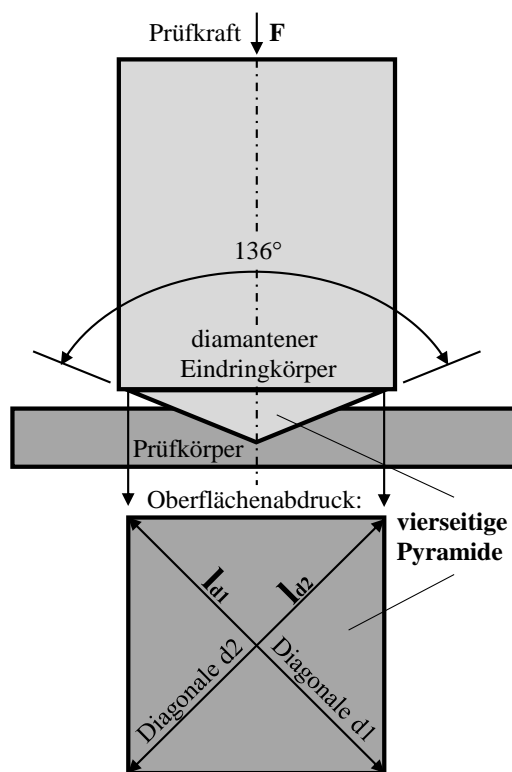
Die Oberflächeneigenschaft der Härte wird als derjenige Widerstand definiert, der von einem Körper, während dem Eindringprozess eines anderen Festkörpers aufgebracht wird. Ein Material muss nicht zwangsläufig überall die gleiche Härte aufweisen. Der Materialkörper kann eine niedrigere Härte aufweisen als die durch den Fertigungsablauf bearbeitete Oberfläche. Das Abrasionsverhalten einer Materialoberfläche wird maßgeblich durch die Härte beeinflusst, dabei wird ein weiches Material von einem härteren Material abgetragen (13). Eine direkte Messung der Härte mit einheitlichem Wert ist nicht möglich. Das Messergebnis wird mit Hilfe verschiedener Parameter bestimmt und hängt davon ab, welche Messmethode für die

Härtemessung gewählt wurde, welches Material und welche Formgebung der zur Messung verwendete Eindringkörper aufweisen und mit welcher Kraft und wie lange der Eindringkörper auf die zu testende Materialoberfläche aufgebracht wird. Die Härteprüfung lässt sich anhand der Art der ausgeübten Krafteinwirkung in eine dynamische, stoßartige und eine statische, langsame unterteilen (45). Es wird vorwiegend die statische Krafteinwirkung für die Härteprüfung von Festkörpern verwendet (46). Bei der statischen Krafteinwirkung wird nochmal unterschieden, ob die Härtemessung unter bestehender Prüfkraft oder erst nach dem Wegfall der Prüfkraft erfolgt (47).

### **2.6.1 Optische Vermessung**

Hier erfolgt die Vermessung des von dem Eindringkörper auf der zu testenden Materialoberfläche hinterlassenen Abdrucks. Härtemessverfahren, die auf dem Prinzip der optischen Vermessung beruhen, sind die Vickers Härte, die Brinellhärte und die Härteprüfung nach Knoop. Sie finden unter statischer Krafteinwirkung statt (46).

## 2.6.2 Vickershärte (HV) ISO 6507



**Abbildung 6. Messung der Vickershärte [angelehnt an (48)]**

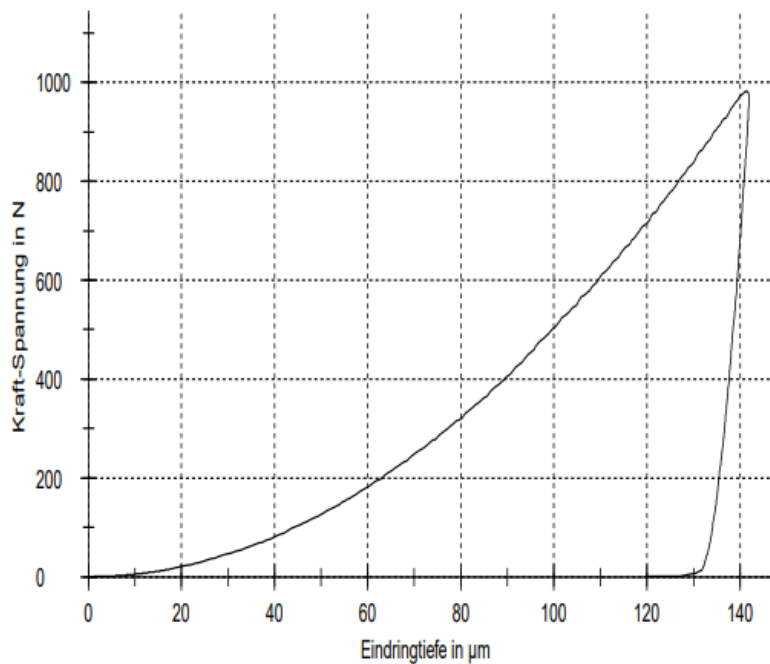
Eine diamantene Pyramide dient bei diesem Verfahren als Eindringkörper, diese wird mit einer festgelegten Prüfkraft und unter definierter Einwirkzeit auf die zu testende Materialoberfläche aufgebracht. Der Eindringkörper weist eine quadratische Grundfläche und einen Flächenwinkel von  $136^\circ$  auf. Er hinterlässt einen Abdruck auf der Prüfkörperfläche, der optisch anhand der zwei abgebildeten Diagonalen vermessen werden kann (siehe Abbildung 6). Um die Größe des optischen Abdrucks zu ermitteln, wird der Mittelwert der zwei Diagonalen in mm verwendet. Die Vickershärte lässt sich dann aus dem Quotienten der einwirkenden Prüfkraft  $F$  in Newton und der Größe des hinterlassenen optischen Abdrucks berechnen. Auf einer härteren Materialoberfläche fällt bei gleicher Prüfkraft der hinterlassene optische Abdruck kleiner aus als bei einer weicheren Materialoberfläche. Die Vickershärte kann als Härtemessverfahren für jegliche Prüfkörperoberflächen genutzt werden und eignet sich besonders gut für Metalle (13, 48).

## 2.6.3 Martenshärte (HM) ISO 14577

Die Martenshärte wird ebenfalls der statischen Härtemessung zugeordnet, ihre Aufzeichnung erfolgt aber im Vergleich zur Vickershärte unter bestehender Prüfkraft. Für die Bestimmung der Martenshärte wird die auf die Prüfkörperoberfläche einwirkende Prüfkraft  $F$  und die resultierende Eindringtiefe  $h$  in Form einer Kurve aufgezeichnet. Als Eindringkörper können eine Hartmetallkugel, ein kugelförmiger diamantener Eindringkörper, ein Vickers Eindringkörper oder ein Berkovich Eindringkörper verwendet werden (47). Die auf die Prüfkörperoberfläche einwirkende Prüfkraft wird von 0 Newton ausgehend bis hin zu einer Maximalkraft gesteigert und anschließend wieder abgebaut. Dies wird während dem gesamten Prüfungszeitraum kontinuierlich mit Hilfe eines Tiefen- und Kraftmesssystems aufgezeichnet

(siehe Abbildung 7) (49, 50). Die Martenshärte ist der Quotient von maximaler Prüfkraft und der Kontaktfläche des Eindringkörpers bei Eindringtiefe  $h$  und wird in der Einheit Newton pro Quadratmillimeter  $\frac{N}{mm^2}$  angegeben (51). Früher wurde die Martenshärte auch als Universalhärte bezeichnet (52). Die Martenshärteprüfung ermöglicht eine gewissermaßen zerstörungsfreie Eindringprüfung, sie ist für die Prüfung an kleinen Materialoberflächen geeignet (46).

**Abbildung 7. Darstellung der Kraft-Eindringtiefen-Kurve zur Bestimmung der Martens-härte mit der einwirkenden Standardkraft in Newton und der Eindringtiefe in  $\mu\text{m}$  (52)**



Aus der Aufzeichnung der Universalhärte unter Verwendung einer vickerschen Pyramide als Eindringkörper, lässt sich ebenfalls die Vickershärte berechnen (53). Die in einer Studie getesteten Bulk-Fill-Komposite wiesen niedrigere Härtewerte und einen höheren Verschleiß im Gegenzug zu dem getesteten Nano-Hybridkomposit auf (54). Der maximaler Härtewert wird nicht generell an der Kompositoberfläche verzeichnet, sondern kann im Bereich unter der Prüfkörperoberfläche gemessen werden. Mit gesteigerter Polymerisationszeit kann eine maximale Härte auch in tieferen Inkrementschichten erzielt werden (7). Mittels der Härteermittlung lässt sich ebenfalls indirekt der Grad der Polymerisation des Füllungsmaterials abschätzen (55). Die Härte an der Füllungsunterseite kann deutlich geringer ausfallen im Vergleich zur Härte an der Oberfläche (56, 57), was auf eine ungenügende Lichtdurchdringung schließen lässt.

## **2.7 Verfärbungsneigung und Farbe**

### **2.7.1 Verfärbung**

Insgesamt werden im zahnmedizinischen Bereich zwei Arten von Verfärbungen unterschieden, je nachdem, ob ihnen eine extrinsische oder intrinsische Ursache zu Grunde liegt. Unter einer extrinsischen Verfärbung versteht man die bedingt durch äußere Faktoren wie beispielsweise Kaffee-, Tee-, Zigaretten- und Rotweinkonsum hervorgerufenen Ablagerungen auf der Zahnoberfläche. Durch Zahnstein- und Plaqueauflagerung können diese verstärkt werden. Verfärbungen, die direkt von der Zahnhartsubstanz ausgehen und einen präeruptiven oder posteruptiven Ursprung haben, werden hingegen als intrinsische Verfärbungen bezeichnet. Verfärbungen der Zahnhartsubstanz kommen im Praxisalltag häufig vor und stellen sowohl ästhetisch als auch klinisch eine Problematik dar (58). Tetrazykline und Fluoride können als mögliche präeruptive Ursachen aufgeführt werden. Traumata, Verfärbungen durch Amalgam oder frühere endodontische Materialien können unter anderem mögliche Ursachen für posteruptive Verfärbungen sein (59). Rotwein- und Zigarettenkonsum als extrinsische Faktoren resultieren in einer sehr starken Verfärbungsneigung (60). Die Oberflächenpolitur und das verwendete Poliersystem nehmen Einfluss auf die Verfärbungsneigung von Kompositen (61). Oberflächenrauigkeiten sind der vorwiegende Auslöser für exogene Verfärbungen von Kompositen (10). Eine längere Verweilzeit in einem färbenden Medium führt zu einer gesteigerten Verfärbung von Kompositen, eine verlängerte Polymerisation eines Füllungsmaterials führt jedoch nicht in jedem Fall zu einer geringeren Verfärbungsneigung (62). Eine erneute Politur der Kompositoberfläche wirkt sich positiv auf die Oberflächeneigenschaften und die Verfärbungsneigung aus (63).

### **2.7.2 Farbe**

Die Farbwahrnehmung ist an das Vorhandensein von Licht gebunden. Trifft Licht auf ein Objekt kann es abhängig von den physikalischen Gegebenheiten des Objektes zu einer Reflexion, Absorption, Streuung oder Transmission der elektromagnetischen Wellen kommen. Betrachtet man ein Objekt, entsteht der gewonnene Farbeindruck durch den Bereich aus dem sichtbaren Lichtspektrum, der von dem Objekt reflektiert wird. Generell handelt es sich bei der Farbwahrnehmung um eine optische Wahrnehmung. Die Farbe lässt sich weiterhin anhand ihrer Helligkeit, Sättigung und ihrem Farbton näher charakterisieren. Von diesen drei Eigenschaften sind Unterschiede in der Helligkeit von dem menschlichen Auge am deutlichsten zu erkennen. Unter diesem Begriff versteht man den Grad der Helligkeit eines Objektes. Die Helligkeit wird

in einem Rahmen zwischen 0%, was schwarz entspricht, und 100%, was weiß entspricht, angegeben. Der Zwischenbereich bezieht sich auf unterschiedliche Grautöne. Diese Farbstufen unterscheiden sich nur durch ihre Helligkeit voneinander. Der Farbton gibt die eigentliche Farbe des Objektes an. Die Farben blau, rot und gelb gelten als Grundfarben. Dabei hängt der Farbton einer Farbe davon ab, wie sehr sich diese Farbe von den drei Grundfarben unterscheidet beziehungsweise, wie stark sie ihnen gleicht. Unter der Sättigung versteht man die Farbintensität. Je nachdem wie viel weißes Licht die Farbe enthält, erscheint sie mehr oder weniger gesättigt. Enthält eine Farbe viel weißes Licht, ist ihre Farbintensität geringer und sie erscheint weniger gesättigt. Je reiner eine Farbe ist, desto stärker ist ihre Sättigung (13). Für eine optimale Farbanpassung des Komposits an die Zahnfarbe ist eine ausreichende Polymerisationszeit erforderlich, denn veränderte Polymerisationszeiten führen zu einem messbaren Farbunterschied von Kompositproben (64).

### 2.7.3 L\* a\* b\*-Farbraum

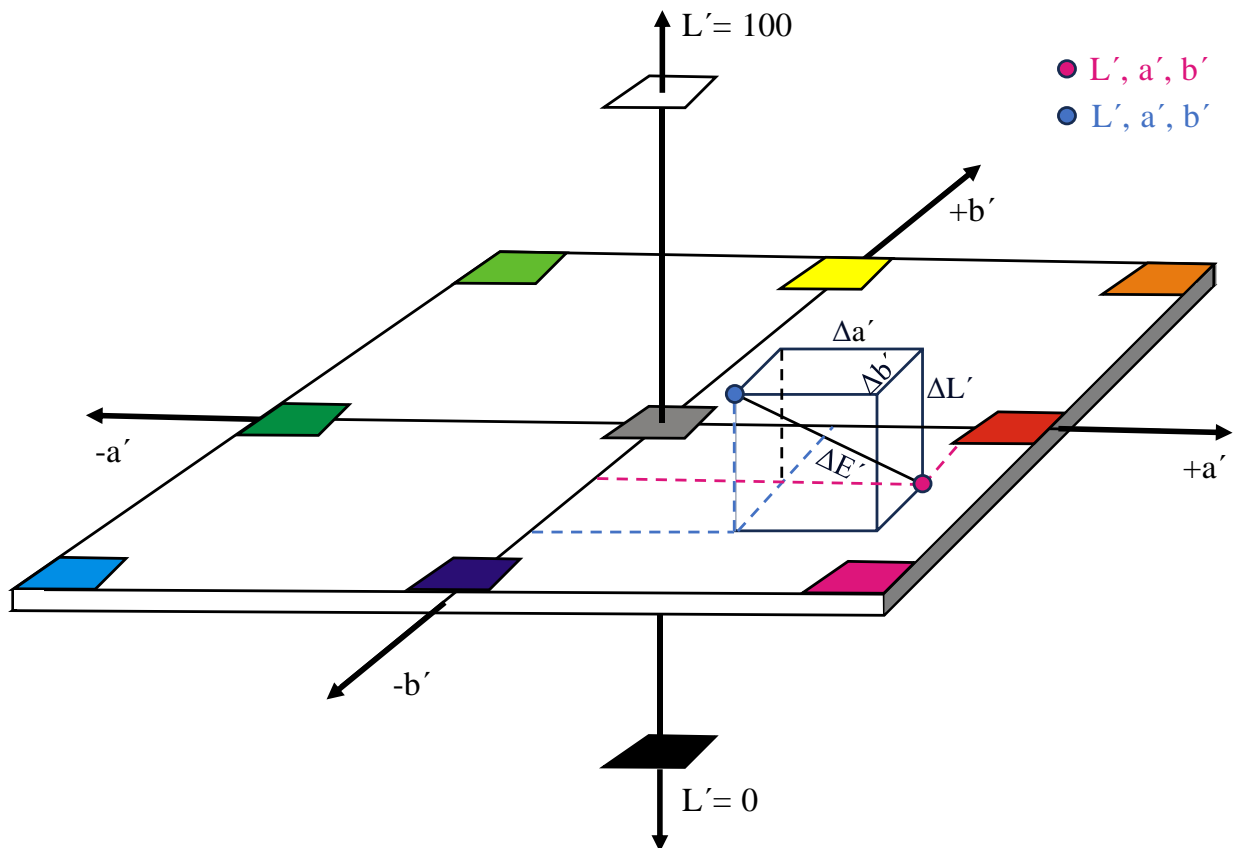
Ein seit 1976 international gängiges Modell zur weiteren Charakterisierung von Farben und zur genormten Farbmessung ist der L\* a\* b\*-Farbraum der Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) (siehe Abbildung 8). Dieser dreidimensionale Farbraum bezieht sich auf alle wahrnehmbaren Farben und das Messergebnis kann unabhängig von dem verwendeten Messgerät angegeben werden (65). Der Farbraum wird zum einen durch die Komponente L\*, die der Helligkeit entspricht und einen Wert zwischen 0 (schwarz) und 100 (weiß) aufweist, definiert. Zum anderen wird der Farbraum durch a\*, dem Grün- und Rotanteil einer Farbe sowie b\*, dem Blau- und Gelbanteil einer Farbe, weiter definiert. Der Grünanteil auf der a-Achse wird dabei durch negative Werte beschrieben und der Rotanteil durch positive Werte. Der Blauanteil auf der b-Achse wird durch die negativen Werte beschrieben und der Gelbanteil durch die positiven (66). Es ist nicht möglich, dass eine Farbe gleichzeitig einen Rot- und Grün- oder Blau- und Gelbton aufweist. Über die a-Achse und die b-Achse lassen sich die Sättigung (C\*) und der Farbtonwinkel (h) berechnen. Zusätzlich kann durch den L\*a\*b\*-Farbraum die numerische Differenz zweier Farben ( $\Delta E$ ) eines Materials berechnet werden (13). Die Farbdifferenz  $\Delta E$  beschreibt die Abweichung zwischen zwei Farben im L\*a\*b\*-Farbraum und lässt sich mit der nachstehenden Formel

$$\Delta E = \sqrt{(L1^* - L2^*)^2 + (a1^* - a2^*)^2 + (b1^* - b2^*)^2}$$

berechnen (65). Die Farbdifferenz  $\Delta E$  kann mit einem Spektralphotometer bestimmt werden. Für das menschliche Auge ist ein Farbunterschied von 1 unter Idealbedingungen gerade noch

ersichtlich, eine Farbdifferenz von 5 zwischen natürlichem Zahn und Restauration wird optisch als zu auffällig wahrgenommen. King und deRjik teilten die Farbdifferenz  $\Delta E$  in vier Bereiche ein, wobei ein Bereich für  $\Delta E$  von 0 bis 2 als nicht wahrnehmbar definiert wurde, ein Bereich für  $\Delta E$  von 2 bis 3 als geringfügig wahrnehmbar, ein Bereich für  $\Delta E$  von 3-8 als teilweise wahrnehmbar und ein Bereich von  $\Delta E$  von über 8 als wahrnehmbar (67).

**Abbildung 8. Darstellung des  $L^*a^*b^*$ -Farbraums (CIE) mit  $\Delta E$  [angelehnt an (68)]**





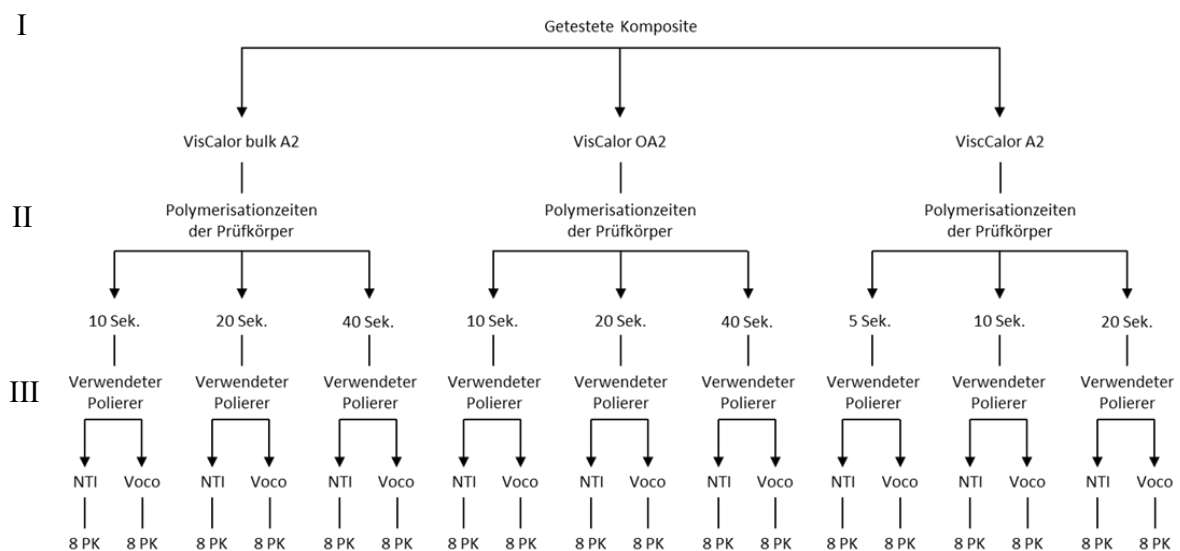
### 3 Material und Methoden

Im Folgenden werden die verwendeten Materialien und festgelegten Arbeitsabläufe dieser Studie näher beschrieben und erläutert. Es wird nacheinander auf die verwendeten Materialien, die Herstellung der Prüfkörper, den Polymerisationsablauf, den Politurvorgang und die verwendeten Messverfahren eingegangen.

#### 3.1 Material

Für die Versuche wurden drei unterschiedliche röntgenopake und lichthärtende Nano-Hybridkomposite der Firma VOCO verwendet (siehe Abbildung 9 Ebene I). Dabei handelte es sich um die Produkte VOCO VisCalorbulkA2; VOCO GmbH; Deutschland und VOCO VisCalor in den zwei Farbvarianten A2 und OA2; VOCO GmbH; Deutschland (69). Diese weisen einen Anteil von 83Gew.-% an anorganischen Füllstoffen auf. Um die Verarbeitung zu erleichtern und eine optimale Qualität der Restaurationen zu erreichen, ist für diese Materialien die Applikation im erhitzten Zustand vorgesehen. In diesem Versuch wurden die Materialien gemäß der Herstellerangabe mit Hilfe des VOCO Caps Warmer; VOCO GmbH; Deutschland auf 68°C erwärmt (70), durch die Materialerwärmung wird die Viskosität des Komposits verringert, was zu einer vereinfachten Applikation in die Prüfkörperform und einer gleichmäßigen Anlagerung des Materials an die Kavitätenwände führte (4).

**Abbildung 9. Versuchsablauf – Herstellung Prüfkörper**



PK : Prüfkörper

### **VisCalorbulkA2 (REF 6067)**

Das Material hat nach Herstellerangaben unter Verwendung einer Halogen- oder LED-Lampe mit einer Leistung von  $\geq 1000 \text{ mW/cm}^2$  und einer Inkrementschichtung zwischen 2 und 4mm eine empfohlene Polymerisationszeit von 20s. Es kann bei der Versorgung einer Black Klasse I, II und V Verwendung finden, dabei können in einem Polymerisationsvorgang Inkrementschichten von bis zu 4mm gleichzeitig appliziert und lichtgehärtet werden. Insgesamt gibt es VisCalor bulk in den vier Farbvarianten Universal, A1, A2 und A3 (16). Die Bestandteile des Werkstoffs belaufen sich auf aromatische und aliphatische Dimethacrylate, Campherchinon, Amin, Siliziumdioxid (50nm), Glaskeramik (Ba-Al-Silikat) mit einem Durchmesser von  $0,7 \mu\text{m}$  beziehungsweise  $2,0 \mu\text{m}$  und Pigmente in Form von Titandioxid, Eisenoxid und Graphit (18).

### **VisCalorOA2 (REF 6122) und A2 (REF 6114)**

Die empfohlene Polymerisationszeit liegt für das Material VisCalorOA2 bei gleichen Halogen- oder LED-Lampen Voraussetzungen ebenfalls bei 20s, für das VisCalorA2 hingegen bei 10s. Beide Materialien bieten sich für die Verwendung bei den Blackklassen I-V an und können mit Inkrementschichten von bis zu 2mm appliziert und lichtgehärtet werden (17). Die Bestandteile der Werkstoffe belaufen sich ebenfalls wie für das VisCalorbulkA2 auf aromatische und aliphatische Dimethacrylate, Campherchinon, Amin, Siliziumdioxid (50nm), Glaskeramik (Ba-Al-Silikat) mit einem Durchmesser von  $0,7 \mu\text{m}$  beziehungsweise  $2,0 \mu\text{m}$  und Pigmente in Form von Titandioxid, Eisenoxid und Graphit (18).

Nach Herstellerangaben gibt es bei allen drei verwendeten Materialien lediglich einen Unterschied in der beigefügten Pigmentmenge, wobei dieser Unterschied so geringfügig ausfällt, dass dieser die Materialeigenschaften nicht beeinflusst und somit nur ein Unterschied in Farbe und Durchhärtung besteht (18).

## **3.2 Vorversuche – Eignung des Versuchsaufbaus**

Da bereits in Dissertationen unterschiedliche Komposite in Bezug auf die Polymerisationszeit, verschiedene Poliersysteme, Glanz, Rauheit, Härte und Verfärbung untersucht, aber nicht miteinander kombiniert betrachtet wurden, ergab sich das Grundgerüst dieser Dissertation. Mit VOCO VisCalor wurde auf ein Material zurückgegriffen, das gerade erst auf dem Markt eingeführt wurde. Mit seiner vom Hersteller als „Thermo-viscous-technology“ beschriebenen Eigenschaft, stellt es einen neuen Ansatz in der Füllungstherapie dar und wurde deshalb als zu

untersuchendes Komposit gewählt. Es wurden VisCalorbulkA2 und VisCalorA2 und OA2 als Versuchsmaterial verwendet, um einen Vergleich zwischen einem Bulk-Material und zwei herkömmlichen Kompositen und verschiedenen Kompositfarben zu untersuchen. Dadurch, dass alle verwendeten Komposite dem gleichen Hersteller und der gleichen Produktlinie entstammen, sowie eine annähernd gleiche Zusammensetzung aufweisen und alle der „Thermoviscous-technology“ zu Grunde liegen, konnten diese Materialien bestmöglich untereinander verglichen werden. Die Polymerisationszeiten wurden im Vorfeld der Versuche auf die Hälfte, der empfohlenen und der doppelten vom Hersteller empfohlenen Polymerisationszeit festgelegt, um gleiche Grundvoraussetzungen in den Versuchen zu schaffen und dabei die Auswirkung bei Abweichung von der empfohlenen Polymerisationszeit zu betrachten. Bei der Auswahl der Prüfkörperform wurden im Vorfeld verschiedene Formen getestet. Der Prüfkörper musste eine für alle Messversuche ausreichende Größe von 10mm aufweisen. Eine weitere Voraussetzung an die Prüfkörperform war, dass der Prüfkörper sich für die anschließenden, weiteren Messungen problemlos aus der Prüfkörperform lösen lassen konnte. Bedingt durch die empfohlene Inkrementstärke von herkömmlichen Kompositen von maximal 2mm, sollte die Prüfkörperform eine Tiefe von 2mm aufweisen. Dabei wurde die Applikation der Komposite in rundliche Formen aus Metall und hartem Kunststoff ausgetestet. Diese Formen erwiesen sich aber als nicht praktikabel, da ein Herauslösen des polymerisierten Prüfkörpers nicht möglich war. Daher wurde eine Silikonprüfkörperform als Negativ mit einem Durchmesser von 10mm und einer Tiefe von 2mm erstellt. In dieses Silikonförmchen ließ sich das Komposit applizieren und der fertige Prüfkörper nach der Polymerisation problemlos für die weiteren Versuche entnehmen. Bei der Kompositadaption in die Prüfkörperform war ein Verdichten mit Handinstrumenten, wie dies in Kavitäten normalerweise erfolgt, nicht möglich, da das Material sich von der Silikonform löste und am Instrument haften blieb. Um dies zu vermeiden und eine ebene Oberfläche für jeden Prüfkörper zu erzielen, wurde das Komposit in die Prüfkörperform appliziert und mit einer zuerst nicht angewärmten Glasplatte plan gedrückt. Dabei kühlte das vorher erwärmte Komposit an der Oberfläche durch den Kontakt mit der kälteren Glasplatte schneller aus und es entstanden zum Teil unebene Prüfkörper mit Blaseneinschluss. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wurde die Glasplatte zusammen mit den Kompositen erwärmt, wodurch plane Prüfkörper mit einem maximal reduzierten Luftblaseneinschluss entstanden.

Für die Politur wurde auf zwei einstufige Polierer zurückgegriffen. Der Dimanto Polierer weist dabei den gleichen Hersteller (VOCO) wie die VisCalor Materialien auf. Um eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Poliergruppen zu erreichen, wurde ein weiterer einstufiger

Polierer verwendet, der NTI Unique Polierer. Für den Politurprozess wurde auf eine bereits bestehende Politureinheit zurückgegriffen, mit einer Einspannhilfe für ein Winkelstück und einem Teller, der gegen das eingespannte Winkelstück bewegt werden konnte. Es wurde eine Drehzahl von 6000U/min verwendet. Auf den Teller der Politureinheit wurde eine Gummiform mit einer exakt für den Prüfkörper ausgeschnittenen Hohlform geklebt und waagrecht ausgerichtet. Der Halter für das Winkelstück wurde mit einem Gegengewicht beschwert, sodass ein Anpressgewicht von 150g erzielt werden konnte. Die Proben wurden wie unter 3.4 beschrieben poliert.

Es erfolgten im Anschluss die Glanzmessung, die Rauheitsmessung, die Härtemessung und die Farbmessung. Nach diesem Prinzip wurden Prüfkörper in den Vorversuchen hergestellt, poliert und nach der entsprechenden Reihenfolge in verschiedenen Messverfahren getestet. Damit konnte festgestellt werden, ob sich der Versuchsaufbau für die spätere Versuchsreihe eignet und damit ein reibungsloser Ablauf in den Hauptversuchen, die im nachfolgenden Abschnitt in chronologischer Reihenfolge näher beschrieben werden, gewährleistet werden. Nachdem sich der Versuchsaufbau für die Hauptversuchsreihe als geeignet erwies, konnte auf diese übergegangen werden.

### **3.3 Herstellung der Prüfkörper**

#### **3.3.1 Prüfkörpergruppen**

Je Material wurden 48 Prüfkörper hergestellt, dabei wurde die Polymerisationsdauer wie folgt variiert:

- a) Hälfte der vom Hersteller empfohlenen Polymerisationsdauer  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,
- b) vom Hersteller empfohlene Polymerisationsdauer  $t_{1Poly}$  und
- c) doppelte vom Hersteller empfohlene Polymerisationsdauer  $t_{2Poly}$ .

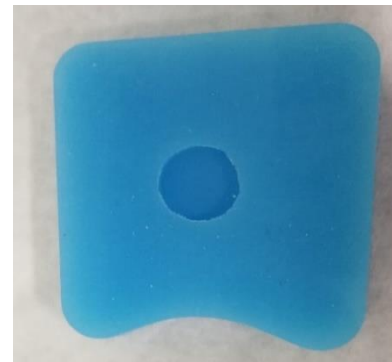
Damit ergaben sich für die Materialien VisCalorOA2 und VisCalorbulkA2 Polymerisationszeiten von 10, 20 und 40s und für das Material VisCalorA2 die Polymerisationszeiten von 5, 10 und 20s (siehe Abbildung 9 Ebene II). Je Material und Polymerisationsdauer wurden somit 16 Prüfkörper hergestellt. An die Herstellung schloss sich die Politur der Prüfkörper an, welche mit zwei verschiedenen Poliersystemen erfolgte. Dementsprechend wurden diese 16 Prüfkörper noch einmal weiter in zwei Versuchsreihen, abhängig von dem jeweils verwendeten Polierer (Kapitel 3.4) unterteilt. Pro Versuchsreihe, die

sich durch das verwendete Material, dieselbe Polymerisationszeit und den gleichen Polierer klassifizierte, wurden somit immer 8 Prüfkörper direkt hintereinander hergestellt (siehe Abbildung 9 Ebene III), polymerisiert, poliert und mit Hilfe verschiedener Messverfahren, die in Kapitel 3.5 weiter erläutert werden analysiert. Im Anschluss an die Herstellung und weitere Analyse aller 3 x 48 Prüfkörper wurde noch ein weiterer Prüfkörper je Material, Polymerisationszeit und verwendetem Polierer für die Betrachtung unter dem Rasterelektronenmikroskop hergestellt.

### 3.3.2 Formgebung

Die Formgebung der Prüfkörper erfolgte mit Hilfe einer Silikonform, in deren Mitte sich eine runde Aussparung mit einem Durchmesser von 10 und einer Tiefe von 2mm befand (siehe Abbildung 10). Vor ihrer Applikation in die Hohlform wurden die Kompositkapseln für 3 Minuten gemeinsam mit dem VOCO Dispenser; VOCO GmbH; Deutschland in dem auf 68°C temperierten VOCO Caps Warmer erwärmt und danach aus Einzelkapseln mit Hilfe des VOCO Caps Dispenser innerhalb von 30s in die Prüfkörperform appliziert (70). Hierbei wurde auf einen möglichst blasenfreien Applikationsablauf geachtet. Im direkten Anschluss wurde die Kompositoberfläche mit einem 1mm dicken gläsernen Objektträger, welcher ebenfalls vorab temperiert wurde, geglättet (siehe Abbildung 11), sodass leicht überschüssiges

**Abbildung 10.**  
**Silikonform für die**  
**Prüfkörperherstellung**



**Abbildung 11. VOCO Caps Warmer mit**  
**Kompositkapseln, VOCO-Dispenser und**  
**gläsernem Objektträger**



Material zu den Rändern entweichen konnte und eine hinsichtlich Oberflächenbeschaffenheit und Höhe vergleichbare Prüfkörperoberfläche erreicht wurde.

### 3.3.3 Polymerisation

Mit der Satelec Mini L.E.D Lampe; Sirona Dental Systems GmbH (Dentsply Sirona); Deutschland (USA) an der Sirona teneo Einheit; Sirona Dental Systems GmbH (Dentsply Sirona); Deutschland (USA) (71) erfolgte die Polymerisation unter Verwendung eines Blendschutzes. Der Lichtleiter der LED- Lampe wurde direkt auf den gläsernen Objektträger mittig über der Probe aufgesetzt und der Prüfkörper entsprechend den unterschiedlichen Zeitvorgaben ausgehärtet (siehe Abbildung 12). Die Leistung der LED-Lampe lag hierbei nach Herstellerangaben mit dem Standard-Lichtleiter und einem Durchmesser von 7,5mm bei ungefähr  $1100\text{mW}/\text{cm}^2$  (72). Nach der Polymerisation wurden die einzelnen Prüfkörper vor der Politur und zwischen den unterschiedlichen Messungen in einer lichtundurchlässigen Box aufbewahrt, um eine nachträgliche Polymerisation durch Umgebungslicht zu verhindern.

**Abbildung 12. Polymerisationsvorgang mit dem aufgedrückten, erwärmten Objektträger**

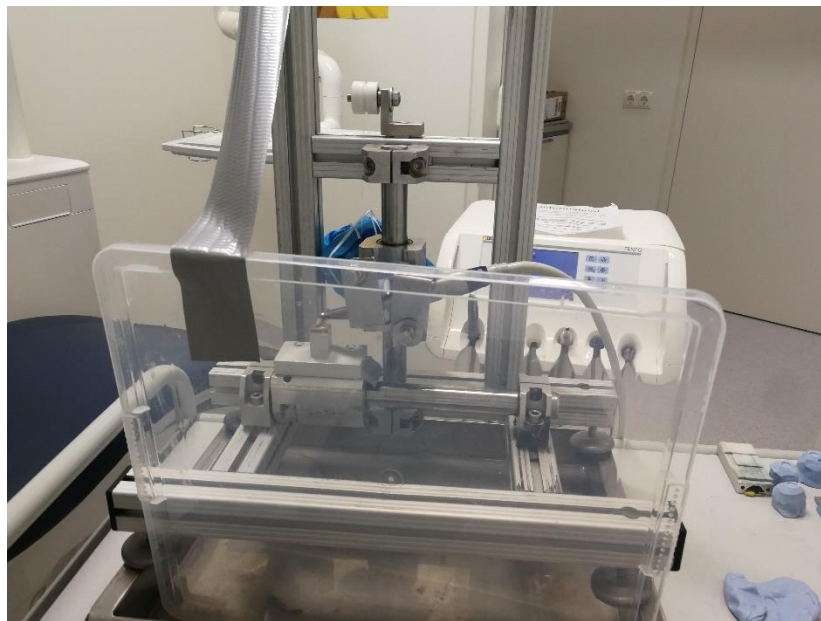


### 3.4 Politur

Im Anschluss wurden die Prüfkörper mit Hilfe einer speziellen, selbstgebauten Politurvorrichtung aus der Forschungsabteilung der zahnärztlichen Prothetik des Universitätsklinikums Regensburg, poliert (siehe Abbildung 13). Diese Vorrichtung bestand aus einem metallenen Halter für das Winkelstück, der mit einem 850g schweren Gegengewicht austariert wurde, sodass für den in das Winkelstück eingespannten Polierer ein konstantes Anpressgewicht von 150g gewährleistet wurde. Verwendung fand das grüne Winkelstück Sirona T1 Line C 6 L; Ref. 33 28 429; Sirona Dental Systems GmbH; Deutschland mit der Übersetzung von 6:1 und einer Drehzahl bis ca. 6000U/min, das über die Sirona teneo Einheit betrieben wurde. Es wurde für die Versuche eine Drehzahl von ca. 6000U/min festgelegt, dafür

wurde der Antrieb der Behandlungseinheit auf 38000U/min eingestellt (73). Das grüne Winkelstück wurde in die Halterung der Politurvorrichtung eingespannt und fixiert, sodass sich seine Position nicht mehr verändern konnte und der Polierer in der gleichen Ausrichtung, flächig über die Prüfkörperoberfläche bewegt werden konnte. Der Prüfkörper wurde auf einem nach rechts und links beweglichen Metalltischchen, adaptiert, wobei das Tischchen gegen den Polierer bewegt werden konnte.

**Abbildung 13. Die verwendete Politurvorrichtung**



### 3.4.1 VOCO Dimanto Polierer

Die eine Hälfte der 16 Prüfkörper, die unter den gleichen Rahmenbedingungen hergestellt wurden, wurde mit dem VOCO Dimanto Polierer; VOCO GmbH; Deutschland einem einstufigen Poliersystem, welches für die Vor- und Hochglanzpolitur von finierten Kompositversorgungen ausgelegt ist, unter Wasserkühlung bei 6000U/min poliert (siehe

**Abbildung 14. VOCO- und NTI-Polierer**



Abbildung 14) (27). Der empfohlene Drehzahlbereich wird zwischen 3000-8000U/min angegeben. Der diamantdurchsetzte Silikonpolierer eignet sich nach Herstellerangaben bei variabler Anpresskraft sowohl für die Vorpolitur und die Hochglanzpolitur (26). Insgesamt ist der VOCO Dimanto Polierer in fünf unterschiedlichen Formen erhältlich, wobei in dem Versuchsaufbau ausschließlich die große Spitze mit der Referenznummer 2382 verwendet wurde (27).

### 3.4.2 NTI Unique Polierer

Die restlichen 8 Prüfkörper dieser Gruppe wurden mit dem NTI Unique Polierer; NTI-Kahla GmbH; Deutschland Artikel-Nr. P20032B, einem ebenfalls einstufigen diamantierten Polierer unter Wasserkühlung bei gleicher Drehzahl und Politurverfahren poliert (siehe Abbildung 14) (28). Der diamantierte Gummipolierer weist eine mittlere Körnung auf und eignet sich laut Herstellerangabe ebenso wie der VOCO Dimanto Polierer als Einstufenpolierer für die Vor- und die Hochglanzpolitur. Der Polierer ist in der Größe 050 erhältlich und besitzt einen Schaftdurchmesser von 2,35mm, der vom Hersteller empfohlene Drehzahlbereich liegt zwischen 5000-7000U/min (28).

Insgesamt ergaben sich somit immer zwei unterschiedliche Poliergruppen mit je 8 Prüfkörpern, von denen die eine Gruppe mit dem Dimanto- und die andere Gruppe mit dem NTI-Polierer poliert wurden (siehe Abbildung 9 Ebene III). Vorab fand keinerlei Oberflächenbearbeitung mit einem Feinkorndiamanten oder Ähnliches statt. Pro Versuchsdurchlauf wurden immer 8 Prüfkörper zusammen hergestellt, poliert und unterschiedliche Messverfahren durchgeführt. Für den Politurvorgang wurde der Prüfkörper auf das Tischchen der Politurvorrichtung gelegt und das Tischchen nun in fünf Bewegungszyklen von rechts nach links und zurück gegen den in das Winkelstück eingespannten Polierer bewegt. Nach Ende dieser Zyklen wurde der Prüfkörper um circa 60° gedreht und dieselbe Anzahl an Politurzyklen durchgeführt, dann wurde der Prüfkörper nochmal um circa 60° gedreht und derselbe Politurvorgang wiederholt. Somit zeigte der fertig polierte Prüfkörper eine Art sternförmige Politurbahn und es wurde ein reproduzierbarer Politurvorgang in dem Versuchsaufbau gewährleistet.

### 3.5 Messverfahren

Direkt im Anschluss an die Polymerisation und Politur der Prüfkörper wurden verschiedene Messungen in der folgenden Reihenfolge durchgeführt:

1. Glanzmessung (ISO 2813:2014) Zehntner ZGM 1120; Proceq SA; Schweiz (74); Programm Gloss Tools 1.0.0049; Proceq SA; Schweiz (34), Winkel 60°.
2. Rauheit (ISO 25178) : Keyence VK-X 100 Series Laser Mikroskop; KEYENCE; Japan (75). 5:1 Objektiv, 120-fache Vergrößerung, Messfeld: Die Rauheit (Rz, Ra) aller Proben wurde bestimmt (Klasse 2 Laser 658nm, 50-fache Vergrößerung; Messbereich 2500 × 1900µm, Cutoff  $\lambda_s$  0,8µm und  $\lambda_c$  0,08µm, Auflösung  $h = 0,005\mu\text{m}$ ,  $w = 0,01\mu\text{m}$ , 50 × 12nm, Wiederholbarkeit  $\sigma_h$ : 0,02µm,  $w$ : 0,05µm).



3. Martenshärte und Vickershärte nach ISO 14577-1 bzw. ISO 6507 bestimmt: Zwickline Z 2.5; ZwickRoell GmbH & Co. KG; Deutschland und dem Programm testXpert ZHV; ZwickRoell GmbH & Co. KG; Deutschland) (76) , Objektiv 10:1. Die Eindringtiefe wurde bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5mm/min bis zu einer maximalen Kraft von  $F_{max} = 30N$  mit einem Vickers-Eindringkörper und einer Verweilzeit von 10s konstant überwacht. Die Entlastung erfolgte mit 0,1mm/min. Die aufgezeichneten Kraft-Eindringtiefen-Kurven wurden zur Berechnung der Härte verwendet. Die Poissonzahl des Diamanteindringkörpers wurde auf  $\nu_i = 0,07$  und für die Verbundwerkstoffe auf Harzbasis auf  $\nu_s = 0,3$  festgelegt. Der Elastizitätsmodul des Eindringkörpers betrug  $E_i = 1140GPa$ .

4. Farbmessung (CIE L\*a\*b\*-Farbraum DIN EN ISO 11664-4:2008): Minolta Spectrophotometer CM-3500d; Konica Minolta; Japan und dem Programm Minolta Spectrophotometer; Konica Minolta; Japan (77), Normlichtart D65, Blende 3mm. Aus den bestimmten Farbewerten L, a und b wurde die Farbänderung  $\Delta E$  berechnet.

Die Farbmessung erfolgte direkt im Anschluss an die Härtemessung, danach wurden die Prüfkörper für zwei Wochen in Rotwein gelagert. Jeder Prüfkörper kam dabei einzeln in einer Mikrotiterplatte zu liegen und wurde mit 2ml Rotwein bedeckt und in diesem Zustand 2 Wochen in der lichtundurchlässigen Box gelagert. Im direkten Anschluss wurde die Farbmessung der Prüfkörper nach dem gleichen Verfahren wiederholt.

Für jede Versuchsreihe wurde ein weiterer Prüfkörper pro Material, Polymerisationszeit und Polierer nach dem vorher beschriebenen Verfahren hergestellt, poliert und rasterelektronenmikroskopisch mit dem Phenom TM World SEM Rasterelektronenmikroskop; Thermo Fisher Scientific – Phenom Desktop SEM; Niederlande (Auflösung 1024, Qualität hoch, WD 10 $\mu m$ ). untersucht (78).

### **3.5.1 Glanzmessung**

Für die Glanzmessung mit dem Zehntner ZGM 1120 60° nach ISO 2813 wurde zunächst aus Puttymasse eine Positionierungshilfe für den V-förmigen Zehntner Mini Glanzmesskopf modelliert. Mit dieser Halterung wurde einerseits der Prüfkörper fixiert, andererseits die Positionierung des Glanzmesskopfs so ermöglicht, dass der Messsensor mittig über dem Prüfkörper zu liegen kam und pro Prüfkörper eine identische Positionierung für den Messvorgang gewährleistet wurde (siehe Abbildung 15). Die Glanzmessung schloss sich als erste Messung direkt an den Polymerisationsvorgang an. Jeder Prüfkörper wurde hierfür direkt vor der jeweiligen Messung einzeln aus der lichtundurchlässigen Box entnommen. Insgesamt

wurden pro Prüfkörper zwei Messungen durchgeführt, deren Werte für die Auswertung gemittelt wurden. Direkt nach der Messung wurde der Prüfkörper wieder unmittelbar in die lichtundurchlässige Box zurückgelegt. Der für die Messungen verwendete Messwinkel des Lichtstrahls des Geräts belief sich hierbei auf  $60^\circ$ , wobei das von der Oberfläche des Prüfkörpers reflektierte Licht im selben, aber umgekehrten Winkel aufgezeichnet und die gemessenen Werte mit Hilfe des Gloss Tool 1.0.0049. Programms aufgenommen wurden (32). Somit handelt es sich bei der Glanzmessung um eine genaue Charakterisierung der Oberflächeneigenschaften eines Prüfkörpers, hierbei wird das in einem speziellen Winkel auf den Prüfkörper projizierte Licht zum größten Anteil von diesem absorbiert und der im umgekehrten Winkel zurückstrahlende Anteil kann von dem Glanzmesser erfasst werden (79).

**Abbildung 15. Glanzmessung mit der Puttyfixation für Prüfkörper und Sensor**



### **3.5.2 Bestimmung der Rauheit**

Direkt im Anschluss schloss sich die Bestimmung der Rauheit der Prüfkörperoberfläche mit dem Keyence VK-X 100 Series Laser Mikroskop und dem Programm VK-Viewer und VK-Analyser unter Verwendung des 5:1 Objektivs bei 120-facher Vergrößerung an (80). Hierzu wurde der Prüfkörper wieder einzeln aus seiner Box entnommen und so auf dem Objektisch des Mikroskops eingestellt, dass die Abtastungsfläche des Lasermikroskops genau über dem zentralen Politurbereich positioniert wurde (siehe Abbildung 16). Es erfolgte jeweils pro Prüfkörper die Bestimmung des arithmetischen Mittenrauwertes (Ra-Wert) und der gemittelten Rautiefe (Rz-Wert) (40). Dafür wurde in den Versuchen die Oberflächenrauheit nach ISO 25178 bestimmt, aus der die zweidimensionalen Parameter abgeleitet werden konnten (81). Die Vermessung der Oberflächenrauheit erfolgte mit einem Cutoff-Wert  $\lambda_s$  von  $0,8\mu\text{m}$  und  $\lambda_c$  von  $0,08\mu\text{m}$ , das Messfeld besaß eine rechteckige Form mit einer Breite von ca.  $2500\mu\text{m}$  und einer Höhe ca.  $1900\mu\text{m}$ . Mit Hilfe des festgelegten Cutoff's kann die Wellenlänge gefiltert werden, zur Erstellung eines Rauheitsprofils muss die lange Wellenlängenkomponente durch den Profilfilter  $\lambda_c$  abgefangen werden (40). Die Messungen erfolgten kontaktlos mit der Hilfe von kurzweiligem Laserlicht als Lichtquelle, somit fand keinerlei Beschädigung der

Prüfkörperoberfläche statt und selbst feinste Strukturen der Oberfläche konnten erfasst werden (80). Das Laserlicht trifft bei diesem Messvorgang auf die Prüfkörperoberfläche und der Scanvorgang des Lasers erfolgt in X- und Y-Richtung, der Bewegungsablauf des Objektivs hingegen verläuft in Z-Richtung und der Scanvorgang des Lasers erfolgt wiederum in X- und Y-Richtung. Dieser Ablauf hält so lange an, bis die erforderliche Messtiefe gefunden und der Messvorgang somit beendet ist (80). Generell läuft ein Messvorgang so ab, dass der Laserstrahl die Prüfkörperoberfläche abfährt, ein Teil des auf den Prüfkörper auftreffenden Lichtes von dessen Oberfläche zurückgestrahlt und durch einen halbdurchlässigen Spiegel im Mikroskopinneren zu einem Lichtaufnahmeelement geleitet wird. Es schließt sich der zuvor erwähnte sich wiederholende Scanvorgang des Lasers in X- und Y-Richtung und der des Objektivs in Z-Richtung an, bis die gewünschte Messtiefe erreicht ist. In dem Moment der höchsten Lichtreflexion, werden für jeden Pixel die Stärke der aufgezeichneten Lichtreflexion und die Höhenposition der Mikroskoplinse registriert (40).

**Abbildung 16. Oberflächenrauheitsmessung mit dem Keyence VK-X 100 Series Laser Mikroskop**



### **3.5.3 Härteprüfung**

Für die sich anschließende Härteprüfung wurden die Prüfkörper wieder nacheinander einzeln aus der lichtundurchlässigen Box entnommen und mit Hilfe des Zwick Roell Z.25 Gerätes und dem Programm testXpert ZHV untersucht. Dabei wurde das 10:1 Objektiv genutzt und eine Belastungspunkt Standardkraft von 30N ausgewählt. Der Prüfkörper wurde auf dem Auflagetisch der Zwick Roell Einheit so positioniert, dass er mittig unter der verfahrbaren Prüfanlage zu liegen kam (siehe Abbildung 17). An der Lage des Prüfkörpers selbst wurde nichts mehr verändert, lediglich die Messeinheit wurde auf die für den Messvorgang benötigte Höhe auf die Prüfkörperoberfläche heruntergefahren. Hierbei wurde pro Prüfkörper eine

Messung durchgeführt und sowohl die Martenshärte nach ISO 14577 als auch die Vickershärte nach ISO 6507 bestimmt. Nach Angabe des Herstellers wird bei dem Messvorgang ein in der Messeinheit integrierter diamantener und pyramidenförmiger Eindringkörper mit einer stoßfrei ausgeübten Prüfkraft bei festgelegter Aufsetz- und Verweilzeit senkrecht auf die Oberfläche des ruhenden Prüfkörpers aufgedrückt. Bei der Vickershärte findet nach Abbau der verwendeten Prüfkraft eine optische Ausmessung des von der Härtemesseinheit auf der Prüfkörperoberfläche hinterlassenen Abdrucks statt. Die Martenshärte wird dem sogenannten Tiefenmessverfahren zugeordnet, hierbei erfolgt die Messung mit einer definierten Prüfkraft. Die Prüfkraft wird langsam bis zum Erreichen der festgelegten Maximalkraft aufgebaut und anschließend wieder zurückgenommen. Dabei wird die Eindringtiefe des pyramidenförmigen Eindringkörpers unter der verwendeten Prüfkraft während dem gesamten Messvorgang festgehalten und aufgezeichnet (49, 50).

**Abbildung 17. Härtemessung mit dem Gerät Zwick Roell Z.25**



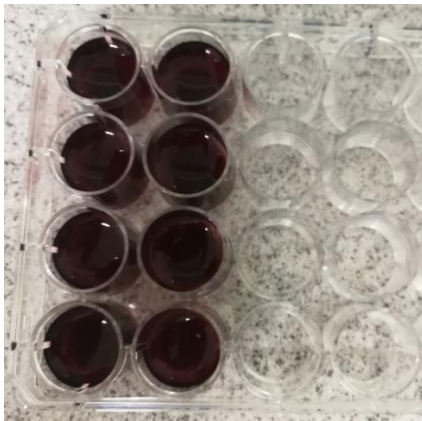
### **3.5.4 Farbmessung**

Die Farbmessung wurde in zwei Abschnitte unterteilt, zunächst erfolgte die erste Farbmessung für jeden Prüfkörper direkt im Anschluss an die Härteprüfung, nachdem die Weiß- und Schwarz-Kalibrierung des Minolta Spectrophotometers CM-3500d abgeschlossen wurden. Danach wurde jeder Prüfkörper einzeln in eine aus Putty modellierte Form eingebracht und mit dieser mittig über der Reflexionsmessöffnung des Spectrophotometers positioniert, um eine reproduzierbare Fixation des Prüfkörpers zu gewährleisten und eine Beeinflussung der Messung durch Tageslicht zu verhindern. Das Messfeld wurde durch die Verwendung der Messblende CM-A121 in den Versuchen auf 3mm festgelegt (77). Zur Belichtung wurde Normlicht D65 verwendet, das mit seiner Farbtemperatur von 6504K, mittleres Tageslicht imitierte und die Ultraviolettstrahlung mitumfasste (82). Bei dieser Reflexionsmessung wurde

laut dem Herstellerhandbuch für den Messvorgang die sogenannte diffus/8° Geometrie nach ISO 7724/1, DIN 5033 verwendet. Dabei fand eine Beleuchtung der Prüfkörperoberfläche aus sämtlichen Richtungen statt und die Begutachtung des Prüfkörpers erfolgte durch einen Sensor unter 8° versetzt zur Senkrechten der Prüfkörperoberfläche. In den Versuchen erfolgte die Farbmessung mit geschlossener Glanzfalle und Glanzeinschluss (SCI). Mit Hilfe der verbauten mechanischen Glanzfalle ließ sich die Farbmessung mit Einbezug des Glanzeindrucks und somit unter Einbezug der gerichteten Reflexion (SCI) durchführen (77, 82). Bei der verbauten mechanischen Glanzfalle handelt es sich um eine an der Position -8° zur Betrachtungsöffnung liegende schwarze Hohlkammer, die geöffnet (SCE) und geschlossen (SCI) werden kann (83). Bei der Messung mit geschlossener Glanzfalle und Glanzeinschluss (SCI), wie in den Versuchen erfolgt, wird die gesamte Reflexion des Prüfkörpers erfasst und die Farbe ohne Einfluss des Oberflächencharakters des Prüfkörpers bestimmt (82). Bei dem Messvorgang wird über eine Xenon-Blitzlampe ein Lichtstrahl abgegeben, dieses Licht trifft auf die weiße Innenwand der im Gerät verbauten ultrabrightischen Kugel, sodass das Licht einheitlich in allen Richtungen des Raumes verteilt wird und in diesem Zustand auf die Prüfkörperoberfläche trifft (77, 82). Das von der Prüfkörperoberfläche in einem Winkel von 8° zur Senkrechten zurückstrahlende Licht wird mittels eines Umlenkspiegels und einem zwischengeschalteten optischen System zu dem ersten Monochromator weitergegeben. Zu dem zweiten Monochromator wird zeitgleich zur Überprüfung Licht aus dem Kugellinneren, mittels einer Glasfaseroptik weitergeleitet. Die Lichtinformationen werden mittels zweier Monochromatoren weiterverarbeitet, hierbei wird das Lichtspektrum mit einem Wellenlängenbereich von 400 bis 700nm in Wellenlängenbereiche von 20nm unterteilt. Anschließend erfolgt eine Transformation des Lichtes in Stromsignale, welche die jeweilige Lichtintensität widerspiegeln und weiter verwertet werden. Die Informationen werden über sich anschließende Stationen zuletzt an den Computer weitergeleitet und verarbeitet (77). Mit Hilfe eines Spektralphotometers lässt sich somit das von der Prüfkörperoberfläche reflektierte Licht und dessen resultierende spektrale Strahlungsverteilung bestimmen (82). Für jeden Prüfkörper wurden hintereinander 3 Messungen durchgeführt und unter Verwendung des L\*a\*b\*-Farbsystems wurden für jede Probe ein L\*- (Helligkeit), a\*- (Farbkoordinate a) und b\*-Wert (Farbkoordinate b) ermittelt (82). Im Anschluss wurde jeder Prüfkörper mit der polierten Oberfläche nach oben gerichtet einzeln in ein Nöpfchen einer Mikrotiterplatte gelegt und mit 2mm Rotwein beträufelt. Die befüllten Mikrotiterplatten wurden danach in die lichtundurchlässigen Boxen gestellt und dort für zwei Wochen belassen (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19). Nach dieser Zeit wurden die Prüfkörper wieder entnommen, kurz

abgetrocknet und mit Hilfe des Spectrophotometers die vorherigen Messungen nach demselben Ablauf und unter denselben Parametern wiederholt und der L\*-, a\*-, und b\*-Wert nach zweiwöchiger Rotweinlagerung bestimmt. Aus den erhobenen Werten vor und nach zweiwöchiger Rotweinlagerung, wurde mit Hilfe der in Kapitel 2.7.3 erläuterten Formel die Farbdifferenz  $\Delta E$  bestimmt.

**Abbildung 18. Mikrotiterplatte mit Prüfkörpern im zweiwöchigem Rotweinbad**



**Abbildung 19. Prüfkörperverwahrung in den lichtundurchlässigen Boxen**



### 3.5.5 Rasterelektronenmikroskop

Im Anschluss wurde für jede Prüfkörpergruppe, ein zusätzlicher Prüfkörper je verwendetem Komposit, verwendeter Polymerisationszeit und verwendetem Polierer hergestellt und direkt im Anschluss an die Fertigstellung das oberflächliche Erscheinungsbild rasterelektronenmikroskopisch festgehalten. Die Untersuchung erfolgte mit Hilfe des Phenom TM World SEM Rasterelektronenmikroskops und es wurden Bilder von der Prüfkörperoberfläche bei 500-, und 2000-facher Vergrößerung im Top-Modus und bei 1000-facher Vergrößerung im Full-Modus aufgenommen.

### 3.5.6 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse der gemessenen Parameter erfolgte mit Hilfe des Programms SPSS 25 (IBM, Armonk, NY, USA). Für die Glanz-, die Rauheits-, die Härte- und die Farbmessungen wurden für jede Prüfkörpergruppe, eingeteilt nach Komposit, Polymerisationszeit und verwendetem Polierer, Mittelwert und Standardabweichung bestimmt und ein entsprechendes Balkendiagramm erstellt. Ebenfalls wurden für die einzelnen Prüfkörpergruppen getrennt nach Glanz, Rauheit (jeweils für den Ra- und Rz-Wert), Härte und Verfärbungsneigung  $\Delta E$  ONEWAY deskriptive Statistiken, eine einfaktorielles ANOVA, Bonferroni Post-Hoc-Tests mit Mehrfachvergleichen und die Pearson Korrelation für die statistische Analyse durchgeführt.

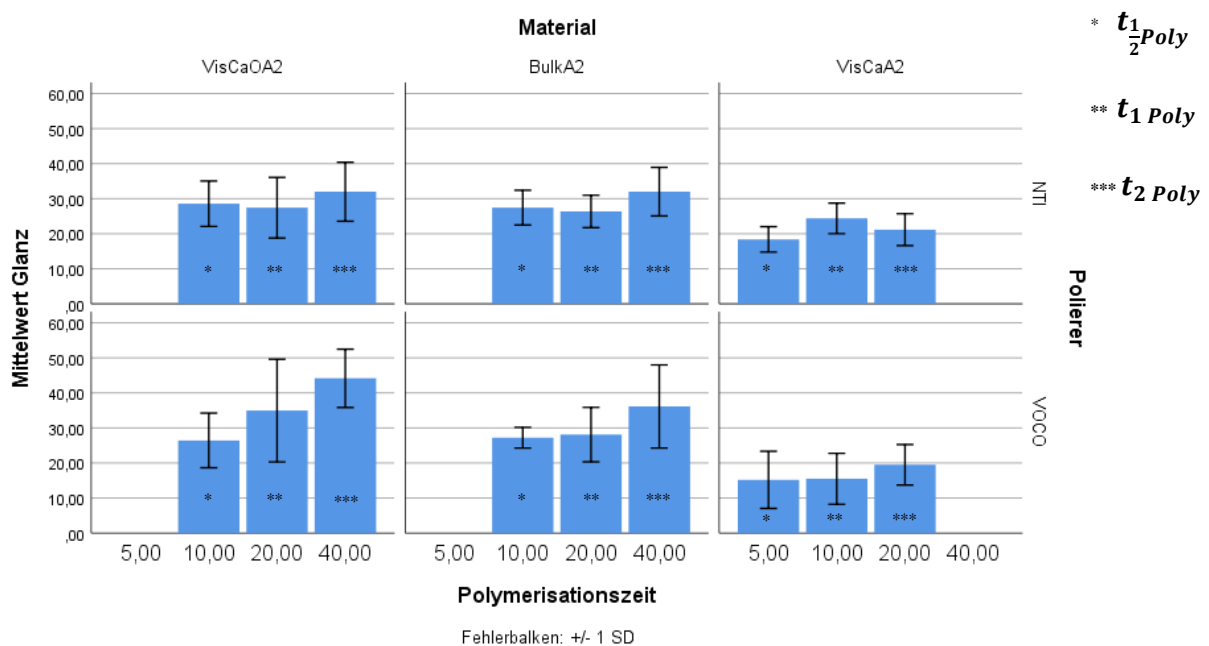
## 4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse von Glanz, Rauheit, Härte und Verfärbung dieser Studie für die drei getesteten Komposite und die verwendeten Poliersysteme dargestellt.

### 4.1 Glanz

Die Glanzmittelwerte wurden mit Hilfe eines Balkendiagrammes graphisch veranschaulicht. Dabei fiel auf, dass mit Ausnahme des Materials VisCalorA2 NTI für alle anderen Materialien und Poliergruppen bei  $t_{2\text{Poly}}$  die höchsten Glanzmittelwerte erzielt wurden. Für VisCalorA2 NTI / VOCO wurden unabhängig von der Polymerisationszeit insgesamt die niedrigsten Glanzmittelwerte notiert. Bei  $t_{1\text{Poly}}$  wurde für VisCalorA2 NTI der höchste Glanzmittelwert erreicht, generell wurde für dieses Material in den NTI-Gruppen eine kleinere Abweichung im Standardfehler festgehalten als für die VOCO-Gruppen. Die Ergebnisverteilung für VisCalorbulka2 fiel für die NTI-Gruppen im Vergleich zu den VOCO-Gruppen unter den drei getesteten Materialien am ähnlichsten aus. Für beide Poliergruppen wurde für  $t_{2\text{Poly}}$  die größte Abweichung im Standardfehler notiert, dabei wurde auch bei diesem Material in der VOCO-Gruppe im Durchschnitt ein größerer Standardfehler als für die NTI-Gruppe festgehalten. In beiden Poliergruppen wurde für das Material VisCalorOA2 durchschnittlich die größte Abweichung im Standardfehler erreicht. Die VOCO-Poliergruppe erzielte bei  $t_{1\text{Poly}}$  und  $t_{2\text{Poly}}$  höhere Glanzmessergebnisse als die NTI-Kontrollgruppe (siehe Abbildung 20).

**Abbildung 20. Darstellung der Mittelwerte für die Glanzmessung der getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ :**



Im ANOVA Test konnten signifikante ( $p=0,000$ ) Unterschiede im Glanz zwischen den Gruppen aufgezeigt werden. Mit Hilfe Bonferroni korrigierter Post Hoc Tests wurden über Mehrfachvergleiche signifikante ( $p\leq 0,05$ ) Unterschiede zwischen den Prüfkörpergruppen festgestellt. Im Vergleich untereinander wurde für VisCalorOA2 VOCO  $t_{2Poly}$  (MW=44,2) ein höherer Glanzmittelwert gemessen als für VisCalorOA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}poly}$  (MW=28,6,  $p=0,11$ ) gefolgt von VisCalorOA2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=27,4,  $p=0,003$ ) und VisCalorOA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=26,4,  $p=0,001$ ). Dabei erreichte VisCalorOA2 NTI bei  $t_{\frac{1}{2}poly}$  einen höheren Glanzmittelwert als bei  $t_{1poly}$ . Damit ist VisCalorOA2 von allen drei getesteten Materialien das Einzige, für das bei dem Vergleich innerhalb derselben Kompositgruppe, gleichem Poliersystem und variierten Polymerisationszeiten und bei dem Vergleich zwischen den zwei Polierern VOCO und NTI signifikante Ergebnisse erzielt werden konnten. Bei den Vergleichen zwischen den verschiedenen Kompositen und Prüfkörpergruppen wurden weitere signifikante Ergebnisse erzielt. Für VisCalorA2 NTI wurden im Vergleich mit VisCalorOA2 VOCO  $t_{2Poly}$  bei  $t_{\frac{1}{2}poly}$  (MW=18,4,  $p=0,000$ ),  $t_{1Poly}$  (MW=24,4,  $p=0,000$ ) und  $t_{2Poly}$  (MW=21,2,  $p=0,000$ ) höhere Glanzmittelwerte als in der VOCO-Kontrollgruppe erreicht. Für die NTI-Gruppe wurde bei  $t_{1Poly}$  der größte Glanzmittelwert festgehalten, gefolgt von  $t_{2Poly}$  und  $t_{1Poly}$ . Dahingegen wurde eine Steigerung im Glanzmittelwert mit der Polymerisationszeit für VisCalorA2 VOCO



$t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=15,2, p=0,003), gefolgt von  $t_{1Poly}$  (MW=15,5, p=0,005) und  $t_{2Poly}$  (MW=19,5, p=0,000), im direkten Vergleich mit VisCalorOA2 NTI  $t_{2Poly}$  (MW=32,0), VisCalorOA2 VOCO  $t_{1Poly}$  (MW=35,0) und  $t_{2Poly}$  und VisCalorbulka2 NTI (MW=32,0) / VOCO (MW=36,1)  $t_{2Poly}$  notiert. VisCalorOA2 VOCO erreichte bei  $t_{2Poly}$  einen höheren Glanzmittelwert als VisCalorOA2 NTI. VisCaOA2 VOCO  $t_{2Poly}$  erreichte einen höheren Glanzmittelwert im Vergleich zu VisCalorbulka2 NTI (MW=27,4, p=0,004) / VOCO (MW=27,2, p=0,003)  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und NTI (MW=26,4, p=0,001) / VOCO (MW=28,1, p=0,007)  $t_{1Poly}$ . Die Glanzmittelwerte für VisCalorbulka2 wiesen in beiden Poliergruppen nur geringe Unterschiede auf, in der NTI-Gruppe wurde bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  ein leicht erhöhter Glanzmittelwert im Vergleich zu  $t_{1Poly}$  gemessen, bei der VOCO-Gruppe verhielt es sich gegensätzlich. Generell erreichten die Materialien VisCalorOA2 und VisCalorbulka2 im Durchschnitt höhere Glanzmittelwerte als das Material VisCalorA2. Es ließ sich jedoch für keines der getesteten Materialien belegen, dass der Glanzmittelwert unabhängig vom verwendeten Poliersystem mit steigender Polymerisationszeit immer chronologisch ansteigt. Für die VOCO-Poliergruppen von VisCalorA2 (im Vergleich mit VisCalorOA2 NTI  $t_{2Poly}$  / VOCO  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  und VisCalorbulka2 NTI / VOCO  $t_{2Poly}$ ), VisCalorOA2 (im Vergleich zwischen VisCalorOA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  mit  $t_{2Poly}$ , mit VisCalorA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  bis  $t_{2Poly}$ ) und VisCalorbulka2 (verglichen mit VisCalorOA2 VOCO  $t_{2Poly}$ ) wurde aber ein signifikanter Anstieg im Mittelwert mit steigender Polymerisationszeit festgehalten. Es befinden sich alle gemessenen Glanzmittelwerte im Bereich des mittleren Glanzes (siehe Tabelle 1). Es zeigten sich signifikante Korrelationen des Glanzes mit dem Ra-Wert (Pearson 0,235 / Signifikanz (2-seitig) p=0,005), der Härte (0,346 / p=0,000) und eine signifikant negative Korrelation mit  $\Delta E$  (-0,278 / p=0,001). Es zeigte sich keine signifikante Korrelation mit dem Rz-Wert (0,123 / p=0,143).

**Tabelle 1: Glanzmessung: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ )**

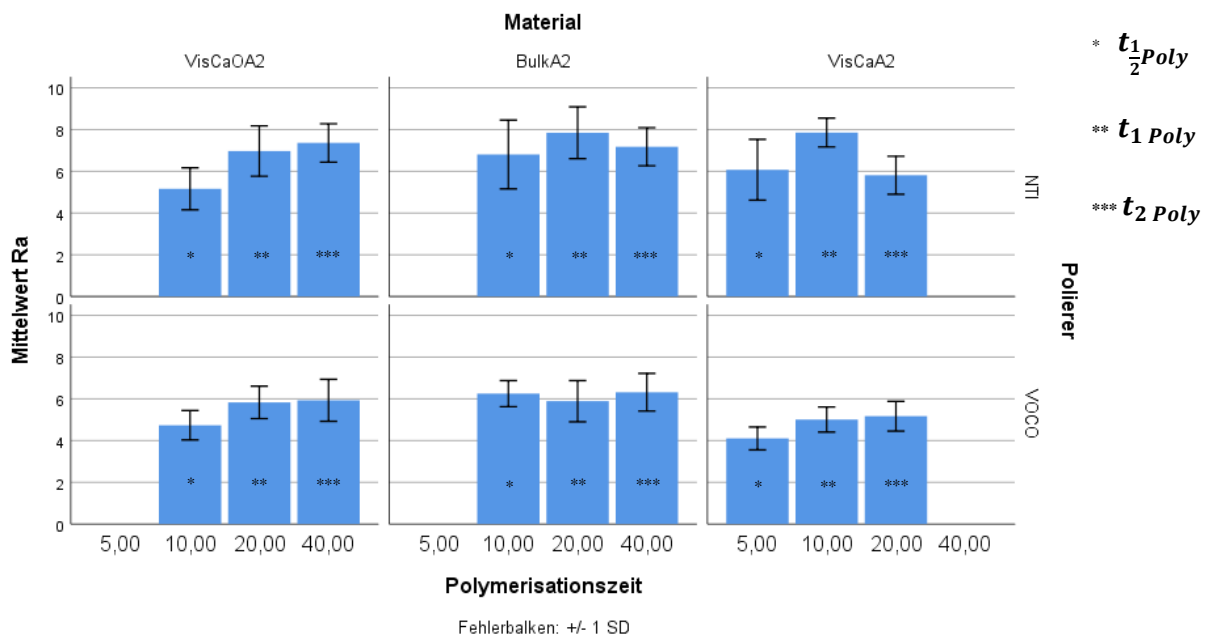
	VisCaOA2 NTI 10	VisCaOA2 NTI 20	VisCaOA2 NTI 40	VisCaOA2 VOCO 10	ViasCaOA2 VOCO 20	VisCaOA2 VOCO 40	BulkA2 NTI 10	BulkA2 NTI 20	BulkA2 NTI 40	BulkA2 VOCO 10	BulkA2 VOCO 20	BulkA2 VOCO 40	VisCaA2 NTI 5	VisCaA2 NTI 10	ViasCaA2 NTI 20	VisCaA2 VOCO 5	VisCaA2 VOCO 10	ViasCaA2 VOCO 20
VisCaOA2 NTI 10	/	/	/	/	/	p=0,011	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaOA2 NTI 20	/	/	/	/	/	p=0,003	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaOA2 NTI 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,003	p=0,005	/
VisCaOA2 VOCO 10	/	/	/	/	/	p=0,001	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
ViasCaOA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,004	/	/	p=0,000	p=0,000	p=0,013
VisCaOA2 VOCO 40	p=0,011	p=0,003	/	p=0,001	/	/	p=0,004	p=0,001	/	p=0,003	p=0,007	/	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000
BulkA2 NTI 10	/	/	/	/	/	p=0,004	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulkA2 NTI 20	/	/	/	/	/	p=0,001	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulkA2 NTI 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,003	p=0,004	/
BulkA2 VOCO 10	/	/	/	/	/	p=0,003	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulkA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	p=0,007	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulkA2 VOCO 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,001	/	p=0,021	p=0,000	p=0,000	p=0,004
VisCaA2 NTI 5	/	/	/	/	p=0,004	p=0,000	/	/	/	/	/	p=0,001	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 NTI 10	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
ViasCaA2 NTI 20	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	p=0,021	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 VOCO 5	/	/	p=0,003	/	p=0,000	p=0,000	/	/	p=0,003	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 VOCO 10	/	/	p=0,005	/	p=0,000	p=0,000	/	/	p=0,004	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/
ViasCaA2 VOCO 20	/	/	/	/	p=0,013	p=0,000	/	/	/	/	/	p=0,004	/	/	/	/	/	/

**Legende:** Spiegelachse der Vergleichsgruppen (----); Kennzeichnung nicht signifikanter Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen durch (/); Kennzeichnung signifikanter Unterschiede ( $p \leq 0,05$ ) zwischen den Vergleichsgruppen durch den jeweils angegebenen p-Wert

## 4.2 Arithmetischer Mittenrauwert (Ra-Wert)

Die Mittelwerte für den arithmetischen Mittenrauwert wurden mit Hilfe eines Balkendiagrammes veranschaulicht. Für VisCalorOA2 wurde in beiden Poliergruppen eine Steigerung des Mittelwertes mit zunehmender Polymerisationszeit aufgezeichnet. Unabhängig vom verwendeten Material wurden für die NTI-Poliergruppen höhere Mittelwerte erzielt verglichen mit den VOCO-Kontrollgruppen, aber gleichzeitig auch eine höhere Abweichung im Standardfehler festgehalten. VisCalorA2 zeichnete für die VOCO-Poliergruppe eine Mittelwertsteigerung mit zunehmender Polymerisationszeit auf, in der NTI-Gruppe wurde bei  $t_{1poly}$  der höchste Mittelwert erzielt. Für VisCalorbulkA2 wurde der höchste Wert in der NTI-Gruppe für  $t_{1poly}$  erreicht, in der VOCO-Gruppe fiel der Mittelwert bei  $t_{1poly}$  am geringsten aus. Die höchste Abweichung im Standardfehler wurde für VisCalorbulkA2 NTI bei  $t_{\frac{1}{2}poly}$  festgehalten (siehe Abbildung 21).

**Abbildung 21. Darstellung der Mittelwerte für den arithmetischen Mittenrauwert (Ra-Wert) der getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ :**



Im ANOVA Test konnten signifikante ( $p=0,000$ ) Ra Unterschiede zwischen den Gruppen aufgezeigt werden. Mit Hilfe Bonferroni korrigierter Post Hoc Tests wurden signifikante Unterschiede ( $p \leq 0,05$ ) zwischen den einzelnen Prüfkörpergruppen festgestellt. Vergleich man VisCalorOA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}poly}$  (MW=5,2) mit VisCalorOA2 NTI  $t_{2poly}$  (MW=7,4,  $p=0,003$ ),

VisCalorbulkA2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=7,9, p=0,000) und VisCalorbulkA2 NTI  $t_{2Poly}$  (MW=7,2, p=0,011), fiel für VisCalorOA2 NTI eine Mittelwertsteigerung innerhalb derselben Kompositgruppe, bei gleichem Poliersystem und mit steigender Polymerisationszeit auf. Für VisCalorbulkA2 NTI wurde bei dem Vergleich zwischen verschiedenen Kompositgruppen bei  $t_{1Poly}$  ein höherer Mittelwert als bei  $t_{2Poly}$  erzielt. Bei dem Vergleich von VisCalorOA2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=7,0) und  $t_{2Poly}$  (MW=7,4) mit VisCalorOA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=4,7, p=0,002 ( $t_{1Poly}$ ), p=0,000 ( $t_{2Poly}$ )), VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=4,1, p=0,000 ( $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ )), VisCalorA2 VOCO  $t_{1Poly}$  (MW=5,0, p=0,016 ( $t_{1Poly}$ ), p=0,001 ( $t_{2Poly}$ )) und VisCalorA2 VOCO  $t_{2Poly}$  (MW=5,2, p=0,003 ( $t_{2Poly}$ )), fiel bei beiden Materialien eine Steigerung im Mittelwert mit steigender Polymerisationszeit auf. Dabei erreichte VisCalorA2 VOCO geringere Mittelwerte als VisCalorOA2 NTI  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ . Für VisCalorOA2 wurde bei dem Vergleich zwischen den Polierern für VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  ein signifikant niedriger Ra-Wert im Vergleich zu  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  NTI erreicht. VisCalorOA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=4,73) erzielte im Vergleich zu VisCalorbulkA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=6,8, p=0,007),  $t_{1Poly}$  (MW=7,9, p=0,000),  $t_{2Poly}$  (MW=7,2, p=0,000) und VisCalorA2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=7,9, p=0,000) den niedrigsten Mittelwert. Für VisCalorbulkA2 NTI wurde bei diesem Vergleich zwischen den verschiedenen Kompositen der höchste Mittelwert bei  $t_{1Poly}$ , gefolgt von  $t_{2Poly}$  und  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  aufgezeichnet. Für VisCalorOA2 VOCO  $t_{1Poly}$  (MW=5,8) wurde ein kleinerer Mittelwert verglichen mit VisCalorbulkA2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=7,9, p=0,010) und VisCalorA2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=7,9, p=0,010) gemessen. Dies gilt ebenfalls für VisCalorOA2 VOCO  $t_{2Poly}$  (MW=5,9). Der Vergleich von VisCalorbulkA2 NTI  $t_{1Poly}$  mit VisCalorbulkA2 VOCO  $t_{1Poly}$  (MW=5,9, p=0,016), VisCaA2 NTI  $t_{2Poly}$  (MW=5,8, p=0,000), VisCaA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=4,1, p=0,000), VisCaA2 VOCO  $t_{1Poly}$  (MW=5,0, p=0,000) und VisCaA2 VOCO  $t_{2Poly}$  (MW=5,2, p=0,000), zeichnete für VisCalorA2 VOCO eine Steigerung im Mittelwert mit zunehmender Polymerisationszeit auf. Für VisCalorbulkA2  $t_{1Poly}$  wurde für die NTI-Gruppe ein höherer Mittelwert als für die entsprechende VOCO-Gruppe verzeichnet. Dabei wurden für VisCalorbulkA2 NTI / VOCO  $t_{1Poly}$  höhere Mittelwerte als für VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  bis  $t_{2Poly}$  und VisCalorA2 NTI  $t_{2Poly}$  notiert. VisCalorA2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=7,9, p=0,015) erreichte im Vergleich zu VisCalorbulkA2 VOCO  $t_{1Poly}$  (MW=5,9) einen höheren Mittelwert. VisCalorA2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=7,9) erreichte verglichen mit VisCalorA2 NTI  $t_{2Poly}$  (MW=5,8,

p=0,008), VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=4,1, p=0,000),  $t_{1Poly}$  (MW= 5,0, p=0,000) und  $t_{2Poly}$  (MW=5,2, p=0,000), einen höheren Mittelwert als die VisCalorA2 VOCO-Gruppen und eine Abnahme im Mittelwert zwischen  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ , wohingegen für die VOCO-Gruppe bei diesem Vergleich eine Steigerung im Mittelwert mit zunehmender Polymerisationszeit zu sehen war. Eine Steigerung im Mittelwert mit zunehmender Polymerisationszeit von VisCalorA2 VOCO wurde beim Vergleich mit VisCalorbulka2 NTI  $t_{2Poly}$  (p-Wert zwischen 0,000-0,011) und VisCalorA2 NTI  $t_{1Poly}$  (p=0,000) beobachtet. VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  wies einen geringeren Mittelwert im Vergleich zu VisCalorA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=6,1, p=0,015), VisCalorOA2 VOCO  $t_{2Poly}$  (MW=5,9, p=0,044) und VisCalorbulka2 VOCO  $t_{2Poly}$  (MW=5,9, p=0,002) auf. Generell wurden für VisCalorbulka2  $t_{1Poly}$ , VisCalorA2  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und  $t_{2Poly}$ , VisCalorOA2  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  bei den NTI-Gruppen signifikant höhere Mittelwerte im Vergleich zu den signifikanten VOCO-Kontrollgruppen notiert. Insgesamt konnte eine signifikante Mittelwertsteigerung mit zunehmender Polymerisationszeit für das Material VisCalorOA2 NTI (bei dem Vergleich mit VisCalorOA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ , VisCalorOA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und  $t_{2Poly}$ , VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und  $t_{1Poly}$ ) / VOCO (bei dem Vergleich mit VisCalorbulka2 NTI  $t_{1Poly}$  und VisCalorA2 NTI  $t_{1Poly}$ ) und für VisCalorA2 VOCO (bei dem Vergleich mit VisCalorOA2 NTI  $t_{1Poly}$ ,  $t_{2Poly}$ , VisCalorbulka2 NTI  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ , VisCalorA2 NTI  $t_{1Poly}$ ) verzeichnet werden. Für VisCalorbulka2 NTI wurden signifikante Werte in bestimmten Mehrfachvergleichen mit den anderen Kompositen und Poliergruppen, die in diesem Abschnitt weiter oben genauer erläutert wurden, notiert und zeigten für  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  den niedrigsten Mittelwert auf, gefolgt von  $t_{2Poly}$  und dann von  $t_{1Poly}$ . Für VisCalorbulka2 VOCO wurde bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  ein höherer Mittelwert als bei  $t_{2Poly}$  verzeichnet (siehe Tabelle 2). Es zeigten sich signifikante Korrelationen des Ra-Wertes mit dem Glanz (Pearson 0,123 / Signifikanz (2-seitig) p=0,005), dem RZ-Wert (0,546 / p=0,000), der Härte (0,242 / p=0,003) und eine negative Korrelation mit  $\Delta E$  (-0,317 / p=0,000).

**Tabelle 2. Ra-Wert: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ )**

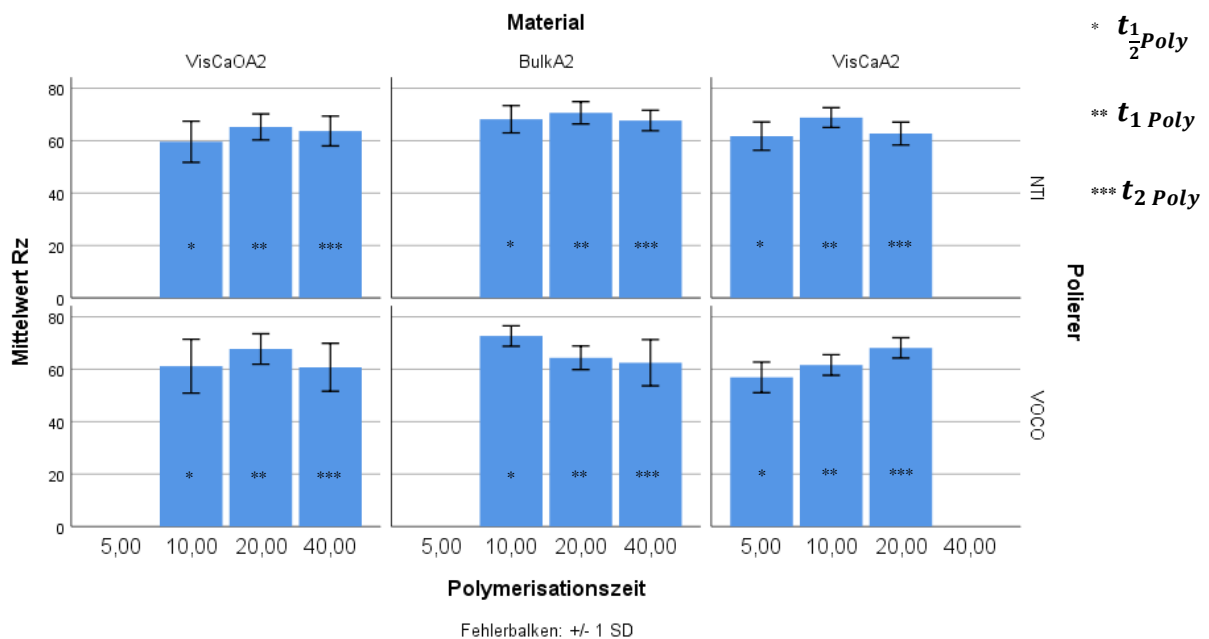
	VisCaOA2 NTI 10	VisCaOA2 NTI 20	VisCaOA2 NTI 40	VisCaOA2 VOCO 10	ViasCaOA2 VOCO 20	VisCaOA2 VOCO 40	BulkA2 NTI 10	BulkA2 NTI 20	BulkA2 NTI 40	BulkA2 VOCO 10	BulkA2 VOCO 20	BulkA2 VOCO 40	VisCaA2 NTI 5	VisCaA2 NTI 10	ViasCaA2 NTI 20	VisCaA2 VOCO 5	VisCaA2 VOCO 10	ViasCaA2 VOCO 20
VisCaOA2 NTI 10	/	/	p=0,003	/	/	/	/	p=0,000	p=0,011	/	/	/	/	p=0,000	/	/	/	/
VisCaOA2 NTI 20	/	/	/	p=0,002	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	p=0,016	/
VisCaOA2 NTI 40	p=0,003	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	p=0,001	p=0,003
VisCaOA2 VOCO 10	/	p=0,002	p=0,000	/	/	/	p=0,007	p=0,000	p=0,000	/	/	/	/	p=0,000	/	/	/	/
ViasCaOA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	p=0,010	/	/	/	/	/	p=0,010	/	/	/	/
VisCaOA2 VOCO 40	/	/	/	/	/	/	/	p=0,023	/	/	/	/	/	p=0,021	/	p=0,044	/	/
BulkA2 NTI 10	/	/	/	p=0,007	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/
BulkA2 NTI 20	p=0,000	/	/	p=0,000	p=0,010	p=0,023	/	/	/	/	p=0,016	/	/	/	p=0,009	p=0,000	p=0,000	p=0,000
BulkA2 NTI 40	p=0,011	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	p=0,003	p=0,011
BulkA2 VOCO 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,004	/	/
BulkA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	p=0,016	/	/	/	/	/	p=0,015	/	/	/	/
BulkA2 VOCO 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,002	/	/
VisCaA2 NTI 5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,015	/	/
VisCaA2 NTI 10	p=0,000	/	/	p=0,000	p=0,010	p=0,021	/	/	/	/	p=0,015	/	/	/	p=0,008	p=0,000	p=0,000	p=0,000
ViasCaA2 NTI 20	/	/	/	/	/	/	/	p=0,009	/	/	/	/	/	p=0,008	/	/	/	/
VisCaA2 VOCO 5	/	p=0,000	p=0,000	/	/	p=0,044	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,004	/	p=0,002	p=0,015	p=0,000	/	/	/	/
VisCaA2 VOCO 10	/	p=0,016	p=0,001	/	/	/	/	p=0,000	p=0,003	/	/	/	/	p=0,000	/	/	/	/
ViasCaA2 VOCO 20	/	/	p=0,003	/	/	/	/	p=0,000	p=0,011	/	/	/	/	p=0,000	/	/	/	/

**Legende:** Spiegelachse der Vergleichsgruppen (-----); Kennzeichnung nicht signifikanter Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen durch (/); Kennzeichnung signifikanter Unterschiede ( $p \leq 0,05$ ) zwischen den Vergleichsgruppen durch den jeweils angegebenen p-Wert

### 4.3 Gemittelte Rautiefe (Rz-Wert)

Die Mittelwerte für die gemittelte Rautiefe wurden mit Hilfe eines Balkendiagrammes graphisch veranschaulicht. Bei allen drei getesteten Materialien wurde für die NTI-Poliergruppe bei  $t_{1\text{Poly}}$  der höchste Mittelwert gemessen. Für VisCalorOA2 wurde in beiden Poliergruppen der höchste Mittelwert bei  $t_{1\text{Poly}}$  erzielt. In der VOCO-Poliergruppe stieg der Mittelwert für VisCalorA2 mit zunehmender Polymerisationszeit an, für VisCalorbulkA2 erfolgte eine Abnahme im Mittelwert mit steigender Polymerisationszeit. Dabei wurden die größten Abweichungen im Standardfehler durchschnittlich für VisCalorOA2 VOCO festgestellt. Der höchste Mittelwert für die gemittelte Rautiefe wurde für VisCalorbulkA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}\text{poly}}$  notiert (siehe Abbildung 22).

**Abbildung 22. Darstellung der Mittelwerte für die gemittelte Rautiefe (Rz-Wert) der getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}\text{Poly}}$ ,  $t_{1\text{Poly}}$  und  $t_{2\text{Poly}}$ :**



Im ANOVA Test konnten signifikante ( $p=0,000$ ) Rz Unterschiede zwischen den Gruppen aufgezeigt werden. Mit Hilfe Bonferroni korrigierter Post Hoc Tests wurden über Mehrfachvergleiche signifikante ( $p\leq 0,05$ ) Unterschiede zwischen den Prüfkörpergruppen festgestellt. Vergleich man VisCalorbulkA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}\text{poly}}$  (MW=72,7) mit VisCalorOA2 NTI (MW=59,6,  $p=0,004$ ) / VOCO (MW=61,2,  $p=0,028$ )  $t_{\frac{1}{2}\text{poly}}$ , VisCalorOA2 VOCO  $t_{2\text{poly}}$

(MW=60,8, p=0,017) und VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}poly}$  (MW=56,9, p=0,000) und  $t_{1poly}$  (MW=61,6, p=0,049), fiel auf, dass VisCalorbulkA2 in dieser Vergleichsgruppe den höchsten Mittelwert erzielte. Bei diesem Vergleich zwischen den verschiedenen Kompositgruppen fiel der Mittelwerte bei  $t_{\frac{1}{2}poly}$  für VisCalorOA2 VOCO geringfügig höher aus, als für VisCalorOA2 NTI. Dabei wurde für VisCalorOA2 VOCO bei  $t_{2poly}$  ein niedrigerer Mittelwert als bei  $t_{\frac{1}{2}poly}$  festgehalten. Für VisCalorA2 VOCO wurde eine Steigerung im Mittelwert von  $t_{\frac{1}{2}poly}$  zu  $t_{1poly}$  festgehalten. Bei der Gegenüberstellung von VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}poly}$  (MW=56,9) mit VisCalorbulkA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}poly}$  (MW=68,2, p=0,038),  $t_{1poly}$  (MW=70,6, p=0,002), VisCalorA2 NTI  $t_{1poly}$  (MW=68,8, p=0,017) und VisCalorA2 VOCO  $t_{2poly}$  (MW=68,1, p=0,039), wies das Bulk-Fill-Komposit bei  $t_{1poly}$  den höchsten Mittelwert in dieser Vergleichsgruppe auf. Es liegt eine Steigerung im Mittelwert für VisCalorbulkA2 NTI von  $t_{\frac{1}{2}poly}$  zu  $t_{1poly}$  vor. VisCalorA2 NTI  $t_{1poly}$  erzielte bei dem Vergleich innerhalb einer Kompositgruppe bei variiertem Polierer einen höheren Mittelwert als VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}poly}$  und einen minimal höheren als VisCalorA2 VOCO  $t_{2poly}$ . In der VOCO-Poliergruppe fiel für VisCalorA2 VOCO (im Vergleich mit VisCalorbulkA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}poly}$  und VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}poly} / t_{2poly}$ ) eine Steigerung im Mittelwert mit zunehmender Polymerisationszeit auf. VisCalorOA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}poly}$  (MW=59,6) erzielte einen geringeren Mittelwert als VisCalorbulkA2 NTI  $t_{1poly}$  (MW=70,6, p=0,048). Für die Materialgruppen VisCalorOA2 NTI  $t_{1poly} / t_{2poly}$ , VisCalorOA2 VOCO  $t_{1poly}$ , VisCalorbulkA2 NTI  $t_{2poly}$ , VisCalorbulkA2 VOCO  $t_{1poly} / t_{2poly}$  und VisCalorA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}poly} / t_{2poly}$  konnten innerhalb der Mehrfachvergleiche zwischen den Prüfkörpergruppen keine signifikanten Ergebnisse aufgezeichnet werden. Insgesamt konnte nur für VisCalorA2 VOCO von allen drei getesteten Materialien bei dem Vergleich innerhalb derselben Kompositgruppe, gleichem Polierer und variierten Polymerisationszeiten eine signifikante Steigerung im Mittelwert der gemittelten Rautiefe mit zunehmender Polymerisationszeit verzeichnet werden. Dabei war VisCalorA2 ebenfalls das einzige getestete Material, das einen signifikanten Unterschied im Rz-Mittelwert bei dem Vergleich innerhalb derselben Kompositgruppe, aber zwischen den beiden Polierern VOCO und NTI aufwies (siehe Tabelle 3). Es zeigte sich eine signifikante Korrelation des Rz-Wertes mit dem Ra-Wert (Pearson 0,546 / Signifikanz (2-seitig) p=0,000) und eine negative



Korrelation mit  $\Delta E$  (-0,317 /  $p=0,000$ ). Es zeigte sich keine signifikante Korrelation mit dem Glanz (0,123 /  $p=0,143$ ) und der Härte (0,088 /  $p=0,292$ ).

**Tabelle 3. Rz-Wert: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ )**

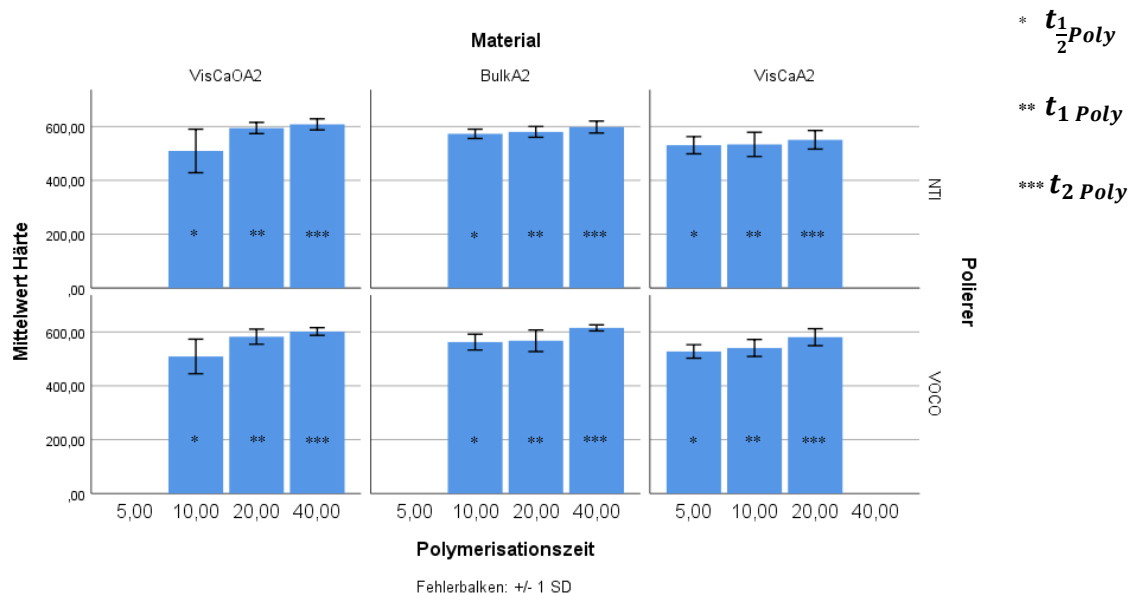
	VisCaOA2 NTI 10	VisCaOA2 NTI 20	VisCaOA2 NTI 40	VisCaOA2 VOCO 10	ViasCaOA2 VOCO 20	VisCaOA2 VOCO 40	BulKA2 NTI 10	BulKA2 NTI 20	BulKA2 NTI 40	BulKA2 VOCO 10	BulKA2 VOCO 20	BulKA2 VOCO 40	VisCaA2 NTI 5	VisCaA2 NTI 10	ViasCaA2 NTI 20	VisCaA2 VOCO 5	VisCaA2 VOCO 10	ViasCaA2 VOCO 20
VisCaOA2 NTI 10	/	/	/	/	/	/	/	p=0,048	/	p=0,004	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaOA2 NTI 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaOA2 NTI 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaOA2 VOCO 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,028	/	/	/	/	/	/	/	/
ViasCaOA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaOA2 VOCO 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,017	/	/	/	/	/	/	/	/
BulKA2 NTI 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,038	/	/
BulKA2 NTI 20	p=0,048	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,002	/	/
BulKA2 NTI 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulKA2 VOCO 10	p=0,004	/	/	p=0,028	/	p=0,017	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	p=0,049	/
BulKA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulKA2 VOCO 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 NTI 5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 NTI 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,017	/	/
ViasCaA2 NTI 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 VOCO 5	/	/	/	/	/	/	p=0,038	p=0,002	/	p=0,000	/	/	/	p=0,017	/	/	/	p=0,039
VisCaA2 VOCO 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,049	/	/	/	/	/	/	/	/
ViasCaA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,039	/	/

**Legende:** Spiegelachse der Vergleichsgruppen (-----); Kennzeichnung nicht signifikanter Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen durch (/); Kennzeichnung signifikanter Unterschiede ( $p \leq 0,05$ ) zwischen den Vergleichsgruppen durch den jeweils angegebenen p-Wert

#### 4.4 Härte

Die Versuchsergebnisse wurden mit Hilfe eines Balkendiagrammes graphisch veranschaulicht. Dabei fiel auf, dass für alle drei getesteten Materialien, unabhängig vom Poliersystem, mit der höchsten Polymerisationszeit  $t_{2\text{Poly}}$  die höchsten Mittelwerte bei der Härtemessung erzielt wurden. Die Ergebnisse fielen für die NTI-Gruppen im direkten Vergleich zu den VOCO-Gruppen sehr ähnlich aus. In beiden Poliergruppen wurden im Durchschnitt für das Material VisCalorA2 bei den verwendeten Polymerisationszeiten  $t_{1\text{Poly}}$  und  $t_{2\text{Poly}}$  die geringsten Härtewerte erzielt. Dabei weist dieses Material eine halb so lange Polymerisationszeitempfehlung, wie die beiden anderen Materialien auf. Für die Polymerisationszeit  $t_{\frac{1}{2}\text{Poly}}$  wurden von allen getesteten Materialien für VisCalorOA2 die niedrigsten Werte gemessen und die größte Abweichung im Standardfehler festgehalten. Unabhängig vom Poliersystem erreichte VisCalorbulkA2 für alle drei Polymerisationszeiten die konstantesten und mit die höchsten Härtewerte (siehe Abbildung 23).

**Abbildung 23. Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichung für die Variable der Martenshärte für die getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}\text{Poly}}$ ,  $t_{1\text{Poly}}$  und  $t_{2\text{Poly}}$ :**



Im ANOVA Test konnten signifikante ( $p=0,000$ ) Unterschiede in der Härte zwischen den Gruppen aufgezeigt werden. Mit Hilfe Bonferroni korrigierter Post Hoc Tests wurden über Mehrfachvergleiche signifikante ( $p\leq 0,05$ ) Unterschiede zwischen den verschiedenen Prüfkörpergruppen festgestellt. Vergleich man die Polymerisationszeiten für VisCalorOA2 NTI

(MW=509,3) / VOCO (MW=509,0)  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  mit den Polymerisationszeiten  $t_{1Poly}$  NTI (MW=594,5) / VOCO (MW=582,4) und  $t_{2Poly}$  NTI (MW=608) / VOCO (MW=601,8) fällt auf, dass für beide Poliergruppen NTI / VOCO bei  $t_{2Poly}$  mit  $p=0,000$  der höchste Mittelwert in dieser Materialgruppe erreicht wurde, gefolgt von  $t_{1Poly}$  ( $p=0,001$  (NTI),  $p=0,012$  (VOCO)). Dies zeigt, dass in beiden Gruppen höhere Härtewerte mit steigender Polymerisationszeit erzielt werden konnten und eine doppelt so lange Polymerisation wie die Herstellerempfehlung die höchsten Härtewerte erzielte. Diese Beobachtung verhielt sich dabei für die Standardabweichung entgegengesetzt. Der Vergleich zwischen den beiden Poliergruppen zeigte ebenfalls einen höheren Härtemittelwert für die höhere Polymerisationszeit auf. Generell ist VisCalorOA2 das einzige der drei getesteten Materialien, bei dem signifikante Ergebnisse bei dem Vergleich innerhalb einer Kompositgruppe, bei gleichem Polierer und variierten Polymerisationszeiten und innerhalb einer Kompositgruppe, bei variiertem Poliersystem erzielt werden konnten. Eine signifikante Härtesteigerung zwischen den verschiedenen Kompositgruppen mit steigender Polymerisationszeit, fiel auch zwischen VisCalorbulkA2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=594,5,  $p=0,020$  (NTI),  $p=0,019$  (VOCO)) und  $t_{2Poly}$  (MW=608,  $p=0,000$  (NTI / VOCO)) bei dem Vergleich mit VisCalorOA2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  auf. Dabei wurde für VisCalorbulkA2 bei  $t_{2Poly}$  für die VOCO-Gruppe (MW=615,3,  $p=0,000$ ) ein höherer Mittelwert erreicht als für die NTI-Gruppe (MW=598,1,  $p=0,000$ ). Für die Materialgruppen VisCalorbulkA2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ , VOCO  $t_{1Poly}$  und VisCalorA2 NTI  $t_{2Poly}$  konnten generell keine signifikanten Werte in den Mehrfachvergleichen zwischen den Prüfkörpergruppen beobachtet werden. Bei den Vergleichen zwischen den verschiedenen Kompositgruppen von VisCalorA2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=530,5 (NTI), MW=527,6 (VOCO)) und  $t_{1Poly}$  (MW=533,6 (NTI), MW=540,6 (VOCO)) mit VisCalorOA2 NTI  $t_{2Poly}$  ( $p=0,005$  (NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ),  $p=0,009$  (NTI  $t_{2Poly}$ )), ( $p=0,003$  (VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ),  $p=0,040$  (VOCO  $t_{1Poly}$ )) und VisCalorbulkA2 VOCO  $t_{2Poly}$  ( $p=0,001$  (NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ),  $p=0,002$  (NTI  $t_{2Poly}$ )), ( $p=0,000$  (VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ),  $p=0,009$  (VOCO  $t_{1Poly}$ )) konnte ebenfalls eine signifikante Steigerung im Mittelwert von  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  zu  $t_{1Poly}$  beobachtet werden. Dies gilt für VisCalorA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und  $t_{1Poly}$  ebenfalls noch für den Vergleich mit VisCalorOA2 VOCO  $t_{2Poly}$  ( $p=0,01$  ( $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ),  $p=0,035$  ( $t_{1Poly}$ )). Somit konnte eine signifikante Steigerung im Mittelwert der Martenshärte und eine geringer werdende Standardabweichung mit zunehmender

Polymerisationszeit für alle untersuchten Polymerisationszeiten und Poliersysteme nur für VisCalorOA2 erreicht werden (siehe Tabelle 4). Es zeigten sich signifikante Korrelationen der Härte mit dem Glanz (Pearson 0,346 / Signifikanz (2-seitig)  $p=0,000$ ) und dem Ra-Wert (0,242 /  $p=0,003$ ) und eine signifikant negative Korrelation mit  $\Delta E$  (-0,313 /  $p=0,000$ ). Es zeigte sich keine signifikante Korrelation mit dem Rz-Wert (0,088 /  $p=0,292$ ).

**Tabelle 4. Härte: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ )**

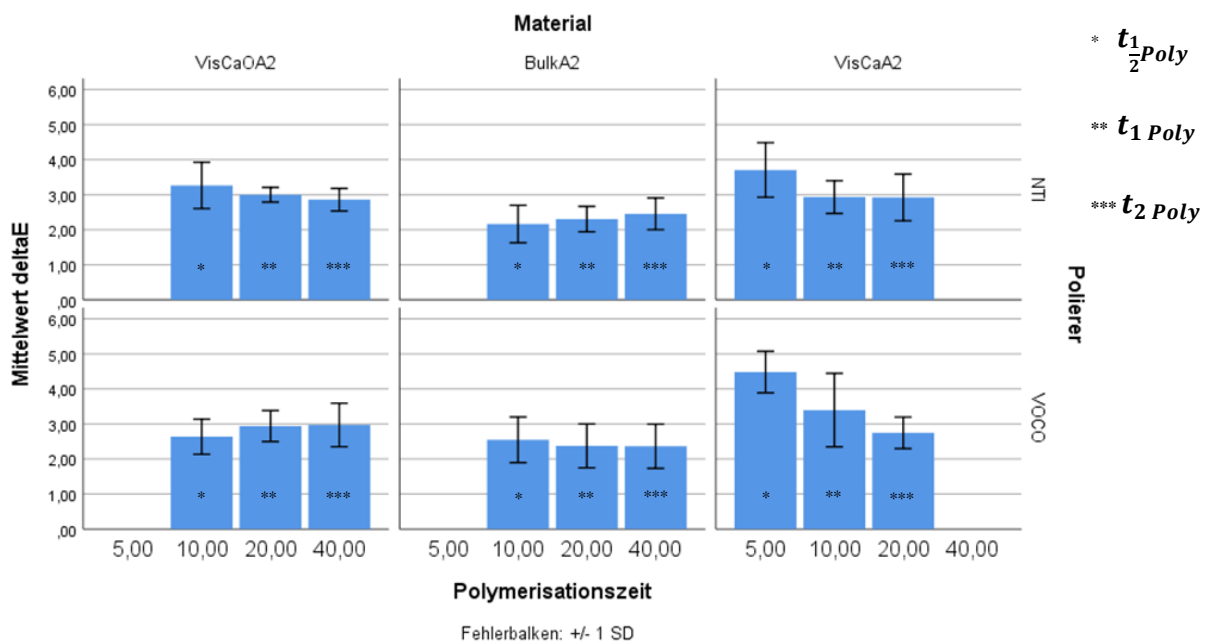
	VisCaOA2 NTI 10	VisCaOA2 NTI 20	VisCaOA2 NTI 40	VisCaOA2 VOCO 10	ViasCaOA2 VOCO 20	VisCaOA2 VOCO 40	BulKA2 NTI 10	BulKA2 NTI 20	BulKA2 NTI 40	BulKA2 VOCO 10	BulKA2 VOCO 20	BulKA2 VOCO 40	VisCaA2 NTI 5	VisCaA2 NTI 10	ViasCaA2 NTI 20	VisCaA2 VOCO 5	VisCaA2 VOCO 10	ViasCaA2 VOCO 20	
VisCaOA2 NTI 10	/	p=0,001	p=0,000	/	p=0,012	p=0,000	/	p=0,020	p=0,000	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	p=0,017
VisCaOA2 NTI 20	p=0,001	/	/	p=0,001	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,045	/	/
VisCaOA2 NTI 40	p=0,000	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,005	p=0,009	/	p=0,003	p=0,040	/	
VisCaOA2 VOCO 10	/	p=0,001	p=0,000	/	p=0,012	p=0,000	/	p=0,019	p=0,000	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	p=0,017
ViasCaOA2 VOCO 20	p=0,012	/	/	p=0,012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaOA2 VOCO 40	p=0,000	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,018	p=0,035	/	p=0,010	/	/	
BulKA2 NTI 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulKA2 NTI 20	p=0,020	/	/	p=0,019	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulKA2 NTI 40	p=0,000	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,038	/	/	p=0,021	/	/	
BulKA2 VOCO 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulKA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
BulKA2 VOCO 40	p=0,000	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,001	p=0,002	/	p=0,000	p=0,009	/	
VisCaA2 NTI 5	/	/	p=0,005	/	/	p=0,018	/	/	p=0,038	/	/	p=0,001	/	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 NTI 10	/	/	p=0,009	/	/	p=0,035	/	/	/	/	/	p=0,002	/	/	/	/	/	/	/
ViasCaA2 NTI 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 VOCO 5	/	p=0,045	p=0,003	/	/	p=0,010	/	/	p=0,021	/	/	p=0,000	/	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 VOCO 10	/	/	p=0,040	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,009	/	/	/	/	/	/	/
ViasCaA2 VOCO 20	p=0,017	/	/	p=0,017	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

**Legende:** Spiegelachse der Vergleichsgruppen (-----); Kennzeichnung nicht signifikanter Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen durch (/); Kennzeichnung signifikanter Unterschiede ( $p \leq 0,05$ ) zwischen den Vergleichsgruppen durch den jeweils angegebenen p-Wert

#### 4.5 Verfärbung, numerische Differenz zweier Farben $\Delta E$

Die Versuchsergebnisse wurden mit Hilfe eines Balkendiagrammes graphisch veranschaulicht. Dabei wurde für VisCalorA2  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  NTI / VOCO unter allen getesteten Materialien und verwendeten Polymerisationszeiten die höchsten Mittelwerte für die Verfärbungsneigung  $\Delta E$  festgehalten. Für die VOCO-Gruppe nahm der Mittelwert mit steigender Polymerisationszeit ab, in der NTI-Gruppe lagen die Mittelwerte für  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  sehr nah beieinander. Für VisCalorbulkA2 wurden unabhängig vom Poliersystem und den verwendeten Polymerisationszeiten die niedrigsten Mittelwerte gemessen. Für das VOCO-Poliersystem wurde für  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  ein leicht erhöhter Mittelwert gegenüber  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  festgehalten, es wurde eine höhere Abweichung im Standardfehler als für die NTI-Gruppe bemerkt. Eine leichte Steigerung im Mittelwert wurde dahingegen für das NTI-Poliersystem mit zunehmender Polymerisationszeit beobachtet. Bei VisCalorOA2 wurden für das NTI-Poliersystem leicht höhere Mittelwerte als für das VOCO-Poliersystem erreicht. Für die NTI-Gruppe wurde eine leichte Abnahme im Mittelwert  $\Delta E$  mit steigender Polymerisationszeit beobachtet, in der VOCO-Gruppe lag der Mittelwert für  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  leicht unter dem von  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  (siehe Abbildung 24).

**Abbildung 24. Darstellung der Mittelwerte für die Verfärbungsneigung der getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ :**



Im ANOVA Test konnten signifikante ( $p=0,000$ )  $\Delta E$  Unterschiede zwischen den Gruppen aufgezeigt werden. Mit Hilfe Bonferroni korrigierter Post Hoc Tests wurden über Mehrfachvergleiche signifikante ( $p \leq 0,05$ ) Unterschiede zwischen den verschiedenen Prüfkörpergruppen festgestellt. Vergleich man VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=4,5) mit VisCalorOA2 VOCO / NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  bis  $t_{2Poly}$ , fiel auf, dass bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  VisCalorA2 VOCO einen höheren Mittelwert in der Verfärbungsneigung erzielte, als VisCalorOA2 VOCO / NTI. Dabei wurde für VisCalorOA2 VOCO bei diesem Vergleich zwischen verschiedenen Kompositgruppen eine sehr leichte Steigerung mit steigender Polymerisationszeit von  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=2,6,  $p=0,000$ ) über  $t_{1Poly}$  (MW=2,9,  $p=0,000$ ) bis  $t_{2Poly}$  (MW=3,0,  $p=0,000$ ) aufgezeichnet. Für VisCalorOA2 NTI hingegen fiel entgegengesetzt eine leichte Abnahme im Mittelwert mit steigender Polymerisationszeit von  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=3,3,  $p=0,009$ ) über  $t_{1Poly}$  (MW=3,0,  $p=0,000$ ) bis  $t_{2Poly}$  (MW=2,9,  $p=0,000$ ) auf. Es ergab sich ein höherer Mittelwert für VisCalorOA2 NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW= 3,3) im Vergleich zu VisCalorbulka2 NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=2,2,  $p=0,039$ ). Vergleich man VisCalorA2 NTI (MW=3,7) / VOCO (MW=4,5)  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  mit VisCalorbulka2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ , fiel bei dem Vergleich zwischen den verschiedenen Kompositgruppen für das Bulk-Fill-Komposit unter dem NTI-Poliersystem eine leichte Mittelwertsteigerung mit steigender Polymerisationszeit auf (VisCalorbulka2 NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=2,2, ( $p=0,000$  VisCalorA2 NTI und VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ )), VisCalorbulka2 NTI  $t_{1Poly}$  (MW=2,3, VisCaA2 NTI ( $p=0,001$ ) / VOCO ( $p=0,000$ )  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ) und VisCalorbulka2 NTI  $t_{2Poly}$  (MW=2,5, VisCaA2 NTI ( $p=0,006$ ) / VOCO ( $p=0,000$ )  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ). Bei dem VOCO-Poliersystem wurden ähnliche Mittelwerte für VisCalorbulka2 erzielt, diese nahmen aber mit steigender Polymerisationszeit leicht ab,  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=2,6, VisCaA2 NTI ( $p=0,019$ ) / VOCO ( $p=0,000$ )  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ),  $t_{1Poly}$  (MW=2,4, VisCaA2 NTI ( $p=0,002$ ) / VOCO ( $p=0,000$ )  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ) und  $t_{2Poly}$  (MW=2,4, VisCaA2 NTI ( $p=0,002$ ) / VOCO ( $p=0,000$ )  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ). Die Mittelwerte von VisCalorA2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  überstiegen die Mittelwerte von VisCalorbulka2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  bis  $t_{2Poly}$ . VisCaA2 VOCO  $t_{1Poly}$  (MW=3,4) wies ebenfalls einen höheren Mittelwert als VisCalorbulka2 NTI  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  ( $p=0,007$ ) und VisCalorbulka2 NTI  $t_{1Poly}$  ( $p=0,044$ ) auf. Vergleich man VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  (MW=4,5) mit VisCalorA2 NTI (MW=2,9,  $p=0,000$ )



/ VOCO (MW=3,4, p=0,047)  $t_{1Poly}$  und VisCalorA2 NTI (MW=2,9, p=0,000) / VOCO (MW=2,8, p=0,000)  $t_{2Poly}$ , fiel auf, dass in beiden Poliergruppen mit steigender Polymerisationszeit eine Abnahme des Mittelwertes zu verzeichnen war. Diese fällt für die NTI-Gruppe aber deutlich geringer aus. Insgesamt war VisCalorA2 von allen drei getesteten Materialien das Einzige, bei dem innerhalb derselben Kompositgruppe, bei gleichem Poliersystem und variierten Polymerisationszeiten in der VOCO-Poliergruppe mit steigender Polymerisationszeit eine signifikante Veränderung in der Verfärbungsneigung nachgewiesen werden konnte. Zusätzlich war es das einzige getestete Material, das einen signifikanten Unterschied innerhalb derselben Kompositgruppe und zwischen den Polierern VOCO und NTI aufwies. Für VisCalorA2 VOCO / NTI konnte bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  ein deutlich höherer Mittelwert in der Verfärbungsneigung erzielt werden als bei VisCalorbulkA2 NTI / VOCO und für VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  ein deutlich höherer als bei VisCalorOA2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  bis  $t_{2Poly}$  (siehe Tabelle 5). Es zeigten sich signifikant negative Korrelationen von  $\Delta E$  mit dem Glanz (Pearson -0,278 / Signifikanz (2-seitig) p=0,001), dem Ra-Wert (-0,348 / p=0,000), dem Rz-Wert (-0,317 / p=0,000) und der Härte (-0,313 / p=0,000).

**Tabelle 5. Verfärbung: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ )**

	VisCaOA2 NTI 10	VisCaOA2 NTI 20	VisCaOA2 NTI 40	VisCaOA2 VOCO 10	ViasCaOA2 VOCO 20	VisCaOA2 VOCO 40	BulkA2 NTI 10	BulkA2 NTI 20	BulkA2 NTI 40	BulkA2 VOCO 10	BulkA2 VOCO 20	BulkA2 VOCO 40	VisCaA2 NTI 5	VisCaA2 NTI 10	ViasCaA2 NTI 20	VisCaA2 VOCO 5	VisCaA2 VOCO 10	ViasCaA2 VOCO 20
VisCaOA2 NTI 10	/	/	/	/	/	/	p=0,039	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,009	/	/
VisCaOA2 NTI 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/
VisCaOA2 NTI 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/
VisCaOA2 VOCO 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/
ViasCaOA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/
VisCaOA2 VOCO 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/
BulkA2 NTI 10	p=0,039	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/	p=0,000	p=0,007	/
BulkA2 NTI 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,001	/	/	p=0,000	p=0,044	/
BulkA2 NTI 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,006	/	/	p=0,000	/	/
BulkA2 VOCO 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,019	/	/	p=0,000	/	/
BulkA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,002	/	/	p=0,000	/	/
BulkA2 VOCO 40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,002	/	/	p=0,000	/	/
VisCaA2 NTI 5	/	/	/	/	/	/	p=0,000	p=0,001	p=0,006	p=0,019	p=0,002	p=0,002	/	/	/	/	/	/
VisCaA2 NTI 10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/
ViasCaA2 NTI 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/
VisCaA2 VOCO 5	p=0,009	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	/	p=0,000	p=0,000	p=0,047	p=0,000	
VisCaA2 VOCO 10	/	/	/	/	/	/	p=0,007	p=0,044	/	/	/	/	/	/	/	p=0,047	/	/
ViasCaA2 VOCO 20	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	p=0,000	/	/

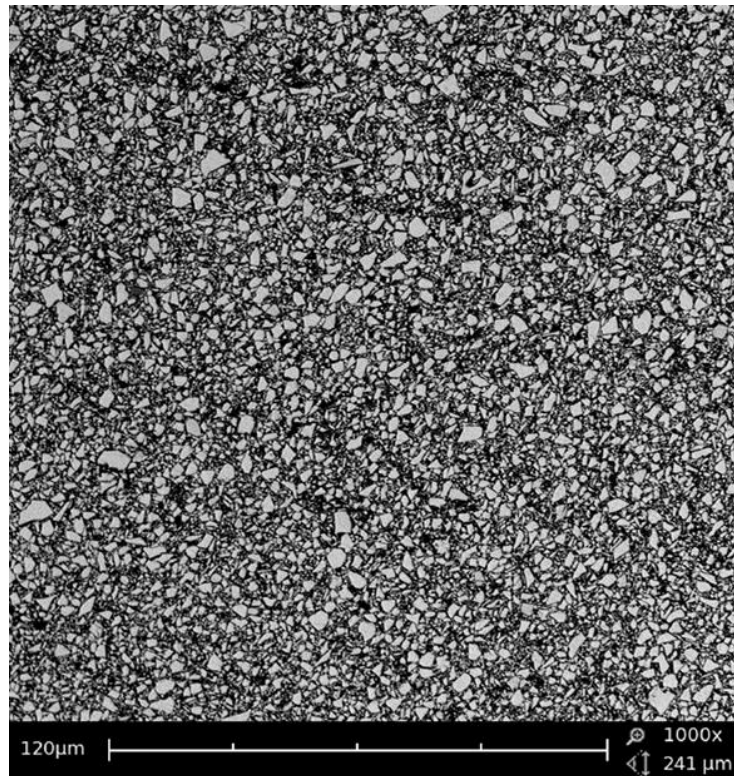
**Legende:** Spiegelachse der Vergleichsgruppen (-----); Kennzeichnung nicht signifikanter Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen durch (/); Kennzeichnung signifikanter Unterschiede ( $p \leq 0,05$ ) zwischen den Vergleichsgruppen durch den jeweils angegebenen p-Wert

## 4.6 Rasterelektronenmikroskop

Im Anschluss an die Hauptversuche wurde für alle drei getesteten Materialien, für die Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  und sowohl für die NTI-Poliergruppe als auch für die VOCO-Poliergruppe ein weiterer Prüfkörper, unter den gleichen Bedingungen wie in den Hauptversuchen, hergestellt. Von diesen Prüfkörpern wurden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen angefertigt. Im Folgenden werden die drei Komposite VisCalorOA2, VisCalorbulkA2 und VisCalorA2 dargestellt. Dabei werden die Komposite zunächst in einer Übersichtsaufnahme bei einer 1000-fachen Vergrößerung betrachtet. Dann erfolgt für jedes Material bei einer 2000-fachen Vergrößerung aufgeteilt nach dem verwendeten Poliersystem und der verwendeten Polymerisationszeit eine direkte Gegenüberstellung der rasterelektronenmikroskopischen Bilder.

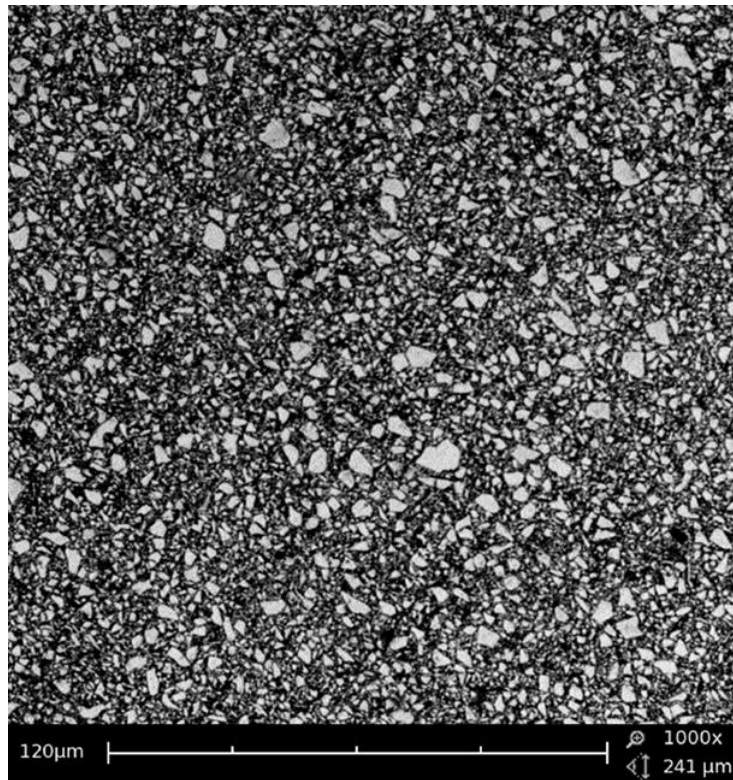
In diesem rasterelektronenmikroskopischen Bild (siehe Abbildung 25) sieht man einen Ausschnitt der Kompositstruktur des Materials VisCalorbulkA2. Um einen Vergleich der Bilder unter denselben Bedingungen zu gewährleisten, wurde für diese Ansicht bei 1000-facher Vergrößerung für VisCalorbulkA2, VisCalorOA2 und VisCalorA2 die Ansicht für eine Polymerisationszeit von  $t_{2Poly}$  und einer Politur mit dem VOCO-Poliersystem ausgewählt. Wobei in dieser Ansicht die verwendete Polymerisationszeit und das Poliersystem zu keinem Unterschied in der Darstellung führen. Man erkennt in diesem Bild die Zusammensetzung des Kompositmaterials bestehend aus verschiedenen großen Füllkörpern und der organischen Matrix des Komposits. Dabei bestehen die Füllkörper laut Hersteller aus Siliziumdioxid 50nm und Glaskeramik (Ba-Al-Silikat) mit einem Durchmesser von  $0,7\mu\text{m}$  und  $2,0\mu\text{m}$ .

**Abbildung 25. VisCalorbulkA2 VOCO 40s 1000x Vergrößerung, organische Matrix und unterschiedlich große Füllkörper**



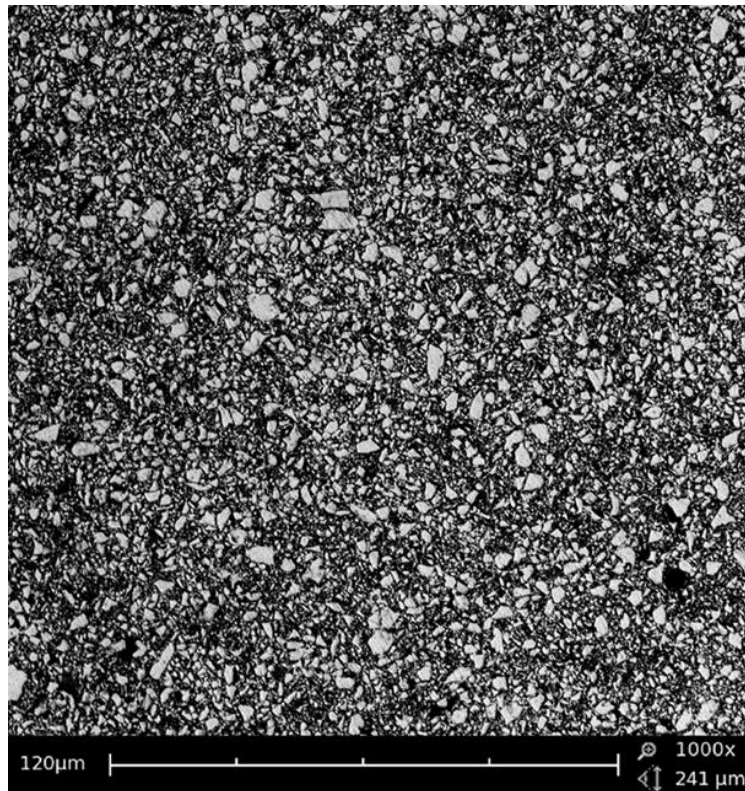
In Abbildung 26 sieht man einen Ausschnitt der Kompositstruktur für das Material VisCalorOA2  $t_{2Poly}$  unter Verwendung des VOCO-Poliersystems. Man erkennt in diesem Bild die Zusammensetzung des Komposits bestehend aus verschiedenen großen Füllkörpern und der organischen Matrix. Dabei bestehen die Füllkörper laut Hersteller ebenfalls aus Siliziumdioxid 50nm und Glaskeramik (Ba-Al-Silikat) mit einem Durchmesser von 0,7µm und 2,0µm. Es ist rein optisch kein Unterschied in der Struktur zu VisCalorbulkA2 zu erkennen, da die Zusammensetzung der getesteten Materialien nahezu identisch ist und laut Hersteller nur ein Unterschied in der zugesetzten Pigmentmenge besteht.

**Abbildung 26. VisCalorOA2 VOCO 40s 1000x Vergrößerung, organische Matrix und unterschiedlich große Füllkörper**



In Abbildung 27 sieht man einen Ausschnitt der Kompositstruktur für das Material VisCalorA2  $t_{2Poly}$  unter Verwendung des VOCO-Poliersystems. Man erkennt in diesem Bild ebenfalls die verschieden großen Füllkörper und die organische Matrix des Komposits. Dabei bestehen die Füllkörper laut Hersteller wie bei VisCalorbulka2 und VisCalorOA2 aus Siliziumdioxid 50nm und Glaskeramik (Ba-Al-Silikat) mit einem Durchmesser von  $0,7\mu\text{m}$  und  $2,0\mu\text{m}$ . Es ist rein optisch kein Unterschied in der Struktur zu VisCalorbulka2 und VisCalorOA2 zu erkennen, da die Zusammensetzung der getesteten Materialien nahezu identisch ist und laut Hersteller nur ein Unterschied in der zugesetzten Pigmentmenge besteht.

**Abbildung 27. VisCalorA2 VOCO 20s 1000x Vergrößerung, organische Matrix und unterschiedlich große Füllkörper**



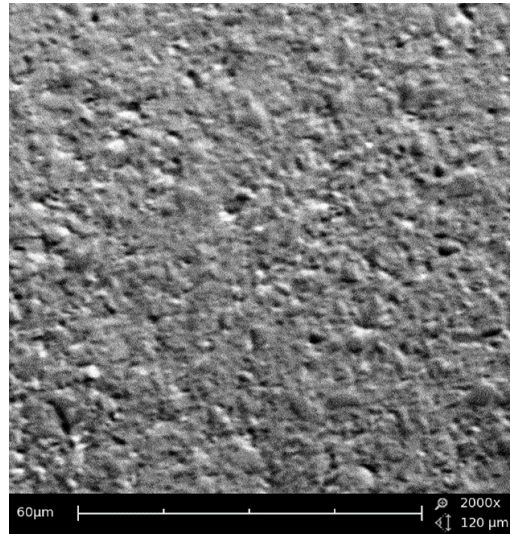
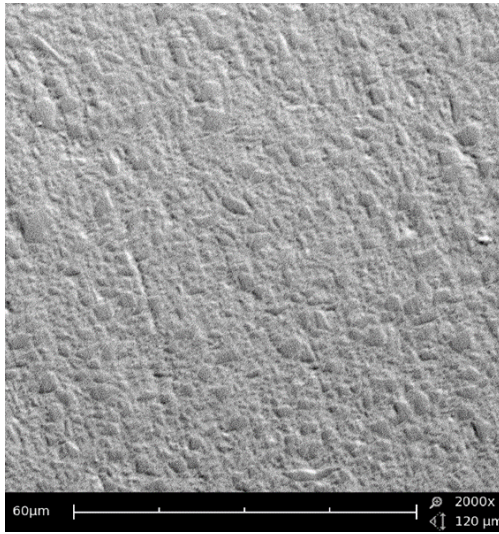
In der nachfolgenden Abbildung 28 sind bei 2000x Vergrößerung rasterelektronenmikroskopische Bilder des Materials VisCalorbulkA2 für die Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  getrennt nach dem VOCO- und NTI-Poliersystem einander gegenübergestellt. Es ist jeweils ein Ausschnitt der polierten Kompositoberfläche ersichtlich mit sichtbaren Politurspuren und freigelegten beziehungsweise zum Teil herausgelösten Füllkörpern. Optisch sind die mit dem VOCO-Poliersystem polierten Prüfkörper glatter, im Vergleich zu denen, die mit dem NTI-Poliersystem poliert wurden, die Füllkörper wirken weniger stark herausgelöst. In der NTI-Poliergruppe ist die Oberfläche bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  rauer im Vergleich zu  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ , die Politurspuren sind dort stärker ersichtlich und es scheinen mehr Füllkörper aus der Kompositoberfläche herausgelöst zu sein. Zwischen den zuletzt genannten ist kein großer Unterschied ersichtlich, die Politurspuren und herausgelösten Füllkörper sind jedoch stärker ersichtlich als bei den mit dem VOCO-Poliersystem polierten Prüfkörpern. Für die VOCO-Poliergruppe ist zwischen  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  bis  $t_{2Poly}$  kein großer Unterschied ersichtlich, man erkennt Politurspuren und vorwiegend angeschnittene Füllkörper.

**Abbildung 28. VisCalorbulkA2 Rasterelektronenmikroskop 2000x Vergrößerung**

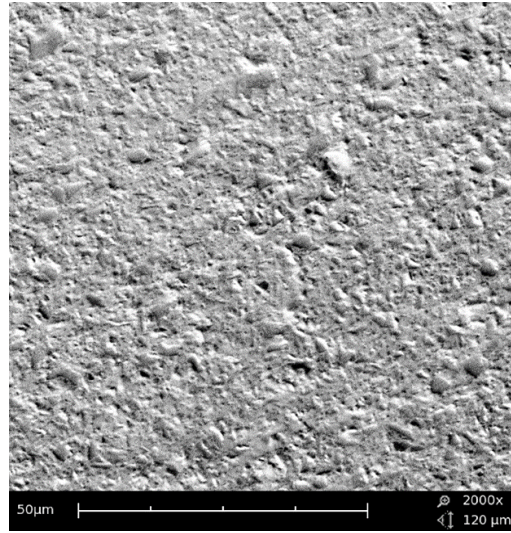
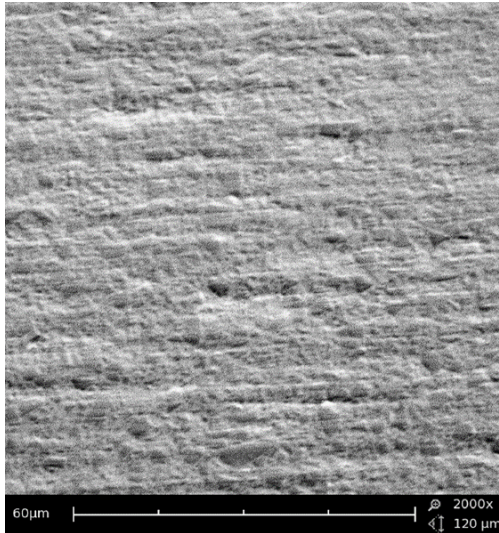
VOCO VisCalor bulk

NTI VisCalor bulk

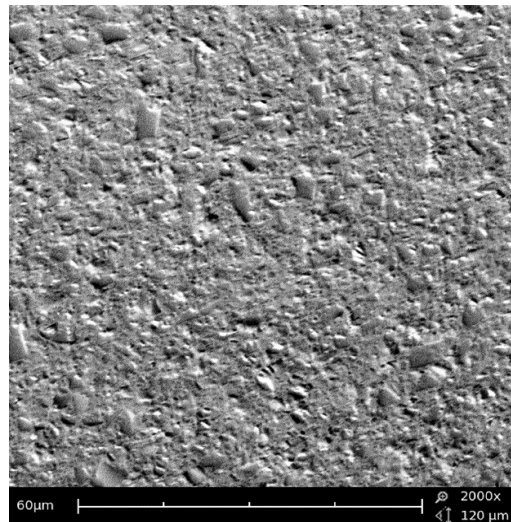
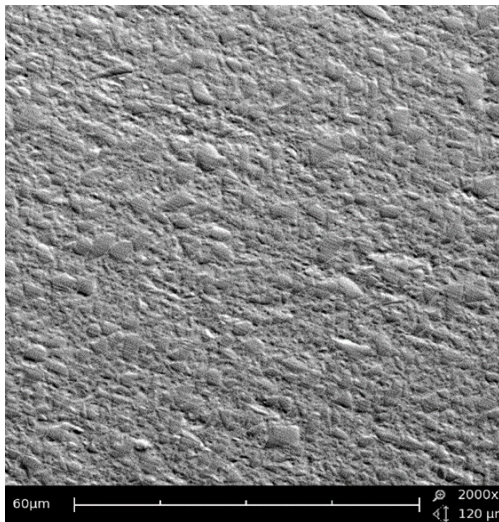
10s



20s.



40s



In der nachfolgenden Abbildung 29 sind bei 2000x Vergrößerung rasterelektronenmikroskopische Bilder des Materials VisCalorOA2 für die Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  getrennt nach dem VOCO- und NTI-Poliersystem einander gegenübergestellt. Es ist jeweils ein Ausschnitt der polierten Kompositoberfläche ersichtlich mit sichtbaren Politurspuren und freigelegten beziehungsweise zum Teil herausgelösten Füllkörpern. Bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  sieht die Kompositoberfläche für das VOCO-Poliersystem rauer aus im Vergleich zu dem Prüfkörper, der mit dem NTI-Poliersystem poliert wurde, die Politurspuren und angeschnittene beziehungsweise herausgelöste Prüfkörper sind dort stärker ersichtlich. Bei  $t_{1Poly}$  ist die Kompositoberfläche für das VOCO-Poliersystem glatter, die Füllkörper erscheinen weniger herausgelöst und vorwiegend angeschnitten, die Politurspuren sind weniger ersichtlich als bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ . Innerhalb der VOCO-Poliergruppe sieht die Oberfläche bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  rauer aus, im Vergleich zu  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ . Zwischen  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  ist kein großer Unterschied ersichtlich. Bei  $t_{2Poly}$  ist optisch kein Unterschied zwischen den beiden Poliersystemen ersichtlich. In der NTI-Gruppe sieht die Oberfläche bei  $t_{2Poly}$  am glattesten aus. Für  $t_{1Poly}$  erscheint sie am rauesten, die Politurspuren und der Anteil an herausgelösten Füllkörpern erscheint hier größer im Vergleich zu den anderen beiden Polymerisationszeiten.

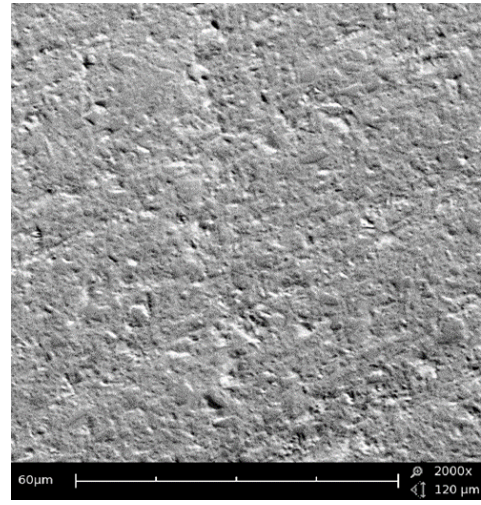
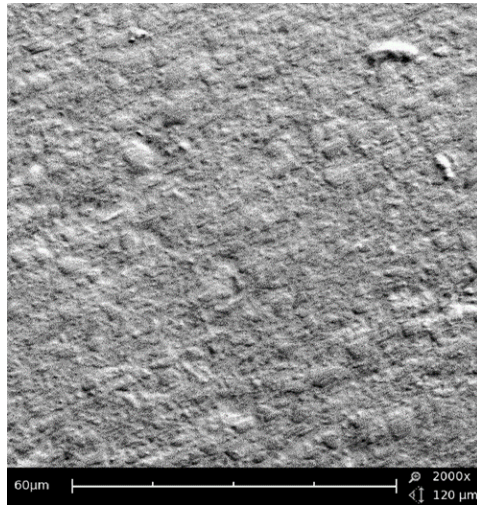


**Abbildung 29. VisCalorOA2 Rasterelektronenmikroskop 2000x Vergrößerung**

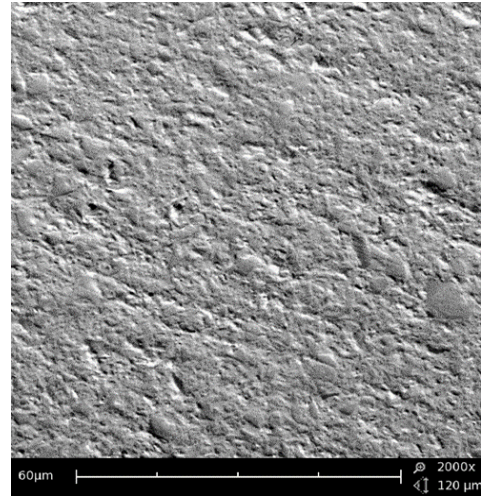
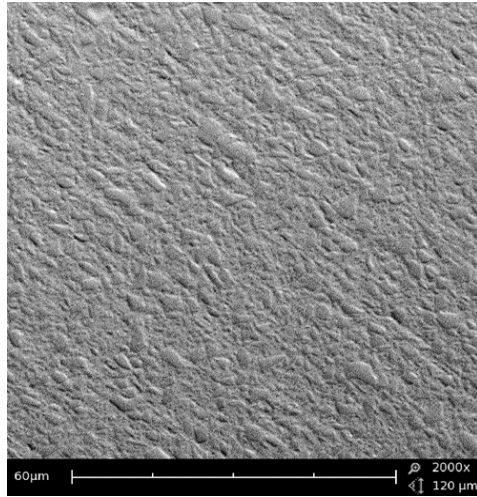
VOCO VisCalorOA2

NTI VisCalorOA2

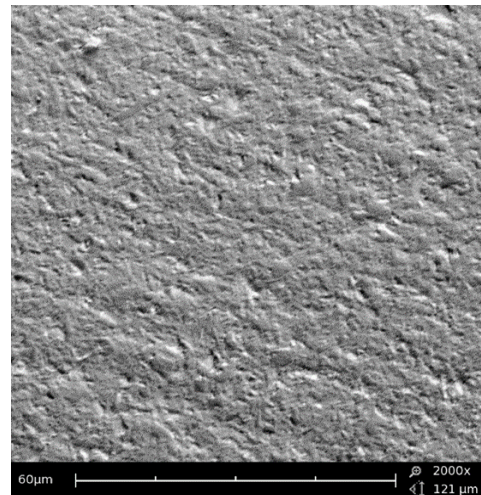
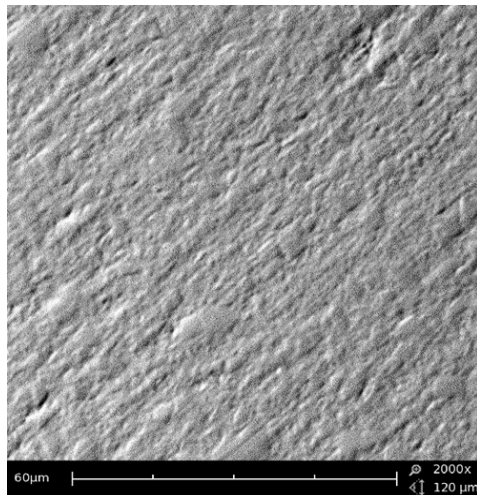
10s



20s



40s



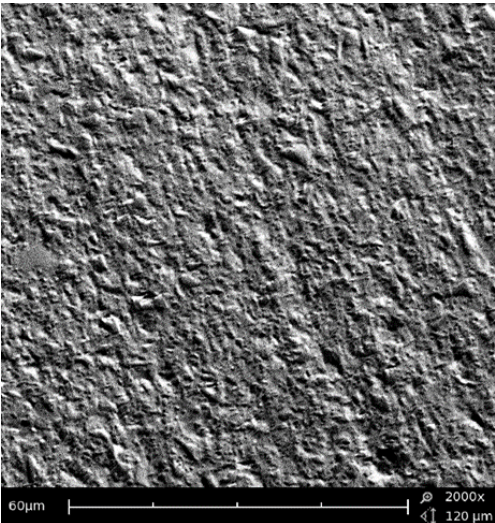
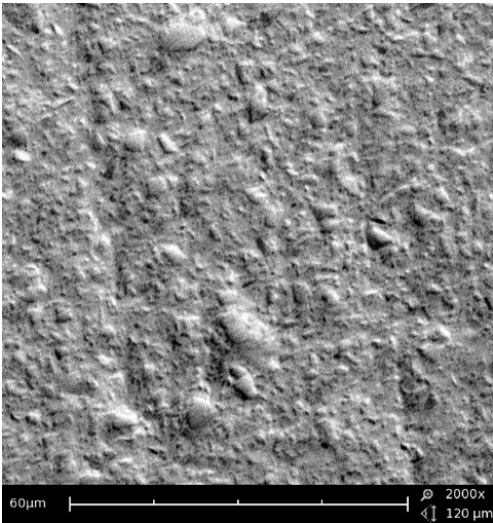
In der nachfolgenden Abbildung 30 sind bei 2000x Vergrößerung rasterelektronenmikroskopische Bilder des Materials VisCalorA2 für die Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  getrennt nach dem VOCO- und NTI-Poliersystem einander gegenübergestellt. Es ist jeweils ein Ausschnitt der polierten Kompositoberfläche ersichtlich mit sichtbaren Politurspuren und freigelegten beziehungsweise zum Teil herausgelösten Füllkörpern. Rein optisch wirkt die Oberfläche für beide Poliersysteme unregelmäßiger im Vergleich zu den Materialien VisCalorbulkA2 und OA2, die Politurspuren sind am deutlichsten zu erkennen und auch der Anteil an herausgelösten Füllkörpern erscheint hier am stärksten. Die Oberfläche der mit dem NTI-Poliersystem polierten Prüfkörper wirkt für  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  glatter und weist ein ebenmäßigeres Erscheinungsbild im Vergleich zu den mit dem VOCO-Polierer polierten Prüfkörpern auf. Die Politurspuren und herausgelösten Füllkörper sind bei VOCO  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  im Vergleich zu den anderen Materialien und Poliergruppen optisch am stärksten ausgeprägt. Bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  wirkt die Oberfläche bei dem NTI-Poliersystem rauer, der Anteil an herausgelösten Füllkörpern wirkt am größten im Vergleich zu dem mit dem VOCO-Polierer polierten Prüfkörper. Bei diesem sind jedoch die freigelegten Prüfkörper deutlicher zu erkennen. Die Oberflächenstruktur für die VOCO-Poliergruppe wirkt mit zunehmender Polymerisationszeit optisch gleichmäßiger, in der NTI-Poliergruppe erscheint sie bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  am unregelmäßigsten und bei  $t_{1Poly}$  am gleichmäßigsten.

**Abbildung 30.VisCalorA2 Rasterelektronenmikroskop 2000x Vergrößerung**

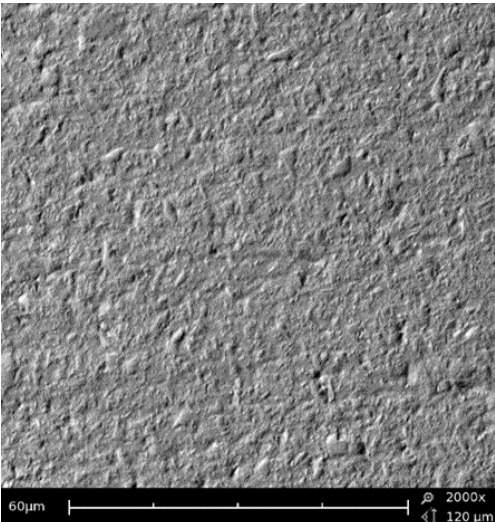
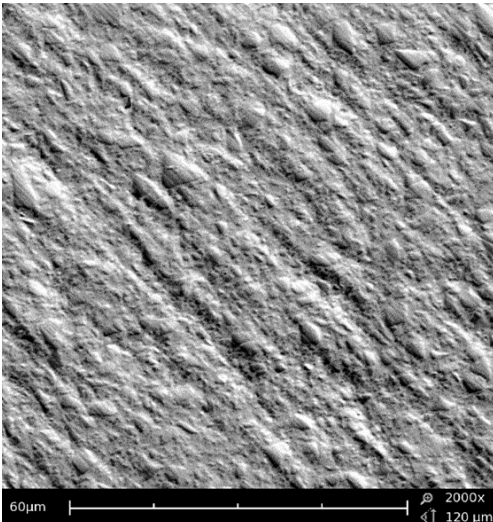
VOCO VisCalorA2

NTI VisCalorA2

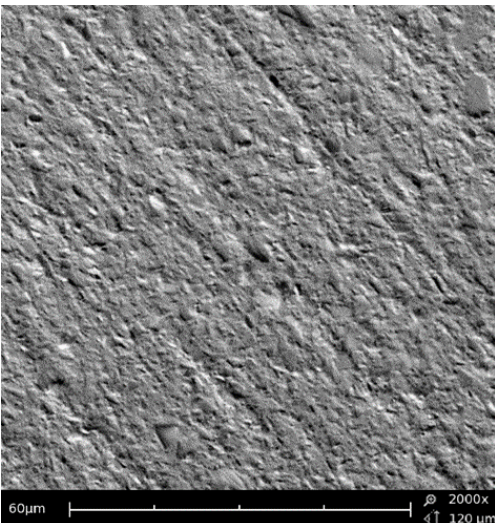
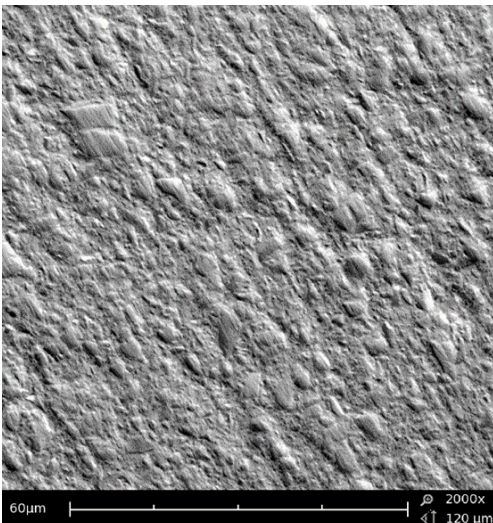
5s



10s

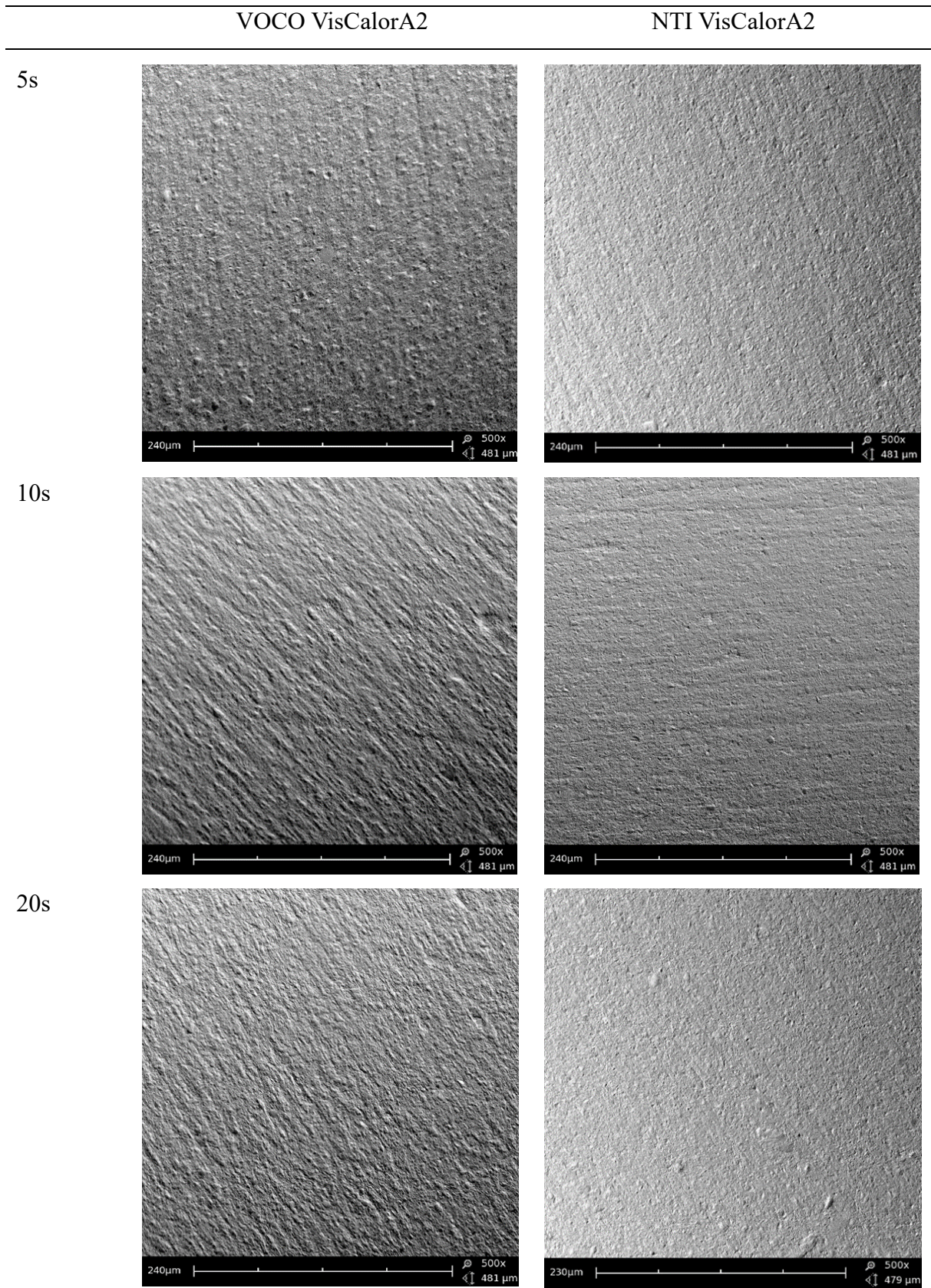


20s



In Abbildung 31 sind bei 500x Vergrößerung rasterelektronenmikroskopische Bilder des Materials VisCalorA2 für die Polymerisationszeiten  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  getrennt nach dem VOCO- und NTI-Poliersystem einander gegenübergestellt. Es ist jeweils ein Ausschnitt der polierten Kompositoberfläche ersichtlich mit sichtbaren Politurspuren, die Füllkörper sind durch die geringere Vergrößerung nicht so detailliert dargestellt wie bei der 2000x Vergrößerung. Die Oberfläche der mit dem NTI-Poliersystem polierten Prüfkörper wirkt glatter und weist ein ebenmäßigeres Erscheinungsbild im Vergleich zu den mit dem VOCO-Polierer polierten Prüfkörpern auf, die Politurspuren sind unauffälliger. Die Oberflächenstruktur für die VOCO-Poliergruppe wirkt für  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  am unregelmäßigsten, hier ist die Struktur einzelner, freigelegter Füllkörper am stärksten zu erkennen, für  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  liegt ein glatteres sehr ähnliches optisches Erscheinungsbild vor. Die Oberfläche der NTI-Prüfkörper weist für  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ ,  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  ein sehr ähnliches, glatteres Erscheinungsbild mit weniger ersichtlichen Politurspuren im Vergleich zu der VOCO-Kontrollgruppe auf.

**Abbildung 31. VisCalorA2 Rasterelektronenmikroskop 500x Vergrößerung**



## **5 Diskussion**

Für eine erfolgreiche Füllungstherapie ist eine gewissenhafte Polymerisation des Komposits unverzichtbar. Dabei kann eine mangelnde Polymerisation mit Dentinhypersensibilitäten, Einbußen bei den mechanischen Eigenschaften, erhöhtem Abrasionsverhalten, geminderter Härte, Füllungsfrakturen, Sekundärkaries und Verfärbungen einhergehen (6). Diese Dissertation beschäftigte sich mit dem Einfluss verschiedener Polymerisationszeiten auf das Politurergebnis und Oberflächeneigenschaften von Kompositen und den Hypothesen, dass das Variieren der Polymerisationsdauer und das Variieren des Poliersystems zu unterschiedlichem Glanz, Rauheit, Härte und Verfärbungsneigung führt. Im Folgenden werden, die der Dissertation zu Grunde liegenden Methoden und Ergebnisse, diskutiert.

### **5.1 Diskussion der Methode**

#### **5.1.1 Auswahl der Materialien**

Als Versuchsmaterialien wurden drei Nano-Hybridkomposite auf Grund ihrer „Thermoviscous-technology“ ausgewählt, da diese eine neue Entwicklung in der Komposittherapie darstellt (1, 84), eine gute Adaption an die Kavitätenwand begünstigt (85, 86) und somit die geläufige „Schnee-pflug-Technik“ (3) vereinfachen kann. Die Komposite unterscheiden sich in ihrer Materialzusammensetzung lediglich in der beigefügten Pigmentmenge (18). Dabei weisen alle drei Materialien mit 83Gew.-% einen gleichen (16, 17) und hohen Füllstoffanteil auf (16, 17, 84), wohingegen sich die meisten Bulk-Fill-Komposite zur Transluzenzerhöhung eine Reduktion des Füllkörperanteils und eine Steigerung der Füllkörpergröße zu Nutze machen (15). Die Durchhärtung der VisCalor Komposite wird jedoch durch die beigesezte Pigmentmenge beeinflusst (18). Mit VisCalorbulkA2 konnte ein Bulk-Fill-Komposit mit einer möglichen Inkrementschichtung von 4mm den zwei herkömmlichen Kompositen VisCalorA2 und dem opaken VisCalorOA2 mit einer Inkrementschichtung von bis zu 2mm gegenübergestellt werden (4). Mit VisCalorA2 und OA2 wurden zwei verschiedene Transluzenzgrade der herkömmlichen VisCalorlinie einander gegenübergestellt, wobei sich das opake VisCalorOA2 besonders zur Schichtung der Dentinschicht eignet (84). Die Schichtdicke wurde für alle Prüfkörper auf 2mm festgelegt, um in den Versuchen eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Kompositen zu gewährleisten. In einer Studie konnte für VisCalorbulk sowohl bei einer Inkrementschichtung von 2 als auch 4mm eine effiziente Aushärtung festgestellt werden (87). Wobei zu beachten ist, dass die Photonen somit in den Versuchen eine geringere Materialstärke im Vergleich zu einer 4mm Kompositschicht durchdringen mussten (15). Bei

dem Erwärmungsvorgang war der VOCO Caps Warmer bedingt durch den gleichen Hersteller auf die VisCalor Produktlinie abgestimmt. Der Caps Warmer erwies sich für den Erwärmungsvorgang genauso geeignet wie der VisCalor Dispenser (88). So konnte ein vereinheitlichter, exakt temperierter Erwärmungsprozess der Versuchsmaterialien gewährleistet und in dieser Hinsicht die gleiche Voraussetzung für die gesamten Prüfkörper geschaffen werden.

### **5.1.2 Auswahl der Prüfkörperform und Herstellung der Prüfkörper**

Die Prüfkörperform wurde in ihrem Ausmaß so gewählt, dass alle geplanten Messvorgänge anstandslos durchgeführt werden konnten und eine einheitliche Form der Prüfkörper resultierte. Dabei entsprach die Tiefe der Prüfkörperform mit 2mm genau der empfohlenen Inkrementschichtung von herkömmlichen Kompositen (13). Die Materialauswahl für die Prüfkörperform fiel auf Silikon. Diese ermöglichte eine komplikationslose Entnahme des Prüfkörpers nach der Herstellung zur Durchführung der weiteren Versuche, bedingt durch die Rückstellkraft und Elastizität der Silikonform (89). Die Temperaturbeständigkeit des Silikons verhinderte eine Verformung der Prüfkörperform während des Applikationsvorgangs des erwärmten Komposits (90). Silikone haben eine hydrophobe Eigenschaft und Rückstände von A- als auch K-Silikonem und Silikonölen können sich negativ auf die Haftkraft von Adhäsiven und Befestigungskompositen auswirken (91). Anders als bei der Situation in situ wurde in den Versuchen kein Adhäsivsystem verwendet, die untersuchte Prüfkörperoberfläche war der Silikonform abgewandt und der Prüfkörper sollte sich gut aus der Prüfkörperform lösen lassen. So konnte dieser Aspekt in den Versuchen vernachlässigt werden. Bei der Applikation des Komposits in die Silikonform wurde auf einen maximal reduzierten Luftblaseneinschluss geachtet, indem die Applikationsspitze der Kompositkapsel während des Applikationsvorgangs im Material verblieb. Zusätzlich soll die „Thermo-viscous-technology“ und die dadurch bedingte gute Adaption des Komposits an die Kavitätenwand die Entstehung von Lufteinschlüssen verhindern (84). Zum Andrücken des Komposits und dessen optimale Adaption in die Prüfkörperform wurde ein gläserner Objektträger verwendet. Dieser wurde zusammen mit dem Komposit auf dem Caps Warmer erwärmt, um eine Temperaturdifferenz zwischen Glas und Komposit zu vermeiden. Dabei ist Glas in seiner Form beständig und es findet keine Wechselwirkung mit anderen Werkstoffen statt (92). Ein Lösen des Objektträgers nach dem Polymerisationsvorgang von der Prüfkörperoberfläche war somit anstandslos möglich. Mit Hilfe des gläsernen Objektträgers entstanden plane Prüfkörper mit einer standardisierten Oberfläche und guter Vergleichsmöglichkeit.

### 5.1.3 Gestaltung des Polymerisationsprozesses

Die in den Versuchen festgelegten Polymerisationszeiträume der halbierten Herstellerempfehlung  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ , der exakten Herstellerempfehlung  $t_{1Poly}$  und der doppelten Herstellerempfehlung  $t_{2Poly}$  gewährleisteten eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Prüfkörpergruppen und Polymerisationszeiten. Dabei beziehen sich die Herstellerangaben bezüglich der empfohlenen Polymerisationszeiten in der Regel auf idealisierte Laborbedingungen (20). Diese unterscheiden sich jedoch von den Voraussetzungen in der Praxis unter anderem durch das Ausmaß der Kavität, den Abstand der Polymerisationslampe zur Kompositoberfläche, bedingt durch die Anatomie des Zahnes und die Tiefe des Kavitätenbodens (7). Alle Prüfkörper wiesen eine 2mm dicke Inkrementschicht auf und bei dem Polymerisationsvorgang bestand nur ein 1mm großer Abstand zwischen Polymerisationslampe und Kompositoberfläche, bedingt durch die Dicke des gläsernen Objektträgers. So lagen in dieser Hinsicht idealisierte Versuchsbedingungen vor. Mit steigender Inkrementschichtung verschlechtert sich die Lichtdurchlässigkeit eines Komposits, während bei dem Polymerisationsprozess eine Transluzenzsteigerung des Komposits unabhängig von der Farbe zu beobachten ist (7, 93). Die Transluzenzsteigerung ermöglicht es den Photonen mit zunehmender Polymerisationszeit mehr in die Tiefe des Komposits vorzudringen (13). Somit konnten mit dem transluzenteren VisCalorbulkaA2, VisCalorA2 und dem opaken VisCalorOA2 unterschiedliche Kompositfarben in dieser Hinsicht näher untersucht werden. Generell ist es für eine erfolgreiche Polymerisation entscheidend, dass Zahnärzte die Polymerisationslampe auf das Komposit abstimmen (20). Dies konnte in den Versuchen unter Verwendung der Satelec Mini L.E.D Lampe mit einer Lichtleistung von  $1100\text{mW}/\text{cm}^2$  gewährleistet werden. Sie erwies sich somit für die Polymerisation der drei getesteten Komposite als geeignet, deren Polymerisationszeitempfehlungen sich auf eine Polymerisationslampe mit einer Lichtleistung von  $\geq 1000\text{mW}/\text{cm}^2$  bezogen (16, 17). Die Verwendung eines Blendschutzes für die Satelec Mini L.E.D Lampe erlaubte eine optische Kontrolle der exakten Lampenpositionierung ohne Versatz auf dem Objektträger, direkt mittig über dem Prüfkörper. So konnte in den Versuchen eine gewissenhafte Polymerisation unter optimalen Bedingungen realisiert werden. Dies ist entscheidend, da die individuelle Handhabung der Polymerisationslampe das Polymerisationsergebnis maßgeblich beeinflusst und eine insuffiziente Energiemenge in schlechteren optischen und mechanischen Eigenschaften des Komposits resultieren kann (20). Der gläserne Objektträger ermöglichte durch seine Lichtdurchlässigkeit die anschließende Polymerisation (29). Durch das Aufdrücken des Objektträgers auf die Kompositoberfläche



wurde entsprechend wie bei dem von einem Matrizenband umgebenden Teil des Komposits die Entstehung einer Sauerstoffinhibitionsschicht vermieden (5, 94, 95). Möglich war dies durch die Kontaktverhinderung der Kompositoberfläche mit dem Luftsauerstoff (13), da diese während dem Polymerisationsvorgang nicht frei zugänglich war, sondern komplett von dem aufgedrückten Objektträger abgedeckt wurde.

#### **5.1.4 Lagerung der Prüfkörper**

Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte nach dem Herstellungsprozess und zwischen den Messungen in lichtundurchlässigen Boxen, um die Lichteinwirkung so gering wie möglich zu halten und die Messergebnisse so wenig wie möglich zu beeinflussen. Dabei konnte ein zusätzlicher Lichteinfall bei der Entnahme der Prüfkörper und während den Messungen nicht komplett vermieden, aber kleinstmöglich gehalten werden.

#### **5.1.5 Gestaltung des Politurprozesses**

Da der verwendete Objektträger die Entstehung einer Sauerstoffinhibitionsschicht verhinderte, musste diese auf der Prüfkörperoberfläche weder mittels Alkohol noch Politur entfernt werden (13). Der Politurprozess wurde durch das Benutzen einer Politurmaschine vereinheitlicht. Das grüne Winkelstück wurde in den metallenen Halter der Politurvorrichtung eingespannt, um eine Positionsänderung während dem Politurvorgang zu verhindern und eine gleiche Ausrichtung des Polierers zur Prüfkörperoberfläche zu garantieren. Dabei wurde ein identisches Anpressgewicht von 150g gewährleistet, indem der Winkelstückhalter mit einem entsprechenden Gegengewicht austariert wurde. Generell ist die Anpresskraft Behandler abhängig und es wird häufig von Herstellern ein maximaler Bereich von 200g oder 2N angegeben (96). Zusätzlich sollte die Anpresskraft auf den Instrumentendurchmesser abgestimmt sein, da in der Regel mit sinkendem Instrumentendurchmesser ebenfalls die Anpresskraft reduziert werden sollte, um ungleichmäßigem Materialabtrag und starker Hitzeentwicklung vorzubeugen (8). Es liegen weder für den VOCO Dimanto Polierer noch für den NTI Unique Polierer genaue Angaben bezüglich der Anpresskraft von Seiten des Herstellers vor. Lediglich für den VOCO Polierer wird zu Politurbeginn eine mäßige Anpresskraft mit Reduzierung für die Hochglanzpolitur empfohlen (26). In den Versuchen wurde die Anpresskraft aber durch das Anpressgewicht von 150g konstant gehalten. Unter der Anpresskraft versteht man die Kraft, die von dem in das Winkelstück eingespannten Aufsatz, dem Winkelstück und der Hand ausgeübt wird (13). In den Versuchen handelte es sich um die Kraft, die der Polierer mit Winkelstück und Winkelstückhalterung ausgeübt hat. Es wurden

zwei Gummipolierer verschiedener Hersteller ausgewählt, die sich sowohl für die Vor- als auch Hochglanzpolitur eignen. So konnten die beiden einstufigen Gummipolierer mit Diamantbestandteil einander gegenübergestellt und der Politurprozess vereinheitlicht werden. Polierer mit Diamantbestandteil bieten sich besonders für die Politur und Erzeugung von ebenen Oberfläche an (8). Dabei ist zu beachten, dass der VOCO Dimanto Polierer den gleichen Hersteller aufweist, wie die getesteten VisCalor Komposite und besonders auf die Politur von hochfesten Nano-Hybridkompositen der neuen Generation ausgelegt ist (27). Der empfohlene Drehzahlbereich des VOCO Dimanto Polierers mit 3000-8000U/min und des NTI Unique Polierers mit 5000-7000U/min überschneidet sich für beide Polierer, sodass in den Versuchen eine generelle Drehzahl von 6000U/min festgelegt wurde. Der vom Hersteller empfohlene Drehzahlbereich sollte immer beachtet werden, um einen hohen Instrumentenverschleiß, Bruch, Überhitzung oder eine Minderung des Politurergebnisses zu verhindern (8, 13). Es erfolgte keine Vorbehandlung der Prüfkörper mittels diamantierten Finierern, dadurch konnte das reine Politurergebnis der diamantierten Gummipolierer betrachtet werden. Außerdem wies die Prüfkörperoberfläche bedingt durch den Anpressvorgang mit der Glasplatte bereits zu Versuchsbeginn eine plane Oberfläche auf. Damit eine bessere Vergleichsmöglichkeit zwischen den beiden Poliergruppen bestand, wurde bei beiden Polierern die große Spitzenform verwendet. Somit wiesen beide Polierer eine ähnliche Geometrie auf, wobei die große Spitze des NTI Unique Polierers etwas größer ausfiel. Die Spitzenform stellt die bevorzugte Poliererformgebung für die in vivo Nutzung dar (13). Dabei ist die Eingrifftiefe eines Gummipolierers auf Grund seiner Elastizität nicht genau definierbar. Der Polierer kann auch nur partiell mit seinen Körnern am Poliervorgang teilhaben, was in einer ebenmäßigen Oberfläche als Politurergebnis resultiert (13). Während dem Politurvorgang erfolgte die Drehung des Prüfkörpers um 60° zur Ausbildung einer deutlich erkennbaren sternförmigen Politurbahn nur nach Augenmaß, somit konnten die 60° lediglich abgeschätzt werden. Während der Politur sollte eine Überhitzung der Kompositoberfläche in jedem Fall vermieden werden, sodass der Politurprozess unter Wasserkühlung erfolgte. Daher wurde in den Versuchen immer unter Wasserkühlung poliert, auch wenn der VOCO Dimanto Polierer mit reduzierter Anpresskraft auch ohne Wasserkühlung verwendbar wäre (26). Für beste Politurergebnisse bieten sich besonders mehrstufige Poliersysteme an (25). In den Versuchen wurden jedoch zwei einstufige Polierer verwendet, um einen Instrumentenwechsel zu vermeiden. Vereinfachte Arbeitsabläufe mit einer Zeitersparnis und einem somit wirtschaftlich positiven Effekt werden zudem von vielen Behandlern gerne angenommen, wobei die Qualität jedoch niemals leiden darf. Der in den Versuchen durchgeführte Politurprozess ist durch die standardisierten

Bedingungen in dieser Form nicht direkt auf die Politur in situ zu übertragen, jedoch lassen sich die nachfolgenden werkstoffkundlichen Messungen genau durchführen und die Prüfkörpergruppen gut untereinander vergleichen. Dabei sollte das Ende des Politurvorganges in situ individuell festgelegt werden, abhängig von dem Tastempfinden des Patienten mit der Zunge (13) und dem optischen Erscheinungsbild der Kompositoberfläche (23). In den Versuchen hingegen wurde der Politurprozess nach einem vorher festgelegten Politurzyklus beendet und dieser Politurzyklus dann für alle Prüfkörpergruppen übernommen, um gleiche Grundvoraussetzungen für alle Prüfkörper zu schaffen.

### **5.1.6 Glanzmessung**

Der Glanzeindruck ist eine optische Eigenschaft, die von dem persönlichen Empfinden abhängt und von Person zu Person unterschiedlich wahrgenommen wird (29). Um vereinheitlichte, genaue, von dem persönlichen Sinneseindruck unabhängige Messwerte zu erreichen, waren Messung mit einem speziellen Glanzmessgerät notwendig. Dazu wurden die Messungen mittels des Zehntner ZGM 1120 durchgeführt, das besonders für Messungen auf kleinen, gekrümmten, und schwer zugänglichen Oberflächen ausgelegt ist (74), und somit für die Messung auf der Prüfkörperoberfläche geeignet war. Zusätzlich wurde aus Puttymasse eine Positionierungshilfe für den V-förmigen Glanzmesskopf des Glanzmessgerätes mit Aussparung für den Prüfkörper modelliert. Diese sorgte für eine identische Positionierung des Glanzmesskopfes mittig über der Prüfkörperoberfläche und fing den Lichteinfall von außen auf den Prüfkörper durch die Einfassung in die Puttyform so gut wie möglich ab. Dadurch war die Ausrichtung der Prüfkörper bei jedem Messvorgang gleich. Der verwendete Messwinkel wurde für alle Prüfkörper auf  $60^\circ$  festgelegt, der besonders für Materialien mit einem seidenmatten Glanz und Glanzwerten zwischen 10-70GU geeignet ist (34). Der Glanz der Prüfkörperoberfläche wurde vorab in den Vorversuchen mit einem Messwinkel von  $60^\circ$  gemessen. Auch die im Hauptversuch ermittelten Glanzmesswerte lagen im mittleren Glanzbereich. In einer anderen Studie hat sich ebenfalls die  $60^\circ$  Messgeometrie zur Messung des Glanzes von Kompositen am besten bewährt (29). Dabei bezogen sich die in diesen Versuchen ermittelten Glanzwerte auf einen festgelegten, standardisierten Politurprozess, der nicht direkt mit einem Politurprozess in situ vergleichbar ist. Durch den standardisierten Ablauf der Messung konnte aber eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Prüfkörpergruppen erzielt werden.

### **5.1.7 Rauheitsmessung**

Generell muss immer ein Ausarbeitungsvorgang der Kompositoberfläche stattfinden und das Politurergebnis einer Füllung steht im direkten Zusammenhang mit der vorliegenden Oberflächenrauheit. Somit besteht ein Zusammenhang zwischen Glanz und Rauheit (23) und beide Oberflächeneigenschaften sollten daher in dieser Dissertation näher betrachtet werden. Die genauere Charakterisierung der Prüfkörperoberfläche erfolgte in diesen Versuchen mit Hilfe des Keyence VK-X 100 Series Laser Mikroskop nach ISO 25178 (80). Dabei wurden die Prüfkörper jeweils so unter dem Mikroskop positioniert, dass die optische Abtastungsfläche des Mikroskops über der zentralen Politurbahn zu liegen kam. Wird die Rauheit mittels optischem Verfahren genauer analysiert, kann die Oberfläche in einem 3D Verfahren analysiert und daraus die 2D-Parameter abgeleitet werden (37). In den Versuchen wurden mit dem Ra-Wert und dem Rz-Wert zwei R-Parameter bestimmt, die den 2D-Parametern zuzuordnen sind. Der arithmetische Mittenrauwert Ra-Wert beschreibt einen Durchschnittswert der gesamten vermessenen Oberfläche bei der zweidimensionalen Oberflächenanalyse und die gemittelte Rautiefe Rz-Wert beschreibt die Gesamthöhe des Profils (13). Da ähnliche Werte bei der Rauheitsmessung nicht bedeuten, dass Oberflächenprofile übereinstimmen (41) und die Bestimmung des Ra-Wertes nur wenig über das Ausmaß der Profilspitzen und Profiltäler aussagt (39), wurden die Messergebnisse zusätzlich um den Rz-Wert ergänzt. Die Messungen mit dem Mikroskop erfolgten nach der kontaktlosen Methode mit kurzweiligem Laserlicht, sodass eine Beschädigung der Prüfkörperoberfläche verhindert wurde, die zu Verfälschungen anderer Messergebnisse führen könnte. Unter anderem sollen die Art des Poliersystems und das verwendete Komposit Einfluss auf die resultierende Rauheit nehmen (44), weswegen diese Oberflächeneigenschaft in den Versuchen für drei Komposite und zwei einstufige Poliersysteme untersucht wurde.

### **5.1.8 Härte**

Die Bestimmung der Martenshärte wurde mittels der Prüfmaschine Zwick Roell Z.25 unter Verwendung eines 10:1 Objektivs und Festlegung der Belastungspunktstandardkraft auf 30N durchgeführt. Die Messung erfolgte mittig über der zentralen Politurbahn des Prüfkörpers. Der pyramidenförmige Eindringkörper der Prüfmaschine wurde für den Messvorgang mit stoßfreier Prüfkraft, unter statischer Kraffteinwirkung mit festgelegter Aufsetz- und Verweilzeit senkrecht auf die Prüfkörperoberfläche aufgebracht. Durch die einheitliche geometrische Form des Eindringkörpers und die klar definierten Belastungsbedingungen lief der Messvorgang für jeden Prüfkörper unter den gleichen Voraussetzungen ab und die Ergebnisse konnten gut

untereinander verglichen werden. Die Bestimmung der Härte erfolgte in den Versuchsreihen erst im Anschluss an die Bestimmung des Glanzes und der Rauheit, da bei der Messung der Abdruck der vickerschen Pyramide der Härtemesseinheit auf der Prüfkörperoberfläche verblieb und die Messergebnisse dadurch hätten beeinflussen werden können. In den Versuchen wurde die Martenshärte bestimmt und die Messergebnisse statistisch ausgewertet. Zusätzlich wurde in dem gleichen Messverfahren ergänzend die Vickershärte bestimmt, indem der optische Abdruck der vickerschen Pyramide vermessen wurde. Dieser war jedoch auf der Prüfkörperoberfläche teilweise nicht genau ersichtlich und somit die optische Festlegung der Eindrucksdiagonalen schwer festzulegen. Daher wurden die Ergebnisse der Vickershärte statistisch nicht weiter ausgewertet. Die Messmethode der Vickershärte ist für alle Materialien geeignet, bietet sich aber besonders für die Beurteilung von Metallen an (13). Die Martenshärte ist ein Tiefenmessverfahren bei dem die Eindringtiefe  $h$  und die einwirkende Prüfkraft  $F$  der Messeinheit für den gesamten Messvorgang aufgezeichnet werden (50). Sie ist besonders gut für die Prüfung an kleinen Materialoberflächen geeignet, was auf die ausgewählte Prüfkörperoberfläche zutrifft (46). Die Martenshärte, die früher auch als Universalhärte bezeichnet wurde, wird anders als die Vickershärte über die Eindringtiefe der Messeinheit festgelegt und nicht als Quotient von aufgebrachter Prüfkraft durch die hinterlassene Abdruckoberfläche der vickerschen Pyramide angegeben. Damit ist die Martenshärte unter anderem unabhängig von der Materialelastizität und von der subjektiven Wahrnehmung (55). Da der Parameter der Polymerisationszeit in den Versuchen variiert wurde und deren Auswirkung auf das Politurergebnis und die Oberflächeneigenschaften von Kompositen untersucht werden sollte, war eine Bestimmung der Härte in diesen Versuchen in der gewählten Reihenfolge unabdingbar.

### **5.1.9 Verfärbungsneigung**

Die beiden Messvorgänge zur Bestimmung der Verfärbungsneigung erfolgten bewusst erst am Ende aller Messungen und auch erst im Anschluss an die Härtemessung. Damit wiesen die Prüfkörper sowohl für die erste Farbmessung vor dem Rotweinbad und als auch für die zweite Farbmessung nach dem Rotweinbad den nicht verhinderbaren Abdruck der vickerschen Pyramide der Härtemesseinheit auf. So besaßen die Prüfkörper für die Farbmessung die gleichen Grundvoraussetzungen und konnten zur Bestimmung der numerischen Farbdifferenz  $\Delta E$  besser miteinander verglichen werden. Die Messung von  $\Delta E$  erfolgte mit dem Minolta Spectrophotometer im  $L^*a^*b^*$ -Farbraum, einem international gängigen Farbraum, der viel Verwendung findet und bei dem das Messergebnis unabhängig von dem verwendeten

Messgerät angegeben werden kann (65). Dabei beschreibt die numerische Farbdifferenz  $\Delta E$  die Abweichung zwischen zwei Farben im  $L^*a^*b^*$ -Farbraum. In diesen Versuchen wurden zunächst die  $L^*a^*b^*$  Werte für jeden Prüfkörper vor dem zweiwöchigen Rotweinbad und dann noch einmal nach dem Rotweinbad bestimmt um daraus  $\Delta E$  ableiten und Rückschlüsse über die Verfärbungsneigung der getesteten Materialien ziehen zu können. Dabei kann die ausgewählte Prüfkörperdicke Einfluss auf die  $L^*a^*b^*$  Koordinaten nehmen (97), die in diesen Versuchen mit 2mm Dicke aber vereinheitlicht wurde und somit zu vernachlässigen ist. Zusätzlich hängt die Farbmessung der Prüfkörper von deren Formgebung ab, zahnförmige Prüfkörper weisen eine Farbdifferenz zu flach gestalteten Prüfkörpern auf (98). Da in diesen Versuchen aber nur die Farbdifferenz der Prüfkörper vor und nach der Lagerung in Rotwein betrachtet wurde und alle Prüfkörper eine flache Formgebung aufwiesen, ist dies zu vernachlässigen. Verfärbungen kommen im Praxisalltag häufig vor und stellen sowohl ästhetisch, als auch klinisch eine Problematik dar (58), daher wurde in diesen Versuchen vor dem Hintergrund der variierten Polymerisationszeiten und Polierer das extrinsische Verfärbungsverhalten der getesteten Kompositen untersucht. Als Lagerungsmedium für die Prüfkörper wurde in den Versuchen Rotwein gewählt, der als stark färbendes Medium gilt (60) und sich daher als besonders geeignet erwies. Dabei nehmen die Oberflächenpolitur und das verwendete Poliersystem Einfluss auf die Verfärbungsneigung von Kompositen (61), weswegen in diesen Versuchen zwei einstufige Poliersysteme unterschiedlicher Hersteller einander gegenübergestellt wurden. Oberflächenrauigkeiten gelten als vorwiegender Auslöser für exogene Verfärbungen von Kompositen (10), daher nahm auch die Bestimmung der Oberflächenrauheit anhand des Ra- und Rz-Wertes einen wichtigen Stellenwert in dieser Dissertation ein.

#### **5.1.10 Rasterelektronenmikroskop**

Im Vergleich zu den anderen Versuchen wurde jeweils nur ein Prüfkörper je Gruppe zusätzlich für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung hergestellt. Diese Art der Darstellung sollte vorwiegend den Zweck erfüllen, zusätzlich einen optischen Eindruck der polierten Prüfkörperoberfläche zu vermitteln, abhängig von dem verwendeten Poliersystem und der verwendeten Polymerisationszeit. So sollten die vorherigen Versuche zusätzlich abgerundet und ergänzt werden. Dabei wurde ein Ausschnitt der Prüfkörperoberfläche betrachtet und es erfolgte eine rein optische Auswertung, die auch abhängig vom persönlichen Sinneseindruck ist. Es wurde eine Übersichtsaufnahme der Prüfkörperoberfläche bei 1000x Vergrößerung angefertigt, um den Aufbau der drei Komposite rein optisch vergleichen zu können. Zusätzlich

erfolgte eine Ergänzung um eine Detailaufnahme bei 2000x Vergrößerung beziehungsweise für VisCalorA2 bei 2000x und 500x Vergrößerung, um die Oberfläche mit ihren Politurspuren und freigelegten und teils herausgelösten Füllkörpern für einen optischen Vergleich gegenüberzustellen.

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

Es wurden die Glanz-, Rauheits-, Härte und Verfärbungsmessergebnisse an Hand der vorliegenden Mittelwerte der einzelnen Prüfkörpervergleichsgruppen, abhängig von den verwendeten Polymerisationszeiten und dem Poliersystem, gegenübergestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse chronologisch nach der entsprechenden Versuchsreihenfolge diskutiert.

### 5.2.1 Glanz

Bei dem Vergleich der Glanzmessergebnisse innerhalb derselben Kompositgruppe, bei gleichem Poliersystem und variierten Polymerisationszeiten, konnte lediglich für VisCalorOA2 in der VOCO-Poliergruppe eine signifikante Veränderung im Glanzmittelwert von  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  auf  $t_{2Poly}$  verzeichnet werden. Es war somit das einzige Material, bei dem eine signifikante Steigerung im Glanzmittelwert mit gesteigener Polymerisationszeit nachgewiesen werden konnte. Dabei befanden sich die signifikanten Ergebnisse beide im mittleren Glanzbereich. Dies kann zum einen daran liegen, dass speziell der VOCO Dimanto Polierer auf die Politur moderner, harter Komposite abgestimmt ist (27) und für VisCalorOA2 eine Polymerisationszeit von  $t_{1Poly}$  empfohlen ist. Zum anderen ist VisCalorOA2 ein opakeres Komposit im Vergleich zu VisCalorA2 und VisCalorbulkA2 und somit weniger lichtdurchlässig.

Bei dem Vergleich innerhalb derselben Kompositgruppe und zwischen den Poliergruppen VOCO und NTI erzielte ebenfalls lediglich VisCalorOA2 in der VOCO-Poliergruppe einen signifikant höheren Glanzmittelwert für  $t_{2Poly}$  im Vergleich zur NTI-Poliergruppe bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und  $t_{1Poly}$ . Auch diese Mittelwerte lagen alle drei im mittleren Glanzbereich. Ein signifikanter Glanzunterschied zwischen den beiden Poliergruppen bei gleicher Polymerisationszeit konnte nicht nachgewiesen werden. Für VisCalorbulkA2 und VisCalorA2 konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Poliergruppen aufgezeichnet werden. Dabei hängt der Glanzeindruck einer Kompositoberfläche auch von dem Ausmaß der Politur ab (29). In diesen Versuchsreihen wurde jedoch jeder Prüfkörper nach dem gleichen, festgelegten Politurvorgang poliert und es erfolgte lediglich eine Variation bedingt durch den verwendeten Polierer. So wiesen alle Prüfkörper in dieser Hinsicht die gleichen Grundvoraussetzungen auf, allerdings

bei besserer Vergleichbarkeit. Generell wird eine Oberfläche als hochglänzend wahrgenommen, wenn eine Glättung aller Oberflächenrauigkeiten stattgefunden hat (23).

Die Struktur des VOCO Dimanto Polierers setzt sich aus einem Silikonbestandteil mit mikrofeinem Diamantpulver bei gewisser Materialsteifigkeit zusammen (27). Für die Hochglanzpolitur sollte am Ende die Anpresskraft und somit die Abtragsleistung des Polierers reduziert werden (26). Diese ist in den Versuchen jedoch konstant geblieben, um eine gute Vergleichbarkeit zu dem NTI-Polierer zu haben, für den eine Reduktion der Anpresskraft nicht explizit empfohlen wird. Dies kann eine Erklärung dafür sein, dass alle signifikanten Ergebnisse für die VOCO-Poliergruppe im mittleren Glanzbereich lagen. Der NTI Unique Polierer weist eine mittlere Körnunggröße auf und soll bei dem Politurvorgang mittels abrasiver, absonderter Polierteile in einer hochglänzenden Kompositoberfläche resultieren (28). Die signifikanten Ergebnisse lagen auch hier im mittleren Glanzbereich, was unter anderem durch den festgelegten Politurzyklus bedingt sein kann.

Der Vergleich zwischen den drei Kompositen und Polymerisationszeiten zeigte für VisCalorOA2 VOCO  $t_{2Poly}$  höhere Glanzmittelwerte als für VisCalorbulKA2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und  $t_{1Poly}$  und deutlich höhere als VisCalorA2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  bis  $t_{2Poly}$ . Auch VisCalorOA2 NTI  $t_{2Poly}$  zeigte signifikant höhere Glanzmittelwerte im Vergleich mit VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und  $t_{1Poly}$ , genau wie VisCalorbulKA2  $t_{2Poly}$  NTI / VOCO im Vergleich mit VisCalorA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  und  $t_{1Poly}$ , beziehungsweise  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  bis  $t_{2Poly}$ . Es befanden sich wieder alle signifikanten Messergebnisse im mittleren Glanzbereich. Dabei erreichte VisCalorA2 als Material mit der geringsten Polymerisationszeitempfehlung unter den signifikanten Messergebnissen niedrigere Glanzmittelwerte als VisCalorbulKA2 und VisCalorOA2. Generell gilt, dass für den Glanzeindruck einer Oberfläche die Materialzusammensetzung des Werkstoffs eine entscheidende Rolle spielt (29). Die Materialzusammensetzung der drei getesteten Materialien ist mit Ausnahme der beigeetzten Pigmentmenge, in Form von Titandioxid, Eisenoxid und Graphit, gleich. Dies soll in keiner Veränderung der Materialeigenschaften resultieren und lediglich die Farbe des Komposits und die Durchhärtung beeinflussen (18). So wurden stärker variierende Materialzusammensetzungen in dieser Dissertation nicht untersucht und unter diesem Aspekt sind keine Aussagen im Hinblick auf die aufgestellten Hypothesen zu treffen. Auch die Größe der enthaltenen Füllkörper, deren Dichte und Formgebung sind für den Glanzeindruck entscheidend und nicht jedes Komposit kann auf Hochglanz poliert werden (29). Die VisCalor-



Komposite sind lichthärtende Nano-Hybridkomposite mit einem hohen Füllstoffgehalt von 83Gew.-% und unterschiedlich großen Füllkörpern. Diese sind in Form von 50nm großen Siliziumdioxid Nanopartikeln und Glaskeramik in Form von 0,7µm großen Minipartikel und 2,0µm großen Midipartikeln an Ba-Al-Silikat enthalten. Damit entsprechen die VisCalor-Komposite in ihrer Zusammensetzung der offiziellen Definition von Nano-Hybridkompositen mit Füllkörpergrößen zwischen 5-100nm und 0,6-1µm. Wobei die Midipartikel des Ba-Al-Silikats mit 2µm etwas größer ausfallen (13). Die heute gängigen Komposite sind Nano-Hybridkomposite und Nanogefüllte, mit guter mechanischen Beschaffenheit (13), die sich bedingt durch ihre Füllkörpergröße auf Spiegelglanz polieren lassen, was den Kompositen mit Mikro- und / oder Nanofüllkörpern vorbehalten ist (23). Dabei sollen die VisCalor-Komposite mit ihrem hohen Füllstoffgehalt und ihrer hohen Materialfestigkeit gut und zeitsparend auf Hochglanzniveau polierbar sein (4), was unter den Versuchsbedingungen nicht erzielt werden konnte. Die gemessenen signifikanten Unterschiede können nicht mit den Füllkörpergrößen und dem Füllkörperanteil in Verbindung gebracht werden, da die VisCalor Komposite sich in diesem Punkt nicht voneinander unterscheiden. In einer Studie zeigten weder die Farben der untersuchten Komposite noch die Komposite untereinander signifikante Unterschiede in der Glanzmessung. Dabei erreichte das Hauptfeld der untersuchten Komposite einen Messwertbereich zwischen 35 und 55GU, was dem mittleren Glanzbereich zuzuordnen ist (29). Heo erhob in seiner Studie für die getesteten Nano- und Nano-Hybrid-Komposite mit einem Messwinkel von 60° Glanzwerte unter 35 bis über 85GU (99). In der Studie von Da Costa et al. empfanden Zahnärzte bei der Betrachtung von Kompositproben mit variiertem Glanz einen Glanzbereich zwischen 40 bis 50GU als klinisch akzeptabel (100). Die ermittelten signifikanten Glanzwerte dieser Dissertation wiesen einen mittleren Glanzbereich zwischen 15 und 44GU auf. Es ist zu beachten, dass sich die Studien in Hinblick auf die verwendeten Materialien und Poliermethoden sowie Messabläufe unterscheiden, sodass die Glanzmessergebnisse nicht direkt miteinander verglichen werden können. Die niedrigsten Glanzmittelwerte dieser Dissertation wurden bei dem Vergleich der Komposite untereinander für VisCalorA2 verzeichnet wurden. VisCalorA2 wies von allen getesteten Materialien die geringste Polymerisationszeitempfehlung auf, wodurch eine Verbindung mit der Durchhärtung des Komposits in Bezug auf die verwendete Polymerisationszeit und den sich darauf zusätzlich auswirkenden Pigmentanteil angenommen werden kann.

In anderen Versuchen konnten die höchsten Glanzwerte für Komposite für den gegen eine Matrize oder eine Glasplatte geschichteten Kompositanteil, bei Vorliegen einer ideal glatten

Oberfläche, verzeichnet werden (30, 99). Dabei führt das Anpressen des gläsernen Objektträgers bei der Prüfkörperherstellung zu einer Einlagerung der Füllkörper in die Matrix (99) und somit zu einem ähnlichen Glanzverhalten der Prüfkörper vor dem Politurvorgang (29, 99). Durch die anschließende Politur erfolgt zum Großteil eine Reduktion der Glanzwerte (30). In den Versuchen dieser Dissertation erfolgte keine Glanzmessung direkt nach der Prüfkörperherstellung, es wurde aber rein optisch betrachtet ebenfalls eine Glanzabnahme der Prüfkörperoberfläche nach dem Politurvorgang festgestellt. Durch die ähnliche Oberflächenbeschaffenheit und Glanzwerte nach dem Anpressvorgang der Glasplatte wiesen die Prüfkörper aber ähnliche Ausgangsbedingungen vor der Politur und anschließender Glanzmessung auf. Generell ließ sich in den Versuchen für keines der getesteten Materialien ein Glanzwert außerhalb des mittleren Glanzbereichs festhalten. Eine Erklärung könnte die Verwendung eines einstufigen Poliersystems, bei festgelegtem Politurzyklus sein. Da sich mehrstufige Poliersysteme aktuell am besten zur Politur von Kompositoberflächen eignen und die besseren Politurergebnisse erzielen (24, 25). Dennis et al. beobachteten, dass die Prüfkörper, die mit einem zweistufigen Poliersystem poliert wurden, höhere Glanzwerte erzielten im Vergleich zu denen, die mit einem mehrstufigen Poliersystem poliert wurden. Aber auch hier zeigte eines der beiden verwendeten einstufigen Poliersysteme die niedrigsten Glanzwerte (101). In den Versuchen wurde die Prüfkörperoberfläche nicht zu Beginn mittels Diamantfinierer finiert, sondern ausschließlich mit dem einstufigen Gummipolierer bei festgelegtem Politurzyklus poliert. In der Praxis spielt jedoch für die Beendigung des Ausarbeitungs- und Politurvorganges einer Kompositfüllung die Begutachtung der Füllung (23) und das Empfinden des Patienten eine Rolle (13). So kann es sein, dass noch einmal nachpoliert werden muss, was in den Versuchen nicht erfolgte. Zusätzlich fand für den VOCO Dimanto Polierer keine Reduktion der Anpresskraft statt, was vom Hersteller für die Hochglanzpolitur explizit empfohlen wird (26). Zovko et al. beobachteten, dass sich die Glanzwerte der Kompositproben über die Zeit reduzierten und sich zusätzlich durch die Lagerung in säuerlichen Lösungen verändern können (102). Dies kann auch interessant sein in Bezug auf die Lagerung der verschiedenen Prüfkörpergruppen in Rotwein, eine erneute Glanzmessung nach dem zweiwöchigen Rotweinbad wurde allerdings in den Versuchen nicht durchgeführt. Insgesamt ließ es sich mit den Versuchen dieser Dissertation nicht belegen, dass eine Variation der Polymerisationszeit und des Poliersystems in jedem Fall zu einer signifikanten Veränderung im Glanzmittelwert führt.

### 5.2.2 Rauheit (Ra- und Rz-Wert)

Für den arithmetischen Mittenrauwert Ra konnten bei dem Vergleich von gleichem Komposit, Poliersystem und variiertes Polymerisationszeit lediglich in der NTI-Poliergruppe signifikante Unterschiede verzeichnet werden. Dabei wurde für VisCalorOA2 eine signifikante Steigerung im Ra-Wert und der Rauheit mit gesteigelter Polymerisationszeit von  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  auf  $t_{2Poly}$  notiert. Dies fiel für VisCalorA2 entgegengesetzt aus, es wurde eine Abnahme im Ra-Wert und somit der Rauheit von  $t_{1Poly}$  auf  $t_{2Poly}$  beobachtet. Die Komposite unterschieden sich mit Ausnahme der beigefügten Pigmentmenge nicht in ihrer Zusammensetzung, sodass der Füllkörperanteil, deren Formgebung und Größe hier nicht für einen Unterschied verantwortlich sein konnten. Nur die empfohlene Polymerisationszeit wird für VisCalorA2 halb solange angegeben, wie für VisCalorOA2. Der arithmetische Mittenrauwert Ra hat jedoch wenig Aussagekraft in Bezug auf das genaue Ausmaß der Profilspitzen und Profiltäler einer Prüfkörperoberfläche (39), da es sich um einen Durchschnittswert aus den Absolutwerten von Tälern und Spitzen einer Einzelmesstrecke handelt (35). Somit kann ein gleicher Ra-Wert in unterschiedlichen Rauheitsprofilen resultieren, sodass zusätzlich der Rz-Parameter erhoben wurde.

Eine signifikante Veränderung im Rz- Mittelwert war im Gegensatz zum Ra-Wert lediglich für die VOCO-Poliergruppe zu verzeichnen, für VisCalorA2 wurde eine signifikante Steigerung für den Rz-Wert und somit der Rauheit bei gesteigerter Polymerisationszeit des Materials aufgezeichnet, was gegensätzlich zu der signifikanten Veränderung im Ra-Wert für VisCalorA2 NTI ist. Die Ergebnisse bezogen sich jedoch auf unterschiedliche Vergleiche der Polymerisationszeiten und Poliergruppen, sodass die Rauheitsparameter in dieser Hinsicht nicht direkt verglichen werden konnten. Sowohl die Ra-Messung als auch die Rz-Messung zeigten keine signifikante Veränderung in der VOCO-Gruppe bei VisCalorbulka2 und VisCalorOA2 und in der NTI-Gruppe bei VisCalorbulka2. Es konnte nicht gezeigt werden, dass eine Variation des Komposits, der Polymerisationszeit und des Poliersystems immer zu einer signifikanten Veränderung des arithmetischen Mittenrauwerths und der gemittelten Rautiefe Rz führt. Dabei ging eine gesteigerte Polymerisationszeit des Komposits nicht automatisch mit einer Abnahme des arithmetischen Mittenrauwerths und der gemittelten Rautiefe einher. Es scheinen sowohl das verwendete Material, die Polymerisationszeit, als auch das verwendete Poliersystem einen Einfluss auf die Oberflächenparameter zu nehmen. Wobei die Verwendung des gleichen Poliersystems hier nicht automatisch zu einem gleichen Rauheitsverhalten der Prüfkörperoberfläche führte. Auch St-Pierre et al. konnten für

verschiedene Komposite unter Verwendung desselben Poliersystems nicht immer ein ähnliches Politurergebnis erzielen (103).

Bei dem Vergleich innerhalb derselben Kompositgruppe und zwischen den einstufigen Polierern VOCO und NTI, konnte für VisCalorOA2 in der VOCO-Poliergruppe ein signifikant niedriger Ra-Mittelwert für  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  im Vergleich zu NTI  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  erreicht werden. Dies gilt ebenfalls für VisCalorbulka2 bei  $t_{1Poly}$ . Auch für VisCalorA2 zeigte der direkte Vergleich zwischen den Poliergruppen bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  für NTI einen signifikant höheren Ra-Mittelwert als für VOCO, bei  $t_{1Poly}$  sogar im Vergleich zu sämtlichen Polymerisationszeiten der entsprechenden VOCO-Gruppe. Dabei ist zu beachten, dass eine Oberfläche umso glatter wirkt, je niedriger der Messwert für den Ra-Parameter ausfällt (38). Somit erreichten unter den signifikanten Vergleichsgruppen die Prüfkörper der VOCO-Poliergruppen niedrigere Ra-Mittelwerte und somit eine niedrigere Rauheit als die der NTI-Poliergruppen. Hierfür kann eine Begründung der übereinstimmende Hersteller zwischen dem Dimanto Polierer und VisCalor sein, da eine Abstimmung von Poliersystem und Komposit bezüglich des Herstellers mit einer niedrigeren Oberflächenrauheit einhergehen kann (104). Zusätzlich besitzt der VOCO Dimanto Polierer mikrofeines Diamantpulver als Schleifmittel, wohingegen der NTI Unique Polierer eine mittlere Körnung aufweist (26, 28). Dabei wirkt sich der Diamantbestandteil besonders positiv auf die Oberflächenrauheit aus und ist Poliersystemen mit Aluminiumoxid- oder Siliziumkarbidbestandteil vorzuziehen (105). Im Rz-Mittelwert konnte lediglich VisCalorA2 einen signifikanten Unterschied erzielen, der für die NTI-Poliergruppe eine höhere Rauheit aufzeigte und mit der gleichen Tendenz wie für den Ra-Wert ausfiel. Somit scheint das verwendete Poliersystem einen Einfluss auf die erzielte Oberflächenrauheit zu nehmen.

Die erhobenen Rauheitsparameter zeigten Unterschiede bei dem Vergleich zwischen den verschiedenen Kompositmaterialien, Poliergruppen und Polymerisationszeiten. VisCalorbulka2 NTI wies unter den gemessenen signifikanten Werten höhere Ra-Mittelwerte und damit eine stärkere Rauheit auf als VisCalorOA2 VOCO und VisCalorA2 VOCO / NTI und ähnliche zu VisCalorOA2 NTI. VisCalorbulka2 VOCO wies ebenfalls einen höheren Ra-Mittelwert als VisCalorA2 VOCO auf, jedoch im Vergleich mit VisCalorA2 NTI einen niedrigeren Ra-Mittelwert. Gömleksiz et al. zeichneten für das untersuchte Bulk-Fill-Komposit höhere Ra-Werte als für die beiden Nanokomposite auf (105). In dieser Dissertation traf dies nicht generell auf das Bulk-Fill-Komposit zu, von der Tendenz her wurde dies aber am stärksten in der NTI-Poliergruppe beobachtet. Dahingegen konnten Babina et al. nur für das Poliersystem

einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit feststellen, nicht jedoch für die Kompositart (106). Die signifikanten Vergleiche mit VisCalorOA2 VOCO / NTI, zeigten für VisCalorA2 NTI höhere Ra-Mittelwerte und für VisCalorA2 VOCO niedrigere Ra-Mittelwerte auf. Somit scheinen sowohl das Material der Prüfkörper, das sich aber mit Ausnahme der beigesetzten Pigmentmenge und der vom Hersteller empfohlenen Polymerisationszeit nicht unterscheidet, als auch das verwendete Poliersystem Einfluss auf die resultierenden Ra-Mittelwerte zu nehmen. Auch hier zeigte der VOCO Dimanto Polierer eine Tendenz zu niedrigeren Ra-Werten im Vergleich zum NTI Unique Polierer und unterstrich somit das Ergebnis aus dem Vergleich zwischen den beiden Poliersystemen bei gleichem Komposit. Bei den Rz-Werten zeigten VisCalorbulkA2 VOCO / NTI unter den signifikanten Ergebnissen höhere Mittelwerte und damit eine stärkere Rauheit als VisCalorA2 VOCO und VisCalorOA2 NTI / VOCO. Dabei gab es Überschneidungen mit den signifikanten Ergebnissen im Ra-Mittelwert, so wiesen VisCalorbulkA2 NTI und VOCO höhere Mittelwerte und damit eine höhere Rauheit auf als VisCalorA2 VOCO. Weitere Überschneidungen gab es unter den Mehrfachvergleichen nicht, da sich unterschiedliche Vergleichsgruppen signifikant zeigten, sodass kein weiterer Abgleich zwischen den Ergebnissen der Ra- und Rz-Werte stattfinden konnte. Generell lagen für den Ra-Wert mehr signifikante Werte als für die Rz-Messung vor, obwohl für eine aussagekräftigere Beurteilung der Rauheit beide Parameter zusammen ausgewertet werden sollten.

Hornung bezog sich unter anderem als Orientierungswert für den arithmetischen Mittenrauwert einer optimal polierten Kompositoberfläche auf die Studienergebnisse von Willems et al. (1991), Jones et al. (2004) und Bollen et al. (1997), die für den Zahnschmelz einen Ra-Wert zwischen  $0,64 \pm 0,25\mu\text{m}$  erhoben. Trotzdem überschritten die in seiner klinischen Studie erhobenen Ra-Werte mit 0,99 bis  $1,11\mu\text{m}$  diesen Orientierungswert. Die Rz-Werte lagen zwischen  $8,32\mu\text{m}$  bis  $9,13\mu\text{m}$  und unterstrichen die Ergebnisse des Ra-Parameters (41). Dahingegen bezog sich Langwieder in seiner in vitro Studie auf einen Orientierungswert zwischen  $0,1-0,2\mu\text{m}$ , den seine erhobenen Ra-Werte für getestete Verblendkomposite zum Großteil initial als auch nach erneuter Politur überstiegen (63). In einer in vitro Studie von Karam Kass lagen die Ra-Werte für die getesteten Komposite in einem Bereich zwischen  $0,063-0,143\mu\text{m}$  und die Rz-Werte zwischen  $0,609-1,151\mu\text{m}$  (42). Insgesamt lagen alle Ra-Werte dieser Dissertation in einem Bereich zwischen  $4,10-7,86\mu\text{m}$ . Dabei ist zu beachten, dass in den Versuchen auf eine kontaktlose Messmethode mit Hilfe von Licht zurückgegriffen wurde. Diese bewirkt für den Ra- und den Rz-Wert einen Messunterschied um eine Zehnerpotenz, sodass die

Messwerte gegenüber den manuellen Messungen um ein Zehnfaches höher ausfallen. Demnach fällt der Unterschied zwischen den aufgeführten Orientierungswerten geringer aus, als es zunächst von den Werten her scheint. Die Messwerte lagen somit zum Teil unter und zum Teil über dem für den Zahnschmelz erhobenen Ra-Wert von  $0,64 \pm 0,25 \mu\text{m}$ . Der Orientierungswert von  $0,1-0,2 \mu\text{m}$  wurde in den Versuchen überschritten. Die erhobenen Rz-Werte lagen zwischen  $56,89-72,67 \mu\text{m}$ . Sie fielen somit geringer aus als die in der Studie von Hornung ermittelten Messwerte, aber deutlich höher als die in der Studie von Karam Kass erhobenen Werte. Eine Erklärung für erhöhte Rauheitswerte ist das für jeden Prüfkörper genau festgelegte Schema des Politurzyklus mittels einstufigem Poliersystem. Denn nach aktuellem Stand ist mehrstufigen Poliersystemen gegenüber einstufigen der Vorzug zu gewähren (24). Vorteilhaft auf die Oberflächenrauheit des Komposits kann sich dabei ein gründlicher Finiervorgang auswirken, der sich vor allem bei einstufigen Poliersystemen bewährt hat (8). Die Prüfkörper wurden jedoch nicht finiert, sondern mit Hilfe des VOCO Dimanto- oder des NTI Unique Polierers poliert, um einen Instrumentenwechsel und einen ungleichmäßigen Abtrag eines in die Politurvorrichtung eingespannten Finierinstruments zu vermeiden. Ebenso wurde die Anpresskraft der beiden Polierer konstant gehalten, obwohl für den VOCO Dimanto Polierer laut Herstellerempfehlung für die Hochglanzpolitur eine Reduktion der Anpresskraft empfohlen wird (26). Der NTI Unique Polierer wurde zur besseren Vergleichbarkeit der Poliergruppen, wie der VOCO Dimanto Polierer, bei  $6000 \text{U}/\text{min}$  betrieben, somit wurde der vom Hersteller empfohlene Drehzahlbereich eingehalten. Auch die Flexibilität, Härte und Korngröße des verwendeten Polierers können zusätzlich die erzielbare Oberflächenrauheit der Prüfkörperoberfläche beeinflussen (63). Wobei die Schleifkörper durch ihre Anzahl, Struktur und Verteilung die Effizienz des Polierers beeinflussen (8). Seitens der beiden Hersteller VOCO und NTI sind darüber jedoch nur unzureichende Informationen veröffentlicht. Für den NTI Unique Polierer werden die diamantenen Schleifkörper mit einer mittleren Körnung angegeben, für den VOCO Dimanto Polierer wird das den Silikonpolierer durchsetzende Schleifmittel Diamant als mikrofein beschrieben. Die Politur erfolgte für beide Polierer unter stetiger Wasserkühlung, was in geringeren Rauheitswerten im Vergleich zu einer trockenen Politur resultiert (107). Das Politurergebnis des VOCO Dimanto Polierers wird nach Herstellerangaben für vier getestete Komposite mit Ra-Werten annähernd zwischen  $0,8-1,35 \mu\text{m}$  angegeben (27). Nähere Angabe zum genauen Ablauf dieser Datenerhebung und die verwendete Messmethode sind jedoch nicht erläutert. Dieser Bereich wurde von denen in dieser Dissertation erhobenen Werten unterschritten, überstieg aber auch den maximal empfohlenen Ra-Wert von  $0,2 \mu\text{m}$  (8). Dabei ist auch zu beachten, dass die Ergebnisse von den jeweils in den Studien verwendeten

Materialien, Politurverfahren, Studiendesigns und Messinstrumenten abhängig sind, sodass ein direkter Vergleich der Versuchsergebnisse nicht möglich ist. In dieser Dissertation entfiel die optische Betrachtung der Prüfkörperoberfläche als Entscheidungsmaßstab darüber, ob eine Verlängerung des Politurprozesses angeschlossen werden sollte. Außerdem wurde das persönliche Tastempfinden des Patienten als Qualitätsmerkmal des Politurergebnisses außer Acht gelassen, das Rauheiten in einem Bereich zwischen  $0,3\text{-}0,5\mu\text{m}$  wahrnehmen kann (13). Somit überschritten alle ermittelten Versuchsergebnisse dieser Dissertation den maximalen Grenzbereich des Ra-Wertes von  $0,2\mu\text{m}$  (8), allerdings sind die Ergebnisse als klinisch akzeptabel einzuordnen. Generell kann eine erhöhte Oberflächenrauheit klinisch unter anderem mit einer zunehmenden Plaqueakkumulation einhergehen (43). Da der Glanzeindruck an eine möglichst glatte Oberfläche gebunden ist, die eine vorwiegend gerichtete Lichtreflexion ermöglicht (29), besteht ein Zusammenhang zwischen dem Glanzeindruck und der vorliegenden Oberflächenrauheit. Dabei ist die Dauer bis zum wahrnehmbaren Glanz der Kompositoberfläche abhängig von dem verwendeten Poliersystem und Komposit und deren gegenseitiger Beeinflussung (106). Im Vergleich zu den signifikanten Werten der Glanzmessung zeigten sich bei den Mehrfachvergleichen innerhalb derselben Kompositgruppe bei gleichem Poliersystem und variiertes Polymerisationszeit und zwischen den Poliergruppen VOCO und NTI nicht dieselben Prüfkörpergruppen signifikant. So konnte der Zusammenhang zwischen Glanz und gemittelter Rautiefe Rz und arithmetischem Mittenrauwert Ra hier nicht näher analysiert werden. Bei dem Vergleich zwischen den verschiedenen Kompositmaterialien, Poliergruppen und Polymerisationszeiten wies der signifikante Vergleich für VisCalorOA2 VOCO  $t_{2Poly}$  einen höheren Glanzmittelwert und für VisCalorbulka2 NTI  $t_{1Poly}$  einen höheren Ra-Mittelwert auf. Dies bekräftigt den Zusammenhang zwischen Glanzwahrnehmung und Oberflächenrauheit, wobei eine Oberfläche umso glatter erscheint, je niedriger ihre Rauheit ist. Allerdings wiesen die anderen Überschneidungen der Ergebnisse der Mehrfachvergleiche zwischen den signifikanten Vergleichsgruppen einen Widerspruch zwischen Glanzwahrnehmung und Oberflächenrauheit auf. Der Rz-Wert fiel für VisCalorbulka2 VOCO  $t_{2Poly}$  höher aus im Vergleich zu VisCalorOA2 VOCO  $t_{2Poly}$ , wobei der Glanzmittelwert niedriger ausfiel und somit ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Glanz und Rauheit aufzeigte. Zwischen den anderen signifikanten Vergleichsgruppen der Mehrfachvergleiche waren nicht die gleichen Prüfkörpergruppen signifikant, sodass keine weiteren Aussagen über den Zusammenhang zwischen Ra-Wert, Rz-Wert und den Glanzmittelwert getroffen werden konnten. Die Pearson Korrelation zeigte für den Ra- und Rz-

Wert eine stark positive Korrelation und somit einen positiv linearen Zusammenhang zwischen den beiden Variablen der Rauheit auf. Sodass hohe / (niedrigere) Werte bei dem einen Rauheitsparameter mit hohen / (niedrigeren) Rauheitswerten des anderen Parameters einhergehen. Für den Ra-Wert zeigten sich zusätzlich schwach positive Korrelationen mit dem Glanz und der Härte und somit ebenfalls ein positiv linearer Zusammenhang auf. Dadurch wird auch ein Gegensatz zwischen Glanzwahrnehmung und Ra-Wert festgestellt, der aber damit zusammenhängen kann, dass jeweils nur ein kleiner Teil der Prüfkörperoberfläche für die Erhebung des Ra-Parameters vermessen wurde. Für den Rz-Wert konnte hingegen kein linearer Zusammenhang mit dem Glanz und der Härte nachgewiesen werden. Sowohl für den Ra-Wert als auch für den Rz-Wert konnte eine moderat negative Korrelation mit  $\Delta E$  und somit ein negativ linearer Zusammenhang verzeichnet werden, der ebenfalls einen Widerspruch zwischen Rauheit und  $\Delta E$  aufzeigt. Dabei ist zu beachten, dass der Ra-Wert alleine eine geringe Aussagekraft besitzt und pro Prüfkörper nur ein Messwert für den Ra-Wert und den Rz-Wert aufgezeichnet wurde und nur ein begrenzter Messabschnitt der Prüfkörperoberfläche betrachtet wurde. Jeder Prüfkörper wurde zwar so ausgerichtet, dass der Messsensor optisch mittig über der zentralen Politurbahn des Prüfkörpers zu liegen kam, was ebenfalls auf die Glanzmessung und Farbmessung zutrifft. Ein absolut identischer Messbereich für die Messung des Glanzes und der Rauheit konnte jedoch nicht gewährleistet werden. Das Messfeld für die Farbmessung betrug 3mm, wohingegen das Messfeld für die Rauheitsmessung eine Breite von ca. 2500 $\mu\text{m}$  und eine Höhe von ca. 1900 $\mu\text{m}$  aufwies.

### **5.2.3 Härte**

Bei dem Vergleich zwischen demselben Komposit, gleichem Poliersystem und variiertes Polymerisationszeit konnten in der VOCO- und NTI-Poliergruppe für VisCalorOA2 signifikante Steigerungen im Härtemittelwert mit zunehmender Polymerisationszeit festgehalten werden. Dahingegen konnten für VisCalorbulka2 und VisCalorA2 keine signifikanten Unterschiede aufgezeichnet werden. Während dem Polymerisationsvorgang wurde die Polymerisationslampe direkt auf der Glasplatte über der Prüfkörperoberfläche aufgesetzt. So lag ein möglichst geringer, und für jeden Prüfkörper gleicher Abstand des Lichtaustrittsfensters zur Prüfkörperoberfläche vor. Dadurch erfolgte die Polymerisation in dieser Hinsicht unter optimalen Bedingungen. Eine Entfernung der Polymerisationslampe zur Kompositoberfläche von 6mm kann zu einer Reduktion der Bestrahlungsstärke von bis zu 50% führen, was durch einen gesteigerten Abstand nochmal zunehmen kann (6). Somit können die Ergebnisse nicht direkt auf die Situation in situ übertragen werden, da sie in Bezug auf den



Abstand zwischen der Polymerisationslampe und der zu polymerisierende Kompositoberfläche unter optimalen Laborbedingungen hergestellt wurden. Unter anderem beeinflussen die Kompositfarbe und die Dicke der Inkrementschicht die Mikrohärtung eines Komposits (108). Es ist zu beachten, dass VisCalorOA2 ein opakes Komposit und damit weniger lichtundurchlässig als VisCalorbulkA2 und VisCalorA2 ist. Verantwortlich ist die beigefügte Pigmentmenge, die die Durchhärtung und Farbe der VisCalor Materialien bestimmt (18). Eine Erklärung ist hierfür der Zusammenhang zwischen der Durchhärtungstiefe und der Opazität eines Komposits. Es gilt je opaker und somit dunkler das Komposit ist, umso niedriger ist die resultierende Durchhärtungstiefe (6). Das erklärt auch die von dem Hersteller empfohlene Polymerisationszeit von 10s für VisCalorA2 und von 20s für VisCalorOA2. Denn im Laufe des Polymerisationsprozesses findet in der Regel eine Steigerung der Transluzenz des Komposits bedingt durch die Umwandlung von Monomeren in Polymere statt, sodass mit zunehmender Belichtungszeit das Licht in tiefere Kompositschichten als zu Polymerisationsbeginn vordringen kann. Somit kann eine verkürzte Polymerisationszeit mit geminderten mechanischen Eigenschaften einhergehen (7). Yang et al. stellten für VisCalor eine Zunahme der oberflächlichen Vickershärte bei einer Polymerisationszeitverlängerung von 20 auf 40s fest, wobei für 20s ebenfalls eine effiziente Aushärtung aufgezeichnet wurde. Jedoch wird nicht genau darauf eingegangen, welche VisCalor Kompositfarbe dabei untersucht wurde (109). Obwohl VisCalorbulkA2 mit einer Polymerisationszeitempfehlung von 20s in Inkrementen bis 4mm polymerisiert werden kann, wurde die Inkrementschicht in diesen Versuchen auf 2mm reduziert. So musste das Licht der Polymerisationslampe hier eine weniger tiefe Inkrementschicht durchdringen, was die Versuchsergebnisse beeinflusst haben kann. Dabei stellten Bilgili Can et al. für VisCalorbulk bei vorheriger Erwärmung auf 68°C bei 2 sowie 4mm Inkrementschichtung eine effiziente Aushärtung fest (87). Unter anderem nimmt auch die Prüfkörperdicke Einfluss auf die Lichtdurchlässigkeit eines Komposits. Par et al. konnten für die getesteten Bulk-Fill-Komposite für eine 2mm Inkrementschichtung im Vergleich zu einer von 4mm eine verringerte Zeit bis zur vollständigen Polymerisation beobachten (110).

Bei dem Vergleich innerhalb derselben Kompositgruppe und zwischen den Poliergruppen VOCO und NTI wurde ebenfalls nur für das opake VisCalorOA2 eine signifikante Veränderung bei gesteigerter Polymerisationszeit festgestellt. VisCalorOA2 VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  zeigte einen signifikant niedrigeren Härtemittelwert als NTI  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$ , was beim umgekehrten Vergleich zwischen den Poliergruppen ebenfalls galt. Somit scheint das Poliersystem keinen

Einfluss auf die Härteentwicklung zu nehmen, jedoch zeigte sich ebenfalls, dass eine verkürzte Polymerisationszeit in geringeren Härtemittelwerten für das opake Komposit resultierte.

Bei dem Vergleich zwischen den drei getesteten Kompositen und variierten Polymerisationszeiten konnte kein signifikanter Härteunterschied bei gleicher Polymerisationsvoraussetzung verzeichnet werden. Es konnten nur signifikante Ergebnisse zwischen den drei Materialien bei verschiedenen Polymerisationsvoraussetzungen erzielt werden. Dabei erreichten materialunabhängig im direkten Vergleich die Prüfkörper mit der gesteigerten Polymerisationszeit einen signifikant höheren Härtemittelwert. Die bei dem Polymerisationsprozess auf das Komposit entsandte Energiedichte (E) belegt die Bedeutung einer adäquaten Polymerisation, da sie das Produkt aus der Polymerisationsdauer in Sekunden und der Lichtleistung der verwendeten Polymerisationslampe ist (20). Eine unzureichende Energiedichte resultiert dabei in einer unzureichenden Vernetzung der Monomermatrix (6).

Somit wird ein Zusammenhang zwischen Härte und Polymerisationszeit aufgezeigt, was unter anderem durch die Aktivierung des Fotoinitiatorsystems erklärt werden kann. Alle drei VisCalor Komposite enthalten als Typ-2-Fotoinitiator die Kombination von Campherchinon und Amin. Dabei besitzt CQ ein Absorptionsspektrum zwischen 360-550nm mit einer maximalen Absorption bei 468nm (13). Die empfohlene Polymerisationszeitempfehlung bezog sich dabei auf eine Lichtleistung von  $\geq 1000 \text{mW/cm}^2$ . Somit war die in den Versuchen verwendete Satelec Mini L.E.D Lampe mit blauem Licht, einer Lichtleistung von  $1100 \text{mW/cm}^2$  und einem Wellenlängenbereich zwischen 420nm bis 480nm auf das Spektrum des enthaltenen Fotoinitiators abgestimmt (72). Dadurch konnte in den Versuchen eine erfolgreiche Aktivierung des Fotoinitiators und seine Überführung in den angeregten Zustand gewährleistet werden, was für eine erfolgreiche Polymerisation mit hohem Polymerisationsgrad, genauso wie die Farbentfaltung des jeweiligen Komposits unabdingbar ist. So wurden in dieser Hinsicht optimalen Bedingungen für den Polymerisationsstart geschaffen. Es ist jedoch zu beachten, dass eine Aktivierung von CQ beziehungsweise die Anzahl des aktivierten CQ von der Polymerisationszeit und der Lichtleistung der Polymerisationslampe abhängig ist. Eine verkürzte Polymerisationszeit kann mit einer größeren Anzahl an nichtreagiertem CQ, vermindertem Polymerisationsgrad und nachteiligen mechanischen, farblichen und zytotoxischen Eigenschaften einhergehen (13). Zusätzlich wird die Zahl der aktivierten Fotoinitiatoren noch durch den vom Hersteller festgelegten Anteil an Fotoinitiatoren im Komposit beeinflusst (7). Diesbezüglich liegen aber für die VisCalor Komposite keine Angaben vor. Dadurch, dass laut Herstellerangaben aber eine nahezu identische Zusammensetzung für

die VisCalor Komposite, mit Ausnahme der Pigmentmenge, angegeben wird, wird diese als übereinstimmend angenommen. Somit kann die enthaltene Fotoinitiatormenge keine Erklärung für die unterschiedlichen signifikanten Ergebnisse sein. Die VisCalor Komposite enthalten unter anderem alle als Füllkörper Siliziumdioxid mit einer Größe von 50nm. Dieses liegt mit seiner geringen Füllkörpergröße unterhalb des Wellenbereichs des sichtbaren Lichtes zwischen 380-780nm. Es erhöht somit die Transluzenz der Komposite, da solch kleine Füllkörper einfallendes Licht weder streuen noch absorbieren. Im Allgemeinen wirkt sich der Füllstoffgehalt eines Komposits auf viele Faktoren, wie zum Beispiel die Härte, Farbe und Transluzenz aus. Dabei resultiert ein reduzierter Füllstoffgehalt in einem hohen Monomergehalt und mangelnden mechanischen Eigenschaften (13). Mit 83Gew.-% weisen die VisCalor Komposite jedoch einen hohen Füllstoffgehalt auf. Eine erfolgreiche Polymerisation ist auch an das Verhältnis von dem Brechungsindex zwischen der organischen Matrix und den Füllkörpern gebunden, diese sollten sich nicht groß voneinander unterscheiden. Die Grenzfläche zwischen Füllkörpern und Matrix eines Komposits und der vorliegende Brechungsindex beeinflussen die Reflexion des in das Komposit eindringenden Lichts. Der Grad der Absorption des eindringenden Lichts wird durch die beigeetzte Pigmentmenge beeinflusst. Dabei sollten Absorption und Reflexion möglichst gering ausfallen, um eine gute Transluzenz zu ermöglichen. Die drei VisCalor Komposite enthalten als Matrix aromatische und aliphatische Dimethacrylate und Füllkörper in Form von Siliziumdioxid (50nm) und Glaskeramik in Form von Ba-Al-Silikat (0,7 und 2,0 $\mu$ m). Siliziumdioxid, das als Füllkörper in VisCalor enthalten ist, besitzt einen ähnlichen Brechungsindex wie Bis-GMA und bewirkt somit eine Steigerung der Transluzenz (13). Ein hoher Füllstoffgehalt und kleinere Füllkörper führen dahingegen zu einer erhöhten Grenzfläche zwischen Matrix und Füllkörpern und einer Transluzenzabnahme (6). Bei den beigeetzten Pigmenten werden Titandioxidpigmente zur weißen Farbgebung verwendet, während Eisenoxidpigmente eine Abnahme der Transluzenz des Komposits bewirken und für dunklere Farbtöne, wie VisCalorOA2, geeignet sind (19). Sie liegen ungelöst in der organischen Matrix vor (13). Somit nehmen die beigeetzten Pigmente Einfluss auf die Farberscheinung und die Durchhärtungstiefe der VisCalor Komposite und erklären die niedrigere Transluzenz von dem opaken VisCalorOA2 (18). Häufig ist der Pigmentanteil bei Bulk-Fill-Kompositen verringert, um so eine zusätzlich Steigerung der Transluzenz zu generieren (13), zu dem genauen Pigmentanteil der verschiedenen VisCalor Komposite werden von dem Hersteller aber keine Angaben gemacht.

Insgesamt lagen die in diesen Versuchen aufgezeichneten signifikanten Härtewerte der Martenshärte in einem Bereich zwischen  $509 \frac{N}{mm^2}$  und  $615,3 \frac{N}{mm^2}$ . In einer anderen Versuchsreihe wiesen mikrogefüllte Komposite und Nanokomposite niedrigere Werte bei der Messung der Vickershärte im Vergleich zu getesteten Hybridkompositen auf und die erzielten Vickershärten lagen in einem Bereich zwischen 21,6 und 102,7 HV (53). Die Werte lassen sich untereinander jedoch nicht direkt vergleichen, da die Prüfkörper unter verschiedenen Gegebenheiten hergestellt wurden und die in diesen Versuchen getesteten Komposite allesamt Nano-Hybridkomposite waren. Zudem wurden in dieser Dissertation, wie bereits vorher erläutert, nur die Ergebnisse für die Martenshärte ausgewertet. Osiewicz et al. wiesen für die getesteten Bulk-Fill-Komposite niedrigere Härtewerte und einen höheren Verschleiß im Gegenzug zu dem getesteten Nano-Hybridkomposit auf (54). Dies konnte zwischen den VisCalorA2, VisCalorOA2 und VisCalorbulkA2 Kompositen nicht beobachtet werden. Eine weitere Studie zeigte maximale Härtewert im Bereich unterhalb der Prüfkörperoberfläche. Durch eine Steigerung der Polymerisationszeit konnte auch in tieferen Inkrementen eine maximale Härte erreicht werden (7). Generell ist zu beachten, dass die Oberfläche eines lighthärtenden Komposits bereits nach kurzer Polymerisationszeit oberflächlich hart erscheinen kann, auch wenn die Monomerumsatzrate, besonders im Bereich des Kavitätenboden noch nicht ausgeschöpft ist (6, 57). Dies gilt besonders im Bereich des Kavitätenbodens bei dickeren Inkrementen und dunkleren Kompositfarben (93), was somit auch auf das opake VisCalorOA2 zutreffen kann. Auch Colombo et al. wiesen eine niedrigere Vickershärte an der Prüfkörperunterseite im Vergleich zu der Oberseite nach (111). Wodurch noch einmal die Notwendigkeit einer ausreichenden Polymerisation aufgezeigt wird. Die Härte wurde in diesen Versuchen jedoch nur auf der Prüfkörperoberfläche, bei gleicher Inkrementschicht von 2mm, bestimmt. Wie sich die Härte an der Prüfkörperunterseite verhielt, wurde somit nicht weiter analysiert. Zusätzlich kann die Lagerung in säuerlichen Lösungen in einer Abnahme der Mikrohärtigkeit resultieren (111). Auch Wein enthält Säure, die somit auch einen potentiellen Einfluss auf die erhobenen Härtewerte nehmen könnte. In den Versuchen wurde jedoch keine weitere Härtemessung an die zweiwöchige Lagerung in Rotwein angeschlossen. Es stellt jedoch einen interessanten Ansatz dar, dies in weiteren Versuchen besonders auch in Hinblick auf die variierten Polymerisationszeiten zu untersuchen. Die Pearson Korrelation zeigte für die Martenshärte eine moderat positive Korrelation mit dem Glanz und eine gering positive Korrelation mit dem Ra-Wert, was einen positiv linearen Zusammenhang zwischen den Variablen aufzeigt. Zwischen der Härte und  $\Delta E$  liegt hingegen eine moderat negative

Korrelation und somit ein negativ linearer Zusammenhang zwischen den Variablen vor. Sodass niedrigere / (erhöhte) Härtewerte mit erhöhten / (niedrigeren) Werten für  $\Delta E$  einhergehen und somit die Härte des Komposits in Zusammenhang mit der Verfärbungsneigung gebracht werden kann. Zwischen den Variablen Härte und Rz-Wert besteht kein linearer Zusammenhang.

#### 5.2.4 Verfärbung

Bei dem Vergleich zwischen demselben Komposit, gleichem Poliersystem und variierten Polymerisationszeiten konnten nur für VisCalorA2 VOCO signifikante Unterschiede gefunden werden. Hierbei wurde für  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  mit 4,5 der höchste  $\Delta E$ -Wert und somit eine erhöhte Verfärbungsneigung im Vergleich zu  $t_{1Poly}$  mit  $\Delta E$  3,4 und  $t_{2Poly}$  mit  $\Delta E$  2,7 verzeichnet. Es wurde eine signifikante Abnahme der numerischen Differenz zweier Farben  $\Delta E$ , mit zunehmender Polymerisationszeit gemessen und für  $t_{2Poly}$  die niedrigste Verfärbung nachgewiesen. Dabei resultierten in einer Studie von Zhao et al. Rotwein- und Zigarettenkonsum als extrinsische Faktoren in einer sehr starken Verfärbungsneigung (60). Bei den färbenden Medien dominierten in der Studie von Grdić Kaffee mit  $\Delta E$  von 7,86 und ebenfalls Wein mit  $\Delta E$  von 8,56 die Verfärbungsneigung (62). Grdić's Ergebnis überstieg die  $\Delta E$ -Werte dieser Dissertation, was mit der längeren Lagerung der Prüfkörper von 36 Wochen in den Färbemedien in Verbindung gebracht werden kann. Falkensammer et al. stellten für die vierwöchige Rotweineinlagerung bei 37°C von verschiedenen Kompositproben die höchste Verfärbungsneigung mit  $\Delta E$  von über 10 fest (112). Lengert wies für in verschiedene Medien bei 37°C eingelagerte Prüfkörper in den ersten sieben Versuchstagen den größten Anteil an Verfärbungen nach und definierte einen Lagerungszeitraum von 14 Tagen zur Messung der Verfärbung als hinreichend. Dabei verzeichnete er auch für die Rotweinelagerung nach der Lagerung in Methylenblau die stärkste Verfärbungsneigung (113). Mahajan et al. beobachteten bei der Lagerung bei 37°C eine Steigerung der Verfärbung in der Zeitspanne von dem dritten auf den zwölften Tag in den Medien Kaffee, destilliertem Wasser, Grün- und Schwarztee, wobei das Maximum der Verfärbung am zwölften Tag bei einer maximalen Einlagerungszeit von zwölf Tagen beobachtet wurde (114). Somit erwies sich die vierzehntägige Rotweinelagerung als geeignet zur Überprüfung der extrinsischen Verfärbungsneigung der getesteten VisCalor Prüfkörper. Es wurde jedoch keine tägliche Farbmessung durchgeführt und die Verfärbungsneigung damit nicht abhängig von den Einlagerungstagen betrachtet. Ebenso wurde in diesen Versuchen der Rotwein nicht auf Mundtemperatur erwärmt. In der Studie von Ersoz et al. wurde nur für das getestete Mikrohybrid Komposit eine stärkere Verfärbung in erwärmtem Kaffee im Vergleich zu kaltem Kaffee festgestellt. Generell wies das Mikrohybrid Komposit

eine stärkere Verfärbung auf als das Nanogefüllte, für das kein Unterschied in der Verfärbung zwischen unterschiedlich temperiertem Kaffee beobachtet werden konnte (115). Für das Färbeverhalten werden unter anderem die im Rotwein befindlichen Tannine, die Art des verwendeten Rotweins, seine Zusammensetzung, Säuregehalt, pH-Wert und sein sich verändernder Reifeprozess diskutiert (63). Da in den Versuchen dieser Dissertation der gleiche Rotwein verwendet wurde, kann dies keinen Einfluss auf die erhobenen Ergebnisse haben. Es kann jedoch eine zusätzliche Erklärung für unterschiedliche Ergebnisse verschiedener Studien sein. Unter anderem können exogene Verfärbungen durch die Adhäsion von Farbstoffen an der Kompositoberfläche, oder durch die im Laufe der Zeit in Mikroporositäten der Kompositoberfläche eindringende Bestandteile aus z.B. Nahrungsmitteln und organischen Substanzen verursacht werden (10). Eine andere Studie stellte einen positiven Effekt von zusätzlicher Lichthärtung der getesteten Komposite auf die Verfärbungsneigung fest (116). Anhand dieser Versuchsergebnisse ließ sich jedoch nicht belegen, dass eine Polymerisationszeitvariation des Komposits immer zu einer signifikanten Veränderung von  $\Delta E$  führt und eine verlängerte Polymerisationszeit in jedem Fall mit einer Abnahme von  $\Delta E$  einhergeht. Generell ist die Verfärbungsneigung von mehreren Faktoren abhängig, unter anderem nehmen die verwendete Lösung, die Lagerungszeit, die Materialzusammensetzung, die Wasseraufnahme und Löslichkeit des verwendeten Komposits Einfluss auf die Ergebnisse und können sich gegenseitig beeinflussen (95). Die Wasseraufnahme wird für VisCalor von VOCO mit  $13 \frac{\mu g}{mm^3}$  als gering angegeben und für eine hohe Farbstabilität verantwortlich gemacht (4). Auch für Schienenmaterialien konnte für die Lagerung in Färbemedien eine Beeinflussung der Parameter Farbe, Glanz und Rauheit beobachtet werden. Dabei spielte das verwendete Material noch eine entscheidendere Rolle als die Zeit der Einlagerung (117).

Bei der Glanzmessung, Ra-Messung und Härtemessung zeigten sich hingegen keine signifikanten Veränderungen bei den Mehrfachvergleichen für die Gruppe VisCalorA2 VOCO, sodass die Ergebnisse untereinander nicht verglichen werden konnten. Für den Rz-Wert konnte eine signifikante Zunahme der Rauheit für VisCalorA2 VOCO von  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  zu  $t_{2Poly}$  notiert werden, was sich gegensätzlich zur Bestimmung von  $\Delta E$  verhält. Dabei kann eine Erklärung sein, dass bei der Rauheitsmessung lediglich ein Prüfkörperausschnitt mit einem rechteckigen Messfeld mit einer Breite von ca.  $2500\mu m$  und einer Höhe von ca.  $1900\mu m$  zur Bestimmung der Oberflächenrauheit betrachtet wurde.

Bei dem Vergleich innerhalb desselben Komposits und zwischen den Poliergruppen VOCO und NTI konnte ebenfalls nur für VisCalorA2 bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  in der VOCO-Poliergruppe ein signifikant höherer  $\Delta E$ -Wert im Vergleich zur NTI-Poliergruppe bei  $t_{1Poly}$  und  $t_{2Poly}$  mit  $\Delta E$  2,9 erreicht werden. Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Poliersystemen bei gleicher Polymerisationszeit gefunden werden und somit kein direkter Einfluss des verwendeten Polierers auf die Farbdifferenz festgestellt werden. Die Glanzmessung und die Härtemessung zeigten für VisCalorA2 keine signifikanten Werte, so konnten die Ergebnisse einander nicht gegenübergestellt werden. Bei der Ra- und Rz-Messung zeigten die signifikanten Ergebnisse der NTI-Poliergruppe höhere Rauheitswerte als in der VOCO-Poliergruppe, sodass ebenfalls eine erhöhte Rauheit, aber gleichzeitig eine geringere Verfärbungsneigung verzeichnet wurde. Obwohl besonders eine erhöhte Oberflächenrauheit mit einer gesteigerten Plaqueakkumulation einhergehen kann und somit den Hauptfaktor für die Entstehung von extrinsischen Verfärbungen an einer Füllungs Oberfläche darstellt. Trotzdem kann auch eine optimal polierte Oberfläche Verfärbungen aufweisen (10). Da der Politurprozess in den Versuchen nach einem bestimmten, gleichbleibenden Politurzyklus ablief und nicht nach dem optischen Empfinden beendet wurde, gingen die Prüfkörperoberflächen mit erhöhten, aber noch klinisch akzeptablen Ra- und Rz- Werten einher. Dies spiegelte sich jedoch in den Messungen für  $\Delta E$  nicht wider und hätte erwartungsgemäß in höheren  $\Delta E$ -Werten resultieren können. Deljoo et al. stellten einen Einfluss des verwendeten Poliersystems auf die resultierende Verfärbungsneigung fest, wobei das verwendete mehrstufige Poliersystem in Form von Sof-Lex-Scheiben in einer geringeren Verfärbungsneigung resultierte (61). In einer Studie von Aydin et al. wurde für die Polierer mit Diamantbestandteil die niedrigste Verfärbungsneigung beobachtet (118). Der Vergleich zu einem mehrstufigen Poliersystem konnte durch den Gebrauch zweier einstufiger Poliersysteme in den Versuchen nicht gezogen werden. Die glatteste Oberfläche geht nicht automatisch mit der geringsten Verfärbungsneigung einher, sodass die vorhandene Oberflächenrauheit nicht als alleiniger Verfärbungsauslöser angenommen wird, sondern zusätzlich eine Einwirkung des Färbemediums auf die Kompositoberfläche (61). Dies kann somit eine weitere Erklärung für die in diesen Versuchen gegensätzlichen Rauheits- und  $\Delta E$ -Messungen sein.

Bei dem Vergleich zwischen den verschiedenen Kompositen und Polymerisationszeiten konnte in der NTI-Poliergruppe bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  für VisCalorbulkA2 mit  $\Delta E$  von 2,2 eine geringere Verfärbungsneigung als für VisCalorOA2 mit  $\Delta E$  von 3,3 verzeichnet werden. Hier erzielte

VisCalorA2 bei  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  in der VOCO-Poliergruppe signifikant höhere  $\Delta E$ -Mittelwerte und damit eine stärkere Verfärbung als jegliche Polymerisationszeiten aus den VOCO- und NTI-Poliergruppen von VisCalorbulkA2 und VisCalorOA2. Dies gilt in der NTI-Poliergruppe ebenfalls für den Vergleich mit sämtlichen Polymerisationszeiten der VOCO- und NTI-Poliergruppen von VisCalorbulkA2 und bei  $t_{1Poly}$  in der VOCO-Poliergruppe für den Vergleich mit sämtlichen Polymerisationszeiten der VOCO- und NTI-Poliergruppen von VisCalorbulkA2. Dabei unterscheiden sich die VisCalor Komposite nur in ihrer beigefügten Pigmentmenge und der empfohlenen Polymerisationszeitempfehlung. Die Verfärbungsneigung eines Komposits wird aber auch von dem Komposit selbst bestimmt (10). Da in diesen Versuchen aber eine annähernd gleiche Zusammensetzung der Komposite vorlag, wurde die Auswirkung der Kompositart in Bezug auf die Verfärbungsneigung nicht weiter untersucht. Einen Unterschied bei der Verfärbungsneigung in Abhängigkeit von dem verwendeten Material, und damit in Form der Materialzusammensetzung als intrinsischen Faktor, zeigte auch die Studie von Deljoo et al. Hier konnte für das untersuchte Mikrohybrid Komposit mit  $\Delta E$  zwischen 1,8-6,5 eine stärkere Verfärbungsneigung als für das getestete Nano-Hybridkomposit mit  $\Delta E$  zwischen 1,1-6,1 in variierten Lagerungsmedien und bei variiertem Oberflächenbearbeitung festgestellt werden (61). Die in diesen Versuchen erhobenen Ergebnisse beziehen sich jedoch nur auf die drei verwendeten Nano-Hybridkomposite. Langwieder konnte in seinen Versuchen nicht in jedem Fall einen Zusammenhang zwischen der gemessenen Verfärbung und dem Füllstoffgehalt und der Füllkörpergröße des Komposits belegen, die umso geringer ausfallen soll, je höher der Füllstoffgehalt ist (63). Da alle getesteten VisCalor Komposite einen gleichen Füllkörperanteil aufwiesen, kann dies in diesen Versuchen nicht überprüft werden beziehungsweise keine Erklärung für unterschiedliche signifikante Ergebnisse zwischen den drei VisCalor Kompositen sein. Es ist aber zu bedenken, dass die VisCalor Komposite einen hohen Füllkörperanteil von 83Gew.-% aufweisen und somit generell widerstandsfähiger gegenüber Verfärbungen sein könnten. Da die meisten signifikanten Ergebnisse für den Vergleich mit VisCalorA2 NTI / VOCO  $t_{\frac{1}{2}Poly}$  zu verzeichnen sind, scheint unter anderem die Polymerisationszeit hier einen Einfluss auf die Ergebnisse zu nehmen. Wobei VisCalorA2 eine halb so hohe Polymerisationszeitempfehlung wie VisCalorbulkA2 und VisCalorOA2 besitzt. Bei den Härteversuchen wurde jedoch kein signifikanter Härteunterschied zwischen den Materialien bei gleicher Polymerisationszeit verzeichnet. Es wurde lediglich für die niedrigste Polymerisationszeit materialunabhängig der niedrigste Härtewert verzeichnet. Eine Erklärung kann hierfür die Tatsache sein, dass pro



Prüfkörper nur eine Härtemessung erfolgte und somit nur die Härte auf dem zentralen Punkt der Politurbahn verzeichnet wurde. Zusätzlich scheint die Polymerisationszeit nicht alleine ausschlaggebend für die Verfärbungsneigung zu sein. Bei der Korrelation nach Pearson konnte allerdings eine moderat negative Korrelation und damit ein negativ linearer Zusammenhang von  $\Delta E$  und der Härte beobachtet werden, wodurch ein genereller Zusammenhang von den beiden Variablen aufgezeigt wurde. Bei den Mehrfachvergleichen konnte ein höherer Ra-Mittelwert und somit eine erhöhte Rauheit, für VisCalorOA2 und VisCalorbulkA2 im Vergleich zu VisCalorA2  $t_{\frac{1}{2}poly}$  erreicht werden. Für VisCalorA2 wurde hingegen wieder eine erhöhte Verfärbungsneigung notiert. Im Vergleich mit der Rz-Bestimmung konnten keine Übereinstimmung bei den signifikanten Prüfkörpervergleichsgruppen gefunden werden. Die Korrelation nach Pearson zeigte eine moderat negative Korrelation von  $\Delta E$  mit dem Ra- und Rz-Wert und somit einen negativen linearen Zusammenhang. Wie bei den zuvor aufgeführten und erläuterten signifikanten Mehrfachvergleichen, wurde dadurch ebenfalls ein Widerspruch zwischen der Verfärbungsneigung und den aufgezeichneten Rauheitsparametern beobachtet. Die Bestimmung im Glanzmittelwert fiel unter den Mehrfachvergleichen für VisCalorOA2 und VisCalorbulkA2 höher aus im Vergleich zu VisCalorA2, trotzdem lagen alle Ergebnisse im mittleren Glanzbereich. Die Korrelation nach Pearson zeigte eine schwach negative Korrelation von  $\Delta E$  mit dem Glanz und somit einen negativen linearen Zusammenhang zwischen dem Glanz und der Verfärbungsneigung. Das Poliersystem zeigte in den Versuchen keinen signifikanten Unterschied für die Verfärbungsneigung von VisCalorbulkA2 und VisCalorOA2, auch für VisCalorA2 war unter gleichen Polymerisationsbedingungen kein Unterschied zwischen den beiden Poliergruppen feststellbar.

Insgesamt lagen die Ergebnisse für die Prüfkörpergruppen dieser Dissertation für  $\Delta E$  in einem Bereich zwischen 2,2 und 4,5. In den Versuchen wurden zur besseren Vergleichbarkeit für alle Prüfkörper mit demselben Rotwein als Färbemedium die gleichen Lagerungsbedingungen festgelegt. Dabei werden die Werte für  $\Delta E$  unterschiedlich bewertet. Ein Wert von 1 kann unter Idealbedingungen gerade eben noch von dem Betrachter wahrgenommen werden. Wobei eine Farbdifferenz von 5 zwischen natürlichem Zahn und Restauration als optisch zu auffällig wahrgenommen wird. King und deRjik teilten die Farbdifferenz  $\Delta E$  in vier Bereiche ein, wobei ein Bereich für  $\Delta E$  von 2-3 als geringfügig wahrnehmbar, ein Bereich für  $\Delta E$  von 3-8 als teilweise wahrnehmbar und erst ein Bereich von  $\Delta E$  von über 8 als wahrnehmbar gilt (67). Andere Studien bezogen sich auf einen klinisch tolerierbaren  $\Delta E$ -Wert von  $\leq 3,3$  (63, 119). Somit liegt eine unterschiedliche Beurteilung von  $\Delta E$  je nach Bewertungsschema vor, sodass

die Ergebnisse unterschiedlich zu interpretieren sind. Die signifikanten  $\Delta E$ -Werte dieser Dissertation gelten daher als ein Farbunterschied, der vom Betrachter wahrnehmbar ist, beziehungsweise zum Teil schon als optisch störend empfunden wird. Nach der Definition von King und deRjik sind die  $\Delta E$ -Werte als geringfügig bzw. teilweise wahrnehmbarer Farbunterschied zu interpretieren. Der klinisch tolerierbare  $\Delta E$ -Wert von  $\leq 3,3$  wurde von den Versuchsergebnissen dieser Dissertation teilweise unterschritten, als auch überschritten. Grdić stellte in Ihren Versuchen, bei denen Prüfkörper verschiedener Verblendkomposite 36 Wochen lang in verschiedenen Färbemedien gelagert wurden, fest, dass die Prüfkörper mit verkürzter Polymerisationszeit die stärksten Verfärbungen aufwiesen. Die Prüfkörper mit verlängerten Polymerisationszeit wiesen die prozentual geringste Verfärbung auf und unerklärlicherweise wiesen die Prüfkörper mit stark verringerter Polymerisationszeit ebenfalls eine verringerte Verfärbungsneigung auf. Somit stellte Grdić einen irregulären Einfluss der verwendeten Polymerisationszeit auf die Verfärbung von Verblendkompositen fest. Die Verfärbungsneigung der Prüfkörper nahm mit der Dauer der Verweilzeit im Färbemedium zu, wohingegen eine verkürzte Polymerisationszeit nicht immer mit einer stärkeren Verfärbung einherging. Eine verlängerte Polymerisationszeit zeigte zwar prozentual eine weniger starke Verfärbungsneigung, aber nicht zwangsläufig eine niedrigere Verfärbungsneigung (62). Dies stützt die Ergebnisse dieser Dissertation, somit scheint zwar die Polymerisation unter anderem einen Einfluss auf die Verfärbungsneigung zu haben, jedoch nicht in jedem Fall zu einer Beeinflussung der Ergebnisse zu führen. Im Gegensatz zu Grdić kann jedoch keine Aussage über das Verhalten der Prüfkörper bei einer Langzeiteinlagerung getroffen werden, da die Einlagerung der Prüfkörper in das Färbemedium auf zwei Wochen begrenzt war. Langwieder orientierte sich in seiner Studie über Verblendkomposite an einem Grenzwert von  $\Delta E$  von  $\leq 3,3$  als klinisch noch akzeptable Verfärbungsneigung. Die Einlagerung ins Färbemedium entsprach mit einer Dauer von 14 Tagen denen dieser Dissertation. Für Rotwein zeichnete Langwieder für den Vergleich zwischen der initialen Farbmessung und Farbmessung nach zweiwöchigem Rotweinbad eine klinisch inakzeptable numerische Farbdifferenz zwischen  $\Delta E=3,66-6,24$  auf, die somit die  $\Delta E$ -Werte dieser Studie überstieg (63). Die aufgezeichneten  $\Delta E$ -Werte für Cola und Kaffee zwischen 1,6-6,5 aus der Studie von Deljoo et al. lagen zum Teil unterhalb der erhobenen Werte dieser Dissertation und überstiegen diese teilweise (61). Dabei ist zu beachten, dass die Messergebnisse verschiedener Studien unter unterschiedlichen Bedingungen erhoben wurden und somit nicht untereinander vergleichbar sind. Generell scheint somit die Verfärbungsneigung einer Kompositoberfläche multifaktoriell bedingt zu sein und unter anderem von der Polymerisation, der Oberflächenrauheit, der Absorption und Adsorption der

einwirkenden Farbstoffe, dem Färbemedium, der Lagerungszeit, dem Poliersystem und dem Komposit beeinflusst zu werden.

### **5.2.5 REM**

In der Übersichtaufnahme bei 1000x Vergrößerung ist optisch zwischen den drei getesteten VisCalor Kompositen kein Unterschied in der Materialzusammensetzung feststellbar, was durch die annähernd gleiche Zusammensetzung mit Ausnahme der beigefügten Pigmentmenge zu erklären ist. Es ist ein großer Anteil an verschiedenen großen Füllkörpern erkennbar, die in die organische Matrix eingebettet sind und sich in dem hohen Füllkörpergehalt mit 83Gew.-% widerspiegeln. Dabei ist die Oberflächenbeschaffenheit einer Kompositoberfläche unter anderem abhängig von der Zusammensetzung des Komposits, insbesondere von der Füllkörperart und deren Größe (63). Da die Komposite sich in dieser Form nicht voneinander unterscheiden, kann dies keine Erklärung für die verschiedenen signifikanten Ergebnisse der unterschiedlichen Messverfahren zwischen den Prüfkörpergruppen sein. Die Polymermatrix, in die die verschiedenen großen Füllkörper eingelagert sind, ist weicher als die Füllkörper und wird somit bei dem Politurvorgang eher abgetragen. Teilweise herausragende oder angeschliffene Füllkörper sind somit bei der mikroskopischen Betrachtung ersichtlich. Ein hoher Füllkörpergehalt führt zu einem besseren Schutz der Matrix (24). Bei dem Vergleich der rasterelektronenmikroskopischen Bilder der drei getesteten Materialien mit den Ergebnissen der Rauheitsmessung lagen für die Rauheitsmessung häufig keine entsprechenden signifikanten Vergleiche vor, beziehungsweise wurde eine Differenz zwischen optischer Wahrnehmung und aufgezeichneten Rauheitswerten verzeichnet. Es kam nur zu wenigen Übereinstimmungen zwischen der optischen Wahrnehmung der Prüfkörperoberfläche und den aufgezeichneten signifikanten Vergleichen für die Rauheitsmessung. Dies kann unter anderem damit zusammenhängen, dass sowohl bei der Rauheitsmessung als auch bei der Betrachtung mittels Rasterelektronenmikroskop nur ein ausgewählter Abschnitt der Prüfkörperfläche betrachtet wurde. Da die rasterelektronenmikroskopischen Bilder nur einen kleinen Ausschnitt der polierten Prüfkörperoberfläche widerspiegeln und nur ein Prüfkörper je Kategorie untersucht wurde, ist es schwierig alleine auf Grund der Aufnahmen eine allgemeingültige Aussage über die Oberflächencharakterisierung der verschiedenen Materialien bei verschiedenen Polymerisationszeiten zu treffen. Dabei spielt der persönliche und optische Sinneseindruck bei der bloßen Bewertung nach dem optischen Erscheinungsbild eine Rolle. Somit hatten die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen vorwiegend den Zweck, den Versuchsaufbau zu

ergänzen und der zusätzlichen optischen Darstellung von einer bearbeiteten Kompositoberfläche bzw. der Darstellung der Matrix und Füllkörper zu dienen.

## 6 Schlussfolgerung

Die Nullhypothesen, dass kein signifikanter Unterschied bei der Variation der Polymerisationsdauer und des Poliersystems bei Glanz, Oberflächenrauheit, Härte und Verfärbungsneigung der Kompositoberfläche besteht, konnten mit Hilfe der einfaktoriellen ANOVA widerlegt werden. Schlussfolgernd lässt sich im Hinblick auf die Versuchsreihen der Dissertation festhalten, dass eine Variation der Polymerisationszeit und des Poliersystems jedoch nicht in jedem Fall zu einer Veränderung der Oberflächeneigenschaften der drei getesteten VOCO VisCalor Komposite in Form von Glanz, Oberflächenrauheit, Härte und Verfärbungsneigung führte.

Bei der Glanzmessung erzielte VisCalorA2 als Komposit mit der geringsten Polymerisationszeitempfehlung insgesamt die geringsten Glanzmittelwerte. Trotzdem waren alle signifikanten Messergebnisse in dem Bereich des mittleren Glanzes anzusiedeln, was besonders mit dem festgelegten Politurzyklus in Verbindung gebracht wurde. Ein direkter Einfluss zwischen den beiden Poliergruppen auf die Glanzmessung konnte nicht verzeichnet werden. Es konnte nur für VisCalorOA2 VOCO eine Steigerung im Glanzmittelwert mit zunehmender Polymerisationszeit aufgezeichnet werden. Es zeigte sich eine gering negative Korrelation zwischen dem Glanz und der Verfärbung und eine moderat positive Korrelation zwischen dem Glanz und der Härte auf und bekräftigte somit den negativ und positiv linearen Zusammenhang zwischen diesen Variablen. Zwischen dem Glanz und dem Ra-Wert fiel die Korrelation gering positiv aus.

Bei der Rauheitsmessung fielen die Messergebnisse durch die Verwendung der kontaktlosen Messung mit Hilfe von Licht um ein Zehnfaches höher aus im Vergleich zur manuellen Messmethode. Es wurden mit den erhobenen Ra-Werten zwischen  $4,1-7,8\mu\text{m}$  und Rz-Werten zwischen  $56,9-72,7\mu\text{m}$  hohe Messwerte erzielt, die allerdings aufgrund der optischen Auswertung noch im normalen Bereich liegen dürften. Der Grenzbereich des Ra-Wertes von  $0,2\mu\text{m}$  wurde aber überschritten (8). Es konnte nur für VisCalorOA2 für den Ra-Wert in der NTI-Poliergruppe eine Steigerung der Rauheit mit gesteigener Polymerisationszeit beobachtet werden, was sich für VisCalorA2 jedoch entgegengesetzt verhielt. Für den Rz-Wert konnte nur für VisCalorA2 in der VOCO-Poliergruppe eine Steigerung der Rauheit mit gesteigener Polymerisationszeit festgehalten werden. Unter den signifikanten Werten konnte eine niedrigere Rauheit für die VOCO-Poliergruppen im Vergleich zu den NTI-Poliergruppen festgehalten werden, was den Einfluss des verwendeten Poliersystems hervorhebt. Zwischen den beiden Rauheitsparametern wurde eine stark positive Korrelation und somit ein positiver

linearer Zusammenhang beobachtet.

Bei der Härtemessung konnte nur für das opake VisCalorOA2 in der VOCO- und NTI-Poliergruppe eine Steigerung der Härte mit zunehmender Polymerisationszeit verzeichnet werden. Somit scheint besonders die Opazität Einfluss auf die Materialhärte bei variierteter Polymerisationszeit zu nehmen. Ein direkter Härteunterschied zwischen den drei getesteten VisCalor Kompositen konnte nicht festgestellt werden. Es erreichte im Vergleich das Material mit der niedrigeren Polymerisationszeit den geringeren Härtewert, wodurch die Bedeutung einer ausreichenden Polymerisation betont wurde. Es wurde eine moderat negative Korrelation zwischen der Härte und  $\Delta E$  festgestellt, wodurch die Härte des Komposits mit der Verfärbungsneigung in Zusammenhang gebracht werden kann.

Bei der Messung der Verfärbungsneigung konnte kein direkter Einfluss zwischen den Poliersystemen auf die Messergebnisse festgestellt werden. VisCalorA2 zeigte als Komposit mit der geringsten Polymerisationszeitempfehlung bei verkürzter Polymerisationszeit die höchste Verfärbungsneigung, die in der VOCO-Poliergruppe mit steigender Polymerisationszeit abnahm. Zwischen  $\Delta E$  und dem Ra-Wert und  $\Delta E$  und dem Rz-Wert wurde eine moderat negative Korrelation und somit ein negativ linearer Zusammenhang zwischen den Variablen festgestellt. Somit wird ebenfalls ein Widerspruch zwischen Rauheit und Verfärbung aufgezeigt.

## 7 Zusammenfassung

In dieser Dissertation sollte der Einfluss von verschiedenen Polymerisationszeiten auf die Oberflächeneigenschaften und das Politurergebnis von Kompositen untersucht werden. Dazu wurden aus der VOCO VisCalor Serie drei Nano-Hybridkomposite in Form der beiden unterschiedlichen Farben VisCalorA2 und dem opaken VisCalorOA2 und dem Bulk-Fill-Komposit VisCalorbulkA2 ausgesucht. Allen drei getesteten Kompositen lag die sogenannte „Thermo-viscous-technology“ zu Grunde, das heißt die Materialien wurden vor der Applikation speziell erwärmt und es fand eine Viskositätsänderung von einem hochviskosen in einen niedrigviskosen und wieder in einen hochviskosen Zustand statt.

Die verwendeten Polymerisationszeiten für die Prüfkörper wurden auf die Hälfte der vom Hersteller empfohlenen Polymerisationsdauer  $t_{\frac{1}{2}Poly}$ , die vom Hersteller empfohlene Polymerisationsdauer  $t_{1Poly}$  und die doppelte vom Hersteller empfohlene Polymerisationsdauer  $t_{2Poly}$  festgelegt.

Für den vereinheitlichten Poliervorgang wurden mit dem VOCO Dimanto und NTI Unique Polierer zwei einstufige Polierer verwendet, sodass sich zwei verschiedene Poliergruppen ergaben. Je nach Material, Polymerisationsdauer und Poliersystem wurden 8 Prüfkörper hergestellt, die in lichtundurchlässigen Boxen gelagert wurden. Es schlossen sich verschiedene Messverfahren zur Bestimmung des Glanzes, der Rauheit, der Härte und der Verfärbungsneigung an.

Bei der Glanzmessung befanden sich bei den signifikanten Vergleichen zwischen den Prüfkörpergruppen alle erhobenen Messwerte im mittleren Glanzbereich. Ein direkter Einfluss der Polymerisationszeit innerhalb derselben Kompositgruppe konnte nur für VisCalorOA2 VOCO verzeichnet werden, wobei eine gesteigerte Polymerisationszeit in erhöhten Glanzwerten resultierte.

Bei den Rauheiten wurde unter den signifikanten Vergleichen für alle erhobenen Messwerte eine hohe Rauheit gemessen, die aufgrund der lasergestützten Auswertung allerdings als klinisch akzeptabel einzuordnen sind. Für den Ra-Wert konnte ein direkter Einfluss der Polymerisationszeit in der NTI-Poliergruppe innerhalb derselben Kompositgruppe für VisCalorOA2 in Form einer Zunahme der Rauheit bei gesteigener Polymerisationszeit und für VisCalorA2 im Gegensatz eine Abnahme der Rauheit mit gesteigener Polymerisationszeit

verzeichnet werden. Für den Rz-Wert konnte in der VOCO-Poliergruppe eine Steigerung der Rauheit mit gesteigener Polymerisationszeit für VisCalorA2 notiert werden.

Bei der Martenshärte konnte ein direkter Einfluss der Polymerisationszeit innerhalb derselben Kompositgruppe nur für das opake VisCalorOA2 verzeichnet werden. Es kam in beiden Poliergruppen zu einem Härteanstieg mit gesteigerter Polymerisationszeit.

Bei der Farbänderung konnte ein direkter Einfluss der Polymerisationszeit auf die Verfärbungsneigung innerhalb derselben Kompositgruppe nur für VisCalorA2 in der VOCO-Poliergruppe verzeichnet werden. Eine Steigerung der Polymerisationszeit ging mit einer geringeren Verfärbung einher.

Die drei röntgenopaken, lighthärtenden, gut zu verarbeitenden Nano-Hybridkomposite VOCO VisCalorOA2, VisCalorA2 und VisCalorbulkA2 stellen mit Ihrer „Thermo-viscous-technology“ einen interessanten Ansatz in der Füllungstherapie dar. Dieser kann zu einer Erleichterung des Arbeitsablaufs in der Füllungstherapie beitragen, bedingt durch den ausbleibenden Wechsel des Füllungsmaterials zwischen Flow und stopfbarem Komposit und der erhöhten Inkrementschichtung des VisCalorbulk.

In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass ein Variieren der Polymerisationszeit und des Poliersystems nicht in jedem Fall zu einer Veränderung der gemessenen Oberflächeneigenschaften der drei getesteten Komposite führte. Eine Steigerung der Polymerisationszeit resultierte nicht zwingend in einer Verbesserung der gemessenen Oberflächeneigenschaften, wohingegen eine Verkürzung der Polymerisationszeit nicht in jedem Fall mit einer Verschlechterung einherging. Unter dem für die Versuche festgelegten Politurzyklus, zur besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen Prüfkörper, konnten mit den beiden einstufigen Polierern nur Ra-Werte erreicht werden, die den Bereich von  $0,2\mu\text{m}$  überstiegen, aber noch als klinisch akzeptabel einzustufen waren. Dabei sollte bei jeder Füllungstherapie ein gründlicher Politurvorgang der Kompositoberfläche stattfinden, ohne Kopplung an einen festgelegten, standardisierten Ablauf. Dieser sollte durch optische Kontrolle, Orientierung an aktuellen klinischen Empfehlungen und an das Tastempfinden des Patienten individuell angepasst sein. Es sollten immer die jeweiligen Herstellerempfehlungen Beachtung finden und die Leistung und das Emissionsspektrum der Polymerisationslampe auf das verwendete Komposit abgestimmt werden.



## 8 Literaturverzeichnis

1. Prof. Dr. Manhart. Thermoviskoses Bulk Fill Komposit. Bayerisches Zahnärzteblatt 2020; (12/2020):S.50–57 [Stand: 28.12.2023]. Verfügbar unter: [https://bzb-online.de/wp-content/uploads/2022/02/BZB\\_12\\_2020.pdf](https://bzb-online.de/wp-content/uploads/2022/02/BZB_12_2020.pdf).
2. Prof. Dr. Frankenberger R, Dr. Dudek M-C, Dr. M.Sc. Winter J, Dr. Roggendorf MJ, Prof. Dr. Krämer N. Die 10 beliebtesten Fehler in der Adhäsivtechnik\* - Online DZZ; 2022 [Stand: 28.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.online-dzz.de/fileadmin/user\\_upload/DZZ\\_04\\_2022\\_online.pdf](https://www.online-dzz.de/fileadmin/user_upload/DZZ_04_2022_online.pdf).
3. Prof. Dr. Frankenberger R, Prof. Dr. Federlin M, Dr. Uwe B, Knüttel H, Prof. Dr. Dr. Franz-Xaver R, Prof. Dr. Dr. Helmut S et al. Kompositrestaurationen im Seitenzahnbereich: S1-Handlungsempfehlung (Langversion). © Deutscher Ärzteverlag | DZZ | Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift | 2017; 71 2017:S.34 [Stand: 28.12.2023]. Verfügbar unter: [https://epub.uni-regensburg.de/35260/1/DZZ\\_GES\\_Leitlinie\\_Kompositrestaurationen.pdf](https://epub.uni-regensburg.de/35260/1/DZZ_GES_Leitlinie_Kompositrestaurationen.pdf).
4. VOCO GmbH. VisCalor/ VisCalor Bulk:S.2–12 [Stand: 29.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.voco.dental/de/portaldata/1/resources/products/folders/de/viscalor\\_fol\\_de.pdf](https://www.voco.dental/de/portaldata/1/resources/products/folders/de/viscalor_fol_de.pdf).
5. Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung: Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Paradontologie; mit 63 Tabellen. 6., überarb. Aufl. Köln: Dt. Zahnärzte-Verl.; 2013.
6. Prof. Dr. Dipl. Ing. Nicoleta Ilie und Dr. med. dent. Uwe Blunck. Lichtpolymerisation heute; 2019 [Stand: 28.12.2023]. Verfügbar unter: [https://zm.epaper-archiv.de/fileadmin/user\\_upload/epaper/2019/23-24/48/](https://zm.epaper-archiv.de/fileadmin/user_upload/epaper/2019/23-24/48/).
7. Prof. Dr. Dipl. Ing. Nicoleta Ilie und Dr. Dipl. Ing. Bogna Stawarczyk. Wie viel Licht brauchen Bulk-Fill-Komposite für eine adäquate Polymerisation? | Fachgebiete | ZMK-aktuell.de: Spitta Verlag GmbH & Co. KG; 2014 [Stand: 28.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/wie-viel-licht-brauchen-bulk-fill-komposite-fuer-eine-adaequate-polymerisation\\_\\_1087.html](https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/wie-viel-licht-brauchen-bulk-fill-komposite-fuer-eine-adaequate-polymerisation__1087.html).
8. Lisa Christine Föhring. Rotierende Oberflächenbearbeitung dentaler Materialien 2021:S.5,7,36,37,45,77,78,80-83 [Stand: 28.12.2023]. Verfügbar unter: [https://epub.uni-regensburg.de/50824/1/DA\\_Endversion\\_korrigiert\\_20211009\\_ohne\\_LL.pdf](https://epub.uni-regensburg.de/50824/1/DA_Endversion_korrigiert_20211009_ohne_LL.pdf).

9. Jung D. Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit eines Nanokomposits nach der Bearbeitung mit flexiblen Disc-Systemen 2013:S.76 [Stand: 28.12.2023]. Verfügbar unter: [https://jilupub.ub.uni-giessen.de/bitstream/handle/jilupub/14515/JungDaniela\\_2014\\_02\\_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://jilupub.ub.uni-giessen.de/bitstream/handle/jilupub/14515/JungDaniela_2014_02_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
10. Rzanny A, Lengert M, Göbel R, Schmidt M, Küpper H. Dentale Kunststoffe und deren Verfärbungsneigung. ZWR 2015; 124(11):S.514–520 [Stand: 28.12.2023]. Verfügbar unter: <https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/pdf/10.1055/s-0035-1565112.pdf>.
11. PONS Langenscheidt. compositus - Latein-Deutsch Übersetzung | PONS; 2023 [Stand: 29.12.2023]. Verfügbar unter: <https://de.pons.com/%C3%BCbersetzung/latein-deutsch/compositus>.
12. Awiszus R. Randspaltanalyse von Füllungen mit Bulk Fill-Kompositen:S.2 [Stand: 29.12.2023]. Verfügbar unter: [https://edoc.ub.uni-muenchen.de/20441/1/Awiszus\\_Rainer.pdf](https://edoc.ub.uni-muenchen.de/20441/1/Awiszus_Rainer.pdf).
13. Prof. Dr. M. Rosentritt, Prof. Dr. N. Ilie, Prof. Dr. U. Lohbauer. Werkstoffkunde in der Zahnmedizin: Moderne Materialien und Technologien. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2018.
14. Prof. Dr. T. Attin, PD Dr. T. T. Tauböck. Bulk-Fill-Komposite: Ein Update. SWISS DENTAL JOURNAL 7/8 2016; (VOL 126):S.694–695 [Stand: 29.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.swissdentaljournal.org/fileadmin/upload\\_sso/2\\_Zahnaerzte/2\\_SDJ/SDJ\\_2016/SDJ\\_7\\_8\\_2016/SDJ\\_2016-07-08\\_materialien\\_D.pdf](https://www.swissdentaljournal.org/fileadmin/upload_sso/2_Zahnaerzte/2_SDJ/SDJ_2016/SDJ_7_8_2016/SDJ_2016-07-08_materialien_D.pdf).
15. Prof. Dr. Nicoleta Ilie, Prof. Dr. Bogna Stawarczyk. Bulk-Fill-Komposite: neue Entwicklungen oder doch herkömmliche Komposite?: Spitta Verlag GmbH & Co. KG; 2014 [Stand: 29.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/bulk-fill-komposite-neue-entwicklungen-oder-doch-herkoemmliche-komposite\\_\\_1010.html](https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/bulk-fill-komposite-neue-entwicklungen-oder-doch-herkoemmliche-komposite__1010.html).
16. VOCO GmbH. Viscalor-bulk Gebrauchsanweisung 10/2023:S.1 [Stand: 29.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.voco.dental/de/Portaldata/1/Resources/products/instructions-for-use/e1/viscalor-bulk\\_ifu\\_e1.pdf](https://www.voco.dental/de/Portaldata/1/Resources/products/instructions-for-use/e1/viscalor-bulk_ifu_e1.pdf).

17. VOCO GmbH. VisCalor Gebrauchsanweisung 10-2020:S.1 [Stand: 29.12.2023].  
Verfügbar unter: [https://www.voco.dental/de/portaldata/1/resources/products/instructions-for-use/e1/viscalor\\_ifu\\_e1.pdf](https://www.voco.dental/de/portaldata/1/resources/products/instructions-for-use/e1/viscalor_ifu_e1.pdf).
18. Danebrock, Martin, VOCO GmbH. Emailverkehr\_VOCO\_GmbH.
19. Tokuyama Dental. Farbanpassung bei Kompositen: Metalloxide oder Struktur? zm online 16.02.2023 [Stand: 29.12.2023]. Verfügbar unter: <https://www.zm-online.de/news/detail/farbanpassung-bei-kompositen-metalloxide-oder-struktur>.
20. Prof. Dr. Jack L. Ferracane, Prof. Dr. David C. Watts, Prof. Dr. Nasser Barghi, Prof. Dr. Claus-Peter Ernst, Prof. Dr. Frederick A. Rueggeberg, Adrian Shortall et al. Der effiziente Einsatz von Lichtpolymerisationsgeräten: ein Leitfaden für Zahnärzte: Spitta Verlag GmbH & Co. KG; 2014 [Stand: 29.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/der-effiziente-einsatz-von-lichtpolymerisationsgeraeten--ein-leitfaden-fuer-zahnaerzte\\_\\_1024.html](https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/der-effiziente-einsatz-von-lichtpolymerisationsgeraeten--ein-leitfaden-fuer-zahnaerzte__1024.html).
21. Cássia Romano B de, Soto-Montero J, Rueggeberg FA, Giannini M. Effects of extending duration of exposure to curing light and different measurement methods on depth-of-cure analyses of conventional and bulk-fill composites. European journal of oral sciences 2020; 128(4):S.336–344 [Stand: 29.12.23]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32502304/>.
22. Ide K, Nakajima M, Hayashi J, Hosaka K, Ikeda M, Shimada Y et al. Effect of light-curing time on light-cure/post-cure volumetric polymerization shrinkage and regional ultimate tensile strength at different depths of bulk-fill resin composites. Dental materials journal 2019; 38(4):S.621–629 [Stand: 29.12.23]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31178547/>.
23. PD Dr. M. Oliver Ahlers. Composite perfekt polieren. Dentalmagazin 2008 [Stand: 30.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.cmd-centrum.de/fileadmin/user\\_upload/artikel/spiegel/DM-05-2008-Composite-polieren.pdf](https://www.cmd-centrum.de/fileadmin/user_upload/artikel/spiegel/DM-05-2008-Composite-polieren.pdf).
24. Prof. Dr. Martin Rosentritt, Dr. Thomas Strasser. Politur von polymerbasierten Werkstoffen: Ein Werkstoff-Steckbrief. Zahntechnik Magazin 2022; (Ausgabe 05):S.2–4 [Stand: 30.12.23]. Verfügbar unter: [https://www.ztm-aktuell.de/technik/werkstoffe/story/politur-von-polymerbasierten-werkstoffen\\_\\_11755.html](https://www.ztm-aktuell.de/technik/werkstoffe/story/politur-von-polymerbasierten-werkstoffen__11755.html).

25. Jaramillo-Cartagena R, López-Galeano EJ, Latorre-Correa F, Agudelo-Suárez AA. Effect of Polishing Systems on the Surface Roughness of Nano-Hybrid and Nano-Filling Composite Resins: A Systematic Review. *Dentistry journal* 2021; 9(8) [Stand: 30.12.23]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34436007/>.
26. VOCO GmbH. Dimanto Gebrauchsanweisung 09/2017:S.1 [Stand: 30.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.voco.dental/de/portaldata/1/resources/products/instructions-for-use/e1/dimanto\\_ifu-e1.pdf](https://www.voco.dental/de/portaldata/1/resources/products/instructions-for-use/e1/dimanto_ifu-e1.pdf).
27. VOCO GmbH. Dimanto Polierer VOCO:S.1-4 [Stand: 30.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.voco.dental/de/portaldata/1/resources/products/folders/de/dimanto\\_fol\\_de.pdf](https://www.voco.dental/de/portaldata/1/resources/products/folders/de/dimanto_fol_de.pdf).
28. NTI-Kahla GmbH. NTI Unique Diamantierter Einstufen - Polierer für Composite montiert RA | NTI-Kahla [Stand: 30.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.nti.de/dental/de/shop/Zahnarztpraxis/Polierer/?card=2163#\\_tab\\_content1](https://www.nti.de/dental/de/shop/Zahnarztpraxis/Polierer/?card=2163#_tab_content1).
29. Dr. Michael Wefelmeier, Duda S, Ott K, Kaup M. Messung des Glanzes von Kompositen vor und nach Politur. *Deutsche zahnärztliche Zeitschrift* 2012; (67):S.760–772 [Stand: 30.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.online-dzz.de/fileadmin/user\\_upload/Heftarchiv/DZZ/article/2012/12/5350AB1D-8B4C-4D74-BBE8-4C1247924D9B/5350AB1D8B4C4D74BBE84C1247924D9B\\_em\\_oa\\_politur\\_glanz\\_wefelmeier\\_deutsch\\_1\\_original.pdf](https://www.online-dzz.de/fileadmin/user_upload/Heftarchiv/DZZ/article/2012/12/5350AB1D-8B4C-4D74-BBE8-4C1247924D9B/5350AB1D8B4C4D74BBE84C1247924D9B_em_oa_politur_glanz_wefelmeier_deutsch_1_original.pdf).
30. Michael Wefelmeier. Polierbarkeit dentaler Komposite in Abhängigkeit vom Glanz 2009:S.3-7,60,61,64 [Stand: 30.12.2023]. Verfügbar unter: [https://repositorium.uni-muenster.de/document/miami/8908dec5-0ca6-4a58-ac54-87c325b9c241/dissertation\\_wefelmeier.pdf](https://repositorium.uni-muenster.de/document/miami/8908dec5-0ca6-4a58-ac54-87c325b9c241/dissertation_wefelmeier.pdf).
31. LEIFiPhysik - Joachim Herz Stiftung. Reflexionsgesetz: Das Wichtigste auf einen Blick [Stand: 30.12.2023]. Verfügbar unter: <https://www.leifiphysik.de/optik/lichtreflexion/grundwissen/reflexionsgesetz>.
32. Screening Eagle Technologies. Zehntner ZGM 1120 Glanzmessgerät [Stand: 30.12.2023]. Verfügbar unter: <https://www.screeningeagle.com/de/products/zehntner-zgm1120>.
33. Torso Verlag. Wissen über Glanzmessung [Stand: 30.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.torso.de/Glanzmessung:\\_:61.html](https://www.torso.de/Glanzmessung:_:61.html).

34. Proceq SA S. ZGM1120 Bedienungsanleitung 2021:S.7,27,29,30 [Stand: 30.12.2023].  
Verfügbar unter:  
[https://d3d9uh9i6bytyw.cloudfront.net/asset/Downloads/201111\\_ZGM1120-Manual\\_\\_V3\\_0.pdf](https://d3d9uh9i6bytyw.cloudfront.net/asset/Downloads/201111_ZGM1120-Manual__V3_0.pdf).
35. Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH. Oberflächenparameter [Stand: 30.12.2023].  
Verfügbar unter: [https://pages.zeiss.com/rs/896-XMS-794/images/DE\\_60\\_050\\_004I\\_Oberflaeche\\_A0.pdf](https://pages.zeiss.com/rs/896-XMS-794/images/DE_60_050_004I_Oberflaeche_A0.pdf).
36. Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin Dipl.-Ing.(FH) Meinke.  
Oberflächenmesstechnik:S.3,4,6 [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: [https://mb-master.htw-berlin.de/files/Stg/MB/Versuchsanleitungen\\_Messtechnik/Oberflaeche.pdf](https://mb-master.htw-berlin.de/files/Stg/MB/Versuchsanleitungen_Messtechnik/Oberflaeche.pdf).
37. GWP Gesellschaft für Werkstoffprüfung. GWP Rauheitsmessung [Stand: 31.12.2023].  
Verfügbar unter: <https://gwp.eu/menue/labor-services/oberflaechenpruefung/rauheitsmessung>.
38. Timesavers. Alles was Sie über die Rauheit der Oberfläche (Ra) wissen müssen; 2021 [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter:  
<https://www.timesaversint.com/de/Wissensdatenbank/alles-was-sie-ueber-die-rauheit-der-oberflaeche-ra-wissen-muessen/>.
39. Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schorr. Rauheitsmessung zur Oberflächencharakterisierung – aber richtig 07.04.2028 [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2018/04/24\\_schorr\\_rauheit\\_04j2018/24\\_schorr\\_rauheit\\_04j2018.php](https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2018/04/24_schorr_rauheit_04j2018/24_schorr_rauheit_04j2018.php).
40. KEYENCE GmbH. Einführung zur Rauheitsmessung von Oberflächen 2021:S.3-6,11-14 [Stand: 31.12.23]. Verfügbar unter:  
[https://www.keyence.de/mykeyence/?ptn=001&aw=googleMCD\\_Top\\_350N&SL=07&gclid=CjwKCAiA0KmPBhBqEiwAJqKK49tMgo\\_p0ap98zY2mVwxMgSGEvdhBT3MipqppsSohabGWZSjbPc1hoCK54QAvD\\_BwE](https://www.keyence.de/mykeyence/?ptn=001&aw=googleMCD_Top_350N&SL=07&gclid=CjwKCAiA0KmPBhBqEiwAJqKK49tMgo_p0ap98zY2mVwxMgSGEvdhBT3MipqppsSohabGWZSjbPc1hoCK54QAvD_BwE).
41. Kai Hornung. Oberflächenqualität von Klasse V Kompositfüllungen in Abhängigkeit von der klinischen Verweildauer 2017:S.65,68,86,88,93,97-99 [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: [https://jlupub.ub.uni-giessen.de/bitstream/handle/jlupub/15172/HornungKai\\_2018\\_03\\_06\\_.pdf?sequence=1](https://jlupub.ub.uni-giessen.de/bitstream/handle/jlupub/15172/HornungKai_2018_03_06_.pdf?sequence=1).

42. Karam Kass Elias. Einfluss verschiedener Lösungsmittel auf die Oberflächenrauheit dentaler Komposite 2019:S.26-28,48,49 [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: <https://freidok.uni-freiburg.de/fedora/objects/freidok:167957/datastreams/FILE1/content>.
43. Indra Nyamaa. Untersuchungen zur In situ-Plaquanlagerung an Füllungswerkstoffen 2005:S.77-81,84 [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: [https://edoc.ub.uni-muenchen.de/5282/1/Nyamaa\\_Indra.pdf](https://edoc.ub.uni-muenchen.de/5282/1/Nyamaa_Indra.pdf).
44. Nascimento HdOd, Vieira Junior WF, Basting RT, Turssi CP, Amaral FLBd, França FMG. Effect of different polishing systems and staining solution on surface roughness and color stability of bulk fill resin composites. American journal of dentistry 2022; 35(1):37–42 [Stand: 31.12.23]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35316591/>.
45. OTH Regensburg. Härteprüfung:S.2,17 [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: <https://hps.hs-regensburg.de/heh39273/aufsaeetze/haerte.pdf>.
46. Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schorr, Steinbeis Analysezentrum. Härteprüfung [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: <https://steinbeis-analysezentrum.com/haertepruefung/>.
47. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Nationales Metrologieinstitut. Härteprüfverfahren; 2015 [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt5/fb-51/test/haertepruefverfahren/martens.html>.
48. Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schorr, Steinbeis Analysezentrum. Härteprüfung Vickers [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: <https://steinbeis-analysezentrum.com/vickers-haertepruefung/>.
49. ZwickRoell. Härte prüfen mit ZwickRoell:S.3,12,13 [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: [https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user\\_upload/Brochures\\_DE/15\\_303\\_Haerte\\_pruefen\\_mit\\_ZwickRoell\\_FP\\_DE.pdf](https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/Brochures_DE/15_303_Haerte_pruefen_mit_ZwickRoell_FP_DE.pdf).
50. ZwickRoell GmbH & Co. KG. Härteprüfung: Definition & Härteprüfverfahren [Stand: 31.12.2023]. Verfügbar unter: <https://www.zwickroell.com/de/branchen/werkstoffpruefung-materialpruefung/haertepruefung/>.

51. Universität Paderborn. Mikroeindringhärte mit Fisherscope [Stand: 31.12.2023].  
Verfügbar unter: <https://chemie.uni-paderborn.de/arbeitskreise/technische-chemie/cmp/ausstattung/mikroeindringhaerte>.
52. Zwick/Roell. Grundlagen der Härteprüfung 2016:S.4,27-29 [Stand: 31.12.2023].  
Verfügbar unter:  
[https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/PDF/testXpo/Vortraege/2016/Zwick\\_Ralf\\_Freck\\_Grundlagen\\_der\\_Haerterpruefung.pdf](https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/PDF/testXpo/Vortraege/2016/Zwick_Ralf_Freck_Grundlagen_der_Haerterpruefung.pdf).
53. Prof. Dr. Dipl. Ing. Nicoleta Ilie, Prof. Dr. Karl-Heinz Kunzelmann, Prof. Dr. Reinhard Hickel. Werkstoffkundliche Untersuchungen zu Kompositen. Deutsche zahnärztliche Zeitschrift 2005; (60):S.321–334 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter:  
[https://zahnarztweilenmann.ch/Wissenschaftliches/FrakturenKomposit/Bilder/Illie\\_et\\_al\\_2005.pdf](https://zahnarztweilenmann.ch/Wissenschaftliches/FrakturenKomposit/Bilder/Illie_et_al_2005.pdf).
54. Osiewicz MA, Werner A, Roeters FJM, Kleverlaan CJ. Wear of bulk-fill resin composites. Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials 2022; 38(3):549–53 [Stand: 01.01.24]. Verfügbar unter:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34972580/>.
55. Katja Trixner. Einfluss der Belichtungsart auf das Polymerisationsverhalten moderner Komposite 2006:S.41-44,90 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: [https://edoc.ub.uni-muenchen.de/6221/1/Trixner\\_Katja.pdf](https://edoc.ub.uni-muenchen.de/6221/1/Trixner_Katja.pdf).
56. Johannes Neubauer. Moderne Nano- und Nanohybridkomposite im werkstoffkundlichen Vergleich 2016:S.80 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: [https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt\\_derivate\\_00036441/Moderne%20Nano-%20und%20Nanohybridkomposite%20im%20werkstoffkundlichen%20Vergleich.pdf](https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00036441/Moderne%20Nano-%20und%20Nanohybridkomposite%20im%20werkstoffkundlichen%20Vergleich.pdf).
57. Kaiser C, Price RB. Effect of time on the post-irradiation curing of six resin-based composites. Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials 2020; 36(8):1019–27 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32600662/>.
58. Hattab FN, Qudeimat MA, al-Rimawi HS. Dental discoloration: an overview. Journal of esthetic dentistry 1999; 11(6):291–310 [Stand: 01.01.24]. Verfügbar unter:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10825865/>.

59. Dr. J. Hehn, Dr. F. Göttfert., Dr. T. Schwenk, Dr. M. Striegel. Bleaching: mit minimalem Mehraufwand zum maximalen Ergebnis. DFZ 2012; 56(5):S.68, 70–73 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: [https://zahnarzt-dr-hehn.de/files/zahnarzt-dr-hehn.de/ver%C3%B6ffentlichungen/JH\\_2012\\_3-Bleaching:%20mit%20minimalem%20Mehraufwand%20zum%20maximalen%20Ergebnis%20Fachbeitrag%20in%20Zeitschrift%20des%20Freien%20Verbandes%20Deutscher%20Zahn%C3%A4rzte.pdf](https://zahnarzt-dr-hehn.de/files/zahnarzt-dr-hehn.de/ver%C3%B6ffentlichungen/JH_2012_3-Bleaching:%20mit%20minimalem%20Mehraufwand%20zum%20maximalen%20Ergebnis%20Fachbeitrag%20in%20Zeitschrift%20des%20Freien%20Verbandes%20Deutscher%20Zahn%C3%A4rzte.pdf).
60. Zhao X, Zanetti F, Wang L, Pan J, Majeed S, Malmstrom H et al. Effects of different discoloration challenges and whitening treatments on dental hard tissues and composite resin restorations. Journal of dentistry 2019; 89:103182 [Stand: 01.01.24]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31430508/>.
61. Z Deljoo, M S, Mr A, R B. The Effect of Different Polishing Methods and Storage Media on Discoloration of Resin Composites. Journal of dental biomaterials 2016; 3(2):S.226–232 [Stand: 01.01.24]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28959747/>.
62. Grdić S. Experimentelle Langzeituntersuchung zur Verfärbung von Verblendkunststoffen in Abhängigkeit von der Polymerisationsdauer 2013:S.67–76 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: <https://d-nb.info/1043699589/34>.
63. Langwieder BC. Verfärbungsrate und Oberflächeneigenschaften moderner Verblendkomposite 2019:S.15-17,23,29,74,121-124,133,134 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: [https://edoc.ub.uni-muenchen.de/25321/1/Langwieder\\_Benedikt.pdf](https://edoc.ub.uni-muenchen.de/25321/1/Langwieder_Benedikt.pdf).
64. Poorsattar Bejeh Mir A, Poorsattar Bejeh Mir M. The effect of different curing time regimens on immediate postpolymerization color changes of resin composites. The journal of contemporary dental practice 2012; 13(4):S.472–475 [Stand: 01.01.24]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23151695/>.
65. Alexander Dreher. Proseminar Farbmanagement Universität Koblenz-Landau: Grundlagen II 2009:S.3,8-10 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: [https://userpages.uni-koblenz.de/~cg/ss09/Proseminar\\_Farbmanagement/Grundlagen%20II.pdf](https://userpages.uni-koblenz.de/~cg/ss09/Proseminar_Farbmanagement/Grundlagen%20II.pdf).
66. Institut für Digital Humanities Universität zu Köln. Farbräume: Universität zu Köln; 2018-2022 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: <https://lehre.idh.uni-koeln.de/lehrveranstaltungen/sosem20/it-grundlagen-schule/digitale-bilder/farbraume/>.



67. PD Dr. Olms C, Martin V. Reproduzierbarkeit und Reliabilität intraoraler Spektrophotometer. Deutsche zahnärztliche Zeitschrift 2019; (S.74):102–11 [Stand: 01.01.24]. Verfügbar unter: [https://www.online-dzz.com/fileadmin/user\\_upload/EM\\_OA\\_Olms\\_Spektrophotometer.pdf](https://www.online-dzz.com/fileadmin/user_upload/EM_OA_Olms_Spektrophotometer.pdf).
68. Wojciech Mokrzycki, Maciej Tatol. Color differenece Delta E: a survey. Machine Graphics and Vision 2011:S.16 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: <https://wisotop.de/assets/2017/DeltaE-%20Survey-2.pdf>.
69. Über VOCO | VOCO GmbH [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: <https://www.voco.dental/de/unternehmen/die-dentalisten/ueber-voco.aspx>.
70. VOCO GmbH. Caps Warmer Benutzerhandbuch VOCO GmbH 2018:S.9,24 [Stand: 01.01.24]. Verfügbar unter: [https://www.voco.dental/us/portaldata/1/resources/products/instructions-for-use/e1/caps-warmer\\_ifu\\_e1.pdf](https://www.voco.dental/us/portaldata/1/resources/products/instructions-for-use/e1/caps-warmer_ifu_e1.pdf).
71. Dentsply Sirona. Geschichte | Dentsply Sirona Deutschland & Österreich [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: <https://www.dentsplysirona.com/de-de/company/our-company/history.html>.
72. Sirona Dental System GmbH. Sirona C4+ Gebrauchsanweisung (Seite 65 von 128) | ManualsLib; 2014 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: <https://www.manualslib.de/manual/170394/Sirona-C4Plus.html?page=65#manual>.
73. Sirona Dental Systems GmbH. Instrumentenserien T1 und T2 Dentsply Sirona:S.18 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: [https://www.henryschein-dental.de/images/ads/inca\\_Uploads/1001/47/1001\\_14539/Brosch%C3%BCre.pdf](https://www.henryschein-dental.de/images/ads/inca_Uploads/1001/47/1001_14539/Brosch%C3%BCre.pdf).
74. Screening Eagle P. Proceq ZGM 1120 2023:S.1-3 [Stand: 01.01.2024]. Verfügbar unter: <https://www.screeningeagle.com/de/sales-flyers/SF-zehntner-zgm1120>.
75. CORPORATION K. Unternehmensprofil KEYENCE; 2018:S.14,16 [Stand: 02.01.24]. Verfügbar unter: <https://exhibitorsearch.messefrankfurt.com/images/original/userdata/bata/208600/5d36eb3e18b81.pdf>.
76. ZwickRoell GmbH & Co. KG. ZwickRoell Gruppe - Materialprüfung / Werkstoffprüfung [Stand: 02.01.2024]. Verfügbar unter: <https://www.zwickroell.com/de/unternehmen/ueber-uns/>.

77. KONICA MINOLTA SENSING INC.  
discontinued\_cm\_3500dspectrophotometer\_manual-8ye9re2280  
SPECTROPHOTOMETER CM-3500d HARDWARE MANUAL 1993:S.8,21,22,26  
[Stand: 02.01.2024]. Verfügbar unter: [https://sensing.konicaminolta.us/wp-content/uploads/discontinued\\_cm\\_3500dspectrophotometer\\_manual-8ye9re2280.pdf](https://sensing.konicaminolta.us/wp-content/uploads/discontinued_cm_3500dspectrophotometer_manual-8ye9re2280.pdf).
78. Thermo Fisher. About us | Thermo Fisher, Phenom World [Stand: 02.01.2024]. Verfügbar unter: <https://www.phenom-world.com/about>.
79. Screening Eagle Technologies. de product-family Portable-Zehntner-Glossmeters - Protect The Built World; 2021 [Stand: 02.01.2024]. Verfügbar unter: [https://www.screeningeagle.com/de/product-family/Portable-Zehntner-Glossmeters?products\\_id=9345](https://www.screeningeagle.com/de/product-family/Portable-Zehntner-Glossmeters?products_id=9345).
80. KEYENCE GmbH. Präzise und großflächige Oberflächenanalyse Keyence Modellreihe VK-X 2018:S.4,17,22,25 [Stand: 02.01.2024]. Verfügbar unter: [https://chemie.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/f\\_chemie/aktuelles\\_events/dateien/AS\\_94517\\_VK-X\\_C\\_622E13\\_DE\\_1078-3.pdf](https://chemie.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/f_chemie/aktuelles_events/dateien/AS_94517_VK-X_C_622E13_DE_1078-3.pdf).
81. KEYENCE GmbH. Einführung zur Rauheitsmessung von Oberflächen: Flächenrauheit 2018:S. 2,6-8,17 [Stand: 02.01.2024]. Verfügbar unter: [https://www.keyence.de/landing/lpc/rauheitsmessung\\_vk.jsp](https://www.keyence.de/landing/lpc/rauheitsmessung_vk.jsp).
82. Konica Minolta. pcc\_deutsch\_13 exakte Farbkommunikation:S.10,25,26,30,32 [Stand: 02.01.2024]. Verfügbar unter: [https://www5.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring\\_Instruments/4\\_Learning\\_Centre/C\\_A/PRECISE\\_COLOR\\_COMMUNICATION/pcc\\_deutsch\\_13.pdf](https://www5.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring_Instruments/4_Learning_Centre/C_A/PRECISE_COLOR_COMMUNICATION/pcc_deutsch_13.pdf).
83. Konica Minolta Sensing Europe B.V. Wie Farbmessgeräte "sehen" - KONICA MINOLTA Europe [Stand: 02.01.2024]. Verfügbar unter: <https://www5.konicaminolta.eu/de/messgeraete/lernzentrum/farbmessung-glanzmessung/colour/wie-farbmessgeraete-sehen.html>.
84. Prof. Carlos Rocha Gomes Torres. VisCalor: „Thermo-Viscous-Technologie“: Spitta Verlag GmbH & Co. KG; 2023 [Stand: 05.01.2024]. Verfügbar unter: [https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/viscalor-thermo-viscous-technologie-tvt-fuer-direkte-frontzahnrestorationen\\_\\_12178.html](https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/viscalor-thermo-viscous-technologie-tvt-fuer-direkte-frontzahnrestorationen__12178.html).

85. Morsy KE, Salama MM, Genaid TM. Clinical evaluation of thermo-viscous and sonic fill-activated bulk fill composite restorations. *American journal of dentistry* 2023; 36(2):81–5 [Stand: 05.01.24]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37076297/>.
86. Yang J, Silikas N, Watts DC. Pre-heating effects on extrusion force, stickiness and packability of resin-based composite. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials* 2019; 35(11):1594–602 [Stand: 05.01.24]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31477247/>.
87. Bilgili Can D, Özarslan M. 3D-2D microleakage assessment of preheated bulk-fill composite resin applied with different parameters: a micro-CT analysis. *Odontology* 2023; 111(4):942–52 [Stand: 05.01.24]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36973535/>.
88. Favoreto MW, Souza Carneiro T de, Wendlinger M, Ñaupari-Villasante R, Matos TP de, Kunz PM et al. Various ways of pre-heating a bulk-fill thermoviscous composite in restoration in non-cariou cervical lesions: 12-month randomized clinical trial. *Clinical oral investigations* 2023; 27(8):4345–59 [Stand: 05.01.24]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37217713/>.
89. Omnident. Doubliermassen; 2023 [Stand: 05.01.2024]. Verfügbar unter: <https://www.omnident.de/katalog/labor/modellherstellung/doubliermassen/#info>.
90. Dr.-Ing. Lambrecht J, Dr. phil. Wolf HP, Dr. rer.nat. Gerlach E. Chemische Eigenschaften von Siliconelastomeren:1–11 [Stand: 06.01.2024]. Verfügbar unter: [https://www.uni-frankfurt.de/61049683/chemische\\_eigenschaften\\_siliconelastomere.pdf](https://www.uni-frankfurt.de/61049683/chemische_eigenschaften_siliconelastomere.pdf).
91. Puria Bigdali. Einfluss von Eugenol und Silikonöl auf die Dentinhaftung von adhäsiven Befestigungsmaterialien 2015:S.1,2,5,50-51 [Stand: 06.01.2024]. Verfügbar unter: <https://open.fau.de/server/api/core/bitstreams/c5fd96aa-98f2-4772-a199-314f222efd82/content>.
92. Bundesverband Glasindustrie e.V. Glasarten [Stand: 06.01.2024]. Verfügbar unter: <https://www.bvglas.de/ueber-glas/allround-talent-glas/glasarten/>.
93. Hyun H-K, Christoferson CK, Pfeifer CS, Felix C, Ferracane JL. Effect of shade, opacity and layer thickness on light transmission through a nano-hybrid dental composite during curing. *Journal of esthetic and restorative dentistry : official publication of the American*

- Academy of Esthetic Dentistry ... [et al.] 2017; 29(5):362–7 [Stand: 06.01.24]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28628735/>.
94. Dr. David Clark. "Schwarze Dreiecke" verschwinden lassen. *cosmetic dentistry* 2009:34–8 [Stand: 06.01.2024]. Verfügbar unter: [https://media.zwp-online.info/archiv/pub/sim/cd/2009/cd0409/cd409\\_034\\_038\\_ads.pdf](https://media.zwp-online.info/archiv/pub/sim/cd/2009/cd0409/cd409_034_038_ads.pdf).
  95. Huang W, Ren L, Cheng Y, Xu M, Luo W, Zhan D et al. Evaluation of the Color Stability, Water Sorption, and Solubility of Current Resin Composites. *Materials (Basel, Switzerland)* 2022; 15(19) [Stand: 06.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36234048/>.
  96. Heintze SD, Reinhardt M, Müller F, Peschke A. Press-on force during polishing of resin composite restorations. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials* 2019; 35(6):937–44 [Stand: 06.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31005330/>.
  97. Ardu S, Rossier I, Di Bella E, Krejci I, Dietschi D. Resin composite thickness' influence on L\*a\*b\* coordinates and translucency. *Clinical oral investigations* 2019; 23(4):1583–6 [Stand: 06.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30143901/>.
  98. Neumann R. Farbanalyse von direkten Komposit Frontzahnrestorationen 2007:S.111 [Stand: 06.01.2024]. Verfügbar unter: [https://edoc.ub.uni-muenchen.de/6870/2/Neumann\\_Raquel.pdf](https://edoc.ub.uni-muenchen.de/6870/2/Neumann_Raquel.pdf).
  99. Hanno Heo. Glanz dentaler Nano-Komposite in Abhängigkeit von der Politur 2009:S.31,53, 54,59,74 [Stand: 07.01.2024]. Verfügbar unter: [https://repositorium.uni-muenster.de/document/miami/77c0f7fc-3b0e-453c-b43d-9b704e950327/diss\\_heo.pdf](https://repositorium.uni-muenster.de/document/miami/77c0f7fc-3b0e-453c-b43d-9b704e950327/diss_heo.pdf).
  100. Da Costa JB, Ferracane JL, Amaya-Pajares S, Pfefferkorn F. Visually acceptable gloss threshold for resin composite and polishing systems. *Journal of the American Dental Association (1939)* 2021; 152(5):385–92 [Stand: 07.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33549304/>.
  101. Dennis T, Zoltie T, Wood D, Altaie A. Reduced-step composite polishing systems - a new gold standard? *Journal of dentistry* 2021; 112:103769 [Stand: 07.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34363894/>.
  102. Zovko R, Cvitanović S, Mabić M, Šarac Z, Ćorić A, Glavina D et al. The Effect of Chemical Degradation and Polishing on the Gloss of Composite Dental Materials.

- Materials (Basel, Switzerland) 2023; 16(10) [Stand: 07.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37241353/>.
103. St-Pierre L, Martel C, Crépeau H, Vargas MA. Influence of Polishing Systems on Surface Roughness of Composite Resins: Polishability of Composite Resins. *Operative dentistry* 2019; 44(3):E122-E132 [Stand: 07.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31046648/>.
104. Berger SB, Paliolol ARM, Cavalli V, Giannini M. Surface roughness and staining susceptibility of composite resins after finishing and polishing. *Journal of esthetic and restorative dentistry : official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ...* [et al.] 2011; 23(1):34–43 [Stand: 07.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21323837/>.
105. Gömleksiz S, Gömleksiz O. The effect of contemporary finishing and polishing systems on the surface roughness of bulk fill resin composite and nanocomposites. *Journal of esthetic and restorative dentistry : official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ...* [et al.] 2022; 34(6):915–23 [Stand: 07.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35076168/>.
106. Babina K, Polyakova M, Sokhova I, Doroshina V, Arakelyan M, Novozhilova N. The Effect of Finishing and Polishing Sequences on The Surface Roughness of Three Different Nanocomposites and Composite/Enamel and Composite/Cementum Interfaces. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)* 2020; 10(7):S.1-14 [Stand: 07.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32659992/>.
107. Nasoohi N, Hoorizad M, Tabatabaei SF. Effects of Wet and Dry Finishing and Polishing on Surface Roughness and Microhardness of Composite Resins. *Journal of dentistry (Tehran, Iran)* 2017; 14(2):69–75 [Stand: 12.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29104597/>.
108. Araújo CS de, Schein MT, Zanchi CH, Rodrigues SA, Demarco FF. Composite resin microhardness: the influence of light curing method, composite shade, and depth of cure. *The journal of contemporary dental practice* 2008; 9(4):43–50 [Stand: 12.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18473026/>.
109. Yang J, Silikas N, Watts DC. Pre-heating time and exposure duration: Effects on post-irradiation properties of a thermo-viscous resin-composite. *Dental materials : official*

- publication of the Academy of Dental Materials 2020; 36(6):787–93 [Stand: 12.01.2024].  
Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32386715/>.
110. Par M, Repusic I, Skenderovic H, Sever EK, Marovic D, Tarle Z. Real-time Light Transmittance Monitoring for Determining Polymerization Completeness of Conventional and Bulk Fill Dental Composites. *Operative dentistry* 2018; 43(1):E19-E31 [Stand: 12.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29284096/>.
111. Colombo M, Gallo S, Poggio C, Ricaldone V, Arciola CR, Scribante A. New Resin-Based Bulk-Fill Composites: in vitro Evaluation of Micro-Hardness and Depth of Cure as Infection Risk Indexes. *Materials (Basel, Switzerland)* 2020; 13(6) [Stand: 12.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32183115/>.
112. Falkensammer F, Arnetzl GV, Wildburger A, Freudenthaler J. Color stability of different composite resin materials. *The Journal of prosthetic dentistry* 2013; 109(6):378–83 [Stand: 12.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23763782/>.
113. Lengert M. Verfärbung und Reinigungsmöglichkeiten von in der Zahnmedizin verwendeten Kunststoffen 2015:S.28,74 [Stand: 12.01.2024]. Verfügbar unter: [https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt\\_derivate\\_00031767/Diss/Lengert.pdf](https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00031767/Diss/Lengert.pdf).
114. Mahajan RP, Shenoy VU, Sumanthini MV, Mahajan HP, Walzade PS, Mangrolia R. Comparative Evaluation of the Discoloration of Microhybrid and Nanohybrid Composite Resins by Different Beverages: A Spectrophotometric Analysis. *The journal of contemporary dental practice* 2019; 20(2):226–30 [Stand: 12.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31058640/>.
115. Ersoz B, Aybala Oktay E, Aydin N, Karaoglanoglu S. Does hot coffee or cold coffee cause more discoloration on resin based composite materials? *European oral research* 2023; 57(2):103–7 [Stand: 12.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37525856/>.
116. Unsal KA, Karaman E. Effect of Additional Light Curing on Colour Stability of Composite Resins. *International dental journal* 2022; 72(3):346–52 [Stand: 12.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34412897/>.
117. Hickl V, Strasser T, Schmid A, Rosentritt M. Effects of storage and toothbrush simulation on color, gloss, and roughness of CAD/CAM, hand-cast, thermoforming, and

- 3D-printed splint materials. *Clinical oral investigations* 2022; 26(5):4183–94 [Stand: 13.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35119536/>.
118. Aydın N, Topçu F-T, Karaoğlanoğlu S, Oktay E-A, Erdemir U. Effect of finishing and polishing systems on the surface roughness and color change of composite resins. *Journal of clinical and experimental dentistry* 2021; 13(5):e446-e454 [Stand: 13.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33981391/>.
119. Kolbeck C, Rosentritt M, Lang R, Handel G. Discoloration of facing and restorative composites by UV-irradiation and staining food. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials* 2006; 22(1):63–8 [Stand: 13.01.2024]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15993940/>.

## 9 Anhang

### A. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. VOCO Dimanto Polierer in den Formen kleine, große Spitze, kleiner, großer Kelch und Linse (von links nach rechts) (27).....	17
Abbildung 2. NTI Unique Polierer, erhältlich als große, kleine Spitze, Kelch und Linse (von links nach rechts) (28) .....	18
Abbildung 3. Graphische Darstellung des Reflexionsgesetzes [angelehnt an (31)].....	19
Abbildung 4. Schemazeichnung Messprinzip eines Reflektometers [angelehnt an (33)].....	20
Abbildung 5. Darstellung der maximalen Profiltiefe $R_v$ , der maximalen Profilspitzenhöhe $R_p$ , der gemittelten Rautiefe $R_z$ und des arithmetischen Mittenrauwertes $R_a$ [angelehnt an (35)] .....	22
Abbildung 6. Messung der Vickershärte [angelehnt an (48)].....	25
Abbildung 7. Darstellung der Kraft-Eindringtiefen-Kurve zur Bestimmung der Martens-härte mit der einwirkenden Standardkraft in Newton und der Eindringtiefe in $\mu\text{m}$ (52) .....	26
Abbildung 8. Darstellung des $L^*a^*b^*$ -Farbraums (CIE) mit $\Delta E$ [angelehnt an (68)] .....	29
Abbildung 9. Versuchsablauf – Herstellung Prüfkörper.....	30
Abbildung 10. Silikonform für die Prüfkörperherstellung .....	34
Abbildung 11. VOCO Caps Warmer mit Kompositkapseln, VOCO-Dispenser und gläsernem Objektträger.....	34
Abbildung 12. Polymerisationsvorgang mit dem aufgedrückten, erwärmten Objektträger .....	35
Abbildung 13. Die verwendete Politurvorrichtung .....	36
Abbildung 14. VOCO- und NTI-Polierer.....	36
Abbildung 15. Glanzmessung mit der Puttyfixation für Prüfkörper und Sensor .....	39
Abbildung 16. Oberflächenrauheitsmessung mit dem Keyence VK-X 100 Series Laser Mikroskop ..	40
Abbildung 17. Härtemessung mit dem Gerät Zwick Roell Z.25.....	41
Abbildung 18. Mikrotiterplatte mit Prüfkörpern im zweiwöchigem Rotweinbad .....	43
Abbildung 19. Prüfkörperverwahrung in den lichtundurchlässigen Boxen .....	43



Abbildung 20. Darstellung der Mittelwerte für die Glanzmessung der getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten t1/2Poly, t1 Poly und t2 Poly: .....	45
Abbildung 21. Darstellung der Mittelwerte für den arithmetischen Mittenrauwert (Ra-Wert) der getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten t1/2Poly, t1 Poly und t2 Poly:.....	48
Abbildung 22. Darstellung der Mittelwerte für die gemittelte Rautiefe (Rz-Wert) der getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten t1/2Poly, t1 Poly und t2 Poly: .....	52
Abbildung 23. Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichung für die Variable der Martenshärte für die getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten t1/2Poly, t1 Poly und t2 Poly: .....	56
Abbildung 24. Darstellung der Mittelwerte für die Verfärbungsneigung der getesteten Materialien aufgeteilt nach den Polymerisationszeiten t1/2Poly, t1 Poly und t2 Poly:.....	60
Abbildung 25. VisCalorbulkA2 VOCO 40s 1000x Vergrößerung, organische Matrix und unterschiedlich große Füllkörper.....	65
Abbildung 26. VisCalorOA2 VOCO 40s 1000x Vergrößerung, organische Matrix und unterschiedlich große Füllkörper.....	66
Abbildung 27. VisCalorA2 VOCO 20s 1000x Vergrößerung, organische Matrix und unterschiedlich große Füllkörper.....	67
Abbildung 28. VisCalorbulkA2 Rasterelektronenmikroskop 2000x Vergrößerung .....	68
Abbildung 29. VisCalorOA2 Rasterelektronenmikroskop 2000x Vergrößerung .....	70
Abbildung 30. VisCalorA2 Rasterelektronenmikroskop 2000x Vergrößerung .....	72
Abbildung 31. VisCalorA2 Rasterelektronenmikroskop 500x Vergrößerung .....	74

## **B. Tabellenverzeichnis**

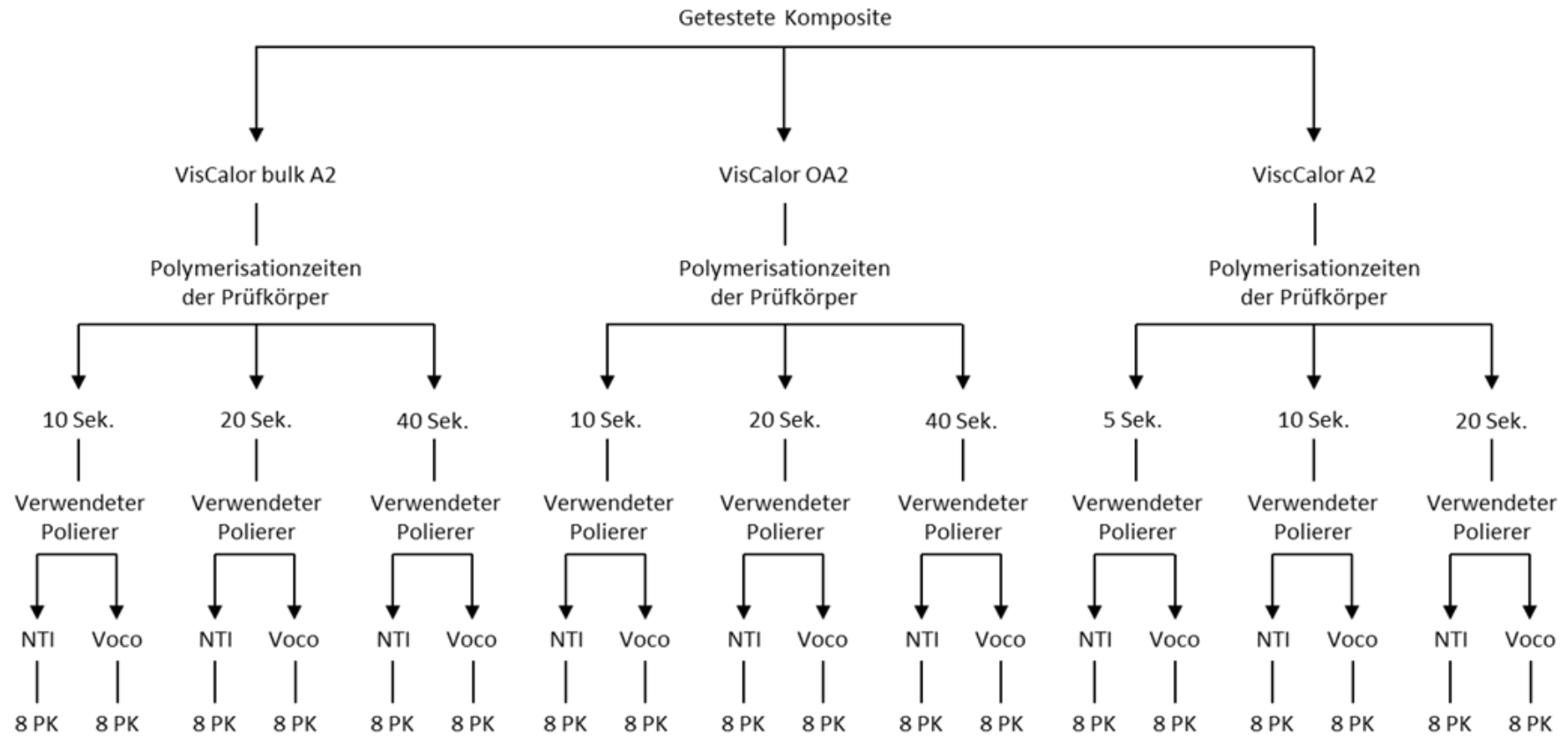
Tabelle 1: Glanzmessung: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ ).....	47
Tabelle 2. Ra-Wert: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ ).....	51
Tabelle 3. Rz-Wert: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ ).....	55
Tabelle 4. Härte: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ ) .....	59
Tabelle 5. Verfärbung: Darstellung der Bonferroni Mehrfachvergleiche, Signifikanzniveau ( $\alpha=0.05$ )	63

### C. Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a*	-	Farbkoordinate a des L*a*b*- Farbsystems
b*	-	Farbkoordinate b des L*a*b*- Farbsystems
Bis-EMA	-	Bisphenol-A-Ethoxydimethacrylat
Bis-GMA	-	Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat
BulkA2	-	VisCalor bulk A2
ca.	-	circa
-	°C	Grad Celsius
CQ	-	Campherchinon
EBPDMA	-	etoxyliertes Bisphenol-Adimethacrylat
-	Gew.-%	Gewichtsprozent
-	g	Gramm
-	K	Kelvin
L*	-	Helligkeit
-	mm	Millimeter
-	$\frac{mW}{cm^2}$	Milliwatt pro Quadratcentimeter
MW	-	arithmetischer Mittelwert
-	nm	Nanometer
-	$\frac{N}{mm^2}$	Newton pro Quadratmillimeter
NTI-Polierer	-	NTI Unique Polierer
p	-	Signifikanzwert
s	-	Sekunden
SCE	-	Specular Component Excluded
SCI	-	Specular Component Included

TEGDMA	-	Triethylenglycoldimethacrylat
$t_{\frac{1}{2}Poly}$	s	Hälfte der vom Hersteller empfohlenen Polymerisationsdauer
$t_{1 Poly}$	s	vom Hersteller empfohlene Polymerisationsdauer
$t_{2 Poly}$	s	doppelte vom Hersteller empfohlene Polymerisationsdauer
-	$\mu\text{m}$	Mikrometer
UDMA	-	Urethandimethacrylat
-	U/min	Umdrehungen pro Minute
VisCaOA2	-	VisCalorOA2/VisCalor OA2
VisCaA2	-	VisCalorA2/VisCalor A2
VisCabulkA2	-	VisCalorbulkA2/VisCalor bulk A2
VisCalorbulk	-	VisCalor bulk A2
VOCO-Polierer	-	VOCO Dimanto Polierer

### D. Versuchsablauf – Herstellung Prüfkörper (groß)



PK : Prüfkörper

## E. Email Antwort von der VOCO GmbH



FreeMail

---

### Viscalor

**Von:** "Danebrock, Martin" [REDACTED]  
**An:** "Christina Boehres" [REDACTED]  
**CC:** "Thomas Strasser" [REDACTED]  
[REDACTED]

---

Hallo Frau Boehres,

vielen Dank für Ihre Untersuchungen an unseren Viscalor Materialien. Ich hoffe, die Versuche sind zufriedenstellend verlaufen.

Die Zusammensetzung der Viscalor Materialien:

Aromatische und aliphatische Dimethacrylate, Campherchinon, Amin

Siliziumdioxid (50nm)

Glaskeramik (Ba-Al-Silikat) Durchmesser 0,7 µm bzw. 2,0 µm

Pigmente (Titandioxid, Eisenoxid, Graphit)

Füllstoffgehalt 83 Gew.%

Die drei Materialien VisCalorbulkA2, A2 und OA2 unterscheiden sich nur in der Pigmentmenge, die zugesetzt ist. Diese ist wiederum so gering, dass sie außer auf Farbe und Durchhärtung keinen Einfluss auf die Materialeigenschaften hat.

MfG

Martin Danebrock

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

---

Name	Christina Boehres
Geboren	19.06.1995 in Hagen
Staatsbürgerschaft	Deutsch

## Schul- und Hochschulausbildung

---

2005-2013	Fichte-Gymnasium Hagen, Abitur
WS 2014-SS 2020	Studium der Zahnheilkunde an der Universität Regensburg, Staatsexamen
März 2021-März 2023	Vorbereitungsassistentin in der Zahnarztpraxis Dr. Doktor & Kollegen Hemer
seit April 2023	Angestellte Zahnärztin in der Zahnarztpraxis Dr. Doktor & Kollegen Hemer



## **Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dipl.-Ing. Martin Rosentritt für die Bereitstellung des interessanten Themas, die sehr gute Betreuung, Expertise und tatkräftige Unterstützung während der Umsetzung dieser Dissertation. Herrn Dr. Thomas Strasser danke ich für die fachliche Betreuung, Anregungen und kompetente Unterstützung bei der Verwirklichung der Dissertation. Zusätzlich möchte ich mich bei der Forschungseinheit der zahnärztlichen Prothetik für die Bereitstellung der Labore und insbesondere bei Frau Dipl.-Ing. Sibylle Schneider-Feyrer, Herrn Hans-Jürgen Laberer und Frau Marlene Rosendahl für die Einführung in die Maschinen und dortige Unterstützung danken. Der VOCO GmbH danke ich für die zur Verfügung gestellten Materialien. Ebenfalls danke ich meiner Familie und meinem Partner für ihre stetige Unterstützung.