

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Haftwerte

Die entstandenen Versagenslastwerte (N) wurden durch die Haftfläche (mm) geteilt, um die Haftwerte in MPa zu erhalten. Der folgende erste Auswertungsschritt bestand in der Bestimmung der Mittelwerte sowie der Standardabweichung, welche in der Tabelle 1 zusammengefasst sind. Die Haftwerte an den verschiedenen Oberflächen sind jeweils für die initiale Gruppe (Initial) und die Gruppe nach thermozyklischer Belastung (TB) dargestellt und nach den Befestigungssystemen Syntac Classic/Tetric Flow und Excite DSC/Variolink II aufgeschlüsselt. Dabei zeigten die Kontrollgruppen der natürlichen Zahnhartsubstanz bis auf die Gruppe Dentin/Variolink II (14,3 (4,7) MPa (initial); 15,1 (2,4) MPa (TB)) und die Gruppen, die mit dem CoJet-System vorbehandelten wurden, deutlich höhere Haftwerte als die unbehandelten und mit Fluorwasserstoff vorbehandelten Gruppen.

**Tab. 1** Mittelwerte und Standardabweichung der Haftwerte an den verschiedenen Oberflächen aufgeschlüsselt nach den Befestigungssystemen

Befestigungssystem			Syntac Classic Tetric Flow		Excite DSC Variolink II	
Haftfläche	TB	N	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Schmelz/Keramik	Initial	10	32,9	16,8	25,5	8,8
	TB	10	31	2,9	27,5	3,6
Dentin/Keramik	Initial	10	30	12,5	14,3	4,7
	TB	10	28,4	1,7	15,1	2,4
Multi/Keramik	Initial	10	17,5	7,3	16,2	5,3
	TB	10	11,4	1,8	16,5	2,6
Clearfil/Keramik	Initial	10	15,4	6,2	14,5	3,6
	TB	10	11,9	1,2	13,9	2,5
Multi/CoJet/Keramik	Initial	10	28,3	14,6	28,5	12,3
	TB	10	30,6	3,3	24,6	4,1
Clearfil/CoJet/Keramik	Initial	10	23,2	12,2	22,1	6,2
	TB	10	24,5	4,6	16,6	2,7
Multi/FS/Keramik	Initial	10	14,6	5	18,1	3
	TB	10	5,9	0,8	16,3	2,1
Clearfil/FS/Keramik	Initial	10	14,1	4,2	16,1	9,4
	TB	10	12,5	0,9	14,8	2,5

Initial - Haftwerte ohne thermozyklische Belastung

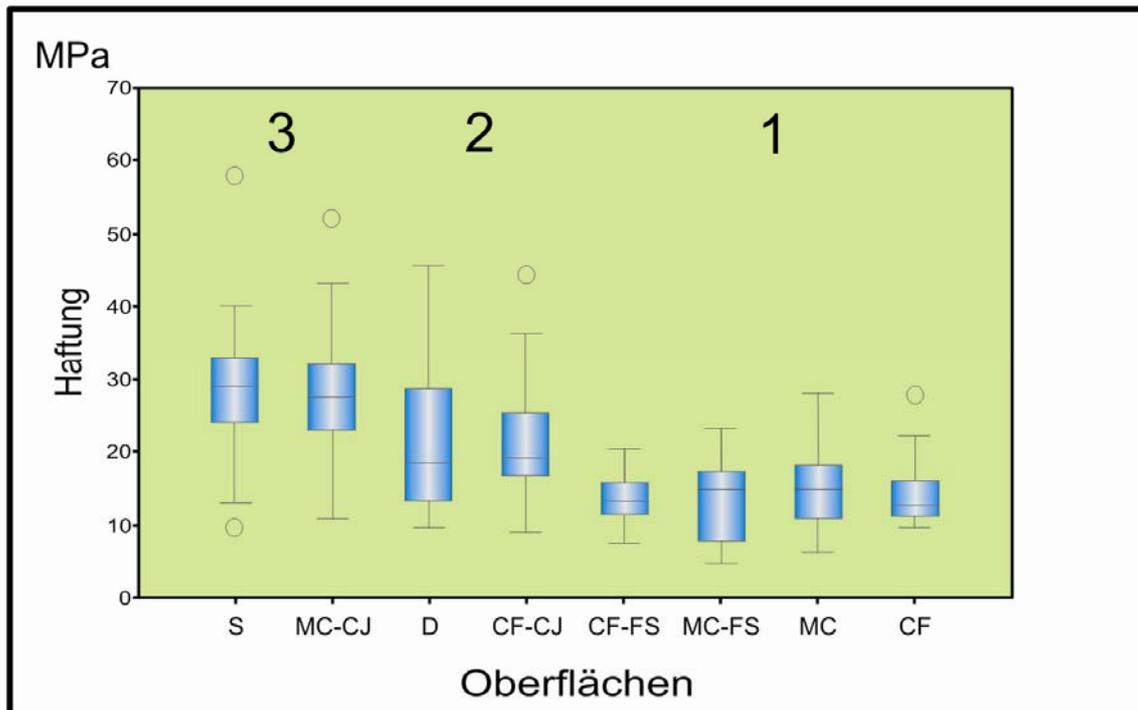
TB - Haftwerte mit thermozyklischer Belastung

Die anschließende multifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit der abhängigen Variable Haftung ergab, dass diese signifikant von den Einflussgrößen Oberfläche ( $p < 0,001$ ), Befestigungssystem ( $p = 0,011$ ) und der thermozyklischen Belastung ( $p = 0,014$ ) beeinflusst wurde. Mit dem folgenden post-Hoc-Test (Tukey-B) für die Einflussgröße Oberfläche konnten insgesamt drei homogene Untergruppen zwischen denen signifikante Unterschiede bestanden gebildet werden, welche in der Tabelle 2 dargestellt sind.

**Tab. 2** Übersicht über die Untergruppen nach dem post-Hoc-Test; (Werte in MPa)

Haftflächen	Untergruppen		
	1	2	3
MultiCore/Fluorwasserstoff	13,7		
Clearfil	13,9		
Clearfil/Fluorwasserstoff	14,3		
MultiCore	15,3		
Clearfil/CoJet		21,6	
Dentin		22	
MultiCore/CoJet			28
Schmelz			29,2

Die Ergebnisse der Haftwerte sind zusätzlich im nachfolgenden Boxplotdiagramm (Abb. 24) dargestellt. Man erkennt, dass die mit dem CoJet-System behandelten Gruppen sich in ihren Haftwerten an die Werte der natürlichen Zahnhartsubstanz angenähert haben. Dabei liegt Clearfil (21,6 MPa) fast auf gleicher Höhe wie das Dentin (MPa 22), welche beide im Diagramm durch die Untergruppe 2 dargestellt sind. MultiCore zeigte insgesamt ähnliche Haftwerte (28 MPa) wie Schmelz (29,2 MPa); im Boxplotdiagramm durch die Gruppe 3 dargestellt. Die unbehandelten und mit Fluorwasserstoff behandelten Gruppen wiesen keine Unterschiede auf.



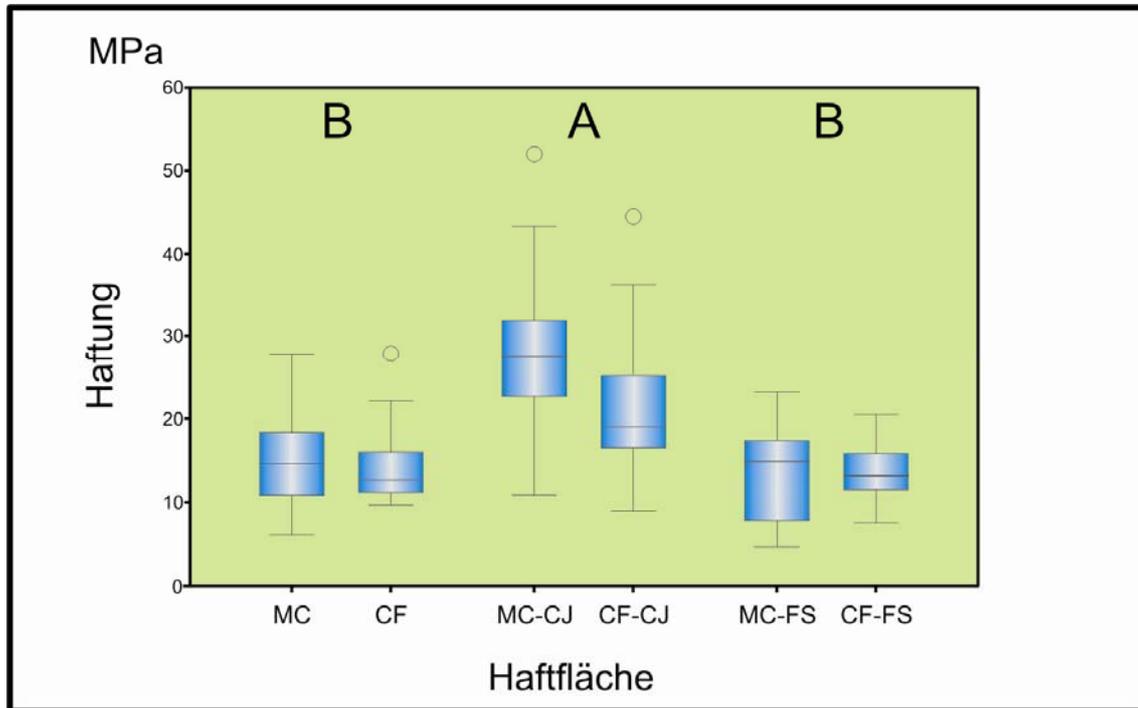
**Abb. 24** Die Abbildung ist eine Zusammenfassung aller Oberflächen. Das Befestigungssystem und die thermozyklische Belastung sind nicht gesondert betrachtet, aber mit eingerechnet. Man erkennt deutlich die signifikanten Unterschiede aufgeteilt in drei Untergruppen: 1 - unbehandelte und geätzten Gruppen zu 2 - Dentin und Clearfil/CoJet und 3 - Schmelz und MultiCore/CoJet.

S - Schmelz, D - Dentin, MC - MultiCore, CF - Clearfil,  
 CJ - CoJet-System, FS - Fluorwasserstoff  
 ○ - Extremwerte

Die obere und untere Begrenzungen der Kästen zeigt die erste (25 %) und die dritte (75 %) Quartile (q) der Beobachtungen ( $q_{0,25}$  und  $q_{0,75}$ ) an. Die Kasten-Länge wird so als  $d = q_{0,25} - q_{0,75}$  definiert. Die oberen Antennen enden am Maximum von Beobachtungen innerhalb der Reihe  $q_{0,75} + 1,5 d$ . Die niedrigeren Antennen werden analog definiert. Alle Beobachtungen kleiner als  $q_{0,25} - 1,5 d$  oder größer als  $q_{0,75} + 1,5 d$  werden als Extremwerte (Kreise) angezeigt.

Die Aufbaumaterialien, unterteilt in die Kontrollgruppe und die beiden Gruppen mit den Vorbehandlungen Fluorwasserstoff und CoJet-System, sind in der Abbildung 25 dargestellt. Dabei sind die initiale Gruppe und die Gruppe nach thermozyklischer Belastung zusammengefasst. Diese Zusammenfassung wurde vorgenommen, weil der Einfluss der thermozyklischen Belastung, der mit der multifaktoriellen Varianzanalyse festgestellt wurde, nach den Paarvergleichen (U-Test) nur bei dem mit Fluorwasserstoff vorbehandelten MultiCore noch signifikant war, welche mit Syntac Classic/Tetric Flow ( $p < 0.001$ ) befestigt wurde und geringere Haftwerte erzielte als die unbehandelte Gruppe.

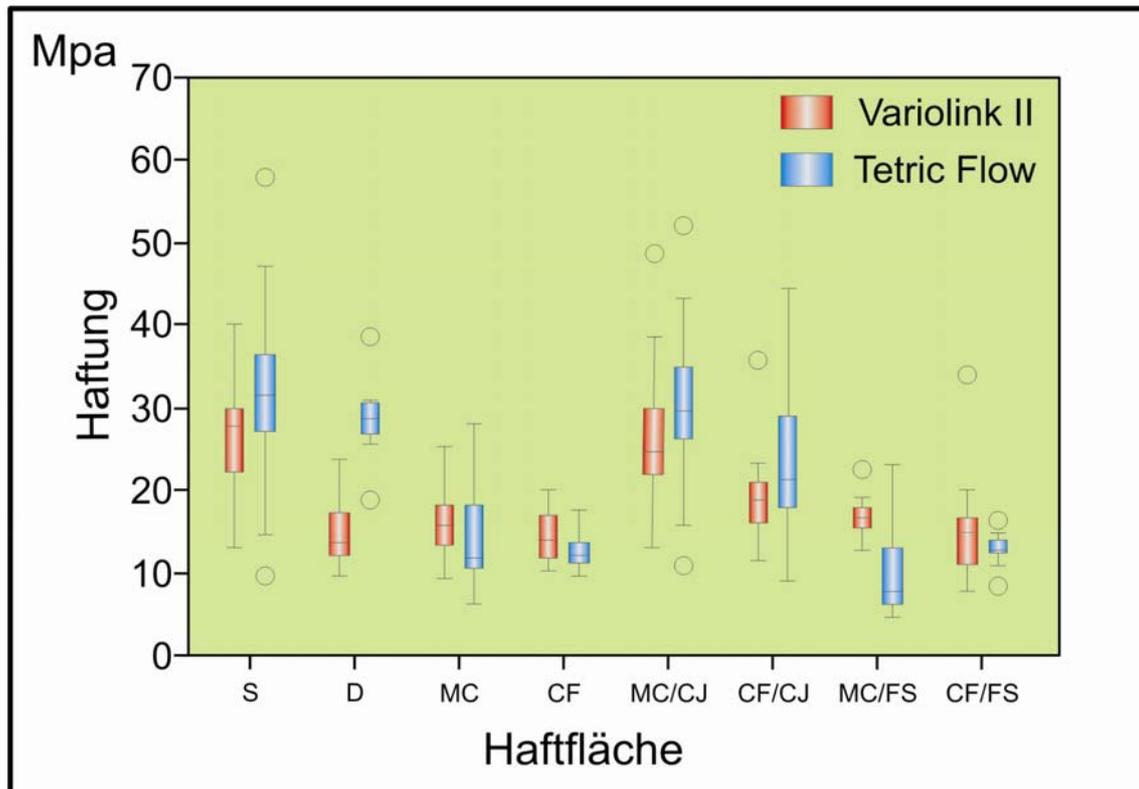
In dem Boxplotdiagramm aller Aufbaumaterialien (Abb. 25) zeigt sich deutlich die Abgrenzung der Gruppen, die mit dem CoJet-System (A) vorbehandelt wurden, gegenüber den unbehandelten und geätzten Gruppen (B).



**Abb. 25** Die Abbildung zeigt die 3 Oberflächen der beiden Aufbaumaterialien (thermozyklische Belastung mit eingeschlossen). Deutlich zu erkennen sind die höheren Haftwerte bei den CoJet-Gruppen (A) gegenüber den unbehandelten und geätzten (B) Gruppen.

CJ - CoJet-System, FS - Fluorwasserstoff  
○ - Extremwerte

Hinsichtlich der Variable Befestigungssystem zeigte sich nach den Paarvergleichen (U-Test), dass in der Dentingruppe das Syntac Classic/Tetric Flow signifikant höhere Haftwerte als das Excite DSC/Variolink II ( $p < 0,001$ ) erzielte. In der mit Fluorwasserstoff vorbehandelten MultiCore-Gruppe zeigte das Excite DSC/Variolink II signifikant höhere Haftwerte als das Syntac Classic/Tetric Flow ( $p < 0,001$ ). Alle anderen Gruppen wiesen keine signifikanten Unterschiede auf.



**Abb. 26** Darstellung der Haftwerte aufgeteilt auf die beiden Befestigungssysteme Excite DSC/Variolink II und Syntac Classic/Tetric Flow

S - Schmelz, D - Dentin, MC - MultiCore, CF - Clearfil  
 CJ - CoJet-System, FS - Fluorwasserstoff  
 ○ - Extremwerte

## 5.2. Versagensmodusanalyse

Die Analyse der Versagensmodi zeigte über alle 320 Proben vier verschiedene Varianten, die in die bereits oben genannten Typen eingeteilt wurden: Typ 1 - adhäsives Versagen zwischen Oberfläche und Komposit, Typ 2 - adhäsives Versagen zwischen Komposit und Keramik, Typ 3 - kohäsives Versagen innerhalb der Aufbaufüllung und Typ 4 - kohäsives Versagen innerhalb der Keramik. Die Ergebnisse mit prozentualer Verteilung und Anzahl der Proben, die nach diesem Modus versagt haben, sind in der Tabelle 3 dargestellt. Auffällig war, dass die Versagenstypen 1 und 3 am häufigsten auftraten.

### Variolink II

Die Kontrollgruppen der Zahnhartsubstanzen zeigten Unterschiede zwischen der Schmelzgruppe, welche zu 25 % adhäsiv (Typ 1) und 65 % kohäsiv (Typ 3) versagte, und der Dentingruppe mit 80 % adhäsivem (Typ 1) und 20 % kohäsivem Versagen (Typ 3). Der

Versagenstyp 2 trat beim Schmelz nur zu 10 % auf, wobei der Typ 4 gar nicht vorkam. In der Dentin-Gruppe traten weder der Typ 2 noch der Typ 4 auf. Innerhalb der unbehandelten und geätzten Aufbaumaterialien stellte sich ein relativ ausgeglichenes Verhältnis zwischen adhäsivem (Typ 1) und kohäsivem Versagenstyp (Typ 3) ein. Ausnahme bildete die MultiCore-Gruppe ohne Vorbehandlung. Hier kam es in 55 % der Fälle zu einem adhäsiven und nur bei 20 % zu einem kohäsiven Versagen. 25 % bestanden im Versagenstyp 2. Demgegenüber stehen die beiden mit dem CoJet-System vorbehandelten Gruppen. MultiCore versagte dabei zu 80 % kohäsiv (Typ 3) und nur zu 15 % adhäsiv (Typ 1). Typ 2 kam nicht vor und Typ 4 nur zu 5 %. Beim Clearfil kam es in 95 % der Fälle zu einem kohäsiven Versagen (Typ 3). Die verbliebenen 5 % traten als Typ 4 auf.

Insgesamt kam es bei 40,3 % zu einem Typ 1-, bei 5 % zu einem Typ 2-, bei 52,2 % zu einem Typ 3- und bei 2,5 % zu einem Typ 4-Versagen.

### **Tetric Flow**

In dieser Gruppe wiesen die Kontrollgruppen Schmelz und Dentin ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Typ 1 (Schmelz 40 %, Dentin 50 %) und Typ 3 (Schmelz 50 %, Dentin 40 %) auf. Die verbliebenen 10 % verteilten sich beim Schmelz auf den Typ 2 und beim Dentin zu je 5 % auf Typ 2 und 4. Bei den Aufbaumaterialien zeigte sich ein anderes Bild als beim Variolink II. Die unbehandelten und geätzten Gruppen hatten ein zum adhäsiven Versagen (Typ 1) deutlich verschobenes Ergebnisbild (MultiCore 85 %, Clearfil 84,2 %; MultiCore/FS 95 %, Clearfil/FS 76,2 %). Der Versagensmodus Typ 3 trat in diesen Gruppen deutlich weniger auf (MultiCore 5 %, Clearfil 10,5 %, MultiCore/FS 0 %, Clearfil 4,8 %). Alle anderen Proben folgten dem Versagenstyp 2 (MultiCore 10 %, Clearfil 5,3 %, MultiCore/FS 5 %, Clearfil/FS 19 %). Der Typ 4 trat in keiner dieser vier Gruppen auf. Bei den mit dem CoJet-System vorbehandelten Gruppen reduzierte sich der prozentuale Anteil des Versagenstyps 3 gegenüber der Variolink-Gruppe auf 60% beim MultiCore und 80% beim Clearfil. Die jeweils noch verbliebenen Proben verteilten sich beim MultiCore wie folgt: Typ 1: 10%, Typ 2: 10% und Typ 4: 20%. Beim Clearfil kam es zu jeweils 10% zu einem Typ 1 und Typ 4 Versagensmuster.

Insgesamt kam es in der Tetric Flow-Gruppe bei 56,3% zu einem Typ 1-, bei 8,1% zu einem Typ 2-, bei 31,3% zu einem Typ 3- und bei 4,4% zu einem Typ 4-Versagen.

**Tab. 3** Übersicht der entstandenen Bruchmodi und ihre prozentuale Verteilung

Befestigungs- system	Haftfläche		Bruchmodus			
			Adhäsiv		Kohäsiv	
			Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
			Zement Zahn oder Aufbaufüllung	Zement Keramik	Aufbaumaterial oder Zahn	Keramik
Syntac Classic Variolink II	Schmelz/Keramik	Anzahl	5	2	13	0
		% von Haftfläche	25,0%	10,0%	65,0%	,0%
	Dentin/Keramik	Anzahl	16	0	4	0
		% von Haftfläche	80,0%	,0%	20,0%	,0%
	Multi/Keramik	Anzahl	11	5	4	0
		% von Haftfläche	55,0%	25,0%	20,0%	,0%
	Clearfil/Keramik	Anzahl	8	0	11	1
		% von Haftfläche	40,0%	,0%	55,0%	5,0%
	Multi/CoJet/Keramik	Anzahl	3	0	16	1
		% von Haftfläche	15,0%	,0%	80,0%	5,0%
	Clearfil/CoJet/Keramik	Anzahl	0	0	19	1
		% von Haftfläche	,0%	,0%	95,0%	5,0%
	Multi/FS/Keramik	Anzahl	12	0	8	0
		% von Haftfläche	60,0%	,0%	40,0%	,0%
	Clearfil/FS/Keramik	Anzahl	9	1	8	1
		% von Haftfläche	47,4%	5,3%	42,1%	5,3%
	Gesamt	Anzahl	64	8	83	4
		% von Haftfläche	40,3%	5,0%	52,2%	2,5%
Excite DSC Tetric Flow	Schmelz/Keramik	Anzahl	8	2	10	0
		% von Haftfläche	40,0%	10,0%	50,0%	,0%
	Dentin/Keramik	Anzahl	10	1	8	1
		% von Haftfläche	50,0%	5,0%	40,0%	5,0%
	Multi/Keramik	Anzahl	17	2	1	0
		% von Haftfläche	85,0%	10,0%	5,0%	,0%
	Clearfil/Keramik	Anzahl	16	1	2	0
		% von Haftfläche	84,2%	5,3%	10,5%	,0%
	Multi/CoJet/Keramik	Anzahl	2	2	12	4
		% von Haftfläche	10,0%	10,0%	60,0%	20,0%
	Clearfil/CoJet/Keramik	Anzahl	2	0	16	2
		% von Haftfläche	10,0%	,0%	80,0%	10,0%
	Multi/FS/Keramik	Anzahl	19	1	0	0
		% von Haftfläche	95,0%	5,0%	,0%	,0%
	Clearfil/FS/Keramik	Anzahl	16	4	1	0
		% von Haftfläche	76,2%	19,0%	4,8%	,0%
	Gesamt	Anzahl	90	13	50	7
		% von Haftfläche	56,3%	8,1%	31,3%	4,4%

Typ 1 - adhäsives Versagen zwischen Oberfläche und Komposit

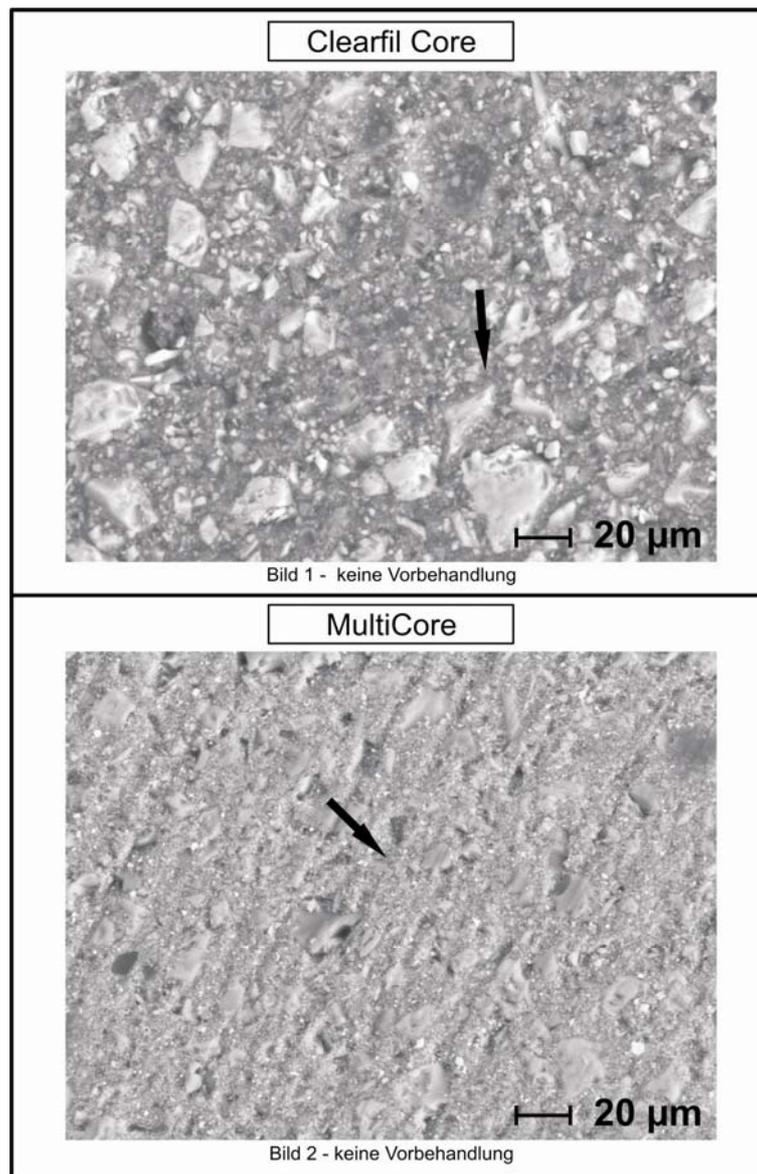
Typ 2 - adhäsives Versagen zwischen Komposit und Keramik

Typ 3 - kohäsives Versagen innerhalb der Aufbaufüllung

Typ 4 - kohäsives Versagen innerhalb der Keramik

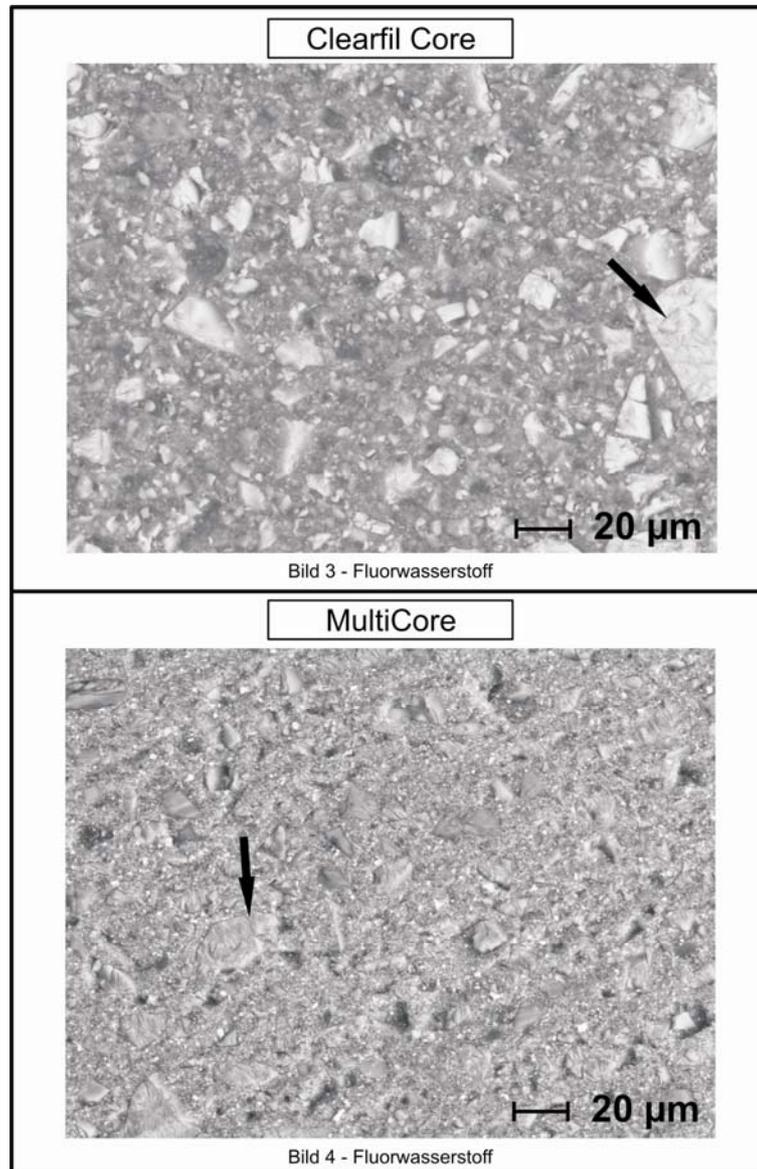
### 5.3. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Aufbaumaterialienoberfläche

Auf den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Aufbaumaterialienoberflächen sind bei den unbehandelten Gruppen jeweils die Schleifspuren des Siliziumcarbid-Nassschleifpapiers zu erkennen (Abb. 27), welche durch die Körnung des Papiers (P 600) und die gleiche Polierrichtung in einem rotierenden Vorgang zustande kommen.



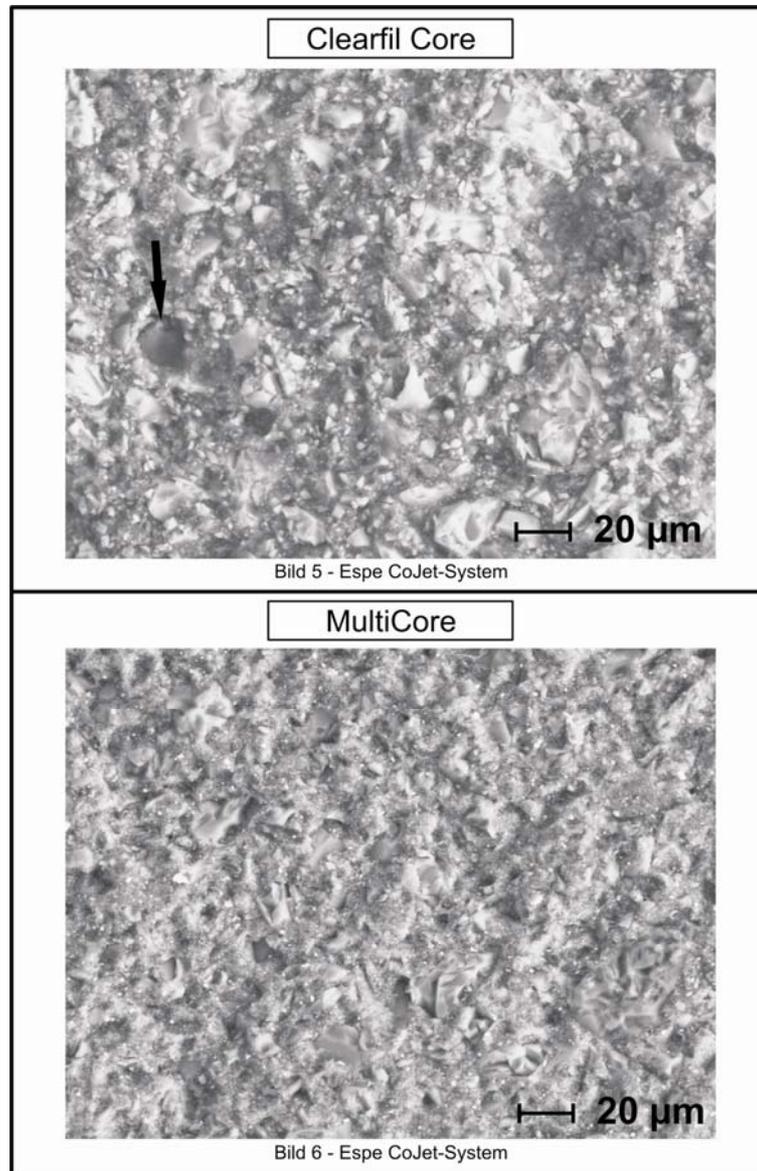
**Abb. 27** REM Aufnahmen der Aufbaumaterialienoberflächen nach der Politur, ohne Vorbehandlung. Die Pfeile markieren die Schleiffrillen durch das Nassschleifpapier.

Diese Schleifrippen sind nach einer 10 s langen Säurebehandlung deutlich reduziert und nur beim MultiCore noch sichtbar. Desweiteren sind auf den Makrofüllern des Clearfils und den größeren Partikeln im MultiCore feine Ätzlinien durch die Säureeinwirkung sichtbar (Abb. 28).



**Abb. 28** REM Aufnahmen der Aufbaumaterialienoberflächen nach der Politur und Vorbehandlung mit Fluorwasserstoff. Die Pfeile zeigen die feinen Ätzlinien, die durch die Säureeinwirkung entstanden sind.

Innerhalb der CoJet-Gruppen (Abb. 29) ist gegenüber den anderen Gruppen eine deutlich strukturierte Oberfläche sichtbar. Durch die unterschiedlich großen Füllkörper zeigte sich die Oberfläche bei Clearfil ungleichmäßiger aufgeraut.



**Abb. 29** REM Aufnahmen der Aufbaumaterialienoberflächen nach der Politur und Vorbehandlung mit dem CoJet-System. Der Pfeil im Bild 5 markiert einen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Partikel.

Die Makrofüller sind nur leicht an der Oberfläche verändert und die Bereiche zwischen diesen stärker herausgelöst. Des Weiteren ist auf der Oberfläche des Clearfils noch ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Partikel sichtbar (Bild 5, Pfeil). Die Oberfläche der MultiCore-Gruppe (Bild 6) zeigt sich durch die

homogenere Grundstruktur eines Feinpartikel-Hybridkomposits insgesamt gleichmäßiger aufgeraut.

#### 5.4. Weißlichtinterferometrie

Die Bestimmung der Rauheit der Aufbaumaterialienoberflächen (Ra - Werte) ist in der Tabelle 4 dargestellt. Wie auch schon auf den REM Aufnahmen zu erkennen war, bestätigten die Ra-Werte eine deutliche rauere Fläche bei den mit dem CoJet-System vorbehandelten Gruppen (Clearfil Ra = 1,47 und MultiCore Ra = 1,41). Insgesamt stellt sich eine Homogenität innerhalb der Vorbehandlungsgruppen zwischen den beiden unbehandelten Materialien (Clearfil Ra = 0,3 und MultiCore Ra = 0,36) und den CoJet-Gruppen ein. Einzig die säurebehandelten Gruppen weisen differierende Werte bei Clearfil (Ra = 0,37) und MultiCore (Ra = 0,65) auf.

**Tab. 4** Auswertungsergebnisse der Weißlichtinterferometrie

Top Map		Clearfil	Clearfil Fluorwasser- stoff	Clearfil CoJet	MultiCore	MultiCore Fluorwasser- stoff	MultiCore CoJet
$\lambda =$ 0,08 mm	Ra	0,3	0,37	1,47	0,36	0,65	1,41