

**Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Abteilung für Zahnärztliche Prothetik,
Altersmedizin und Funktionslehre
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin**

Dissertation

**In vitro Untersuchung zur
Oberflächenbeschaffenheit
von funkenerosiv bearbeiteten Implantat-
Suprastrukturen**

**Vergleich der SAE-Funkenerosionsmaschine
EDM 2000 mit dem Nachfolgermodell EDM 2005**

**zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)**

**vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité- Universitätsmedizin Berlin
Campus Benjamin Franklin**

**von
Jesco Lorenz Vetter
aus Berlin**

Gutachter: 1. Prof. Dr. W. B. Freesmeyer

2. Prof. Dr. med. dent. K. Böning

3. Priv.-Doz. I. Peroz

Datum der Promotion: 14. Juni 2009

Widmung

**Meinem Vater, Dachdeckermeister Ortfried Vetter
und seiner Frau, meiner Mutter, Angelika Vetter gewidmet.**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XII
1 Einleitung	15
1.1 Fragestellung	16
2 Literaturübersicht	18
2.1 Legierungsproblematik implantatgetragene Mesostrukturen	18
2.2 Korrosion zahnärztlicher Restaurationen	19
2.3 Galvanische Elemente	21
2.4 Biologische Wirkung gelöster Metallionen	22
2.5 Kupfer im menschlichen Körper	24
2.6 Kupferproblematik	24
2.7 Funkenerosion	24
2.8 Funkenspalt	26
2.9 Oberflächenqualität von erodierten Flächen	27
2.10 Oberflächenqualität zahnmedizinischer Restaurationen in der Mundhöhle	29
2.11 Die Funkenerosion in der Zahnheilkunde	29
2.12 Vorteile der Funkenerosion in der zahnmedizinischen Anwendung	31
2.13 Verbesserung der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 gegenüber ihrem Vorgänger EDM 2000	32
2.14 Messmethoden zur Beurteilung der Oberflächenveränderungen von zahnmedizinischen Restaurationen	32
2.15 Qualitative und Quantitative Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit	33
2.16 Rauigkeitsmessungen	33
2.17 Mikroskopische Untersuchungen	34
2.18 Energiedispersive Elektronenstrahlmikroanalyse	35
3 Material und Methode	37
3.1 Schematische Darstellung des Studienablaufes	37
3.2 Zahntechnischer Ablauf	39
3.2.1 Herstellung der Suprakonstruktionen	39

3.2.2	Einbettung und Guss für die Goldsuprakonstruktionen.....	39
3.2.3	Einbettung und Guss für die Titansuprakonstruktionen	40
3.2.4	Einbettung und Guss der Kobalt –Chromsuprakonstruktion	41
3.3	Funkerosiver Prozess	42
3.4	Quantitative Beurteilung der Oberfläche.....	45
3.4.1	Messvorrichtung	46
3.4.2	Messvorgang	47
3.4.3	Messbedingungen	47
3.4.4	Messung der Rauigkeit nach Funkerosion.....	47
3.4.5	Oberflächenparameter.....	48
3.4.6	Auswertung und Interpretation der Parameter.....	48
3.5	Untersuchung der elementaren Oberflächenzusammensetzung.....	51
3.5.1	Energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse vor Funkerosion.....	51
3.5.2	Messvorrichtung	51
3.5.3	Energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse nach Funkerosion	52
3.6	Messung der oberflächlichen Gefügeveränderung in der Tiefe	52
3.6.1	Herstellung der Prüfkörper:.....	52
3.6.2	Messvorrichtung	53
3.6.3	Messbedingungen	53
3.7	Statistische Auswertung der Ergebnisse	53
4	Ergebnisse.....	56
4.1	Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen	56
4.1.1	Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Titansuprastrukturen vor Funkerosion.....	57
4.1.2	Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Titansuprastrukturen nach Funkerosion.....	60
4.1.3	Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Goldsuprastrukturen vor Funkerosion.....	63
4.1.4	Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Goldsuprastrukturen nach Funkerosion.....	66
4.1.5	Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Kobalt- Chromsuprastrukturen vor Funkerosion.....	69
4.1.6	Ergebnis der mittleren Rauigkeitswerte der Kobalt- Chromsuprastrukturen nach Funkerosion	72

4.2	Grafische Darstellung der mittleren Rauigkeitswerte der Titan-, Gold- und Kobalt- Chrom- Suprastrukturen unbearbeitet und nach Funkenerosion.....	75
4.2.1	Grafische Darstellung des Mittenrauwertes Ra vor und nach Funkenerosion.....	75
4.2.2	Grafische Darstellung der maximalen Rautiefe Rmax vor und nach Funkenerosion.....	76
4.2.3	Grafische Darstellung der Rautiefe Rz vor und nach Funkenerosion.....	78
4.2.4	Grafische Darstellung der Rautiefe Rp vor und nach Funkenerosion.....	79
4.2.5	Grafische Darstellung der Glättungstiefe Rv vor und nach Funkenerosion.....	81
4.3	Standardabweichung der Rauigkeitsmessungen aller Proben vor Bearbeitung und nach Funkenerosion.....	82
4.3.1	Standardabweichung (SD) aller Titanproben vor und nach Bearbeitung.....	82
4.3.2	Standardabweichung (SD) aller Goldproben vor und nach Bearbeitung.....	83
4.3.3	Standardabweichung (SD) aller Kobalt-Chromproben vor und nach Bearbeitung.....	84
4.4	Ausgewählte Fotografien der Rauigkeitsmessungen.....	86
4.5	Vergleichende Statistik Rauigkeit.....	88
4.5.1	Vergleichende Statistik der Proben zwischen EDM 2000 vor und nach Bearbeitung.....	88
4.5.2	Vergleichende Statistik der Proben zwischen EDM 2005 vor und nach Bearbeitung.....	89
4.5.3	Vergleichende Statistik der Proben der EDM 2000 und 2005 nach Bearbeitung.....	90
4.6	Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse.....	91
4.6.1	Ergebnisse der energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse der Titansuprastrukturen für EDM 2000, unbearbeitet vor Funkenerosion.....	91
4.6.2	Ergebnisse der energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse der Titansuprastrukturen für EDM 2005, unbearbeitet vor Funkenerosion.....	92
4.6.3	Ergebnisse der energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse der Titansuprastrukturen für EDM 2000, bearbeitet nach Funkenerosion.....	93
4.6.4	Ergebnisse der energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse der Titansuprastrukturen für EDM 2005, bearbeitet nach Funkenerosion.....	94

4.6.5	Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Goldsuprastrukturen für EDM 2000, unbearbeitet vor Funkenerosion.....	95
4.6.6	Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Goldsuprastrukturen für EDM 2005, unbearbeitet vor Funkenerosion.....	96
4.6.7	Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Goldsuprastrukturen für EDM 2000, bearbeitet nach Funkenerosion.....	97
4.6.8	Ergebnisse der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse der Goldsuprastrukturen für EDM 2005, bearbeitet nach Funkenerosion.....	98
4.6.9	Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Kobalt- Chromsuprastrukturen für EDM 2000, unbearbeitet vor Funkenerosion.....	99
4.6.10	Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Kobalt- Chromsuprastrukturen für EDM 2005, unbearbeitet vor Funkenerosion.....	100
4.6.11	Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Kobalt- Chromsuprastrukturen für EDM 2000, bearbeitet nach Funkenerosion.....	101
4.6.12	Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Kobalt- Chromsuprastrukturen für EDM 2005, bearbeitet nach Funkenerosion.....	102
4.7	Grafische Darstellung der Mittelwerte der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse.....	103
4.7.1	Mittlere Elementarzusammensetzung der Titansuprastrukturen vor Erosion	103
4.7.2	Mittlere Elementarzusammensetzung der Titansuprastrukturen nach Erosion.....	104
4.7.3	Mittlere Elementarzusammensetzung der Goldsuprastrukturen vor Erosion	105
4.7.4	Mittlere Elementarzusammensetzung der Goldsuprastrukturen nach Erosion.....	106
4.7.5	Mittlere Elementarzusammensetzung der Kobalt- Chromsuprastrukturen vor Erosion	107
4.7.6	Mittlere Elementarzusammensetzung der Kobalt- Chromsuprastrukturen nach Erosion.....	108

4.8	Standardabweichungen der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse.....	109
4.8.1	Standardabweichung der energiedispersiven Elektronenmikrostrahl- analyse für alle Titansuprastrukturen vor und nach Funkenerosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005	109
4.8.2	Standardabweichung der energiedispersiven Elektronenmikrostrahl- analyse für alle Goldsuprastrukturen vor und nach Funkenerosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005	110
4.8.3	Standardabweichung der energiedispersiven Elektronenmikrostrahl- analyse für alle Kobalt- Chromsuprastrukturen vor und nach Funken- erosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005.....	111
4.9	Vergleichende Statistik der Kupferauflagerung.....	112
4.9.1	Vergleichende Statistik für abhängige Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005	112
4.9.2	Vergleichende Statistik für unabhängige Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005	113
4.10	Ausgewählte Fotografien der energiedispersiven Elektronenmikro- strahlanalyse; Spezielle Untersuchung der Kupferauflagerung	115
4.10.1	Sekundärelektronenbilder	115
4.10.2	Farbig unterlegte Sekundärelektronenbilder	116
5	Diskussion	117
5.1	Diskussion der Rauigkeitsmessung	117
5.1.1	Allgemeine Diskussion Rauigkeit.....	119
5.2	Diskussion der Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse.....	122
5.3	Diskussion der klinischen Bedeutung	125
5.4	Allgemeine Diskussion.....	127
5.5	Schlussfolgerung	128
6	Zusammenfassung	129
7	Summary	132
8	Literaturverzeichnis.....	135
9	Anhang	146
9.1	Tabellenanhang.....	146

9.1.1	Messergebnisse der Rauigkeitsmessungen aller Suprastrukturen vor und nach Funkenerosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005.....	146
9.1.2	Messergebnisse der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse aller Suprastrukturen vor und nach Funkenerosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005	152
9.2	Verwendete Geräte und Materialien beim zahntechnischen Ablauf.....	158
9.2.1	Geräteverzeichnis.....	158
9.2.2	Verwendete Materialien	159
	Danksagung	161
	Lebenslauf.....	162
	Eidesstattliche Erklärung	163

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Prinzip der Funkenerosion (SAE Produktkatalog)	25
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Studienablaufes Teil 1	37
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des Studienablaufes Teil 2	38
Abbildung 3-3: Teile für das SAE-SECOTEC-Programm (Modellhülse,	
Modellimplantat, Implantatelektrode, Kunststoffzylinder)	39
Abbildung 3-4: 36 Suprastrukturen, die für diese Studie hergestellt worden sind	42
Abbildung 3-5: Funkenerosionsmaschine EDM 2000	45
Abbildung 3-6: Funkenerosionsmaschine EDM 2005	45
Abbildung 3-7: PC-basiertes Oberflächenmessgerät	46
Abbildung 3-8: Taster Mahr Surf MFW-250	46
Abbildung 3-9: Parameter Ra und Rq	50
Abbildung 3-10: Parameter Rz und Rmax	50
Abbildung 3-11: Parameter Rp und Rv	50
Abbildung 3-12: EDS-System QUANTAX	52
Abbildung 3-13: EDS-System QUANTAX XFLASH® Detektor	52
Abbildung 4-1: Grafik Mittelwerte des Mittenrauwertes Ra	75
Abbildung 4-2: Grafik Mittelwerte der maximalen Rautiefe Rmax	76
Abbildung 4-3: Grafik Mittelwerte der Rautiefe Rz	78
Abbildung 4-4: Grafik Mittelwerte der Glättungstiefe Rp	79
Abbildung 4-5: Grafik Mittelwerte der Glättungstiefe Rv	81
Abbildung 4-6: Titansuprastruktur 9B vor Bearbeitung	86
Abbildung 4-7: Titansuprastruktur 9B nach Funkenerosion	86
Abbildung 4-8: Goldsuprastruktur 1B vor Bearbeitung	86
Abbildung 4-9: Goldsuprastruktur 1B nach Funkenerosion	86
Abbildung 4-10: Kobalt- Chromsuprastruktur 1B vor Bearbeitung	87
Abbildung 4-11: Kobalt- Chromsuprastruktur 1B nach Funkenerosion	87
Abbildung 4-12: Grafik Darstellung der Titansuprastrukturen vor Erosion	103
Abbildung 4-13: Grafik Darstellung der Titansuprastrukturen nach Erosion	104
Abbildung 4-14: Grafik Darstellung der Goldsuprastrukturen vor Erosion	105
Abbildung 4-15: Grafik Darstellung der Goldsuprastrukturen nach Erosion	106
Abbildung 4-16: Grafik Darstellung der Kobalt- Chromsuprastrukturen vor Erosion	107

Abbildung 4-17: Grafik Darstellung der Kobalt-Chromsuprastrukturen nach Erosion	108
Abbildung 4-18: Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 1a mit EDM 2000	115
Abbildung 4-19: Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 3a mit EDM 2000	115
Abbildung 4-20: Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 6a mit EDM 2005	115
Abbildung 4-21: Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 6b mit EDM 2005	115
Abbildung 4-22: farbiges Sekundärelektronenbild der erodierten Titansupra- struktur 3 mit EDM 2000	116
Abbildung 4-23: farbiges Sekundärelektronenbild der erodierten Titansupra- struktur 2 mit EDM 2000	116
Abbildung 4-24: farbiges Sekundärelektronenbild der erodierten Titansupra- struktur 5 mit EDM 2005	116
Abbildung 4-25: farbiges Sekundärelektronenbild der erodierten Titansupra- struktur 6 mit EDM 2005	116

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Parametereinstellungen der EDM 2000 und 2005	44
Tabelle 4-1:	Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Titansuprastrukturen vor Erosion	57
Tabelle 4-2:	Mittelwerte Titan vor Funkenerosion	59
Tabelle 4-3:	Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Titansuprastrukturen nach Erosion.....	60
Tabelle 4-4:	Mittelwerte Titan nach Funkenerosion	62
Tabelle 4-5:	Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Goldsuprastrukturen vor Erosion.....	63
Tabelle 4-6:	Mittelwerte Gold vor Funkenerosion.....	65
Tabelle 4-7:	Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Goldsuprastrukturen nach Erosion	66
Tabelle 4-8:	Mittelwerte Gold nach Funkenerosion.....	68
Tabelle 4-9:	Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Kobalt-Chromsuprastrukturen vor Erosion	69
Tabelle 4-10:	Mittelwerte CoCr vor Funkenerosion.....	71
Tabelle 4-11:	Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Kobalt-Chromsuprastrukturen nach Erosion.....	72
Tabelle 4-12:	Mittelwerte CrCo nach Funkenerosion	74
Tabelle 4-13:	Standardabweichung (SD) aller Titanproben vor und nach Bearbeitung.....	82
Tabelle 4-14:	Standardabweichung (SD) aller Goldproben vor und nach Bearbeitung.....	83
Tabelle 4-15:	Standardabweichung (SD) aller Kobalt-Chromproben vor und nach Bearbeitung.....	84
Tabelle 4-16:	Ergebnisse des Wilcoxon-Tests. Vergleich für die Funkenerosions- maschine EDM 2000.....	88
Tabelle 4-17:	Ergebnisse des Wilcoxon-Tests. Vergleich für die Funkenerosions- maschine EDM 2005.....	89
Tabelle 4-18:	Ergebnisse des U-Testes nach Mann und Whitney zwischen Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005	90

Tabelle 4-19:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Titansuprastrukturen EDM 2000 vor Erosion	91
Tabelle 4-20:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Titansuprastrukturen EDM 2005 vor Erosion	92
Tabelle 4-21:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Titansuprastrukturen EDM 2000 nach Erosion	93
Tabelle 4-22:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Titansuprastrukturen EDM 2005 nach Erosion	94
Tabelle 4-23:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Goldsuprastrukturen EDM 2000 vor Erosion.....	95
Tabelle 4-24:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Goldsuprastrukturen EDM 2005 vor Erosion.....	96
Tabelle 4-25:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Goldsuprastrukturen EDM 2000 nach Erosion.....	97
Tabelle 4-26:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Goldsuprastrukturen EDM 2005 nach Erosion.....	98
Tabelle 4-27:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Kobalt-Chromsuprastrukturen EDM 2000 vor Erosion	99
Tabelle 4-28:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Kobalt-Chromsuprastrukturen EDM 2005 vor Erosion	100
Tabelle 4-29:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Kobalt-Chromsuprastrukturen EDM 2000 nach Erosion	101
Tabelle 4-30:	Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Kobalt-Chromsuprastrukturen EDM 2005 nach Erosion	102
Tabelle 4-31:	Standardabweichungen bei der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse aller Titansuprastrukturen vor und nach Bearbeitung der Maschine EDM 2000 und 2005.....	109
Tabelle 4-32:	Standardabweichungen bei der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse aller Goldsuprastrukturen vor und nach Bearbeitung der Maschine EDM 2000 und 2005.....	110
Tabelle 4-33:	Standardabweichungen bei der energiedispersiven Elektroenmikrostrahlanalyse aller Kobalt -Chromsuprastrukturen vor und nach Bearbeitung der Maschine EDM 2000 und 2005.....	111

Tabelle 4-34:	Ergebnisse des Wilcoxon-Tests. Vergleich für die Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und 2005 getrennt	112
Tabelle 4-35:	Ergebnisse des U-Testes nach Mann und Whitney zwischen Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005	113
Tabelle 9-1:	Rauigkeitsmessungen Titan vor Funkenerosion	146
Tabelle 9-2:	Rauigkeitsmessungen Titan nach Funkenerosion	147
Tabelle 9-3:	Rauigkeitsmessungen Gold vor Funkenerosion.....	148
Tabelle 9-4:	Rauigkeitsmessungen Gold nach Funkenerosion.....	149
Tabelle 9-5:	Rauigkeitsmessungen Kobalt- Chrom vor Funkenerosion	150
Tabelle 9-6:	Rauigkeitsmessungen Kobalt- Chrom nach Funkenerosion	151
Tabelle 9-7:	EDAX Analyse der Titan Suprastrukturen vor Funkenerosion	152
Tabelle 9-8:	EDAX Analyse der Titan Suprastrukturen nach Funkenerosion.....	153
Tabelle 9-9:	EDAX Analyse der Gold Suprastrukturen vor Funkenerosion.....	154
Tabelle 9-10:	EDAX Analyse der Gold Suprastrukturen nach Funkenerosion	155
Tabelle 9-11:	EDAX Analyse der NEM Suprastrukturen vor Funkenerosion	156
Tabelle 9-12:	EDAX Analyse der NEM Suprastrukturen nach Funkenerosion.....	157
Tabelle 9-13:	Geräteverzeichnis	158
Tabelle 9-14:	Verwendete Materialien	160

1 Einleitung

Die enossale Implantologie hat sich in den letzten 30 Jahren enorm weiterentwickelt und das Therapiespektrum der prothetischen Zahnheilkunde extrem bereichert.

Die Versorgung teilbezahnter und zahnloser Kiefer mit implantgetragendem Zahnersatz nimmt einen immer größeren Stellenwert zahnärztlichen Handelns ein.

Damit eine langfristige Osseointegration der im Kieferknochen inserierten Implantate auf lange Sicht gewährleistet werden kann, sollten bei der zahntechnischen Ausführung einige Grundvoraussetzungen erfüllt sein.

Basierend auf den Erkenntnissen der zahnmedizinischen Forschung muss es eine Forderung sein, dass die Meso- und Suprastruktur unbedingt passgenau gefertigt ist, damit keine Zug- und Druckspannungen auf die im Kieferknochen inserierten Implantate übertragen werden.

Allgemein anerkannt ist die Forderung nach einem passiven Sitz der Meso- und Suprastrukturen auf den Abutments enossaler Implantate, da die Verschraubung passungenaue Gerüste Spannungen auf Implantate und periimplantären Knochen induziert. In der Folge davon sind biologische Komplikationen beschrieben, die sich im Reiz des Weichgewebes, mit Schmerzen, mit Spannungen, mit marginalem Knochenverlust und Verlust der Osseointegration bemerkbar machen.

Um dieser Forderung nachzukommen, werden mit dem

SAE- Serotec-Verfahren durch Funkenerosion die Fehlpassungen der Meso- und Suprastrukturen, die aus allen im Dentalbereich zur Anwendung kommenden Legierungen und Metallen besteht, korrigiert.

Fehlpassungen der Meso- und Suprastrukturen führen dazu, dass kleine oder große Partien der passungenaue Gerüste auf dem Implantatpfosten ungleichmäßig, ungenau und verkantet aufsitzen. Diese zu früh aufsetzenden Partien werden durch das Funkenerosionsverfahren so weit abgetragen, bis alle Partien zirkulär gleichmäßig aufsitzen.

Eine weitere Grundvoraussetzung für eine langfristige Osseointegration ist die Wahl des richtigen Werkstoffes für die Anfertigung der Meso- bzw. Suprastrukturen. Es soll ein biokompatibler, monometallischer Werkstoff zur Anwendung kommen. Es kommen bei der Anfertigung der Meso- und Suprastrukturen bisher Edelmetall- und

edelmetallfreie Kobalt-Chrom-Legierungen zur Anwendung. Durch die Fortschritte in der Dentaltechnik ist es auch möglich geworden den Werkstoff Titan und auch keramische Werkstoffe für die Anfertigung von Zahnersatz in vollem Umfang zu verwenden.

Zielsetzung der Biokompatibilität eines Dentalmaterials ist es sich biologisch inert zu verhalten. Grundsätzlich muss bei der Frage der biologischen Verträglichkeit zwischen einer biologischen Reaktion und einer Materialreaktion unterschieden werden. Aus diesem Grund kann eine umfassende Beurteilung der Verträglichkeit von Dentalmaterialien nur unter Berücksichtigung und der Einbeziehung einer Vielzahl von Aspekten erfolgen.

Biokompatibilität oder biologische Verträglichkeit ist in der Herstellung von Zahnersatz eines der höchsten Ziele zahnärztlichen Handelns.

Ein Schutz durch das Arzneimittelgesetz besteht nur für einen Teil der zahnärztlichen Materialien. Die Werkstoffe die mit der Schleimhaut in Kontakt treten sind nicht erfasst. Und dies obwohl die daraus gefertigten Kronen, Prothesen usw. schließlich doch als Arzneimittel gelten.

Nach Eingliederung der Arbeit trägt allein der Zahnarzt gegenüber dem Patienten die Verantwortung für die biologische Unbedenklichkeit, obwohl ihm die Materialzusammensetzung häufig nicht ausreichend bekannt ist.

Daher soll untersucht werden wie funkenerosiv bearbeiteter Zahnersatz sich verändert und eventuell auftretende Veränderungen medizinisch gesundheitliche Bedenken hervorrufen könnten.

1.1 Fragestellung

In der vorliegenden Studie soll die Wirkung der unterschiedlichen Generationen von SAE- Serotec -Funkenerosionsmaschinen an unterschiedlichen Materialien für die Herstellung von Implantatsuprastrukturen untersucht werden.

Stellvertretend für das Angebot der Legierungsvielfalt der Dentalindustrie werden jeweils eine Gold-, Titan- und Kobalt-Chrom-Legierung als typische Vertreter den analytischen Methoden unterzogen.

Unter besonderer Beobachtung stand die neue SAE Funkenerosionsmaschine EDM 2005 mit ihrer neuen digitalen Generatortechnologie und der modernisierten Prozessor gesteuerten Bedieneinheit. Ziel der vorliegenden Studie war es eine Beurteilung über eine Verbesserung der Oberflächenstruktur in Bezug auf die Oberflächenrauigkeit zu erzielen.

Kommt es bei dem doch materialtechnisch aggressiven Bearbeitungsmodus der Funkenerosion möglicherweise zu Materialeinschmelzungen von Kupferpartikel aus den Modellelektroden in die zu bearbeitenden zahntechnischen Werkstücken? Besteht die Gefahr, dass ein Werkstück an der Oberfläche so ungünstig beeinflusst wird, dass die Brauchbarkeit darunter leidet?

Es sollte überprüft werden ob maschinenabhängige Unterschiede zu bestimmen sind.

Daraus ergeben sich im Einzelnen folgende Fragen:

- Wie rau sind Oberflächen von zahntechnischen Werkstücken die mit Hilfe der Funkenerosion bearbeitet worden sind?
- Gibt es Abhängigkeiten bezüglich der Rauheit in den Gruppen der unterschiedlich verwendeten Legierungstypen?
- Unterscheiden sich die verschiedenen Generationen der SAE-Serotec-Funkenerosionsgeräte hinsichtlich der zu erreichenden Rauheit?
- Kommt es zu Materialeinschlüssen von Kupfer in die Oberfläche möglicherweise in Abhängigkeit von dem jeweiligen Legierungstyp?
- Unterscheiden sich hier die verschiedenen Baumuster der Funkenerosionsmaschine?

Mit Hilfe von rasterelektronmikroskopischen Aufnahmen, Rauigkeitsmessungen und energiedispersiver Elektronenmikrostrahlanalyse (EDX) soll an 42 Mesostrukturen untersucht werden wie das SAE-Serotec-Funkenerosionsverfahren der alten und neuen Generation die Oberfläche der bearbeiteten Werkstücke verändert. Dabei werden drei verschiedene Materialwerkstoffe in die Untersuchung einbezogen (Gold, Titan, Kobalt-Chrom) und funkenerosiv bearbeitet.

2 Literaturübersicht

2.1 Legierungsproblematik implantatgetragene Mesostrukturen

Die moderne orale Implantologie ist aus der Rehabilitation teilbezahnter bzw. unbezahnter Patienten nicht mehr wegzudenken. Das Spektrum reicht von Einzelzahn-implantaten bis zur Versorgung hochgradig atrophiertes, zahnloser Oberkiefer und Unterkiefer.

Auf diese in den Kieferknochen inserierten Implantate wird dann unter Zwischenschaltung einer Mesiokonstruktion eine Suprakonstruktion befestigt, die den eigentlichen prothetischen Ersatz darstellt bzw. aufnimmt. Diese Mesiokonstruktion kann je nach Anwendungsbereich und nach Ausstattung des Dentallabors aus Kobalt-Chrom-Legierungen, hochgoldhaltigen Legierungen oder auch aus Titan bestehen.

Bei den Mesiokonstruktionen die auf den meistens noch aus Titan bestehenden Implantaten verschraubt oder auch nach Aufbauverschraubung zementiert werden bedeutet dies, dass unterschiedliche Metalle in einem feuchten Milieu in direkten Kontakt geraten und so ein galvanisches Element bilden. Das kann zur Folge haben, dass ein Strom fließt und es zur Korrosion kommt. Dadurch wird die gesamte Konstruktion geschädigt und es kommt zur Bildung von Korrosionsprodukten, die im Körper lokale und systemische Reaktionen hervorrufen können.

Es ist eine Erkenntnis neuerer Zeit das mögliche implantologische/prothetische Misserfolge möglicherweise auch durch die Werkstoffwahl der Suprastruktur entscheidend mit beeinflusst werden.⁽⁹⁴⁾ Aus einem Korrosionsvorgang herausgelöste Metallionen können schon in kleinsten Mengen schädigend auf das perimplantäre Gewebe wirken. Eine mögliche Verbindung zwischen Knochenabbau und freiwerdenden Metallen aus Korrosionsprozessen ist beschrieben worden (19). Als Folge davon sollten für den langfristigen Erfolg von implantatgetragenen Zahnersatz korrosionsresistente Metalle zur Anwendung kommen. Im allerbesten Fall kommen monometallische Versorgungen zur Anwendung.

Um eine monometallische Versorgung zu gewährleisten, ergibt sich die Forderung die Meso- und Suprastrukturen auf Implantaten ebenfalls aus Titan zu fertigen. Es kommen aber auch Edelmetall- und edelmetallfreie Cr-Co-Legierungen zur Anwendung. In neuer Zeit kommen auch keramische Werkstoffe zur Anwendung.

Nicht nur die unzureichende Legierungswahl, sondern auch unterschiedliche Gefügestrukturen der Legierungen, Einschlüsse und Verunreinigungen im Gefüge und an der Oberfläche sowie Verarbeitungsfehler können korrosive Prozesse fördern (91).

Die Implantate und ihre Strukturen können – dank hochwertiger biokompatibler Metalle und Legierungen – durch ihre hohen Festigkeitswerte der Anatomie des Patienten sehr gut angepasst werden. Die Vielzahl der verschiedenen Legierungstypen für die Suprastrukturen und mögliche Gefügeveränderungen bei der Bearbeitung bringen die Gefahr einer allfälligen Unverträglichkeit gegenüber Korrosionsprodukten aus instabilen Legierungen (91).

Um Korrosionseffekte so gering wie möglich zu halten, werden die Empfehlungen immer dringlicher, nach Möglichkeit korrosionsbeständige Metalllegierungen zu verwenden, sie werkstoffgerecht zu verarbeiten und möglichst nur eine Legierung im Mund zu verwenden.

Neue Technologien wie die Funkenerosionstechnik zeigen Wege zu diesem Ziel auf (23).

2.2 Korrosion zahnärztlicher Restaurationen

Korrosion ist ein elektrochemischer Prozess, der von der Oberfläche ausgehend zur allmählichen Zerstörung von Werkstoffen führen kann.

Es handelt sich dabei um die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen kann (37).

Alle metallischen Elemente mit Ausnahme der Edelmetalle sind bestrebt aus dem metallischen Zustand in den von chemischen Verbindungen (z.B. als Oxide) zurückzukehren, in dem sie in der Natur vorliegen. Es entstehen somit Ionen, die in Lösung gehen können.

Wird ein Metall in einen Elektrolyten (wie z. B. Speichel) getaucht, gibt es Kationen in die Lösung ab und lädt sich negativ auf. Die in Lösung gegangenen Kationen werden durch elektrostatische Kräfte in unmittelbare Nähe der Metalloberflächen gehalten und scheiden sich dort wieder ab. Ab einem bestimmten Zeitpunkt gehen genau so

viele Metallionen in Lösung wie am Metall wieder abgeschieden werden. Die Anzahl der in Lösung befindlichen Teilchen bleibt jedoch gleich. Man spricht dann von einem dynamischen Gleichgewicht.

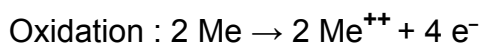
Dieses Gleichgewicht hängt vom Potential des jeweiligen Metalls ab. Das Potential kann gegen eine Bezugselektrode (z.B. Wasserstoffelektrode) gemessen werden. Somit lassen sich Metalle in einer Spannungsreihe ordnen, also nach ihrem Bestreben Elektronen abzugeben. Als Nullpunkt der Spannungsreihe wurde das Normalpotential des Wasserstoffs gewählt.

Das Ablösen des Metalls, gleichbedeutend mit der Oxidationsreaktion, spielt sich an der Anode ab, während der Reduktionsvorgang an der Kathode statt findet. Beide Vorgänge zusammen als Redoxreaktion führen zur Korrosion, wenn das beschriebene dynamische Gleichgewicht gestört wird. Diese Störung ist im Allgemeinen der Verbrauch der Elektrode durch eine nach gelagerte Reaktion.

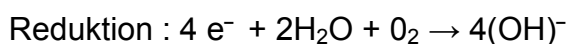
Die entscheidenden Reaktionsmechanismen sind die Sauerstoffkorrosion und die Säurekorrosion.

Sauerstoffkorrosion:

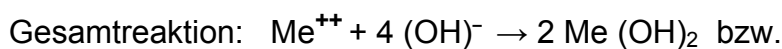
Bei der Sauerstoffkorrosion handelt es sich um eine Reduktion von molekularem Sauerstoff zu Hydroxidionen und der Bildung der Metalloxide. Diese Reaktion ist die häufigste Ursache von Korrosionsschäden, da Sauerstoff und Feuchtigkeit allgegenwärtig sind. Die Reduktion des Sauerstoffs wird des Weiteren als Haupttriebkraft der Korrosion angesehen.



(anodische Reaktion)



(kathodische Reaktion)

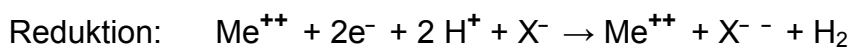


Säurekorrosion:

Bei der Säurekorrosion kommt es zum Auflösen eines Metalls durch eine Säure (HX, X = Säurerest) wobei sich Wasserstoffionen zu elementarem Wasserstoff entladen und das Metallsalz dieser Säure entsteht.



(anodische Reaktion)



(kathodische Reaktion)

2.3 Galvanische Elemente

Ein galvanisches Element bildet sich, wenn zwei Metalle oder Legierungen elektrisch leitend miteinander verbunden werden, und so ein Ionenaustausch stattfinden kann. Dabei kommt es dann zur Auflösung der unedleren Legierungskomponenten. Als Pluspol und Kathode fungiert die Elektrode, an der eine Reduktion stattfindet. Dementsprechend ist der Minuspol die Anode und Elektrode, an der eine Oxidation stattfindet (89, 90).

Bei einem galvanischen Element geht immer das unedlere Metall (mit dem negativeren Ruhepotential) in Lösung. Bei Legierungen bilden die einzelnen Phasen untereinander galvanische Elemente aus. Die unedleren Legierungsbestandteile gehen in Lösung und dienen den edleren Phasen als Opferanoden.

Galvanische Elemente können im Mund des Patienten durch den Kontakt von unterschiedlichen Legierungen entstehen:

- Kontakt zwischen Implantat und Suprakonstruktion
- Kontakt zwischen unterschiedlichen metallischen Füllungen
- Kontakt zwischen Patrize und Matrize bei Geschieben oder Doppelkronen
- bei Lötverbindungen.

Werden nun zwei Legierungen leitend miteinander in Verbindung gebracht, werden immer die unedleren Legierungsbestandteile verstärkt in Lösung gehen. Dies bedeutet aber auch, dass unedlere Bestandteile einer Goldlegierung in Lösung gehen können, indem sie als Opferelektrode für die edleren Bestandteile einer Kobalt-Chrom-Legierung dienen.

Die Ausbildungen von galvanischen Elementen, bei denen Gold-Legierungen mit Amalgam in Verbindung gebracht wurden, sind oft untersucht (3, 16, 72).

Es zeigte sich, dass die Korrosionsraten auch über einen längeren Zeitraum erhöht bleiben können, abhängig davon, ob sich eine Passivierungsschicht ausbildet und ob sie durch Kaueinflüsse verletzt wird.

Zementiert man Goldkronen über Amalgamfüllungen kommt es nicht zur Korrosion (8).

Wird allerdings eine Amalgamfüllung an den Rand einer Goldrestauration gelegt, kommt es zu einer deutlichen Korrosionserscheinung (49).

RAVNHOLDT konnte in einer Studie zeigen, dass eine mit Titan in Verbindung stehende Gold- bzw. Kobalt-Chrom-Legierung nicht zur Korrosion neigt (58).

In einer weiteren Studie untersuchte er das Verhalten von Suprakonstruktionen aus einer Silber-Palladium-Legierung gegenüber Titanimplantaten. Er fand niedrige Korrosionsraten (58).

Die Suprakonstruktionen bestehen neben Titan aus Gold- oder Nichtedelmetall-Legierungen. Die errechenbaren theoretischen Potentialdifferenzen zwischen Titan und Gold- bzw. Kobalt-Chrom-Legierungen sind nicht praxisrelevant. Die Passivierung von Titan führt zu einer Erhöhung der Korrosionsresistenz und zu einer Angleichung der Potentialdifferenz.

Um eine Aussage über die möglichen in vivo stattfindenden Korrosionsprozessen funkenerosiv bearbeiteter Suprastrukturen machen zu können, müssen klinische Untersuchungen durchgeführt werden.

2.4 Biologische Wirkung gelöster Metallionen

Nach der Untersuchung von Schwickerath unterliegen alle Dentallegierungen im Mund Korrosionsangriffen, wobei Ionen in Lösung gehen (73).

Diese dringen entweder in das umliegende Gewebe ein (72) oder gelangen mit dem Speichel in den Verdauungstrakt. Hier kommt es dann wie auch bei den Metallionen aus der Nahrung, zu einer Resorption. Der Aufnahme von Metallen sind jedoch Grenzen gesetzt, so daß das Wissen um die Art und Menge der freiwerdenden Metallionen auch dann von Bedeutung ist, wenn der Aspekt der Sensibilisierung und der allergischen Reaktionen nicht primär in den Vordergrund gestellt wird (72). An Dentalwerkstoffe müssen daher bezüglich der Körperverträglichkeit hohe Anforderungen gestellt werden, um Folgeerscheinungen durch Ionen zu vermeiden.

Klötzer weist darauf hin, dass eine Vielzahl von Metallen in der gesamten belebten und unbelebten Natur vorkommt und Metallionen nicht notwendigerweise systemische oder lokale Reaktionen auslösen müssen. Gegenüber den üblicherweise in der Nahrung vorkommenden Metallen besitzt der Mensch gut funktionierende Maßnahmen zur Regulierung der Aufnahme und Ausscheidung (37).

Die klinischen Erscheinungsformen und lokalen Krankheitsbilder als Reaktion auf toxische, aus Legierungen gelöste Metallionen sind sehr zahlreich, sie lassen sich summarisch wie folgt zusammenfassen:

- Mundtrockenheit
- Geschmacksirritationen
- Schleimhautbrennen
- Gingivitiden
- Hyperplasien
- Parodontopathien
- generalisierte und lokal ausstrahlende Schmerzen
- Lysen am Dentin und Knochen
- Nekrosen von Knochen und Weichgeweben

Darüber hinaus können in Abhängigkeit von Qualität und Quantität der toxischen Substanzen auch allgemeine Krankheitssymptome auftreten (91).

2.5 Kupfer im menschlichen Körper

Der tägliche Kupferbedarf des Menschen beträgt 0,03 bis 0,08 mg pro kg Körpergewicht.

Die Gesamtmenge im menschlichen Körper beträgt 100 mg. Kupfer gilt beim Menschen als essentielles Spurenelement. Jedoch kann es auch zu Kupferintoxikationen kommen, wobei die Bindung freier Kupferionen an Proteine und daraus resultierenden Funktionseinschränkungen dieser Eiweiße die größte Bedeutung zukommt. Grundsätzlich sind akute und chronische Intoxikationen durch Kupfer beim Menschen möglich. Es besteht jedoch kein besonderes Risiko einer Kupfermangel- bzw. Kupferintoxikationssituation. Ausgenommen sind Patienten mit genetischen Defekten (Menke-Krankheit, Wilson-Krankheit), Personen mit einseitiger Diät bzw. Malabsorption und mit chronischen Leberschäden (83).

2.6 Kupferproblematik

Kupfer ist ein Metall das kein stabiles Oxid bildet. Es konnte nachgewiesen werden das Metalle mit dieser Eigenschaft hoch toxisch in der Gewebekultur waren, während Metalle mit stabiler Oxidbildung nur geringe zytotoxische Effekte zeigten (77).

Die Zytotoxizität des Kupfers ist bekannt, was sich offensichtlich bei stark kupferhaltigen Goldlegierungen auf die Unterdrückung des Bakterienwachstums auswirkt (43).

2.7 Funkenerosion

Die Funkenerosion ist eine Methode zur abtragenden Formgebung von Metallen durch gesteuerte elektrische Stromimpulse zwischen einer Werkzeugelektrode und einem Werkstück in Gegenwart einer dielektrischen Flüssigkeit.

Werkzeugelektrode und Werkzeug werden so in Arbeitsposition gebracht, dass sich beide nicht berühren. Der verbleibende Spalt wird mit einer isolierenden Flüssigkeit, dem sogenannten Dielektikum gefüllt. Dessen Aufgabe besteht in der Isolation, der Ionisation, der Kühlung und dem Abtransport der Abtragspartikel.

Werkstück und Werkzeug sind über Kabel an eine Gleichstromquelle angeschlossen. Zunächst fließt kein Strom weil das Dielektrikum isoliert. Wird nun der Zwischenraum verkleinert, schlägt bei einem bestimmten, sehr geringem Abstand ein Funke über. Bei diesem Entladungsvorgang wird Strom in Wärme umgewandelt. Die Materialoberfläche erhitzt sich im Bereich des Entladungskanals sehr stark. Der elektrische Funke tritt mit ca. 8000-12000 Grad Celsius auf das Werkstück auf.

Unterbricht man nun den Stromfluss, fällt der Entladekanal sehr schnell zusammen. Dadurch verdampft die Metallschmelze an der Materialoberfläche explosionsartig und reißt bis zu einer gewissen Tiefe flüssiges Material mit. Es bildet sich ein kleiner Krater. Folgt nun Entladung auf Entladung, so entstehen Krater neben Krater und eine stetige Abtragung an der Werkstückoberfläche.

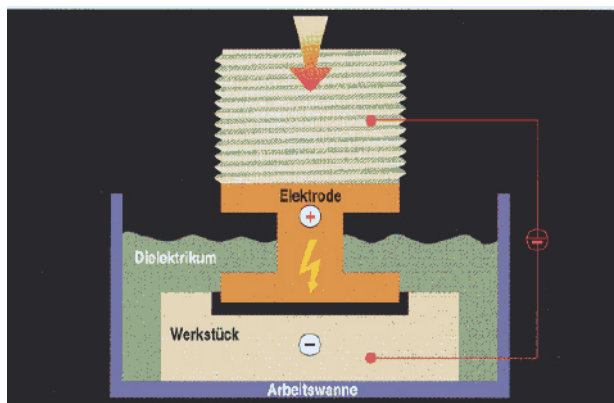


Abbildung 2-1: Prinzip der Funkenerosion (SAE Produktkatalog)

Die Funkenerzeugung erfolgt über einen Generator im Funkenerosionsgerät, dessen Hauptfunktion darin besteht, die Zünd- und Entladungsspannung zu liefern, den Entladestrom und die Entladedauer zu begrenzen und die Funkenfrequenz zu erzeugen. Die Funkenfrequenz wird durch elektrische Schaltkreise erzeugt: durch Kippkreisverfahren (RC-Generatoren) oder Schwingkreisverfahren (RCLD-Generator), bei denen Spannungsspitzen über die Entladung von Kondensatoren erreicht werden. Bei den Impulsgeneratoren, wie sie in der Zahntechnik verwendet werden, steuert ein Oszillator die Funkenfrequenz. Mit diesen Impulsgeneratoren können energiegleiche Funken bei konstanter Funkenstrecke entstehen, während die Funkenfrequenz variabel steuerbar ist. Es lässt sich eine gleichmäßige Oberflächenqualität bei gleichbleibendem Materialabtrag erreichen (25).

Im Gegensatz zu dem zeilen- bzw. schichtförmigen Abtragen bei spannablebenden Fertigungsverfahren herkömmlicher Technologie, wie z. B. Drehen oder Fräsen, ermöglicht die Funkenerosion die Herstellung beliebiger Raumformen mit dreidimensionaler gekrümmter Oberfläche in einem einzigen abbildenden Bearbeitungsgang (40).

Vorraussetzung für die funkenerosive Metallbearbeitung ist die Verfügbarkeit einer präzisen Werkzeugelektrode. Sie enthält die zu erodierende Form als Negativkontur. (40) Die Werkzeugelektrode kann aus Graphit, Silber, Wolfram-Kupfer, Elektrolyt-Kupfer oder auch K20- Wolfram-Carbid bestehen. An den Werkzeugelektroden entsteht ein geringfügiger Abbrand. Das Material der Werkzeugelektrode muss auf den zu bearbeitenden Werkstoff abgestimmt sein.

2.8 Funkenspalt

Die angelegte Spannung baut im Elektrodenzwischenraum ein elektrisches Feld auf. Durch die Kraftwirkung dieses Feldes und die geometrische Beschaffenheit der Oberfläche konzentrieren sich in der Flüssigkeit schwebende, leitende Partikel an der Stelle größter Feldstärke. Die führt zu Bildung einer Brücke. Gleichzeitig werden aus der negativ geladenen Elektrode negativ geladene Teilchen herausgeschleudert. Diese stoßen mit neutralen Teilchen im Elektrodenzwischenraum zusammen und werden aufgespalten. Es entstehen so positiv und negativ geladene Teilchen. Dieser Vorgang breitet sich lawinenartig aus und wird Stoßionisation genannt.

Positiv geladene Teilchen wandern zur negativen Elektrode, die negativen nach positiv. Es fließt somit ein elektrischer Strom.

Dieser Strom nimmt bis zu einem Höchstwert zu, wobei Temperatur und Druck weiter steigen. Es bildet sich eine Dampfblase aus.

Kommt es nun zur Energieentladung nimmt die Zahl der elektrisch geladenen Teilchen rapide ab. Der Entladekanal fällt zusammen.

Die überhitzte Schmelze verdampft explosionsartig und reißt geschmolzenes Material mit. Sodann fällt auch die Dampfblase zusammen, und an Rückständen bleiben zuletzt Metallteilchen sowie Spaltprodukt aus der Arbeitsflüssigkeit. Dies sind überwiegend Graphit und Gas.

Der Bearbeitungsspalt zwischen Werkzeug und Werkstück beträgt zwischen 0,02 bis 0,4 mm.

2.9 Oberflächenqualität von erodierten Flächen

Ähnlich dem Bearbeiten mit konventionellen Methoden entsteht beim Erodieren keine völlig ebene, sondern eine leicht raue, muldenförmige Oberfläche. Sie ist typisch für die Erosion.

Genau wie beim spanabhebenden Bearbeiten können auch beim Erodieren feine oder grobe Oberflächen erzeugt werden.

Die Oberflächenrauigkeit hängt von der Stromstärke ab. Körber und Lindemann (1987) geben Rautiefen zwischen 1 μm und 10 μm an.

Es besteht eine Abhängigkeit zwischen der Größe der gewählten Stromstärke und der erreichten Rauigkeit (große Stromstärke führt zu großer Rauigkeit und umgekehrt) (40).

Am Generatorteil sollte die geringste mögliche Stromstärke eingestellt werden, um eine möglichst feine Metalloberfläche und eine maximale Annäherung von Gussobjekt und Stumpf durch einen kleinen Brennpalt zu erreichen.

Die Qualität Rautiefe und Abtragsvolumen sind direkt abhängig von der Funkenentladungsfrequenz. Je höher die Frequenz, umso geringer ist das Abtragsvolumen, aber umso geringer ist auch die Rautiefe.

Das Funkenerosionsverfahren hat einen ganz anderen Einfluss auf das bearbeitete Material als herkömmliche Bearbeitungsverfahren.

Die auf das Werkstück auftreffenden elektrischen Funken erhitzen die äußerste Schicht des Materials so hoch, dass der Werkstoff verdampft. Im Dielektrikum kondensieren diese Metaldämpfe meist zu Höhlkügelchen, die an einer Seite offen sind und eine scharfe Schnittkante aufweisen. Im Werkstück selber entstehen kraterförmige Mulden.

In den meisten Fällen konnte keine Beeinflussung der Funktion des bearbeiteten Werkstücks nachgewiesen werden.

Veränderungen der Eigenschaften die festgestellt werden sind auf die starke Erhitzung der sogenannten Randzone zurückzuführen. In dieser Randzone werden das Gefüge, die Härte, der Spannungszustand und der Kohlenstoffgehalt beeinflusst.

Beim Schnitt durch eine funkenerosiv bearbeitete Oberfläche der industriellen Fertigung erhält man mehrere Schichten.

Die so genannte „geschmolzene Schicht“ ist die äußerste Schicht.

Sie zeigt deutlich, dass es sich um eine schnell erstarrte Schicht handelt. Lange Säulenkristalle sind beim Erstarren senkrecht aus der Metalloberfläche hochgewachsen.

In der sogenannten „umgehärteten Schicht“ ist die Temperatur über die Härtetemperatur gestiegen. Es ist ein harter und spröder Martensit entstanden.

In der sogenannten „angelassenen Schicht“ ist die Erhitzung nicht so hoch um die Härtetemperatur zu erreichen. Das Material ist nur angelassen. Darunter befindet sich der unbeeinflusste Kern.

Die Schichtdicken scheinen von der Metallsorte und auch vom Elektrodenwerkstoff unabhängig zu sein. Eindeutige Unterschiede bestehen zwischen gehärteten und weich geglühten Materialien. Im geglühten Werkstoff sind die Zonen dünner und Materialrisse seltener. Die Risse sind auf Spannungen zurückzuführen, die bei dem schnellen Abschrecken durch das Dielektrikum entstehen sowie auf die Volumendifferenz zwischen den einzelnen Gefügebestandteilen in verschiedenen Schichten. Bei richtig ausgeführtem Erodieren mit abschließendem Schlichten werden die Oberflächenfehler, die durch das Schrumpfen entstanden sind, zum großen Teil ausgeschaltet.

Eine gewisse Gefügebeeinflussung bleibt natürlich immer bestehen.

2.10 Oberflächenqualität zahnmedizinischer Restaurationen in der Mundhöhle

Oberflächenunebenheiten und Rauheit begünstigen das Wachstum bakterieller Kolonien sowie eine Zunahme der Plaqueretention. Im sorgfältigen Glätten und Polieren ist eine prophylaktische Behandlungsmaßnahme zu sehen, welche neue Plaquebildung einschränkt.

Die Politur leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur Behandlung und Prävention von parodontalen Erkrankungen (92).

Raue zahnärztliche Restaurationsmaterialien fördern die in Phasen ablaufende Plaqueakkumulation und fördern die Entstehung von Karies, Gingivitis und Parodontitis. Plaqueretention ist schon bei einer Rauheit von 0,7 bis 1,44 μm festzustellen. Verschiedene Materialien weisen unterschiedlich freie Oberflächenenergien auf, welche die bakterielle Adhäsion beeinflussen. Der Einfluss der Rauheit auf die Plaqueretention ist aber entscheidender als die freie Oberflächenenergie. Eine gut polierte Oberfläche bietet weniger Retentionsmöglichkeit für Speichel, Epithel, Bakterien und Nahrungsreste und erleichtert die Mundhygiene. Die qualitative Zusammensetzung der Plaque wird von der Oberflächenrauheit der zahnärztlichen Restauration beeinflusst. Rauere Oberflächen haben höhere Anteile an Mikroorganismen, welche auf eine reifere Plaque hindeuten. Es besteht eine enge Beziehung zwischen ausgeprägt rauen bzw. glatten Zahnoberflächen und rascher, großflächiger bzw. langsamer, gering ausgedehnter Plaquebildung. Qualitativ ist die Zusammensetzung der Plaque nicht materialspezifisch. Lediglich in der Keimqualität findet man eine Werkstoffabhängigkeit (5).

2.11 Die Funkenerosion in der Zahnheilkunde

Das thermisch Abtragsverfahren der Funkenerosion stellt seit der Entdeckung im Jahre 1943 durch das russische Forscherehepaar B. R. und N. J. Lazarenko in der metallverarbeitenden Industrie schon seit langem ein Routineverfahren dar.

Die dentale Funkenerosion begann 1982 mit der Modifizierung der industriellen Elektroerosion für die Bearbeitung von Zahnersatz durch Rübeling.

Durch E. Körber und Mitarbeiter (1986/87) wurde das Senkerodieren zur Herstellung von Kronen und Brücken eingeführt und seine Eignung zum Bearbeiten von Kobaltbasislegierungen und Titan nachgewiesen (34).

Mit Hilfe der Funkenerosion ist es möglich Kronen und Inlays zu fertigen, ohne dass das Metall gegossen werden muss. Die Form wird mit Hilfe von Formelektroden aus einem vollen Metallblock herausgearbeitet. Wesentlicher Vorteil dieser Methode ist es, dass ebenso wie herkömmliche Legierungen auch andere korrosionsbeständige Legierungen, die sich nicht bzw. nur unter schwierigen Bedingungen vergießen lassen, verarbeiten lassen (15, 31).

Durch den Guss können Gefüge- und Formveränderungen sowie Poren und Lunker, Schwundvorgänge und Deformationen beim Abkühlen des Gussstückes entstehen (15, 30, 31). Das heißt durch den Guss können Qualitätsminderungen auftreten. Beim ungleichmäßigem Abkühlen kann es zur Bildung eines korrosionsanfälligen Gefüges kommen, dass sich dadurch bedingt nach längerer Tragezeit verfärbt (30).

Die Herstellung von Kronen, Brücken und Inlays durch Funkenerosion hat bisher nur zögerlich Anwendung in der Praxis gefunden. In Zeiten der CAD/CAM Fertigung von Zahnersatz ist es fraglich ob es zu einer weiteren Verbreiterung kommen wird.

Bewährt hat sich der Einsatz der Funkenerosion zur Teilbearbeitung von gegossenem Zahnersatz aus Kobaltbasislegierungen und Titan, insbesondere für Verankerungselemente bewährt (Rübeling 1984, 1989) Dabei werden Negativformen für Geschiebe, Riegel oder Friktionsstifte mittels industriell gefertigter Werkzeugelektroden aus Kupfer in die Kronen- und Brückengerüste senkerodiert. In die so gestalteten Matrizen können die ebenfalls industriell gefertigten Patrizen ohne Nacharbeit eingefügt werden. Rationelle Technologie, hohe Präzision und die Möglichkeit, kombinierte festsitzend und abnehmbare Teilprothesen aus einem Materialtyp, sind der Vorteil diese Vorgehens (34).

So fand die Funkenerosion Verwendung bei der Herstellung von Verankerungselementen in der Teilprothetik, wie Friktionsstifte, Steck- und Schwenkriegel sowie Verblockungsgeschiebe (Rübeling und Kreylos 1983 und 1984) (31).

2.12 Vorteile der Funkenerosion in der zahnmedizinischen Anwendung

Bei der prothetischen Versorgung von Patienten mit kombiniert festsitzend/herausnehmbarem Zahnersatz stellen Konstruktionen mit Geschieben, Doppelkronen und Riegeln im Hinblick auf die Ästhetik und Funktion sehr anspruchsvolle Lösungen dar.

Aus alter Gewohnheit werden für diese aufwendigen Konstruktionen als Materialien überwiegend Kombinationen von edelmetallfreien Legierungen (Co-Cr-Mo Basisteile) mit Edelmetalllegierungen (Primär- u. Sekundärteile) verwendet. Neben einem erhöhten Kostenaufwand ist vor allem die einhergehende Legierungsvielfalt anzuführen, die elektrochemisch- vor allem unter galvanischen Aspekten diskussionswürdig erscheint. Die Problematik der Legierungsvielfalt steht dann im Raum, da bei aufwendigem Zahnersatz unter der Verwendung verschiedener Metalllegierungen neben der Hauptlegierung in Form der verschiedenen Lote und konfektionierten Geschiebeteilen mitunter leicht fünf bis acht verschiedene Legierungen gleichzeitig aufgrund des Zahnersatzes im Mund eingegliedert werden. Manches zunächst nicht zu objektivierende und zu beseitigende Schleimhautbrennen eines Patienten- oft als Erscheinung mit internistischer oder/und psychogener Ursache gedeutet- sowie manches an der Lotstelle abgebrochene Sekundärteil- oft als Folge einer fehlerhaften Lötung gesehen- mag seinen eigentlichen Grund in korrosiven Prozessen haben (86). Mit Hilfe der Funkenerosion ist es möglich kombiniert festsitzenden/herausnehmbaren Zahnersatz von einfachen Konstruktionen bis hin zu sehr komplexen zahntechnischen Versorgungen anzufertigen. Dabei ist es aufgrund der Materialeigenschaften der Legierung einerseits, sowie aufgrund der Verfahrenstechnik andererseits, möglich diesen Zahnersatz aus nur einer Legierung anzufertigen, was dazu beiträgt, die Zahl der Legierungen im Munde des Patienten und die damit einhergehenden objektiven und subjektiven Probleme zu reduzieren.

Die Funkenerosionstechnik kann aufgrund ihrer Versatilität, die Doppelkronen, intra- und extrakoronale Geschiebe und Riegeltechniken ermöglicht, außerordentlich vielseitig eingesetzt werden (86).

Mit Hilfe des funkenerosiven Bearbeitungsverfahrens ist es möglich druck- und berührungsfrei, punktuell wie auch flächig Passungsfehler von Implantatarbeiten zu korrigieren, um so Spannungsfreiheit der im Kieferknochen inserierten Implantate zu erhalten (28).

2.13 Verbesserung der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 gegenüber ihrem Vorgänger EDM 2000

Die Verbesserungen der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 gegenüber ihrem Vorgängermodell sind im Einzelnen:

- eine digitale Generatortechnologie
- eine modernisierte prozessorgesteuerte Bedieneinheit
- ein Technologiedatenspeicher zum Aufruf über Produktkennung
- eine Z-Achsen-Einheit
- über PCI Anschluss ist eine Steuerung über Laptop möglich
- eine schnellere Tankbefüllung
- eine Z-Achse „Touch-down-Nullpunkteinstellung“
- individuelle Parametereinstellungen sind nun möglich
- eine Minimierung der Oberflächenrautiefe

2.14 Messmethoden zur Beurteilung der Oberflächenveränderungen von zahnmedizinischen Restaurationen

Die Erfassung der geometrischen Oberflächenverhältnisse von Objekte in medizinischen Studien, erfolgt überwiegend mit licht- und elektronenmikroskopischen Untersuchungsmethoden. Die Beurteilung des Oberflächenzustandes ist dabei immer vom subjektiven optischen Empfinden des Betrachters abhängig und kann nur bedingt eine qualitative Charakterisierung darstellen.

Eine objektive Beurteilung dagegen ist allein durch die quantitative Messung von Oberflächen mit geeigneten Geräten gegeben (56).

Eine in der Literatur beschriebene Technik die elementare Zusammensetzung von zahnärztlichen Therapiemitteln zu bestimmen ist die energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse.

2.15 Qualitative und Quantitative Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit

Zur Untersuchung und Bewertung von Oberflächen stehen qualitative und quantitative Verfahren zur Verfügung. In Ihrer Kombination gewährleisten sie eine umfassende Evaluierung von Oberflächen. Sie ermöglichen das Vermessen bzw. die Interpretation von Profilen. Die Methoden ergänzen sich in der Beurteilung der Untersuchungsobjekte und in der Aussage der Ergebnisse. Qualitative Verfahren untersuchen Formabweichungen und differenzieren werkstoffbedingte und durch abtragende Verfahrenstechniken verursachte Profilunregelmäßigkeiten (Jung, M. 1998). Quantitative Verfahren ermöglichen die Erfassung der Oberfläche, der Geometrie und der Rauheit mit Oberflächenmessgeräten und deren Bewertung mit Messzahlen (Roemtsch und Letzner 1993). Viele der zahnärztlichen Studien zur Oberflächenanalyse kombinieren Aussagen der rasterelektronen-mikroskopischen Untersuchungen mit Ergebnissen der Profilometrie oder Lichtreflexionsmessung.

2.16 Rauigkeitsmessungen

Es gibt verschiedene quantitative Verfahren, die es ermöglichen Oberflächen zu vermessen. Von allen Verfahren wird das so genannte Tastschnittverfahren am häufigsten eingesetzt.

Dabei erfolgt die Aufnahme der Oberfläche mit einer Diamantspitze die quer über die Werkstoffoberfläche bewegt wird. Im Taster befindet sich eine hochpräzise Lagerung der Tastspitze und der Wandler, der die Vertikalbewegungen der Spitze, durch Profilunregelmäßigkeiten ausgelöst, in ein elektrisches Signal umwandelt. Das Signal wird verstärkt, digitalisiert und die Daten werden in einem Computer eingespeist, welcher die verschiedenen Rechenoperationen durchführt. Die Ergebnisse werden am Display angezeigt und als Zahlenwert mit einem Profildiagramm ausgedruckt.

Der Laser-Taster und die Streulichttechnik ermöglichen die optische Messung. Damit gehören sie auch zu den quantitativen Verfahren.

Die Funktion des Lasertasters lässt sich wie folgt beschreiben: Ein Laserstrahl wird auf das zu untersuchende Werkstück gerichtet und die Focussierungslinse (Objektiv) kann durch eine Spule in senkrechter Richtung verschoben werden. Die Bewegung dieses Objektives wird durch ein Focussierungssignal ausgelöst, das auf Änderungen

des Abstandes zwischen Objektiv und dem wahren Brennpunkt anspricht. Das Objektiv folgt in einem bestimmten Abstand. Die Bewegungen des Objektivs entsprechen dem gemessenen Oberflächenprofil.

Bei der Streulichttechnik wird ein Lichtpunkt (0,8 mm), bedingt durch die Oberflächenrauheit, gestreut reflektiert. Raue Oberflächen streuen das einfallende Licht stärker als glatte. Das so entstehende Streumuster wird von einem Feld von Fotodioden erfasst, wobei die Varianz der Streulichtverteilung ermittelt wird (Rometsch und Letzner 1993).

Moderne Oberflächen Messgeräte bieten eine große Anzahl verschiedener Oberflächenkennwerte (Parameter) mit unterschiedlicher Aussagekraft. Bei der quantitativen Oberflächencharakterisierung muss die Dreidimensionalität der Profile berücksichtigt werden. Die Messung mit nur einem Parameter zu genauen Erfassung der Verhältnisse reicht nicht aus.

Der bevorzugte arithmetische Mittenrauwert R_a kann zum Beispiel nicht zwischen Erhebungen und Versenkungen unterscheiden, ebenso wenig kann er verschiedene Profilformen erkennen.

Die Aussagen des Wertes müssen durch die Interpretationen der Messergebnisse anderer Werte wie dem quadratischem Mittenrauwert R_q , der maximalen Rautiefe R_{max} , der Rautiefe R_z , und weiterer Parameter ergänzt werden (61, 48).

2.17 Mikroskopische Untersuchungen

Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) ergänzen die Ergebnisse der quantitativen Methode in zahnmedizinischen Studien. Hauptsächlich dienen die Untersuchungen der mikromorphologischen Analyse von Werkstoffoberflächen oder von Zahnhartsubstanz.

Ein REM funktioniert wie folgt: der Durchmesser eines Elektronenstrahles wird einer Mikroskopsäule durch eine elektrische Linse elektronenoptisch verkleinert, so dass auf der zu untersuchenden Probe ein Sondendurchmesser von 5-20 nm vorliegt. Ein Ablenkgenerator ermöglicht eine zeilenförmige Abtastung der Probe durch die Elektronensonde und eine synchrone Rasteraufzeichnung des Bildes in einer Bildröhre. Die emittierten Sekundärelektronen und die rückstreuenden Elektronen

werden von Detektoren erfasst. Diese Signale dienen nach Passieren des Videoverstärkers zur Helligkeitsmodulation der Bildröhre.

2.18 Energiedispersive Elektronenstrahlmikroanalyse

Die energiedispersive Elektronenstrahlmikroanalyse (EDX) ist eine analytische Technik zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von massiven Proben, dünnen Schichten oder Partikeln mit der Untersuchung in einem Elektronenmikroskop. Unter Verwendung eines energiedispersiven Röntgenstrahlspektrometers (EDS) ist es möglich Elemente aufzuspüren und zu analysieren. Elementinformationen erhalten von einer umfangreichen Probe oder nur ein paar mikroskopischen Partikeln bei einer limitierten Nachweisgrenze in der Größenordnung von einem Zehntel eines Masseprozent, macht die Röntgenmikrostrahlanalyse zu einem der meist empfindlichsten Analysen überhaupt.

Das Prinzip der energiedispersiven Elektronenstrahlmikroanalyse lässt sich wie folgt beschreiben:

Die zu untersuchende Probe wird mit hochenergetischen Elektronen beschossen. Dabei kommt es zu unterschiedlichen Wechselwirkungen der Atome der Probe mit den auftreffenden Elektronen. Eines dieser Wechselwirkungsprodukte ist die Röntgenstrahlung.

Röntgenstrahlung entsteht, wenn hochbeschleunigte Elektronen auf eine feste Oberfläche auftreffen und plötzlich abgebremst werden; die emittierte elektromagnetische Strahlung wird daher Röntgenbremsstrahlung genannt. Es entsteht dabei jedoch auch eine Eigenstrahlung, wenn ein sehr schnell bewegtes Elektron die äußeren Schalen des Atoms durchdrungen hat und aus den tieferen Schalen ein Elektron herausschlägt. Die entstandene Leerstelle wird sofort von einem Elektron der höheren Schalen ausgefüllt, wobei dann dessen Elektronen einen größeren Energiebetrag in Form von Röntgenstrahlung einer ganz typischen, hohen Frequenz aussenden.

Nach dem MOSELEYschen Gesetz ist diese Röntgenstrahlung charakteristisch für jedes Element des Periodensystems. Damit kann über die Energie der charakteristischen Röntgenstrahlung die Zuordnung zu einem bestimmten Element erfolgen.

Das MOSELEYsche Gesetz beschreibt die Lage der sogenannten K α - Linien im Röntgenspektrum. Dieses ist die Linie, welche dem Übergang eines Elektrons von der L-Schale zur K-Schale entspricht.

In einer allgemeineren Form kann man mit diesem Gesetz auch die Wellenlänge der übrigen Linien des Röntgenspektrums bestimmen. Die Wellenlänge λ der beim Elektronenübergang emittierten bzw. absorbierten charakteristischen Röntgenstrahlung ist abhängig von der Ordnungszahl Z des jeweiligen Elementes und somit charakteristisch für ein bestimmtes Element.

Es gilt: $1 / \lambda = \bar{\nu} = R_{\infty} \cdot (Z - K)^2 \cdot (1/n_1^2 - 1/n_2^2)$

Dabei ist:

λ	-	Wellenlänge der emittierten bzw. absorbierten Röntgenstrahlung
ν	-	Wellenzahl der emittierten bzw. absorbierten Röntgenstrahlung
R_{∞}	-	Rydberg-Konstante - $1,0973731534 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$
Z	-	Ordnungszahl des Elements
K	-	Abschirmungskonstante (Abschirmung der Kernladung durch Elektronen , die sich zwischen Kern und dem betrachteten Elektron befinden)
n_1, n_2	-	Hauptquantenzahl der beiden Zustände (n_1 = innere Schale, n_2 = äußere Schale)

Für den Übergang eines Elektrons von der zweiten (L-Schale) in die erste Schale (K-Schale), der sogenannten K α -Übergang, gilt $K \approx 1$ und die entsprechende Wellenzahl ist dann:

$$\bar{\nu}_{K\alpha} = R_{\infty} \cdot (Z-1)^2 \cdot (1/1^2 - 1/2^2) = R_{\infty} \cdot (Z-1)^2 \cdot (3/4)$$

Für den Übergang eines Elektron von der dritten (M-Schale) in die zweite Schale (L-Übergang) gilt $K \approx 7,4$.

Da der Elektronenbeschuss nur in die oberen Atomsschichten der Metallprobe eindringt ist nur eine Mikroanalyse der Oberflächenszusammensetzung möglich.

3 Material und Methode

3.1 Schematische Darstellung des Studienablaufes

Ablauf der Studie

1. Teil: Rauigkeitsmessungen und energiedispersive Elektronenmikrostrahl-analyse (EDAX-Analyse)

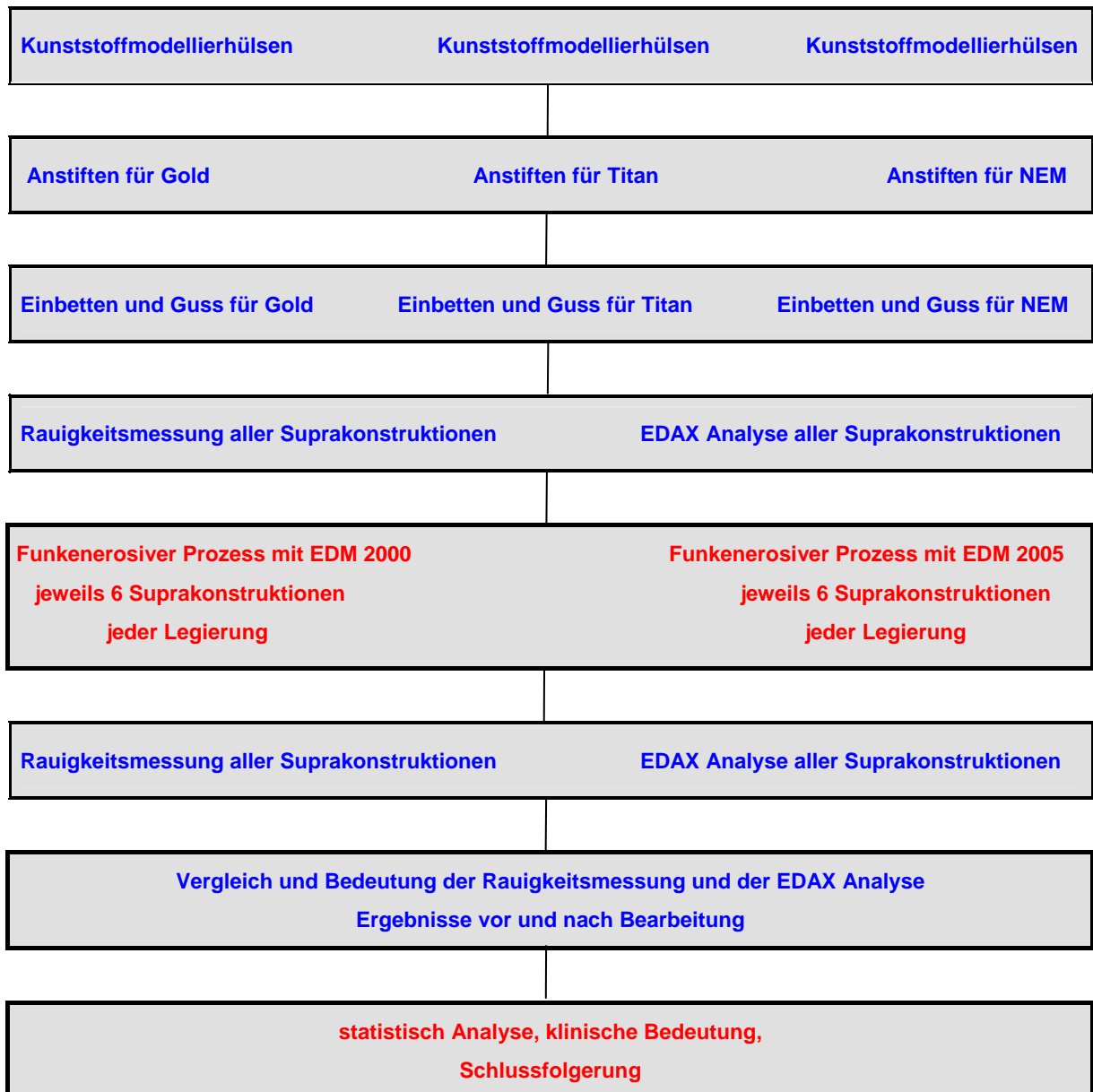


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Studienablaufes Teil 1

2. Teil: Schichtstärkenmessung mit energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse

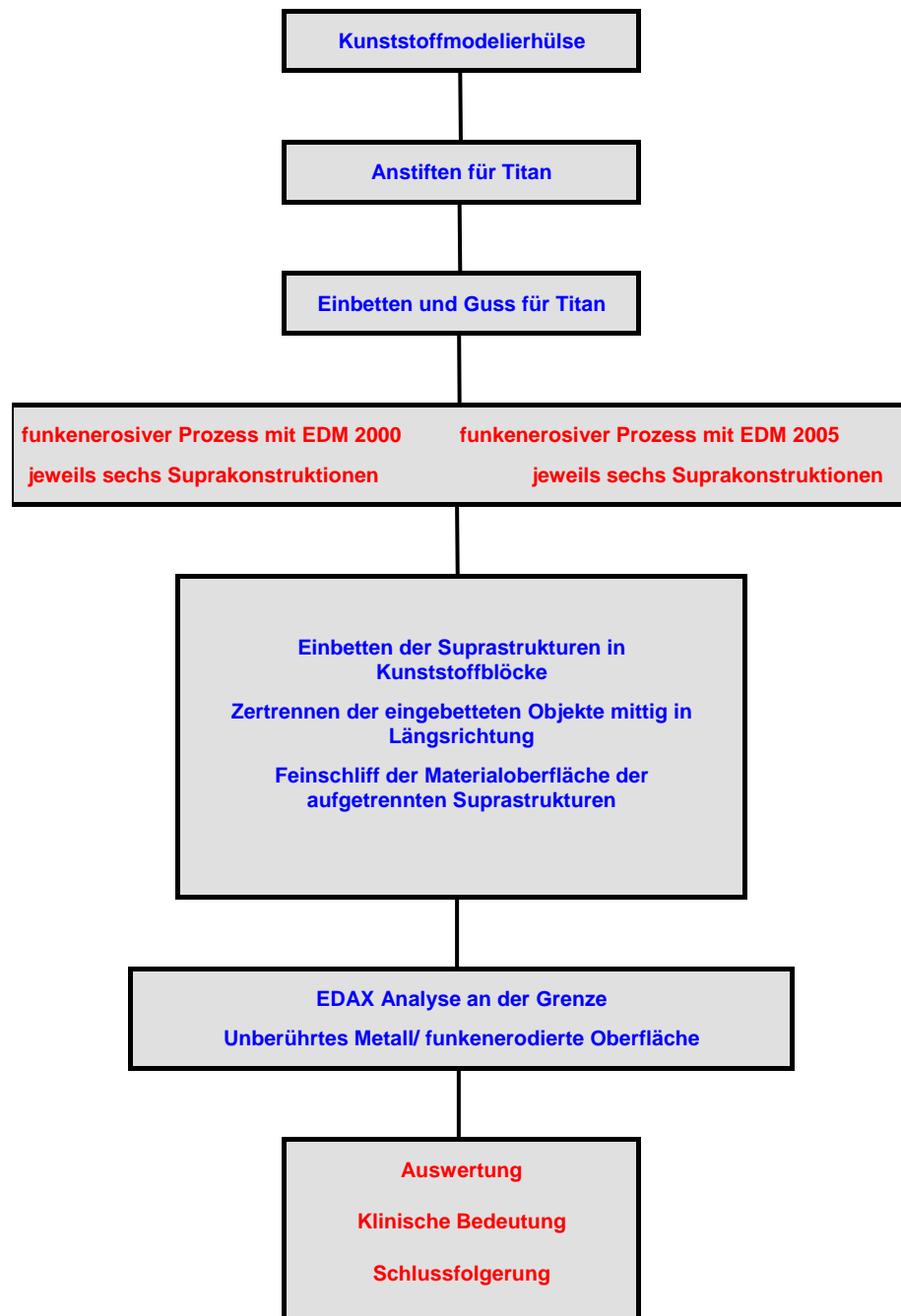


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des Studienablaufes Teil 2

3.2 Zahntechnischer Ablauf

3.2.1 Herstellung der Suprakonstruktionen

Für die energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse und die Rauigkeitsmessungen wurden im Gussverfahren Prüfkörper hergestellt, die hier simulierend für definitive zahntechnische Arbeiten im Patientenmund den vollständigen zahntechnischen Ablauf durchlaufen. Es werden drei typische Vertreter einer dentalen Gusslegierung zur Herstellung der Prüfkörper eingesetzt. Jeweils ein Vertreter einer Gold-, Titan- und einer Kobalt-Chrom Legierung kommen zum Einsatz.

Ein Ankylos Kunststoffzylinder (Best-Nr. 82-0370) der Firma SAE wird für den zahntechnischen Guss angestiftet. In einem Winkel von 45° wird ein Gusskanal mit einem Durchmesser von 3 mm am Übergang des zylindrischen Teils zum konischen Teil des Kunststoffzylinders angebracht, so dass die ringförmige Auflagefläche der Suprastruktur auf der Implantatschulter keinerlei Nachbearbeitung benötigt.

Von jeder Legierung werden 12 Prüfkörper hergestellt. Insgesamt also 36 Prüfkörper.



Abbildung 3-3: Teile für das SAE-SECOTEC-Programm (Modellhülse, Modellimplantat, Implantatelektrode, Kunststoffzylinder)

3.2.2 Einbettung und Guss für die Goldsuprakonstruktionen

Der Einbettvorgang erfolgte mit einer Speedeinbettmasse von Eurocast (phosphatgebunden, gips- und graphitfrei) gemäß den Herstellerangaben. Dabei werden 21 ml Konzentrat mit 19 ml destilliertem Wasser in einem Einrührbecher gut durchmischt. Danach werden 180 g Speedeinbettmasse eingestreut und mit dem Spatel durchgerührt.

Die entstandene Masse wird 90 sec. im Vacummixer angemischt und langsam auf dem Rüttler in den Silikomuffelformer gegossen.

Nach 13 min wird der Silikonmuffelformer entfernt und die Muffel für 35 min in den auf 850°C vorgeheizten Ofen gestellt.

Zur Anwendung kommt die Legierung Bio-RD-1 mit folgender Zusammensetzung:

Au= 73,8 %, Ag= 9,2%, Pt= 9,0%, Cu= 4,4%, Zn= 2,0%, In= 1,5%, Ir= 0,1%.

Die heiße Muffel wird in einer widerstandsbeheizten Tiegelschleuder TS 3 von Degussa bei einer Temperatur von 1050°C abgegossen.

Nach dem Abkühlen wird der Goldguss mit der Ausbettzange von der Einbettmasse befreit. Feine Einbettmasse wird mit 125 µm Aluminiumoxid und 250 µm Glasperlen bei zwei bar abgestrahlt.

Jetzt erfolgt die Abtrennung des Gusskanals mit einer 0,3 mm Trennscheibe und das Verschleifen des Gussansatzes. Kleine Gussperlen und Fähnchen werden im Bereich des Implantatpfostens unter dem Mikroskop entfernt.

3.2.3 Einbettung und Guss für die Titansuprakonstruktionen

Das Einbetten und der Guss für Titan erfolgten nach dem Gießverfahren der Firma Schütz Dental GmbH (Biotan).

Der Einbettvorgang wird mit der Spinelleinbettmasse gemäß Herstellerangaben in einem Anmischverhältnis von 250 g Einbettmasse zu 35 ml Flüssigkeit bei einer Anmischzeit von 35 Sekunden mit dem Vakumgerät, einer Verarbeitungszeit von sechs Minuten und einer Trockenphase von 60 Minuten durchgeführt. Beim Auffüllen der Muffel mit der Einbettmasse war darauf zu achten, dass der Kunststoffzylinder nur ca. drei Millimeter bedeckt ist.

Nach ca. zwei Stunden wird die angetrocknete Einbettmasse angeraut, das überflüssige Vlies entfernt und der Rest der Muffel mit der mit Wasser ohne Vakuum angerührten M1-Modellgusseinbettmasse aufgefüllt. Der Aufheizzyklus wird über Nacht durchgeführt. Der Titanguss wird nach der Checkliste aus dem Biotan-Guss-Handbuch durchgeführt.

Zur Anwendung kommt die Legierung Biotan mit folgender Zusammensetzung:

Ti = 99,48 %, O = 0,18 %, N = 0,03 %, C = 0,10 %, Fe = 0,20 %, H = 0,01 %.

Ist die Muffel im Wasser abgekühlt, wird die Einbettmasse aus dem Muffelring herausgedrückt und vorsichtig mit einem kleinen Hammer abgeschlagen. Das Titan muss beschädigungsfrei bleiben.

Nach der Ausbettung erfolgte das Abstrahlen mit 125 µm Aluminiumoxid und 250 µm Glasperlen bei zwei bar. Der Gusskanal wird mit einer 0.3 mm Trennscheibe abgetrennt und die Gussansätze verschliffen. Das Entfernen kleiner Gussperlen und Fähnchen erfolgte unter dem Mikroskop.

3.2.4 Einbettung und Guss der Kobalt –Chromsuprakonstruktion

Der Einbettvorgang erfolgte mit der Einbettmasse INVESTMENT C gemäß den Herstellerangaben. Dabei werden 82 ml Konzentrat mit 18 ml destilliertem Wasser in einem Anrührbecher gut durchmischt. Danach werden 420 g Pulver eingestreut und 20 sec. mit dem Spatel durchgerührt. Die entstandene Masse wird 45 sec. im Vacuummixer angemischt und langsam auf dem Rüttler in die Muffel gegossen. Die Aushärtzeit der Einbettmasse beträgt 60 min. Gemäß den Herstellerangaben wird der Aufheizzyklus etappenweise gesteuert. Nach dem Erreichen der Endtemperatur von 960°C wird nach einer Haltezeit von 45 min mit einer Hochfrequenz-Vakuumschleuder bei einer Gießtemperatur von 1510°C die Muffel abgegossen.

Zur Anwendung kommt die Legierung Vi-Comp mit folgender Zusammensetzung:

Co= 61,10%, Cr= 32,00%, Mo= 5,50%, Si= 0,70%, Mn= 0,70%.

Nach dem Abkühlen wird der Kobalt-Chrom Guss mit der Ausbettzange von der Einbettmasse befreit. Feine Einbettmasse wird mit 125 µm Aluminiumoxid und 250 µm Glasperlen bei zwei bar abgestrahlt. Der Gusskanal wird mit einer 0.3 mm Trennscheibe abgetrennt und die Gussansätze verschliffen. Das Entfernen kleiner Gussperlen und Fähnchen erfolgte unter dem Mikroskop.



Abbildung 3-4: 36 Suprastrukturen, die für diese Studie hergestellt und vor und nach Funkenerosion auf ihre Oberflächenbeschaffenheit untersucht worden sind, links 12 Gerüste aus Titan, in der Mitte 12 aus Gold und rechts 12 aus Kobalt-Chrom

3.3 Funkenerosiver Prozess

Die funkenerosive Bearbeitung der 36 Versuchshülsen wurden nach den Angaben der Firma SAE Bremerhafen durchgeführt.

Von den jeweils zwölf angefertigten Suprastrukturen jeder der drei verwendeten Legierungen (Gold, Titan, Kobalt-Chrom) werden die Hälfte mit der SAE Funkenerosionsmaschine EMD 2000 und die andere Hälfte mit der SAE Funkenerosionsmaschine EMD 2005 bearbeitet.

Die funkenerosive Bearbeitung der Suprastrukturen wurde nach den Angaben von Rübeling wie folgt durchgeführt:

Mit Hilfe eine Modellsockelformers wurde ein Meistermodell erstellt in dem eine Modellhülse des SAE Serotecs Systems analog wie bei der Herstellung eines zahn-technischen Meistermodelles nach der Sammelabformung befestigt wurde.

Mittels einer an der Modellhülse angebrachten Kupferlitze wurde die elektrische Leitfähigkeit hergestellt. Die so befestigt Modellhülse erlaubt einen guten Austausch der aus Kupfer gefertigten Modelimplantate. Dieses Modell kann auf dem Modelltisch der Funkenerosionsmaschine sicher fixiert werden.

In diese hergestellte Halterung wird nun eine Kupfermodellelektrode eingespannt.

Auf diese Kupferelektrode wird dann jeweils eine der gegossenen Suprastrukturen aufgesetzt und mit einem kleinen Partikel Weichwachs fixiert.

Die Aufnahmekralle im Funkerosionsgerät wird bis zum Kontakt zur Suprakonstruktion im senkrechten Motorvortrieb heruntergefahren. Ein Auslegarm der Kralle wird so in Kontakt zur Suprastruktur gebracht. Es erfolgte ein spannungsfreier Verbund zwischen der Aufnahmekralle und der Suprakonstruktion mittels Pattern Resin.

Nach dem Hochfahren der Suprakonstruktion ist die Modelloberfläche frei zugänglich. Es können so die formidentischen Implantatelektroden nach den einzelnen Erodiervorgängen ausgetauscht werden.

Es erfolgte die Ausrichtung der Dielektrikum-Spülung auf die Suprakonstruktion. Die Wanne wird geschlossen und geflutet.

Der Erosionsprozess wird immer unter der Spülung durch ein Dielektrikum vorgenommen. Es hat die Aufgabe das bearbeitete Metall zu kühlen, herausgelöste Metallpartikel wegzuspülen und eine Optimierung des elektrischen Spannungsfeldes zu erreichen. Vor der funkerosiven Bearbeitung der Strukturen wurden beide Erosionsmaschinen grundgereinigt und mit frischem Dielektrikum befüllt.

Am Generator des jeweiligen Gerätes wird die Einstellung für den Erosionsablauf vorgenommen. Die Parametereinstellungen für den differenzierten Erosionsablauf ist abhängig von der Legierungsart, der Größe des Objektes sowie der gewählten Bearbeitungsart (Schrubben, Schlichten, Feinschlichten). Es sind die vom Hersteller empfohlenen Parameter in Abhängigkeit vom verwendeten Material verwendet worden.

Der Tabelle sind die Parametereinstellungen der Maschinen zu entnehmen:

Prüfkörper NEM 1-6 auf EDM 2000

<i>Zahl der Durchgänge</i>	<i>T-ON</i>	<i>T-OFF</i>	<i>IP</i>	<i>Polarität</i>
1. Durchgang	30	20	2	negativ
2. Durchgang	30	20	1	negativ
3. Durchgang	30	20	0	negativ

Prüfkörper Au 1-6 auf EDM 2000

<i>Zahl der Durchgänge</i>	<i>T-ON</i>	<i>T-OFF</i>	<i>IP</i>	<i>Polarität</i>
1. Durchgang	50	20	1	negativ
2. Durchgang	50	20	0	negativ

Prüfkörper Ti 1-6 auf EDM 2000

<i>Zahl der Durchgänge</i>	<i>T-ON</i>	<i>T-OFF</i>	<i>IP</i>	<i>Polarität</i>
1. Durchgang	50	30	2	negativ
2. Durchgang	50	30	1	negativ
3. Durchgang	30	20	0	negativ

Prüfkörper NEM 7-12 auf EDM 2005

<i>Zahl der Durchgänge</i>	<i>T-ON</i>	<i>T-OFF</i>	<i>IP</i>	<i>Polarität</i>
1. Durchgang	30	20	4	negativ
2. Durchgang	30	20	2	negativ
3. Durchgang	30	20	1	negativ

Prüfkörper Au 7-12 auf EDM 2005

<i>Zahl der Durchgänge</i>	<i>T-ON</i>	<i>T-OFF</i>	<i>IP</i>	<i>Polarität</i>
1. Durchgang	50	20	1	negativ

Prüfkörper Ti 7-12 auf EDM 2005

<i>Zahl der Durchgänge</i>	<i>T-ON</i>	<i>T-OFF</i>	<i>IP</i>	<i>Polarität</i>
1. Durchgang	50	30	4	negativ
2. Durchgang	30	20	2	negativ
3. Durchgang	30	20	1	negativ

Tabelle 3-1: Parametereinstellungen der EDM 2000 und 2005

Zwischen den Erosionsvorgängen der einzelnen Suprastruktur werden die Modell-elektroden ausgetauscht und gegen unbenutzte ersetzt. Alle Suprastrukturen wurden auf 0,4- 0,5 mm Tiefe erodiert.

Nach dem Prozess der funkenerosiven Bearbeitung erfolgte eine Reinigung der Werkstücke im Ultraschallbad und eine abschließende Spülung mit reinem Alkohol.



Abbildung 3-5: Funkerosionsmaschine EDM 2000 (Quelle: SAE Bremerhaven)

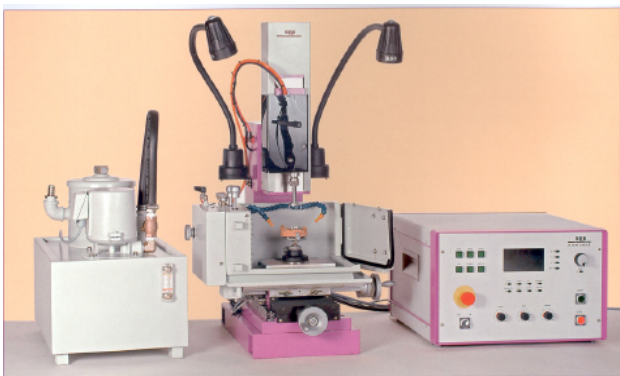


Abbildung 3-6: Funkerosionsmaschine EDM 2005 (Quelle: SAE Bremerhaven)

3.4 Quantitative Beurteilung der Oberfläche

Die Messung der Rauigkeit sowie deren Bewertung wurden von der Mahr GmbH Göttingen durchgeführt.

Auf der dem Implantat zugewandten horizontal verlaufenden ringförmigen Stirnfläche wurde an jeweils zwei definierten Messstellen die Rauigkeit gemessen. Die Messstellen liegen auf der kreisförmigen Stirnfläche um 180° in Radiusrichtung versetzt.

Die Proben wurden im Originalzustand untersucht. Eine spezielle Präparation erfolgte nicht.

3.4.1 Messvorrichtung

Die Rauigkeitsmessungen der Oberflächen wurden mit dem Messgerät POM Concept mit dem Vorschubgerät PGK Plus der Firma Mahr GmbH mit dem Taster MFW-250 (Bezugebenentaster) durchgeführt.

Die Messaufgabe bestand darin auf den jeweils 12 Proben der drei verwendeten Legierungen vor der funkenerosiven Bearbeitung Rauigkeitsmessungen durchzuführen. Auf jeder Probe wurden an zwei definierten Messpunkten die Untersuchungen erhoben.

Die Größe der Messstrecke betrug 1,0 mm



Abbildung 3-7: PC-basiertes Oberflächenmessgerät (Quelle: Firma Mahr)



Abbildung 3-8: Taster Mahr Surf MFW-250 (Quelle: Firma Mahr)

3.4.2 Messvorgang

Die Oberfläche der Implantatsuprastrukturen wurde durch 6400 Messpunkte mit einem Punktabstand von $0,16 \mu\text{m}$ abgetastet. Die Messgeschwindigkeit betrug $0,10 \text{ mm/s}$.

Um in die Mikrostruktur der Oberfläche eindringen zu können (die Rautiefen), muss man die Angaben des Messgerätes bezüglich der Makrostruktur (Form) mathematisch ignorieren. Dazu bedient man sich des Polynoms 5. Ordnung, da eine Fläche keine definierte geometrisch Figur darstellt. Ein Rauheitsfilter (LS) mit $2,5 \mu\text{m}$ bewirkt eine Aufgliederung der Oberfläche, die Trennung des Profils in Welligkeitsprofil und Rauheitsprofil. Die Wahl des Filters hängt von der Größe der zu messenden Rauheit ab. Dieser Filter verändert nicht das Ausgangsprofil, sondern nur die Art der Betrachtung, um die Messparameter zu erhalten und vergleichen zu können.

3.4.3 Messbedingungen

Beim Funkenerodieren entstehen aperiodische Profile. Den Werten der maximalen Rauheitsprofilhöhe (R_z) von $0,1$ bis $0,5 \mu\text{m}$ ist eine Grenzwellenlänge von (λ_c) von $0,25 \text{ mm}$ zugeordnet. Die Zuordnung ist in der DIN EN ISO 4288 verbindlich festgelegt. Die Grenzwellenlänge λ_c ist von großer Bedeutung, da die Rauheitsparameter aus dem gefilterten Profil berechnet werden

Die gesamte Strecke (LT) die vom Mikrotaster auf der Oberfläche zurückgelegt worden ist betrug $1,0 \text{ mm}$. Es gibt jeweils eine Vor- und eine Nachlaufstrecke.

Die Auswertestrecke (LM) betrug jeweils $0,5 \text{ mm}$. Sie wird zu Berechnung der Parameter herangezogen. Es wurden 6400 Profilpunkte aufgenommen.

Insgesamt musste die Messstrecke aufgrund der vorhandenen Größe des Prüfkörpers verkürzt werden.

Der Durchmesser der verwendeten Tastspitze MFW-250 der Firma Mahr betrug $2 \mu\text{m}$.

3.4.4 Messung der Rauigkeit nach Funkenerosion

Nach der Bearbeitung der Suprakonstruktionen mit dem SAE- Serotec- Funkenerosionsverfahren wurden diese wie in Punkt 3.4.3, erneut von der Mahr GmbH

Göttingen bezüglich der Rauigkeit an den gleichen definierten Messpunkten untersucht.

Anschließend wurden die Werte vor und nach Funkenerosion zur statistischen Auswertung herangezogen.

3.4.5 Oberflächenparameter

Für die Auswertungen der Rauigkeitsmessungen und für die Interpretation der Oberflächenmorphologie stehen nach der Vermessung folgende Parameter zu Verfügung, die in gebräuchliche und statistische Parameter unterschieden werden:

gebräuchliche Parameter:

- Ra** arithmetische Mittelwert der Beträge aller Profilwerte des Rauheitsprofils
- Rz** arithmetische Mittelwert der Einzelrautiefen aufeinander folgender Einzelmeßstrecken
- Rmax** größte Einzelrautiefe innerhalb der gesamten Messstrecke

statistische Parameter:

- Rq** quadratischer Mittenrauwert
- Rsk** Schiefe
- Rku** Steilheit/ Kurtosis

weitere Parameter:

- Rp** Höhe der größten Profilspitze des Rauheitsprofils innerhalb einer Einzelmessstrecke
- Rv** ist die Tiefe des größten Profiltals des R-Profiles innerhalb einer Einzelmessstrecke

3.4.6 Auswertung und Interpretation der Parameter

Die Parameter Ra und Rz bilden die Grundlage für die Auswertung und Interpretation um die Mikrostruktur der erosiv bearbeiteten Suprastrukturen zu beurteilen.

Zur Beurteilung von Flächen müssen immer mehrere Parameter herangezogen und gegenübergestellt werden. So reicht zum Beispiel der arithmetische Mittenrauwert R_a allein als Oberflächenkennwert nicht aus. Er ist nicht in der Lage zwischen Spitzen und Riefen zu unterscheiden, ebenso wenig kann er verschiedene Profilformen erkennen. Trotzdem ist er ein vielfach verwendeter Wert, der mit analogen Messgeräten einfach berechnet werden kann. Seiner Definition liegt eine sehr starke Mittelwertbildung zu Grunde.

Die Aussagefähigkeit des arithmetischen Mittenrauwertes R_z ist höher.

Der Wert R_{max} trifft nur eine Aussage über die größte vorhandene Einzelrautiefe innerhalb der gesamten Messstrecke. Er kann deshalb nie eine Oberfläche aussagekräftig beschreiben.

Die Auswertung der Glättungstiefe R_p und R_v hilft bei der detaillierteren Beurteilung der Veränderung der Oberfläche durch den funkenerosiven Prozess.

Ein nur oberflächlicher Abtrag von Material sollte die Höhen der Profilsitzen innerhalb einer Einzelmessstrecke verkleinern. Hingegen sollten die Werte des größten Profiltales unverändert bleiben.

Die Auswertung wird in Mikrometern (μm) angegeben, wobei minimale Werte eine geringere Rauheit, d.h. eine besseren Oberflächengüte entsprechen.



Abbildung 3-9: Parameter Ra und Rq (Quelle Mahr)



Abbildung 3-10: Parameter Rz und Rmax (Quelle Mahr)

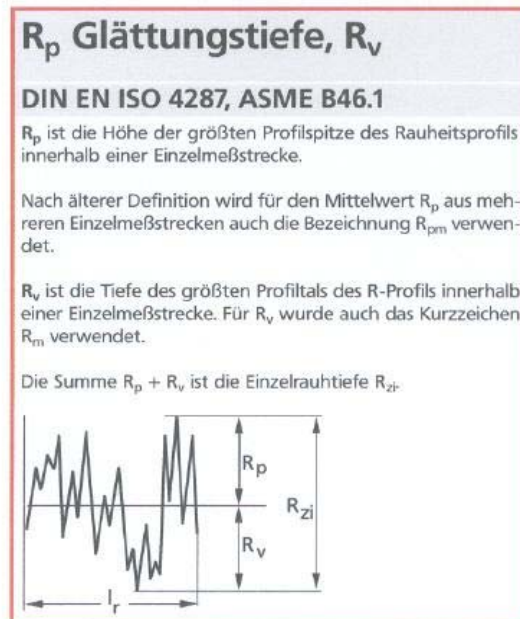


Abbildung 3-11: Parameter Rp und Rv (Quelle Mahr)

3.5 Untersuchung der elementaren Oberflächenzusammensetzung

Die Untersuchung der elementaren Oberflächenzusammensetzung erfolgte mit Hilfe der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse.

Diese Röntgenmikroanalyse wurde von der Firma Brucker AXS Microanalytics GmbH Berlin durchgeführt.

3.5.1 Energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse vor Funkenerosion

Auf der dem Implantat zugewandten horizontal verlaufenden ringförmigen Stirnfläche wurde an jeweils zwei definierten Messstellen die oberflächlich Elementarzusammensetzung der Suprastruktur direkt nach dem zahntechnischen Guss bestimmt. Die Messstellen liegen auf der kreisförmigen Stirnfläche um 180° in Radiusrichtung versetzt.

3.5.2 Messvorrichtung

Die Untersuchung erfolgte an einem Rasterelektronenmikroskop LEO 438VP ausgerüstet mit einem energiedispersiven Spektrometer der Fa. Brucker AXS.

Als Detektor kam ein stickstofffreier Siliziumdriftkammerdetektor (XFlash® 4010) mit einer Energieauflösung von 125 eV für die Mangan $K\alpha$ Linie zum Einsatz.

Die Proben wurden im Originalzustand untersucht. Eine spezielle Präparation erfolgte nicht.

Die Anregungsspannung am Elektronenmikroskop betrug 20 kV. Folgende Parameter wurden für die Messung verwendet: Bildauflösung 1024 x 768 Punkte, Vergrößerung 200 fach. Von jeder Probe wurde an zwei verschiedenen definierten Stellen (jeweils um 180° versetzt auf der Kreisfläche) je ein Sekundärelektronenbild und ein Spektrum nachgewiesen.

Die Quantax Familie der EDS Systeme von der Firma Bruker AXS Mikroanalyse liefert zuverlässige Ergebnisse über eine weite Reihe von Anwendungen beispielloser Geschwindigkeit, Genauigkeit und Einfachheit in der Anwendung.

Der einzigartige, von flüssigem Stickstoff freie XFLASH® silicon drift detector (SDD) liefert zusammen mit dem neu entwickelten Hybridprozessor eine optimale Verar-

beitung der Signale des XFLASH® Detektors und eine über zehnmals schnellere Geschwindigkeit als konventionelle Si(Li) basierende Systeme.



Abbildung 3-12: EDS-System QUANTAX

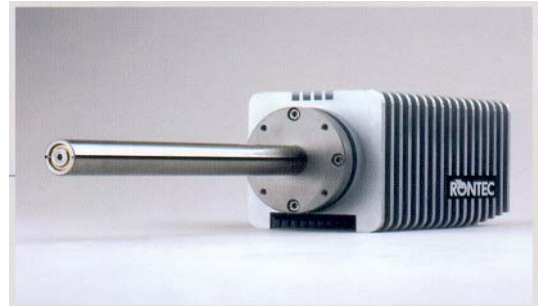


Abbildung 3-13: EDS-System QUANTAX
XFLASH® Detektor

3.5.3 Energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse nach Funkenerosion

Nach der Bearbeitung der Suprakonstruktionen mit dem SAE- Serotec- Funkenerosionsverfahren wurden diese wie in Punkt 3.6.1 , erneut von der Firma Brucker AXS Microanalytics GmbH bezüglich der Elementarzusammensetzung an den gleichen definierten Messpunkten untersucht.

Anschließend wurden die Werte vor und nach Funkenerosion zur statistischen Auswertung herangezogen.

3.6 Messung der oberflächlichen Gefügeveränderung in der Tiefe

Um mögliche Verunreinigungen an der Oberfläche sowie Veränderungen in der Elementarverteilung der erosiv bearbeiteten Flächen genauer untersuchen zu können, wurden sechs Prüfkörper für eine entsprechende Untersuchung präpariert.

3.6.1 Herstellung der Prüfkörper:

Es wurden sechs Prüfkörper aus Titan wie unter Punkt 3.2.3 beschrieben hergestellt. Danach wurden jeweils drei Stück auf der Funkenerosionsmaschine EMD 2000 und EDM 2005 vollständig dem Ablauf des Errodierens unterzogen. Danach wurden alle Suprastrukturen in Epo-Plast Einbettmasse (Firma Buehler) vollständig eingebettet.

Nach dem Aushärten der Masse wurden die zylinderartigen Strukturen in der Länge nach mit einer Diamanttrennscheibe getrennt. Es folgte eine Politur der Schnittfläche auf einer Tellerschleifmaschine mit Sandpapier in aufsteigender Körnung (600, 1200, 2400). Anschließend wurden die Flächen mit Alkohol von Verunreinigungen gesäubert und getrocknet.

3.6.2 Messvorrichtung

Auch diese Messung wurde von der Firma Brucker AXS Microanalytics GmbH Berlin durchgeführt. Es wurde die gleiche Messeinrichtung wie unter Punkt 3.6.2 beschrieben verwendet.

3.6.3 Messbedingungen

Die Anregungsspannung im Rasterelektronenmikroskop beträgt 20 kV.

Es wurde eine 2000fache Vergrößerung und eine Bildauflösung von 600 x 450 Punkten gewählt. Die Messzeit betrug 15 min bei einem Impulsdurchsatz von 50000 Impulsen/s

Um eine elektrische Aufladung der nicht leitenden Kunststoffeinbettmasse zu verhindern wird auf der Oberfläche der Schnittfläche eine leitende Kohlenstoffschicht durch bedampfen aufgebracht.

Als Messpunkt wurde der Phasenübergang der Titansuprastruktur (erodierte Fläche) zum Material der Kunststoffeinbettmasse gewählt

Es wurden Sekundärelektronenbilder und auch farbig unterlegte Bilder der Elementverteilung an der Oberfläche der erodierten Flächen hergestellt.

3.7 Statistische Auswertung der Ergebnisse

In Tabellen wurden die Standardabweichungen dargestellt. Die Standardabweichung als gebräuchliches Streunungsmaß wird bei intervallskallierten und normalverteilten Variablen berechnet.

Die Darstellungen der Standardabweichung der Messergebnisse der Rauigkeitsmessungen erfolgte getrennt für jede der drei verwendeten Legierungstypen in einer Tabelle (Titan, Gold, Kobalt-Chrom). (Tabelle 4-13 bis 4-15).wobei innerhalb einer Tabelle alle untersuchten Rauheitsparameter (Ra, Rmax, Rz, Rp, Rv) sowohl der

Funkenerosionsmaschine EDM 2000 als auch der EDM 2005 vor und nach Erosion dargestellt werden.

Die Darstellung der Standardabweichung der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse erfolgte getrennt für jede der drei verwendeten Legierungstypen (Titan, Gold, Kobalt-Chrom) in einer Tabelle (Tabelle 4-31 bis 4-33), wobei innerhalb einer Tabelle alle vor und nach Erosion nachgewiesenen Elemente sowohl der EDM 2000 als auch der EDM 2005 dargestellt werden.

Alle Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen und der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse wurden mit Tests auf signifikante Unterschiede statistisch ausgewertet.

Der von F. Wilcoxon entwickelte Wilcoxon- Test wurde verwendet um die gewonnenen abhängigen Messwerte zu vergleichen. Der Test dient zum Vergleich zweier abhängiger Stichproben bezüglich ihrer zentralen Tendenz. Dies sind die Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen und der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse die mit den identischen Proben jeweils vor und nach funkenerosiver Bearbeitung gewonnen wurden.

Die Auswertung der Rauigkeitsmessungen erfolgte in Kreuztabellen getrennt für die Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005, wobei innerhalb der jeweiligen Tabelle alle verwendeten Legierungstypen (Titan, Gold, Kobalt-Chrom) und alle gemessenen Rauheitsparameter (Ra, Rmax, Rz, Rp, Rv) miteinander verglichen werden .

Die statistische Auswertung der Ergebnisse der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse erfolgte in Kreuztabellen getrennt für die Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005, wobei innerhalb einer Tabelle die Proben der drei verwendeten Legierungstypen (Titan, Gold, Kobalt-Chrom) vor und nach Funkenerosion miteinander verglichen werden .

Der von H. B. Mann und D. R. Whitney entwickelte U- Test wurde verwendet um die gewonnenen unabhängigen Messwerte zu Vergleichen. Der U-Test dient zum Vergleich von zwei Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz, wobei die Werte beliebig verteilt sein oder Ordinalniveau aufweisen können. Dies sind die Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen und der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse der beiden Funkenerosionsmaschinen nach Erosion. Die Proben der EDM 2000 nach Erosion wurden mit den Proben der EDM 2005 nach der Erosion verglichen. Bei den Rauigkeitsmessungen erfolgte die statistische Auswertung in einer Kreuztabelle,

wobei innerhalb einer Tabelle die drei verwendeten Legierungstypen (Titan, Gold, Kobalt-Chrom) und alle gemessenen Rauheitsparameter (R_a , R_{max} , R_z , R_p , R_v) miteinander verglichen werden.

Für die energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse erfolgte die statistische Auswertung des U-Testes in einer Kreuztabelle, wobei innerhalb einer Tabelle alle Ergebnisse miteinander verglichen wurden.

Die Überprüfungen in den statistischen Tests erfolgten mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit p von 5 %. Je kleiner p , desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Unterschied zwischen den Werten besteht.

Ist $p < 0,05$ wird davon ausgegangen, dass sich die Werte unterscheiden.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen

Die Ergebnisse der Rauigkeitsmessungen wurden in Form von Rauigkeitsänderungen nach dem zahntechnischen Guss vor Bearbeitung und nach Funkenerosion tabellarisch in Tabelle 4-1 bis 4-12 und grafisch in den Grafiken 4-1 bis 4-5 dargestellt.

Die Ergebnisse der Standartabweichung vor und nach Bearbeitung wurden tabellarisch in den Tabellen 4-13 bis 4-15 dargestellt.

Die Ergebnisse der statistischen Analyse wurden tabellarisch in den Kreuztabellen 4-16 bis 4-18 dargestellt.

Weiterhin veranschaulichen ausgewählte Fotografien der unbearbeiteten und erodierten Oberflächen die Untersuchungsergebnisse, die in den Abbildungen 4-6 bis 4-11 abgebildet sind.

Die Ergebnisse aller Messungen sind im tabellarischen Anhang abgebildet.

4.1.1 Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Titansuprastrukturen vor Funkenerosion

Probe	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messungen in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1	0,98	5,63	5,32	2,26	3,06
2	1,01	5,07	4,84	2,05	2,78
3	1,01	6,27	5,67	2,52	3,16
4	1,05	7,10	6,03	2,61	3,42
5	1,10	6,31	5,63	2,65	2,98
6	0,78	3,73	3,72	1,71	2,01
EDM 2000					
1	1,06	6,64	5,46	2,09	3,37
2	1,02	5,90	5,43	2,55	2,70
3	0,91	6,03	4,86	2,12	2,74
4	0,94	5,68	5,21	2,41	2,80
5	1,01	5,25	4,92	2,17	2,75
6	1,01	6,16	5,23	2,12	3,26
EDM 2005					

Tabelle 4-1: Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Titansuprastrukturen vor Erosion

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Mittenrauwerte Ra im Bereich von 0,78- 1,10 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,78 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 1,10 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der Mittelwert des Mittenrauwertes Ra für die Titansuprastrukturen lag bei 0,98 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Mittenrauwerte R_a im Bereich von 0,91- 1,06 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,91 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der höchste mittlere Wert mit 1,06 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der Mittelwert des Mittenrauwertes R_a für die Titansuprastrukturen lag bei 0,99 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren maximalen Rautiefen R_{max} im Bereich von 3,73- 7,10 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,73 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 7,10 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe R_{max} für die Titansuprastrukturen lag bei 5,69 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren maximalen Rautiefen R_{max} im Bereich von 5,25- 6,64 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 5,25 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der höchste mittlere Wert mit 6,64 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe R_{max} für die Titansuprastrukturen lag bei 5,94 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Rautiefen R_z im Bereich von 3,72-6,03 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,72 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 6,03 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der Rautiefe R_z für die Titansuprastrukturen lag bei 5,20 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Rautiefen R_z im Bereich von 4,86- 5,46 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 4,86 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der höchste mittlere Wert mit 5,46 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der Mittelwert der Rautiefe R_z für die Titansuprastrukturen lag bei 5,18 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefen R_p im Bereich von 1,71- 2,65 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,71 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 2,65 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_p für die Titansuprastrukturen lag bei 2,30 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefen R_p im Bereich von 2,09- 2,55 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,09 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 2,55 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_p für die Titansuprastrukturen lag bei 2,24 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefe R_v im Bereich von 2,01- 3,42 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,01 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 3,42 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_v für die Titansuprastrukturen lag bei 2,90 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefe R_v im Bereich von 2,70- 3,37 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,70 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der höchste mittlere Wert mit 3,37 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_v für die Titansuprastrukturen lag bei 2,94 μm .

In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte aller gemessenen Rauheitsparameter der Titanproben der EDM 2000 und 2005 vor Funkenerosion gegenübergestellt.

	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
EDM 2000	0,99	5,67	5,20	2,30	2,90
EDM 2005	0,99	5,94	5,19	2,24	2,94

Tabelle 4-2: Mittelwerte Titan vor Funkenerosion

4.1.2 Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Titansuprastrukturen nach Funkenerosion

Probe	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messungen in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1	0,77	4,74	4,67	2,14	2,53
2	0,71	5,52	4,92	2,36	2,75
3	0,62	3,82	3,50	1,62	1,88
4	0,78	5,73	4,97	2,47	2,49
5	0,67	3,80	3,62	1,20	1,88
6	0,70	3,98	3,72	1,95	1,77
EDM 2000					
1	0,81	5,53	4,87	2,13	2,74
2	0,81	6,07	5,23	2,25	2,98
3	0,86	7,95	6,85	2,96	3,88
4	0,93	6,46	5,60	2,09	3,51
5	0,70	5,34	4,72	1,78	2,94
6	0,57	4,37	4,12	1,70	2,41
EDM 2005					

Tabelle 4-3: Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Titansuprastrukturen nach Erosion

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Mittenrauwerte Ra im Bereich von 0,62- 0,78 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,62 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der höchste mittlere Wert mit 0,78 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert des Mittenrauwertes Ra für die Titansuprastrukturen lag bei 0,71 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Mittenrauwerte Ra im Bereich von 0,57- 0,93 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,57 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 0,93 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert des Mittenrauwertes Ra für die Titansuprastrukturen lag bei 0,78 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren maximalen Rautiefen Rmax im Bereich von 3,86- 5,73 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,86 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der höchste mittlere Wert mit 5,73 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe Rmax für die Titansuprastrukturen lag bei 4,60 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren maximalen Rautiefen Rmax im Bereich von 4,37- 7,95 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 4,37 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 7,95 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe Rmax für die Titansuprastrukturen lag bei 5,95 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Rautiefen Rz im Bereich von 3,50- 4,97 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,50 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der höchste mittlere Wert mit 4,97 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der Rautiefe Rz für die Titansuprastrukturen lag bei 4,23 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Rautiefen Rz im Bereich von 4,12- 6,85 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 4,12 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 6,85 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Rautiefe Rz für die Titansuprastrukturen lag bei 5,23 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefe Rp im Bereich von 1,62- 2,47 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,62 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der höchste mittlere Wert mit 2,47 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der Glättungstiefe Rp für die Titansuprastrukturen lag bei 1,96 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefe Rp im Bereich von 1,70- 2,96 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,70 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 2,96 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Glättungstiefe Rp für die Titansuprastrukturen lag bei 2,15 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefe Rv im Bereich von 1,77- 2,75 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,77 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 2,75 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert der Glättungstiefe Rv für die Titansuprastrukturen lag bei 2,21 μm .

Für die Titangerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefe Rv im Bereich von 2,41- 3,88 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,41 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 3,88 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Glättungstiefe Rv für die Titansuprastrukturen lag bei 3,08 μm .

In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte aller gemessenen Rauheitsparameter der Titanproben der EDM 2000 und 2005 nach Funkenerosion gegenübergestellt.

	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
EDM 2000	0,71	4,60	4,23	1,96	2,22
EDM 2005	0,78	5,95	5,23	2,15	3,08

Tabelle 4-4: Mittelwerte Titan nach Funkenerosion

4.1.3 Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Goldsuprastrukturen vor Funkenerosion

Probe	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messungen in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1	0,52	3,01	2,71	1,57	1,14
2	0,49	3,05	2,72	1,45	1,27
3	0,59	3,99	3,54	2,11	1,43
4	0,50	2,83	2,70	1,40	1,29
5	0,52	3,02	2,83	1,49	1,38
6	0,44	3,77	2,77	1,44	1,32
EDM 2000					
1	0,66	3,20	3,26	1,69	1,56
2	0,51	3,39	2,93	1,51	1,42
3	0,60	3,34	3,26	1,75	1,51
4	0,59	3,30	3,22	1,81	1,40
5	0,55	4,56	3,04	1,64	1,40
6	0,71	3,26	4,21	2,06	2,15
EDM 2005					

Tabelle 4-5: Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Goldsuprastrukturen vor Erosion

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Mittenrauwerte Ra im Bereich von 0,44- 0,59 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,44 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 0,59 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert des Mittenrauwertes Ra für die Goldsuprastrukturen lag bei 0,51 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Mittenrauwerte R_a im Bereich von 0,51- 0,71 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,51 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der höchste mittlere Wert mit 0,71 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der Mittelwert des Mittenrauwertes R_a für die Goldsuprastrukturen lag bei 0,61 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren maximalen Rautiefen R_{max} im Bereich von 2,83- 3,99 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,83 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der höchste mittlere Wert mit 3,99 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe R_{max} für die Goldsuprastrukturen lag bei 3,18 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren maximalen Rautiefen R_{max} im Bereich von 3,20- 4,56 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,20 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 4,56 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe R_{max} für die Goldsuprastrukturen lag bei 3,60 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Rautiefen R_z im Bereich von 2,70- 3,54 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,70 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der höchste mittlere Wert mit 3,54 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Rautiefe R_z für die Goldsuprastrukturen lag bei 2,87 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Rautiefen R_z im Bereich von 2,93- 4,21 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,93 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der höchste mittlere Wert mit 4,21 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der Mittelwert der Rautiefe R_z für die Goldsuprastrukturen lag bei 3,32 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefen R_p im Bereich von 1,40 - 2,11 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,40 μm befand sich

an Suprastruktur 4. Der höchste mittlere Wert mit 2,11 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_p für die Goldsuprastrukturen lag bei 1,58 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefen R_p im Bereich von 1,51- 2,06 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,51 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der höchste mittlere Wert mit 2,06 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_p für die Goldsuprastrukturen lag bei 1,74 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefe R_v im Bereich von 1,14- 1,43 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,14 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 1,43 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_v für die Goldsuprastrukturen lag bei 1,30 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefen R_v im Bereich von 1,40- 2,15 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,40 μm befand sich an Suprastruktur 4 und 5. Der höchste mittlere Wert mit 2,15 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_v für die Goldsuprastrukturen lag bei 1,57 μm .

In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte aller gemessenen Rauheitsparameter der Goldproben der EDM 2000 und 2005 vor Funkenerosion gegenübergestellt.

	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
EDM 2000	0,51	3,18	2,88	1,58	1,30
EDM 2005	0,61	3,59	3,32	1,74	1,57

Tabelle 4-6: Mittelwerte Gold vor Funkenerosion

4.1.4 Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Goldsuprastrukturen nach Funkenerosion

Probe	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messungen in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1	0,78	4,99	4,73	2,28	2,42
2	0,85	5,83	5,37	2,81	2,55
3	0,77	5,01	5,01	2,71	2,05
4	0,82	5,87	5,45	3,43	2,02
5	0,82	6,10	5,51	3,11	2,40
6	0,84	5,98	5,11	2,79	2,32
EDM 2000					
1	0,57	3,81	3,75	1,70	2,05
2	0,56	4,29	3,78	1,75	2,03
3	0,72	5,17	4,75	1,90	2,86
4	0,48	3,44	3,32	1,73	1,59
5	0,47	3,85	3,30	1,80	1,51
6	0,47	3,51	3,07	1,47	1,60
EDM 2005					

Tabelle 4-7: Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Goldsuprastrukturen nach Erosion

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Mittenrauwerte Ra im Bereich von 0,77- 0,85 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,77 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der höchste mittlere Wert mit 0,85 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert des Mittenrauwertes Ra für die Goldsuprastrukturen lag bei 0,81 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Mittenrauwerte R_a im Bereich von 0,47- 0,72 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,47 μm befand sich an Suprastruktur 5 und 6. Der höchste mittlere Wert mit 0,72 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert des Mittenrauwertes R_a für die Goldsuprastrukturen lag bei 0,54 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren maximalen Rautiefen R_{max} im Bereich von 4,99- 6,10 nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 4,99 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der höchste mittlere Wert mit 6,10 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe R_{max} für die Goldsuprastrukturen lag bei 5,53 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren maximalen Rautiefen R_{max} im Bereich von 3,44- 5,17 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,44 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der höchste mittlere Wert mit 5,17 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe R_{max} für die Goldsuprastrukturen lag bei 4,01 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Rautiefen R_z im Bereich von 4,73- 5,51 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 4,73 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 5,51 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der Mittelwert der Rautiefe R_z für die Goldsuprastrukturen lag bei 5,20 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Rautiefen R_z im Bereich von 3,07- 4,75 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,07 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 4,75 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Rautiefe R_z für die Goldsuprastrukturen lag bei 3,66 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefen R_p im Bereich von 2,28- 3,43 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,28 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 3,43 μm befand sich an

Suprastruktur 4. Der Mittelwert der Glättungstiefe Rp für die Goldsuprastrukturen lag bei 2,86 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefen Rp im Bereich von 1,47- 1,90 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,47 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 1,90 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Glättungstiefe Rp für die Goldsuprastrukturen lag bei 1,72 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefen Rv im Bereich von 2,02- 2,55 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,02 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der höchste mittlere Wert mit 2,55 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert der Glättungstiefe Rv für die Goldsuprastrukturen lag bei 2,29 μm .

Für die Goldgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefen Rv im Bereich von 1,51- 2,86 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,51 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der höchste mittlere Wert mit 2,86 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Glättungstiefe Rv für die Goldsuprastrukturen lag bei 1,94 μm .

In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte aller gemessenen Rauheitsparameter der Goldproben der EDM 2000 und 2005 nach Funkenerosion gegenübergestellt.

	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
EDM 2000	0,81	5,63	5,20	2,86	2,29
EDM 2005	0,54	4,01	3,66	1,72	1,94

Tabelle 4-8: Mittelwerte Gold nach Funkenerosion

4.1.5 Ergebnisse der mittleren Rauigkeitswerte der Kobalt-Chromsuprastrukturen vor Funkenerosion

Probe	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messungen in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1	0,58	3,26	3,04	1,34	1,70
2	1,01	5,52	5,07	1,89	3,18
3	0,54	3,27	3,21	1,32	1,88
4	1,10	6,84	6,36	3,31	3,05
5	0,68	4,25	3,93	1,85	2,08
6	0,82	5,73	5,01	2,01	2,99
EDM 2000					
1	0,80	5,10	4,36	1,98	2,36
2	0,64	5,68	4,47	2,12	2,36
3	0,60	3,67	3,48	1,63	1,85
4	0,67	4,06	3,56	1,56	2,01
5	0,66	4,23	3,67	1,87	1,81
6	0,53	3,09	2,90	1,27	1,63
EDM 2005					

Tabelle 4-9: Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Kobalt-Chromsuprastrukturen vor Erosion

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Mittenrauwerte Ra im Bereich von 0,54- 1,10 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,54 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der höchste mittlere Wert mit 1,10 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert des Mittenrauwertes Ra für die Kobalt-Chromsuprastrukturen lag bei 0,79 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Mittenrauwerte Ra im Bereich von 0,53- 0,80 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,53 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 0,80 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert des Mittenrauwertes Ra für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 0,65 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren maximalen Rautiefen Rmax im Bereich von 3,26- 6,84 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,26 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 6,84 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe Rmax für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 4,81 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren maximalen Rautiefen Rmax im Bereich von 3,09- 5,68 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,09 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 5,68 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe Rmax für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 4,30 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Rautiefen Rz im Bereich von 3,04- 6,36 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,04 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 6,36 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der Rautiefe Rz für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 4,43 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Rautiefen Rz im Bereich von 2,90- 4,47 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,90 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 4,47 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert der Rautiefe Rz für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 3,74 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefen Rp im Bereich von 1,32- 3,31 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,32 μm

befand sich an Suprastruktur 3. Der höchste mittlere Wert mit 3,31 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_p für die Kobalt- Chrom-suprastrukturen lag bei 1,95 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefen R_p im Bereich von 1,27- 2,12 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,27 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der höchste mittlere Wert mit 2,12 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_p für die Kobalt- Chrom-suprastrukturen lag bei 1,74 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefen R_v im Bereich von 1,70-3,18 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,70 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 3,18 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_v für die Kobalt- Chrom-suprastrukturen lag bei 2,90 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefen R_v im Bereich von 1,63- 2,36 μm vor Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,63 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 2,36 μm befand sich an Suprastruktur 1 und 2. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_v für die Kobalt- Chrom-suprastrukturen lag bei 2,94 μm .

In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte aller gemessenen Rauheitsparameter der Kobalt-Chromproben der EDM 2000 und 2005 vor Funkenerosion gegenübergestellt.

	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
EDM 2000	0,79	4,81	4,43	1,95	2,90
EDM 2005	0,65	4,30	3,74	1,47	2,94

Tabelle 4-10: Mittelwerte CoCr vor Funkenerosion

4.1.6 Ergebnis der mittleren Rauigkeitswerte der Kobalt-Chromsuprastrukturen nach Funkenerosion

Probe	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messungen in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1	0,53	3,89	3,56	1,60	2,11
2	0,89	5,71	5,54	2,38	3,16
3	0,91	5,53	5,12	2,59	2,53
4	0,87	5,89	5,18	2,52	2,65
5	0,85	5,21	4,75	2,10	2,66
6	0,87	5,34	4,96	2,55	2,41
EDM 2000					
1	0,86	5,35	5,35	2,45	2,17
2	0,76	5,15	4,71	2,07	2,67
3	0,90	5,50	4,97	2,12	2,81
4	0,77	4,82	4,13	1,77	2,36
5	0,70	5,01	4,45	1,83	2,62
6	0,84	4,57	4,21	1,97	2,24
EDM 2005					

Tabelle 4-11: Mittelwerte der verschiedenen Rauigkeitsparameter aller untersuchten Kobalt-Chromsuprastrukturen nach Erosion

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Mittenrauwerte Ra im Bereich von 0,53- 0,91 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,53 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 0,91 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert des Mittenrauwertes Ra für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 0,82 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Mittenrauwerte Ra im Bereich von 0,70- 0,90 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 0,70 μm befand sich an Suprastruktur 5. Der höchste mittlere Wert mit 0,90 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert des Mittenrauwertes Ra für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 0,81 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren maximalen Rautiefen Rmax im Bereich von 3,89- 5,89 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,89 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 5,89 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe Rmax für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 5,26 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren maximalen Rautiefen Rmax im Bereich von 4,57- 5,50 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 4,57 μm befand sich an Suprastruktur 6. Der höchste mittlere Wert mit 5,50 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe Rmax für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 5,06 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Rautiefen Rz im Bereich von 3,56- 5,54 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 3,56 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 5,54 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert der Rautiefe Rz für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 4,85 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Rautiefen Rz im Bereich von 4,13- 5,35 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 4,13 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der höchste mittlere Wert mit 5,35 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der Mittelwert der Rautiefe Rz für die Kobalt- Chromsuprastrukturen lag bei 4,63 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefen Rp im Bereich von 1,60- 2,59 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,60 μm

befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 2,59 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_p für die Kobalt- Chrom-suprastrukturen lag bei 2,29 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefen R_p im Bereich von 1,77- 2,45 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 1,77 μm befand sich an Suprastruktur 4. Der höchste mittlere Wert mit 2,45 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_p für die Kobalt- Chrom-suprastrukturen lag bei 2,03 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2000 lagen die mittleren Glättungstiefe R_v im Bereich von 2,11- 3,16 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,11 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 3,16 μm befand sich an Suprastruktur 2. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_v für die Kobalt- Chrom-suprastrukturen lag bei 2,58 μm .

Für die Kobalt- Chromgerüste der EDM 2005 lagen die mittleren Glättungstiefen R_v im Bereich von 2,17- 2,81 μm nach Erosion. Der niedrigste mittlere Wert mit 2,17 μm befand sich an Suprastruktur 1. Der höchste mittlere Wert mit 2,81 μm befand sich an Suprastruktur 3. Der Mittelwert der Glättungstiefe R_v für die Kobalt- Chrom-suprastrukturen lag bei 2,47 μm .

In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte aller gemessenen Rauheitsparameter der Kobalt-Chromproben der EDM 2000 und 2005 vor Funkenerosion gegenübergestellt.

	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
EDM 2000	0,82	5,26	4,85	2,29	2,58
EDM 2005	0,81	5,06	4,63	2,03	2,47

Tabelle 4-12: Mittelwerte CrCo nach Funkenerosion

4.2 Grafische Darstellung der mittleren Rauigkeitswerte der Titan-, Gold- und Kobalt- Chrom- Suprastrukturen unbearbeitet und nach Funkenerosion

4.2.1 Grafische Darstellung des Mittenrauwertes Ra vor und nach Funkenerosion

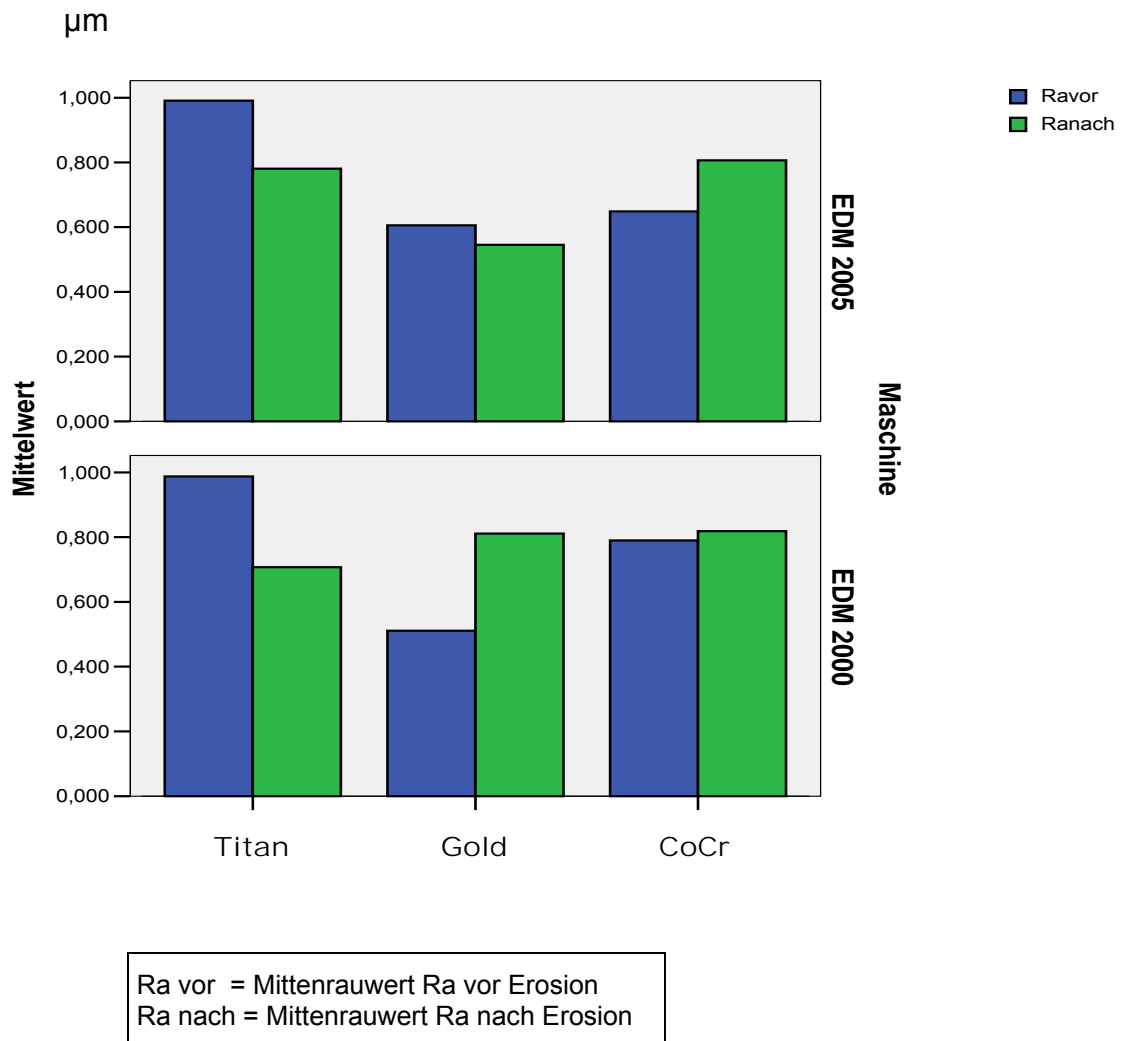


Abbildung 4-1: Grafik Mittelwerte des Mittenrauwertes Ra

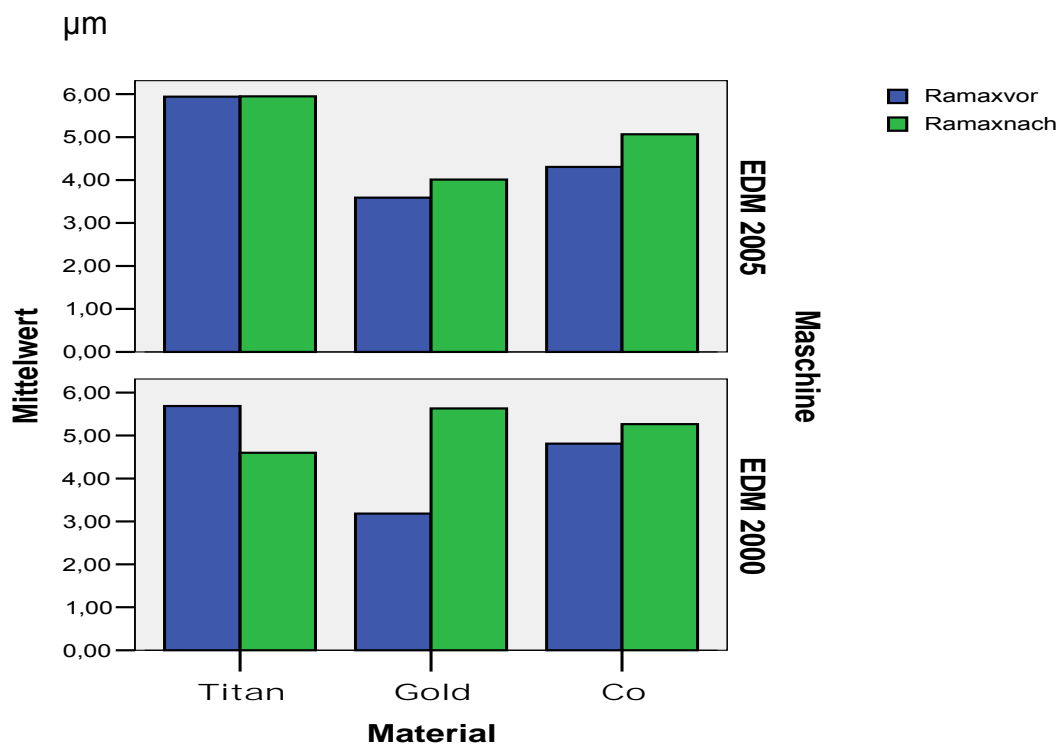
Die Grafik 4-1 veranschaulicht die Mittelwerte des Mittenrauwertes Ra bei allen Titan-, Gold- und Kobalt-Chromproben.

Die y-Achse stellt die gewonnenen Werte des Mittenrauwertes in µm dar, die x-Achse zeigt das Material. Die obere Teilabbildung zeigt den Wert der Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 vor und nach Erosion. Die untere Teilabbildung zeigt diese Werte der Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000.

Die blaue Säule repräsentiert jeweils die unbearbeiteten Proben, die grüne Säule repräsentiert die Proben nach Funkenerosion.

Der Mittelwert des Mittenrauwertes der Titanproben lag vor Erosion mit der EDM 2005 bei 0,99 μm und nach Bearbeitung bei 0,71 μm . Bei den Proben der EDM 2000 verringerte sich der Wert von 0,99 μm auf 0,71 μm . Bei den Goldproben verringerte sich bei der Probengruppe der EDM 2005 Wert von 0,60 μm vor Bearbeitung auf 0,54 μm nach Erosion, während er sich bei den Proben der EDM 2000 von 0,51 μm auf 0,81 μm vergrößerte. Bei den Kobalt-Chromproben der EDM 2005 vor Erosion betrug der Mittelwert 0,64 μm und nach Bearbeitung 0,81 μm . Bei den Proben der EDM 2000 veränderte sich der Mittenrauwert von 0,79 μm vor auf 0,82 μm nach Bearbeitung.

4.2.2 Grafische Darstellung der maximalen Rautiefe R_{max} vor und nach Funkenerosion



Ramaxnach = maximal Rautiefe R_{max} vor Erosion
 Ramaxvor = maximale Rautiefe R_{max} nach Erosion

Abbildung 4-2: Grafik Mittelwerte der maximalen Rautiefe R_{max}

Die Grafik 4-2 veranschaulicht die Mittelwerte der maximalen Rautiefe R_{max} bei allen Titan-, Gold- und Kobalt –Chromproben.

Die y-Achse stellt die gewonnenen Werte der maximalen Rautiefe in μm dar, die x-Achse zeigt das Material. Die obere Teilabbildung zeigt den Wert der Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 vor und nach Erosion. Die untere Teilabbildung zeigt diese Werte der Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000.

Die blaue Säule repräsentiert jeweils die unbearbeiteten Proben, die grüne Säule repräsentiert die Proben nach Funkenerosion.

Der Mittelwert der maximalen Rautiefe der Titanproben lag vor Erosion mit der EDM 2005 bei $5,94 \mu\text{m}$ und nach Bearbeitung bei $5,95 \mu\text{m}$. Bei den Proben der EDM 2000 verringerte sich der Wert von $5,69$ auf $4,60 \mu\text{m}$. Bei den Goldproben vergrößerte sich bei der Probengruppe der EDM 2005 Wert von $3,59 \mu\text{m}$ vor Bearbeitung auf $4,01 \mu\text{m}$ nach Erosion, während er sich bei den Proben der EDM 2000 von $3,18 \mu\text{m}$ auf $5,63 \mu\text{m}$ vergrößerte. Bei den Kobalt-Chromproben der EDM 2005 vor Erosion betrug der Mittelwert $4,30 \mu\text{m}$ und nach Bearbeitung $5,07 \mu\text{m}$. Bei den Proben der EDM 2000 veränderte sich die maximale Rautiefe von $4,81 \mu\text{m}$ vor auf $5,26 \mu\text{m}$ nach Bearbeitung.

4.2.3 Grafische Darstellung der Rautiefe Rz vor und nach Funkenerosion

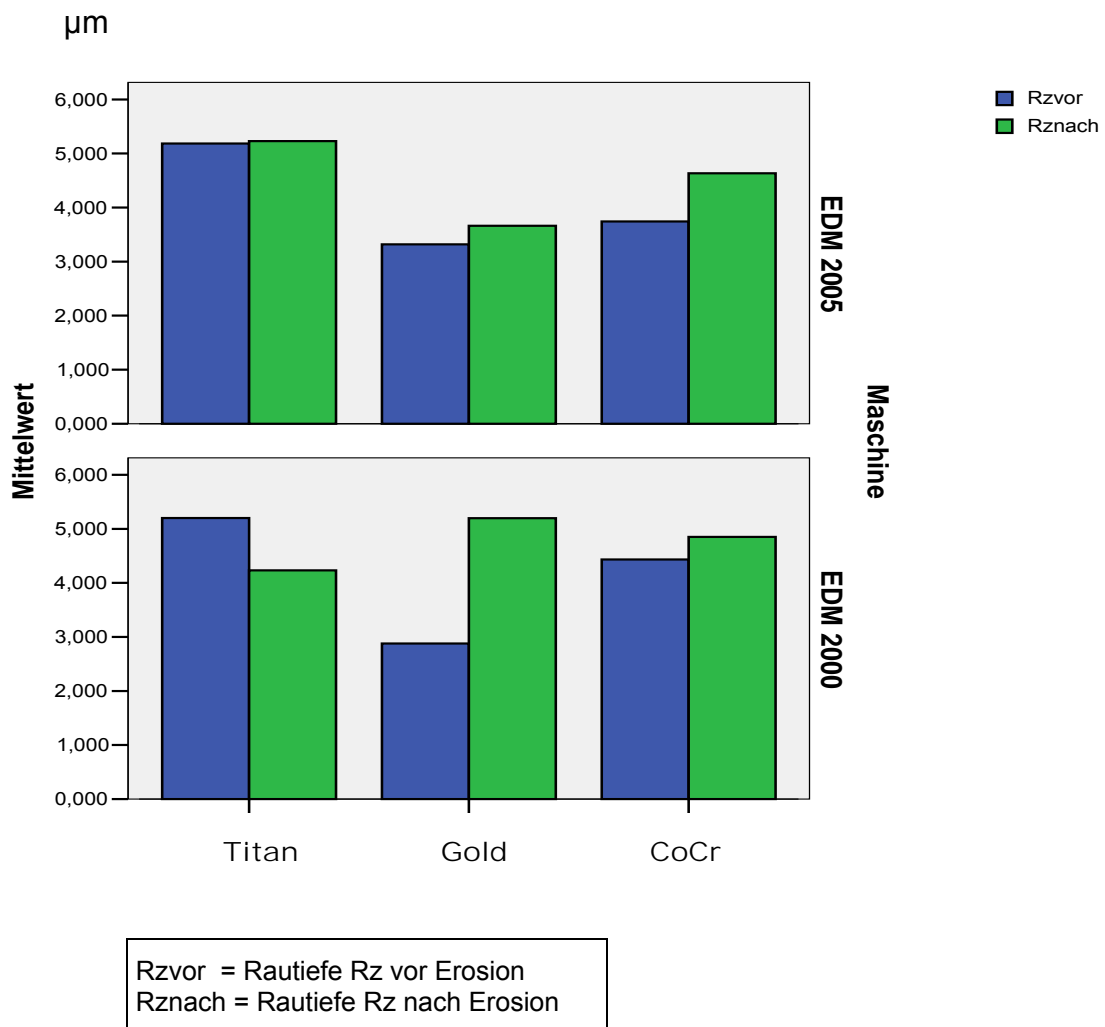


Abbildung 4-3: Grafik Mittelwerte der Rautiefe Rz

Die Grafik 4-3 veranschaulicht die Mittelwerte der Rautiefe Rz bei allen Titan-, Gold- und Kobalt –Chromproben.

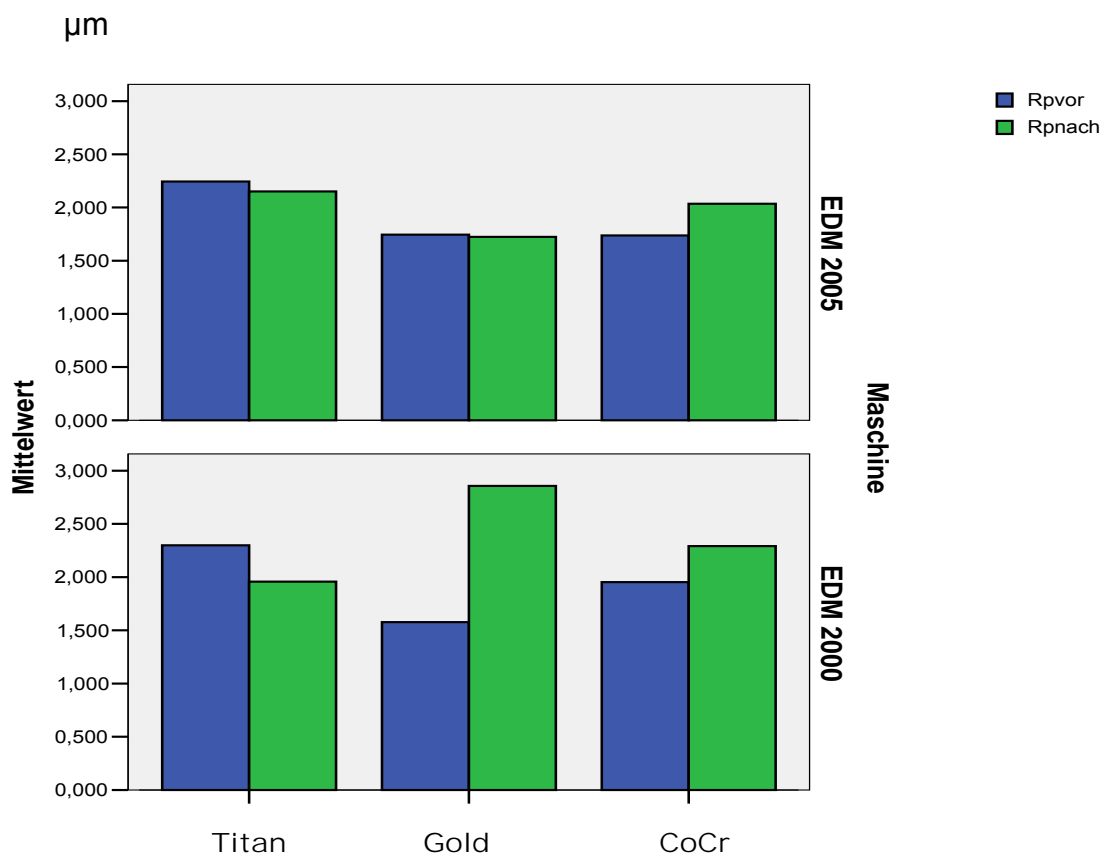
Die y-Achse stellt die gewonnenen Werte der Rautiefe in μm dar, die x-Achse zeigt das Material. Die obere Teilabbildung zeigt den Wert der Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 vor und nach Erosion. Die untere Teilabbildung zeigt diese Werte der Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000.

Die blaue Säule repräsentiert jeweils die unbearbeiteten Proben, die grüne Säule repräsentiert die Proben nach Funkenerosion.

Der Mittelwert der Rautiefe der Titanproben lag vor Erosion mit der EDM 2005 bei 5,18 μm und nach Bearbeitung bei 5,23 μm . Bei den Proben der EDM 2000 verkleinerte sich der Wert von 5,20 μm auf 4,23 μm . Bei den Goldproben vergrößerte sich

bei der Probengruppe der EDM 2005 Wert von 3,32 μm vor Bearbeitung auf 3,66 μm nach Erosion, während er sich bei den Proben der EDM 2000 von 2,88 μm auf 5,20 μm vergrößerte. Bei den Kobalt-Chromproben der EDM 2005 vor Erosion betrug der Mittelwert 3,74 μm und nach Bearbeitung 4,63 μm . Bei den Proben der EDM 2000 veränderte sich die Rautiefe von 4,43 μm vor auf 4,85 μm nach Bearbeitung.

4.2.4 Grafische Darstellung der Rautiefe R_p vor und nach Funkenerosion



Rpvor = Glättungstiefe R_p vor Erosion
Rpnach = Glättungstiefe R_p nach Erosion

Abbildung 4-4: Grafik Mittelwerte der Glättungstiefe R_p

Die Grafik 4-4 veranschaulicht die Mittelwerte der Glättungstiefe R_p bei allen Titan-, Gold- und Kobalt –Chromproben.

Die y-Achse stellt die gewonnenen Werte der Glättungstiefe in μm dar, die x-Achse zeigt das Material. Die obere Teilabbildung zeigt den Wert der Proben der Funken-

erosionsmaschine EDM 2005 vor und nach Erosion. Die untere Teilabbildung zeigt diese Werte der Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000.

Die blaue Säule repräsentiert jeweils die unbearbeiteten Proben, die grüne Säule repräsentiert die Proben nach Funkenerosion.

Der Mittelwert der Glättungstiefe der Titanproben lag vor Erosion mit der EDM 2005 bei 2,24 μm und nach Bearbeitung bei 2,15 μm . Bei den Proben der EDM 2000 verkleinerte sich der Wert von 2,30 μm auf 1,96 μm . Bei den Goldproben verkleinerte sich bei der Probengruppe der EDM 2005 Wert von 1,74 μm vor Bearbeitung auf 1,72 μm nach Erosion, während er sich bei den Proben der EDM 2000 von 1,58 μm auf 2,86 μm vergrößerte. Bei den Kobalt-Chromproben der EDM 2005 vor Erosion betrug der Mittelwert 1,74 μm und nach Bearbeitung 2,03 μm . Bei den Proben der EDM 2000 veränderte sich die Glättungstiefe von 1,9 μm vor auf 2,29 μm nach Bearbeitung.

4.2.5 Grafische Darstellung der Glättungstiefe Rv vor und nach Funkenerosion

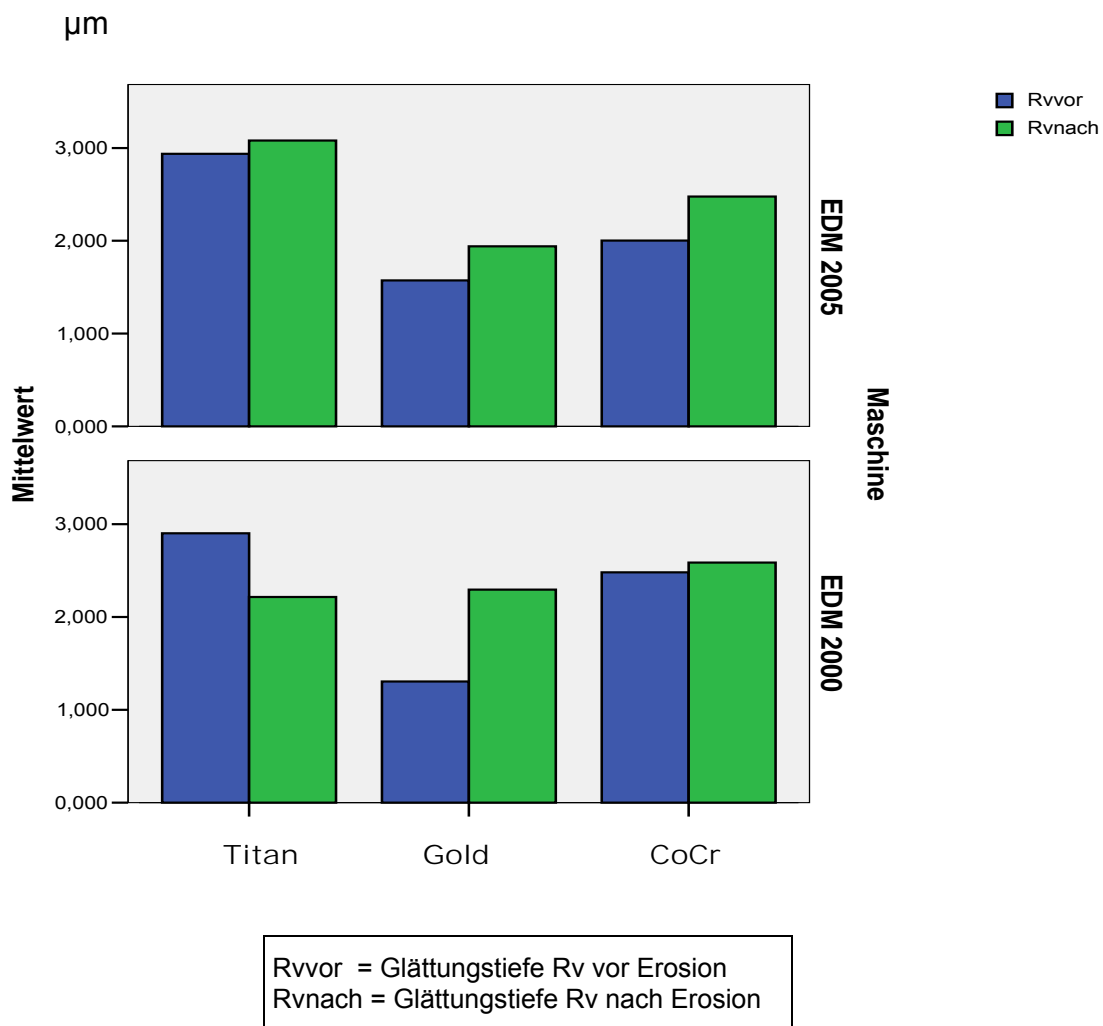


Abbildung 4-5: Grafik Mittelwerte der Glättungstiefe Rv

Die Grafik 4.5 veranschaulicht die Mittelwerte der Glättungstiefe Rv bei allen Titan-, Gold- und Kobalt –Chromproben.

Die y-Achse stellt die gewonnenen Werte der Glättungstiefe in µm dar, die x-Achse zeigt das Material. Die obere Teilabbildung zeigt den Wert der Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 vor und nach Erosion. Die untere Teilabbildung zeigt diese Werte der Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000.

Die blaue Säule repräsentiert jeweils die unbearbeiteten Proben, die grüne Säule repräsentiert die Proben nach Funkenerosion.

Der Mittelwert der Glättungstiefe der Titanproben lag vor Erosion mit der EDM 2005 bei 2,94 µm und nach Bearbeitung bei 3,08 µm. Bei den Proben der EDM 2000

verkleinerte sich der Wert von 2,90 μm auf 2,21 μm . Bei den Goldproben vergrößerte sich bei der Probengruppe der EDM 2005 Wert von 1,57 μm vor Bearbeitung auf 1,94 μm nach Erosion, während er sich bei den Proben der EDM 2000 von 1,30 μm auf 2,29 μm vergrößerte. Bei den Kobalt-Chromproben der EDM 2005 vor Erosion betrug der Mittelwert 2,00 μm und nach Bearbeitung 2,47 μm . Bei den Proben der EDM 2000 veränderte sich die Glättungstiefe von 2,48 μm vor auf 2,58 μm nach Bearbeitung.

4.3 Standardabweichung der Rauigkeitsmessungen aller Proben vor Bearbeitung und nach Funkenerosion

4.3.1 Standardabweichung (SD) aller Titanproben vor und nach Bearbeitung

Standardabweichung (SD) in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
SD EDM 2000 vor Erosion	0,11	1,18	0,83	0,37	0,48
SD EDM 2005 nach Erosion	0,57	0,47	0,25	0,19	0,29
SD EDM 2000 vor Erosion	0,06	0,87	0,69	0,48	0,42
SD EDM 2005 nach Erosion	0,13	1,21	0,94	0,45	0,53

Tabelle 4-13: Standardabweichung (SD) aller Titanproben vor und nach Bearbeitung

Die Tabelle 4-13 zeigt die Standardabweichung bei den Rauigkeitsmessungen aller Titansuprastrukturen vor und nach Bearbeitung. In der Tabelle wird zwischen der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005 unterschieden.

Der höchste Wert der Standardabweichung des Mittenrauwertes Ra betrug 0,57 μm vor Bearbeitung bei der Gruppe der EDM 2005. Der kleinste Wert betrug 0,06 μm nach Bearbeitung mit der EDM 2000.

Der höchste Wert für die maximale Rautiefe R_{max} betrug $1,21 \mu\text{m}$ und war an den Proben, die mit der EDM 2005 erodiert worden sind, zu finden. Der kleinste Wert betrug $0,47 \mu\text{m}$ vor Bearbeitung mit der EDM 2005.

Für die Rautiefe R_z war der höchste Wert $0,94 \mu\text{m}$ und war an den Proben, die mit der EDM 2005 erodiert worden sind, zu finden. Der kleinste Wert betrug $0,25 \mu\text{m}$ bei den Proben der EDM 2005 vor Erosion.

Der höchste Wert der Standardabweichung für die Glättungstiefe R_p betrug $0,48 \mu\text{m}$ nach Erosion mit der EDM 2000. Der kleinste Wert betrug $0,19 \mu\text{m}$ bei den Proben der EDM 2005 vor Erosion.

Für die Glättungstiefe R_v betrug der höchste Wert der Standardabweichung $0,53$ bei den Proben der EDM 2005 nach Erosion. Die geringste Standardabweichung hatten mit $0,29 \mu\text{m}$ die Proben der EDM 2005 vor Erosion.

4.3.2 Standardabweichung (SD) aller Goldproben vor und nach Bearbeitung

Standardabweichung (SD) in μm	R_a	R_{max}	R_z	R_p	R_v
SD EDM 2000 vor Erosion	0,46	0,41	0,33	0,27	0,10
SD EDM 2005 nach Erosion	0,71	0,51	0,45	0,18	0,29
SD EDM 2000 vor Erosion	0,03	0,50	0,30	0,39	0,21
SD EDM 2005 nach Erosion	0,09	0,64	0,60	0,14	0,51

Tabelle 4-14: Standardabweichung (SD) aller Goldproben vor und nach Bearbeitung

Die Tabelle 4-14 zeigt die Standardabweichung bei den Rauigkeitsmessungen aller Goldsuprastrukturen vor und nach Bearbeitung. In der Tabelle wird zwischen der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005 unterschieden.

Der höchste Wert der Standardabweichung des Mittenrauwertes Ra betrug $0,71\mu\text{m}$ vor Bearbeitung bei der Gruppe der EDM 2005. Der kleinste Wert betrug $0,03\mu\text{m}$ nach Bearbeitung mit der EDM 2000.

Der höchste Wert für die maximale Rautiefe Rmax betrug $0,64\mu\text{m}$ und war an den Proben die mit der EDM 2005 erodiert worden sind zu finden. Der kleinste Wert betrug $0,41\mu\text{m}$ vor Bearbeitung mit der EDM 2000.

Für die Rautiefe Rz war der höchste Wert $0,60\mu\text{m}$ und war an den Proben die mit der EDM 2005 erodiert worden sind zu finden. Der kleinste Wert betrug $0,30\mu\text{m}$ bei den Proben der EDM 2000 nach Erosion.

Der höchste Wert der Standardabweichung für die Glättungstiefe Rp betrug $0,39\mu\text{m}$ nach Erosion mit der EDM 2005. Der kleinste Wert betrug $0,14\mu\text{m}$ bei den Proben der EDM 2005 nach Erosion.

Für die Glättungstiefe Rv betrug der höchste Wert der Standardabweichung $0,51$ bei den Proben der EDM 2005 nach Erosion. Die geringste Standardabweichung hatten mit $0,10\mu\text{m}$ die Proben der EDM 2000 vor Erosion.

4.3.3 Standardabweichung (SD) aller Kobalt-Chromproben vor und nach Bearbeitung

Standardabweichung (SD) in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
SD EDM 2000 vor Erosion	0,23	1,45	1,27	0,73	0,30
SD EDM 2005 nach Erosion	0,88	0,94	0,59	0,31	0,66
SD EDM 2000 vor Erosion	0,82	0,74	0,67	0,38	0,35
SD EDM 2005 nach Erosion	0,81	0,34	0,47	0,24	0,26

Tabelle 4-15: Standardabweichung (SD) aller Kobalt-Chromproben vor und nach Bearbeitung

Die Tabelle 4-15 zeigt die Standardabweichung bei den Rauigkeitsmessungen aller Kobalt-Chromsuprastrukturen vor und nach Bearbeitung. In der Tabelle wird zwischen der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005 unterschieden.

Der höchste Wert der Standardabweichung des Mittenrauwertes R_a betrug $0,88 \mu\text{m}$ vor Bearbeitung bei der Gruppe der EDM 2005. Der kleinste Wert betrug $0,23 \mu\text{m}$ vor Bearbeitung mit der EDM 2000.

Der höchste Wert für die maximale Rautiefe R_{max} betrug $1,45 \mu\text{m}$ und war an den Proben der EDM 2000 vor Erosion zu finden. Der kleinste Wert betrug $0,34 \mu\text{m}$ nach Bearbeitung mit der EDM 2005.

Für die Rautiefe R_z war der höchste Wert $1,27 \mu\text{m}$ und war an den Proben die mit der EDM 2000 vor Erosion zu finden. Der kleinste Wert betrug $0,47 \mu\text{m}$ bei den Proben der EDM 2005 nach Erosion.

Der höchste Wert der Standardabweichung für die Glättungstiefe R_p betrug $0,73 \mu\text{m}$ vor Erosion mit der EDM 2000. Der kleinste Wert betrug $0,24 \mu\text{m}$ bei den Proben der EDM 2005 nach Erosion.

Für die Glättungstiefe R_v betrug der höchste Wert der Standardabweichung $0,66 \mu\text{m}$ bei den Proben der EDM 2005 vor Erosion. Die geringste Standardabweichung hatten mit $0,26 \mu\text{m}$ die Proben der EDM 2005 nach Erosion.

4.4 Ausgewählte Fotografien der Rauigkeitsmessungen

Dargestellt sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberfläche der Suprastrukturen. Die Größe der dargestellten Fläche beträgt $600\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$ bei 200facher Vergrößerung.



Abbildung 4-6: Titansuprastruktur 9B vor Bearbeitung

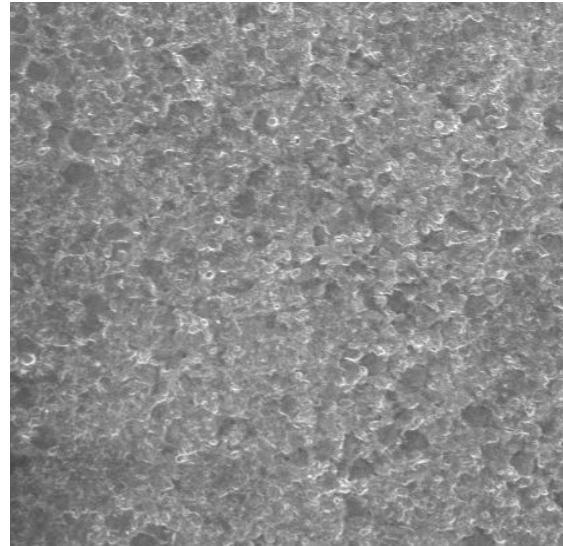


Abbildung 4-7: Titansuprastruktur 9B nach Funkenerosion



Abbildung 4-8: Goldsuprastruktur 1B vor Bearbeitung

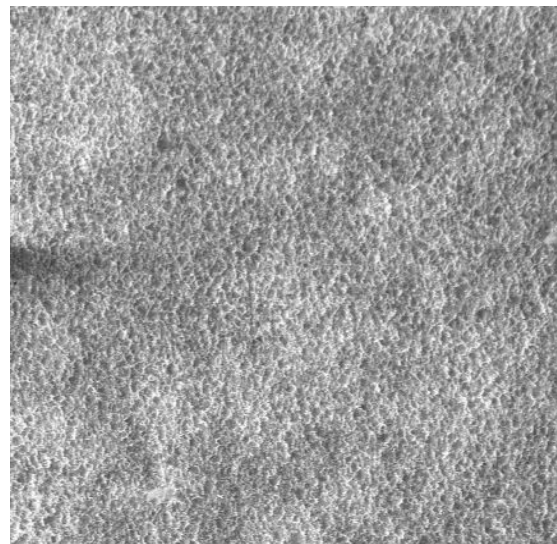
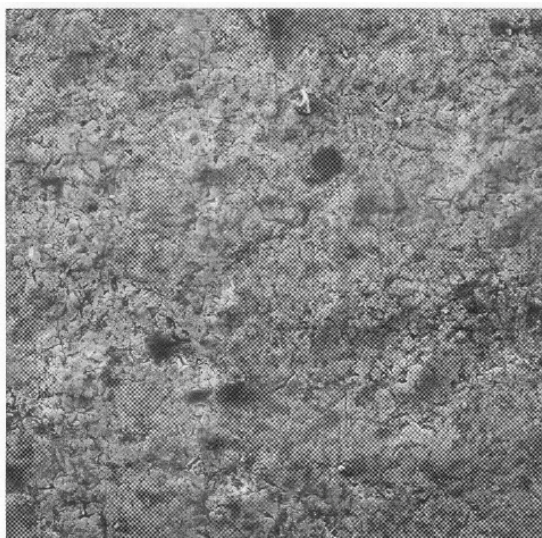
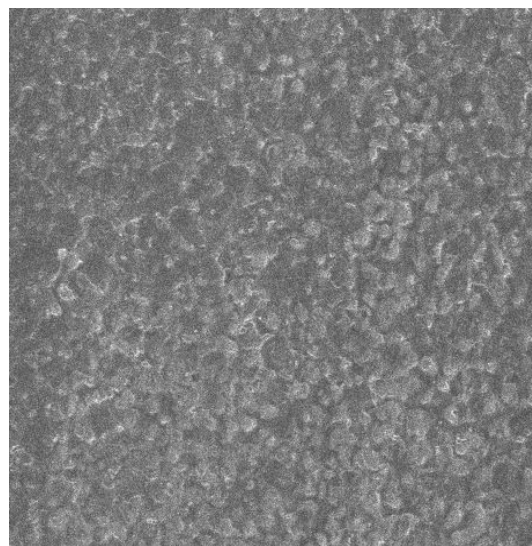


Abbildung 4-9: Goldsuprastruktur 1B nach Funkenerosion



**Abbildung 4-10: Kobalt- Chromsuprastruktur
1B vor Bearbeitung**



**Abbildung 4-11: Kobalt- Chromsuprastruktur
1B nach Funkenerosion**

4.5 Vergleichende Statistik Rauigkeit

4.5.1 Vergleichende Statistik der Proben zwischen EDM 2000 vor und nach Bearbeitung

	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
Proben Titan	+	-	-	-	+
Proben Gold	+	+	+	+	+
Proben Kobalt-Chrom	-	-	-	-	-

- = $p > 0,05$ nicht signifikant

+ = $p < 0,05$ signifikant

++ = $p < 0,01$ hoch signifikant

Tabelle 4-16: Ergebnisse des Wilcoxon-Tests nach F. Wilcoxon der Untersuchung zur Rauigkeit vor und nach Funkenerosion. Vergleich für die Funkenerosionsmaschine EDM 2000

In der Tabelle 4-16 werden die Werte der gemessenen Werte der Rauigkeit vor Bearbeitung statistisch mit den gemessenen Werten nach Bearbeitung miteinander verglichen. Dabei werden die Proben die mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 bearbeitet wurden verglichen im Ausgangsstadium nach dem zahntechnischen Guss und nach Erosion.

Durch das Erodieren mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 kam es bei keiner Materialprobe zu einem hochsignifikanten Unterschied in der Rauheit.

Bei den Proben der Goldsuprastrukturen kam es in allen gemessenen Rauheitsparametern zu einem signifikanten Unterschied. Ebenso bei den Titansuprastrukturen kam es bei den Parametern Ra und Rv zu einem signifikanten Unterschied.

Die übrigen gemessenen Parameter bei den Titansuprastrukturen und alle bei den Kobalt- Chromsuprastrukturen erhobenen Messwerte zeigen keine Signifikanz.

4.5.2 Vergleichende Statistik der Proben zwischen EDM 2005 vor und nach Bearbeitung

	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
Proben Titan	+	-	-	-	-
Proben Gold	-	-	-	-	-
Proben Kobalt-Chrom	+	+	-	-	+

- = $p > 0,05$ nicht signifikant

+ = $p < 0,05$ signifikant

++ = $p < 0,01$ hoch signifikant

Tabelle 4-17: Ergebnisse des Wilcoxon-Tests nach F. Wilcoxon der Untersuchung zur Rauigkeit vor und nach Funkenerosion. Vergleich für die Funkenerosionsmaschine EDM 2005

In der Tabelle 4-17 werden die Werte der gemessenen Werte der Rauigkeit vor Bearbeitung statistisch mit den gemessenen Werten nach Bearbeitung miteinander verglichen. Dabei werden die Proben, die mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 bearbeitet wurden, verglichen im Ausgangsstadium nach dem zahntechnischen Guss und nach Erosion.

Durch das Erodieren mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 kam es bei keiner Materialprobe zu einem hochsignifikanten Unterschied in der Rauheit.

Bei den Proben der Titansuprastrukturen kam es bei dem Rauigkeitswert Ra zu einem signifikanten Unterschied. Bei den Proben der Kobalt- Chrom Suprastrukturen kam es bei den Rauigkeitswerten Ra, Rmax und Rv zu einem signifikanten Unterschied vor und nach Bearbeitung.

Bei den Proben der Goldsuprastrukturen kam es zu keinem signifikanten Unterschied.

4.5.3 Vergleichende Statistik der Proben der EDM 2000 und 2005 nach Bearbeitung

	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
Proben Titan	-	-	-	-	+
Proben Gold	+	-	+	+	-
Proben Kobalt-Chrom	-	-	-	-	-

- = $p > 0,05$ nicht signifikant

+ = $p < 0,05$ signifikant

++ = $p < 0,01$ hoch signifikant

Tabelle 4-18: Ergebnisse des U-Testes nach Mann und Whitney der Untersuchung zur Rauigkeit nach Funkenerosion zwischen Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005

In der Tabelle 4-18 werden die Werte der gemessenen Werte der Rauigkeit nach Bearbeitung statistisch miteinander verglichen. Dabei werden die Proben die mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 bearbeitet wurden verglichen mit den Proben die auf der EDM 2005 erodiert worden sind.

Es lässt sich erkennen dass zwischen den beiden Maschinen kein hochsignifikanter Unterschied in keinem der gemessenen Rauigkeitsparameter bestand.

Ein signifikanter Unterschied zeigte sich in den Rauigkeitsparametern Ra, Rz und Rp der untersuchten Goldsuprastrukturen.

Kein signifikanter Unterschied bestand bei den Materialproben der Titan- und Kobalt-Chromsuprastrukturen in allen untersuchten Rauigkeitsparametern.

4.6 Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse

Die Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse wurde vor Funkenerosion und nach Funkenerosion auf allen 36 Suprastrukturen in Form von mittleren prozentualen Elementarzusammensetzungen der Oberfläche in den Tabellen 4-19 bis 4-30 und Grafiken 4-12 bis 4-17 abgebildet. Es erfolgte dabei eine Aufschlüsselung der Proben in bei dieser Untersuchung verwendeten Erosionsmaschinen EDM 2000 und EDM 2005. Weiterhin wird zwischen den drei verwendeten Materialien unterschieden (Titan, Gold, Kobalt- Chrom)

Die Ergebnisse der Standardabweichung wurden in Tabelle 4-31 bis 4-33, die Ergebnisse der statistischen Analysen wurden in Tabelle 4-34 und 4-35 dargestellt.

Weiterhin veranschaulichen ausgewählte Fotografien der speziell präparierten sechs Titansuprastrukturen der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse nach Erosion die Ergebnisse, die in den Abbildungen 4-18 bis 4-25 dargestellt sind.

Die Ergebnisse aller Messungen sind im tabellarischen Anhang abgebildet.

4.6.1 Ergebnisse der energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse der Titansuprastrukturen für EDM 2000, unbearbeitet vor Funkenerosion

	Element		
Probe	Ti	Al	Si
A	76,44	21,34	2,22
B	81,85	16,19	1,97
C	78,42	19,57	2,02
D	79,68	17,89	2,44
E	80,72	16,95	2,34
F	81,03	16,37	2,61

Tabelle 4-19: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Titansupratrukturen EDM 2000 vor Erosion

In der Tabelle 4-19 wurden anhand von energiedispersiver Elektronenmikrostrahlanalyse folgende Werte für Titansuprastrukturen vor Funkenerosion für die Maschine EDM 2000 aufgelistet:

Die Ausgangswerte vor Bearbeitung lagen für das Element Titan zwischen 76,44 % und 81,85 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe B und den niedrigsten Probe A. Der Ausgangswert für Aluminium lag zwischen 16,19 % und 21,34 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe A und den niedrigsten Probe B. Für das Element Silizium lagen die Ausgangswerte zwischen 1,97 % und 2,61 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe F und den niedrigsten Probe B.

4.6.2 Ergebnisse der energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse der Titansuprastrukturen für EDM 2005, unbearbeitet vor Funkenerosion

	Element		
Probe	Ti	Al	Si
A	86,30	12,03	1,95
B	88,26	10,41	1,33
C	81,98	15,96	2,06
D	85,53	14,24	2,23
E	82,16	15,69,	2,14
F	79,20	18,08	2,73

Tabelle 4-20: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Titansuprastrukturen EDM 2005 vor Erosion

In der Tabelle 4-20 wurden anhand von energiedispersiver Elektronenmikrostrahlanalyse folgende Werte für Titansuprastrukturen vor Funkenerosion für die Maschine EDM 2005 aufgelistet:

Die Ausgangswerte vor Bearbeitung lagen für das Element Titan zwischen 79,20 % und 88,26 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe B und den niedrigsten Probe F. Der Ausgangswert für Aluminium lag zwischen 18,08 % und 12,03 %. Den höchsten

Anteil zeigte Probe F und den niedrigsten Probe A. Für das Element Silizium lagen die Ausgangswerte zwischen 1,33 % und 2,73 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe F und den niedrigsten Probe B.

4.6.3 Ergebnisse der energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse der Titansuprastrukturen für EDM 2000, bearbeitet nach Funkenerosion

	Element	
Probe	Ti	Cu
A	92,62	7,38
B	93,04	6,97
C	93,73	6,28
D	92,48	7,52
E	93,25	6,76
F	93,13	6,81

Tabelle 4-21: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Titansuprastrukturen EDM 2000 nach Erosion

In der Tabelle 4-21 wurden anhand von energiedispersiver Elektronenmikrostrahlanalyse folgende Werte für Titansuprastrukturen nach Funkenerosion für die Maschine EDM 2000 aufgelistet:

Die Werte nach Bearbeitung lagen für das Element Titan zwischen 92,48 % und 93,73 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe C und den niedrigsten Probe D. Die Werte für Kupfer lagen zwischen 6,28 % und 7,38 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe A und den niedrigsten Probe C.

4.6.4 Ergebnisse der energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalyse der Titansuprastrukturen für EDM 2005, bearbeitet nach Funkenerosion

	Element	
Probe	Ti	Cu
A	94,19	5,82
B	95,74	4,27
C	95,20	4,80
D	93,26	6,74
E	94,82	4,80
F	91,61	6,74

Tabelle 4-22: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Titansuprastrukturen EDM 2005 nach Erosion

In der Tabelle 4-22 wurden anhand von energiedispersiver Mikrostrahlanalyse folgende Werte für Titansuprastrukturen nach Funkenerosion für die Maschine EDM 2000 aufgelistet:

Die Werte nach Bearbeitung lagen für das Element Titan zwischen 91,61 % und 95,74 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe B und den niedrigsten Probe F. Die Werte für Kupfer lagen zwischen 4,27 % und 6,74 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe F und den niedrigsten Probe B.

4.6.5 Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Goldsuprastrukturen für EDM 2000, unbearbeitet vor Funkenerosion

	Element						
Probe	Au	Ag	Pt	Cu	In	Al	Si
A	73,96	9,43	6,10	3,65	2,02	1,08	3,54
B	73,45	10,08	5,69	3,46	2,49	1,06	3,79
C	71,42	9,98	6,41	3,77	2,74	1,56	4,13
D	71,96	9,21	6,80	3,42	3,20	1,15	4,29
E	72,98	9,91	6,12	3,53	2,97	1,00	3,51
F	72,94	9,58	5,90	3,77	2,67	1,37	3,79

Tabelle 4-23: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Goldsuprastrukturen EDM 2000 vor Erosion

In der Tabelle 4-23 wurden anhand von energiedispersiver Energiedispersiven-mikrostrahlanalyse folgende Werte für Goldsuprastrukturen vor Funkenerosion für die Maschine EDM 2000 aufgelistet:

Die Werte vor Bearbeitung lagen für das Element Gold zwischen 71,42 % und 73,96 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe A und den niedrigsten Probe C. Die Werte für Silber lagen zwischen 9,21 % und 10,08 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe B und den niedrigsten Probe D. Die Werte für Platin lagen zwischen 5,69 % und 6,80 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe D und den niedrigsten Probe B. Die Werte für Kupfer lagen zwischen 3,42 % und 3,77 %.

Den höchsten Anteil zeigte Probe B und C (identischer Wert) und den niedrigsten Probe D. Die Werte für Indium lagen zwischen 2,02 % und 3,20 %.

Den höchsten Wert zeigte Probe D und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Aluminium lagen zwischen 1,00 % und 1,56 %. den höchsten Wert zeigte Probe

C und den niedrigsten Probe E. Die Werte für Kupfer lagen zwischen 3,51 % und 4,29 %. Den höchsten Wert zeigte Probe D und den niedrigsten Probe E.

4.6.6 Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Goldsuprastrukturen für EDM 2005, unbearbeitet vor Funkenerosion

	Element						
Probe	Au	Ag	Pt	Cu	In	Al	Si
A	73,99	9,35	5,99	3,77	2,36	1,00	3,55
B	72,92	9,62	6,07	3,57	2,76	1,16	3,91
C	74,15	9,27	6,16	3,55	2,34	1,06	3,48
D	74,67	9,39	5,41	3,70	2,21	1,24	3,40
E	73,72	9,13	5,79	3,55	2,41	1,29	4,13
F	72,22	9,98	6,32	3,47	2,84	1,45	3,99

Tabelle 4-24: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Goldsuprastrukturen EDM 2005 vor Erosion

In der Tabelle 4-24 wurden anhand von energiedispersiver Elektronenmikrostrahlanalyse folgende Werte für Goldsuprastrukturen vor Funkenerosion für die Maschine EDM 2005 aufgelistet:

Die Werte vor Bearbeitung lagen für das Element Gold zwischen 72,22 % und 74,67 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe D und den niedrigsten Probe F. Die Werte für Silber lagen zwischen 9,13 % und 9,98 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe F und den niedrigsten Probe E. Die Werte für Platin lagen zwischen 5,41 % und 6,32 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe F und den niedrigsten Probe D. Die Werte für Kupfer lagen zwischen 3,47 % und 3,77 %.

Den höchsten Anteil zeigte Probe A und den niedrigsten Probe F. Die Werte für Indium lagen zwischen 2,21 % und 2,84 %.

Den höchsten Wert zeigte Probe F und den niedrigsten Probe D. Die Werte für Aluminium lagen zwischen 1,00 % und 1,45 %. den höchsten Wert zeigte Probe F und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Silizium lagen zwischen 3,40 % und 4,13 %. Den höchsten Wert zeigte Probe E und den niedrigsten Probe D.

4.6.7 Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Goldsuprastrukturen für EDM 2000, bearbeitet nach Funkenerosion

	Element					
Probe	Au	Ag	Pt	Cu	In	Zn
A	73,51	8,06	8,78	5,82	1,60	2,25
B	72,66	8,01	10,35	5,23	1,55	2,22
C	73,30	8,11	9,53	5,53	1,39	2,17
D	72,94	8,05	9,76	5,52	1,65	2,10
E	72,85	8,21	9,58	5,54	1,64	2,15
F	73,34	8,11	9,48	5,52	1,50	2,08

Tabelle 4-25: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Goldsuprastrukturen EDM 2000 nach Erosion

In der Tabelle 4-25 wurden anhand von energiedispersiver Mikrostrahlanalyse folgende Werte für Goldsuprastrukturen nach Funkenerosion für die Maschine EDM 2000 aufgelistet:

Die Werte vor Bearbeitung lagen für das Element Gold zwischen 72,66 % und 73,51 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe A und den niedrigsten Probe B. Die Werte für Silber lagen zwischen 8,01 % und 8,21 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe E und den niedrigsten Probe B. Die Werte für Platin lagen zwischen 8,78 % und 10,35 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe B und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Kupfer lagen zwischen 5,23 % und 5,82 %.

Den höchsten Anteil zeigte Probe A und den niedrigsten Probe B. Die Werte für Indium lagen zwischen 1,39 % und 1,65 %.

Den höchsten Wert zeigte Probe D und den niedrigsten Probe C. Die Werte für Zink lagen zwischen 2,08 % und 2,25 %. Den höchsten Wert zeigte Probe A und den niedrigsten Probe F.

4.6.8 Ergebnisse der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse der Goldsuprastrukturen für EDM 2005, bearbeitet nach Funkenerosion

	Element					
Probe	Au	Ag	Pt	Cu	In	Zn
A	73,55	7,93	9,31	5,65	1,40	2,13
B	73,40	7,94	9,21	5,65	1,48	2,33
C	72,67	7,93	9,33	6,51	1,37	2,19
D	73,28	7,33	9,90	6,19	1,43	1,89
E	73,49	7,51	10,05	5,68	1,48	1,88
F	73,41	7,60	9,84	5,83	1,37	1,97

Tabelle 4-26: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Goldsuprastrukturen EDM 2005 nach Erosion

In der Tabelle 4-26 wurden anhand von energiedispersiver Mikrostrahlanalyse folgende Werte für Goldsuprastrukturen nach Funkenerosion für die Maschine EDM 2005 aufgelistet:

Die Werte vor Bearbeitung lagen für das Element Gold zwischen 72,67 % und 73,55 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe A und den niedrigsten Probe C. Die Werte für Silber lagen zwischen 7,33 % und 7,94 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe B und den niedrigsten Probe D. Die Werte für Platin lagen zwischen 9,21 % und 10,05 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe E und den niedrigsten Probe B. Die Werte für Kupfer lagen zwischen 5,65 % und 6,51 %.

Den höchsten Anteil zeigte Probe C und den niedrigsten Probe A und B (identisch). Die Werte für Indium lagen zwischen 1,37 % und 1,48 %.

Den höchsten Wert zeigte Probe B und den niedrigsten Probe F. Die Werte für Zink lagen zwischen 1,88 % und 2,33 %. Den höchsten Wert zeigte Probe B und den niedrigsten Probe E.

4.6.9 Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Kobalt- Chromsuprastrukturen für EDM 2000, unbearbeitet vor Funkenerosion

	Element					
Probe	Co	Cr	Mo	Mn	Si	Al
A	51,15	26,77	5,21	1,02	1,85	13,78
B	52,21	26,53	4,88	1,04	1,75	13,59
C	52,50	26,86	4,37	0,94	1,31	14,03
D	52,10	26,52	4,69	0,87	1,67	14,22
E	50,82	26,08	4,84	1,04	2,10	15,13
F	51,61	27,38	4,51	0,96	1,69	13,86

Tabelle 4-27: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Kobalt-Chromsuprastrukturen EDM 2000 vor Erosion

In der Tabelle 4-27 wurden anhand von energiedispersiver Elektronenmikrostrahlanalyse folgende Werte für Kobalt-Chromsuprastrukturen vor Funkenerosion für die Maschine EDM 2000 aufgelistet:

Die Werte vor Bearbeitung lagen für das Element Kobalt zwischen 50,82 % und 52,50 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe C und den niedrigsten Probe E. Die Werte für Chrom lagen zwischen 26,08 % und 27,38 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe F und den niedrigsten Probe E. Die Werte für Molybdän lagen zwischen 4,37 % und 5,21 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe A und den niedrigsten Probe C. Die Werte für Mangan lagen zwischen 0,87 % und 1,04 %.

Den höchsten Anteil zeigte Probe B und den niedrigsten Probe D. Die Werte für Silizium lagen zwischen 1,31 % und 2,10 %.

Den höchsten Wert zeigte Probe E und den niedrigsten Probe C. Die Werte für Aluminium lagen zwischen 13,59 % und 15,13 %. Den höchsten Wert zeigte Probe E und den niedrigsten Probe B.

4.6.10 Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Kobalt- Chromsuprastrukturen für EDM 2005, unbearbeitet vor Funkenerosion

	Element					
Probe	Co	Cr	Mo	Mn	Si	Al
A	51,72	26,69	4,60	0,88	1,43	14,70
B	50,99	26,32	4,28	0,69	1,73	16,01
C	52,08	26,20	4,53	0,98	1,43	14,78
D	51,85	27,58	5,54	1,10	3,29	12,55
E	53,72	26,10	4,84	1,06	1,82	12,49
F	52,02	25,89	5,43	0,96	2,05	12,72

Tabelle 4-28: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Kobalt-Chromsuprastrukturen EDM 2005 vor Erosion

In der Tabelle 4-28 wurden anhand von energiedispersiver Elektronenmikrostrahlanalyse folgende Werte für Kobalt- Chromsuprastrukturen vor Funkenerosion für die Maschine EDM 2000 aufgelistet:

Die Werte vor Bearbeitung lagen für das Element Kobalt zwischen 50,99 % und 53,72 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe E und den niedrigsten Probe B. Die Werte für Chrom lagen zwischen 25,89 % und 27,58 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe D und den niedrigsten Probe F. Die Werte für Molybdän lagen zwischen 4,28 % und 5,54 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe D und den niedrigsten Probe B. Die Werte für Mangan lagen zwischen 0,69 % und 1,10 %.

Den höchsten Anteil zeigte Probe D und den niedrigsten Probe B. Die Werte für Silizium lagen zwischen 1,43 % und 3,29 %.

Den höchsten Wert zeigte Probe D und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Aluminium lagen zwischen 12,49 % und 16,01 %. Den höchsten Wert zeigte Probe B und den niedrigsten Probe E.

4.6.11 Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Kobalt- Chromsuprastrukturen für EDM 2000, bearbeitet nach Funkenerosion

	Element					
Probe	Co	Cr	Mo	Mn	Si	Cu
A	55,73	29,72	4,69	0,60	0,60	8,44
B	57,73	30,55	5,10	0,68	0,61	6,75
C	58,38	30,80	5,12	0,73	0,66	5,14
D	57,11	30,96	5,40	0,70	0,69	7,51
E	57,81	30,37	5,14	0,72	0,66	7,62
F	57,74	30,92	5,10	0,74	0,61	7,20

Tabelle 4-29: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Kobalt-Chromsuprastrukturen EDM 2000 nach Erosion

In der Tabelle 4-29 wurden anhand von energiedispersiver Elektronenmikrostrahlanalyse folgende Werte für Kobalt- Chromsuprastrukturen nach Funkenerosion für die Maschine EDM 2000 aufgelistet:

Die Werte vor Bearbeitung lagen für das Element Kobalt zwischen 55,73 % und 58,38 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe C und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Chrom lagen zwischen 29,72 % und 30,96 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe D und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Molybdän lagen zwischen 4,69 % und 5,40 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe D und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Mangan lagen zwischen 0,60 % und 0,74 %.

Den höchsten Anteil zeigte Probe E und den niedrigsten Probe F. Die Werte für Silizium lagen zwischen 0,60 % und 0,69 %.

Den höchsten Wert zeigte Probe D und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Kupfer lagen zwischen 5,14 % und 8,44 %. Den höchsten Wert zeigte Probe A und den niedrigsten Probe C.

4.6.12 Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Kobalt- Chromsuprastrukturen für EDM 2005, bearbeitet nach Funkenerosion

	Element					
Probe	Co	Cr	Mo	Mn	Si	Cu
A	55,60	29,76	4,85	0,73	0,64	8,49
B	56,56	30,24	5,03	0,82	0,62	5,34
C	57,71	30,55	5,21	0,73	0,67	4,31
D	56,18	30,14	4,75	0,76	0,66	5,15
E	56,47	29,92	4,90	0,69	0,61	5,31
F	56,53	30,05	4,91	0,65	0,68	5,10

Tabelle 4-30: Ergebnisse der mittleren Elementarzusammensetzungen der Kobalt-Chromsuprastrukturen EDM 2005 nach Erosion

In der Tabelle 4-30 wurden anhand von energiedispersiver Elektronenmikrostrahlanalyse folgende Werte für Kobalt- Chromsuprastrukturen nach Funkenerosion für die Maschine EDM 2005 aufgelistet:

Die Werte vor Bearbeitung lagen für das Element Kobalt zwischen 55,60 % und 57,71 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe C und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Chrom lagen zwischen 29,76 % und 30,55 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe C und den niedrigsten Probe A. Die Werte für Molybdän lagen zwischen 4,75 % und 5,21 %. Den höchsten Anteil zeigte Probe C und den niedrigsten Probe D. Die Werte für Mangan lagen zwischen 0,65 % und 0,82 %.

Den höchsten Anteil zeigte Probe B und den niedrigsten Probe F. Die Werte für Silizium lagen zwischen 0,61 % und 0,68 %.

Den höchsten Wert zeigte Probe F und den niedrigsten Probe E. Die Werte für Kupfer lagen zwischen 4,31 % und 8,49 %. Den höchsten Wert zeigte Probe A und den niedrigsten Probe C.

4.7 Grafische Darstellung der Mittelwerte der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse

In den Grafiken 4-12 bis 4-17 ist die mittlere Elementarzusammensetzung an den Oberflächen der unbearbeiteten und bearbeiteten Suprastrukturen dargestellt.

Die Ordinate zeigt Elemente in Massenprozent (%), auf der Abszisse ist die Metallart dargestellt. Es werden die mittleren Elementarzusammensetzungen der untersuchten Prüfkörper für jede verwendete Legierung dargestellt. Es erfolgt eine Aufteilung der Proben die mit der EDM 2000 und 2005 bearbeitet worden sind.

4.7.1 Mittlere Elementarzusammensetzung der Titansuprastrukturen vor Erosion

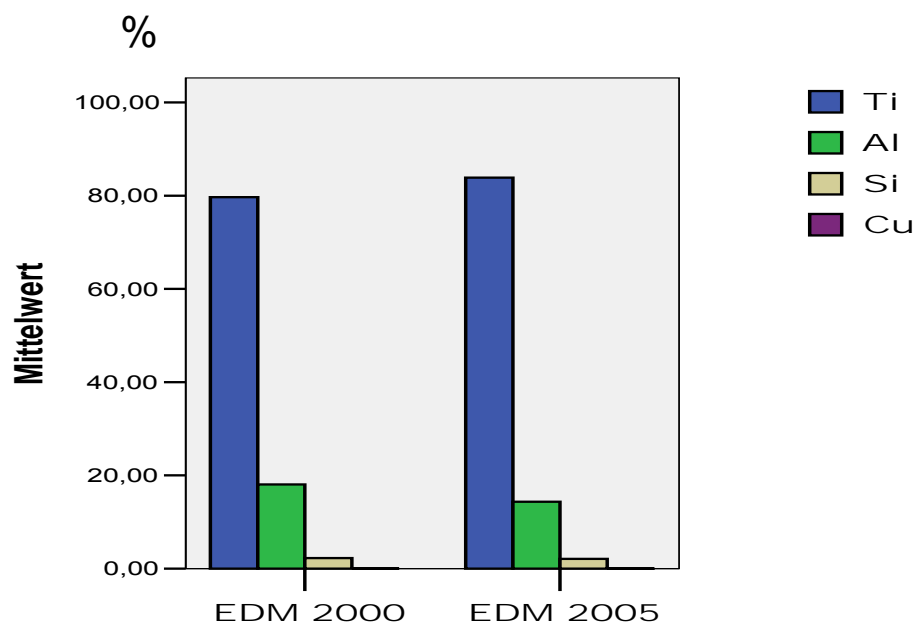


Abbildung 4-12: Grafik Darstellung der Titansuprastrukturen vor Erosion

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche vor der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Titan 79,67 %, Aluminium 18,05 % und Silizium 2,26 %.

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche vor der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Titan 83,86 %, Aluminium 14,34 % und Silizium 2,07 %.

4.7.2 Mittlere Elementarzusammensetzung der Titansuprastrukturen nach Erosion

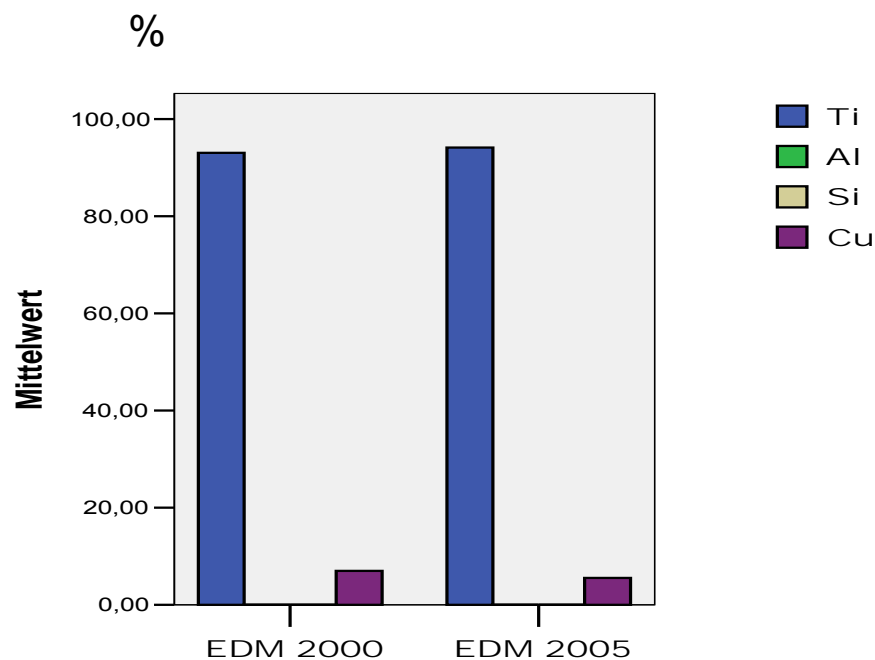


Abbildung 4-13: Grafik Darstellung der Titansuprastrukturen nach Erosion

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche nach der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Titan 94,13 % und Kupfer 5,53 %.

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche nach der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Titan 93,05 % und Kupfer 6,95 %.

4.7.3 Mittlere Elementarzusammensetzung der Goldsuprastrukturen vor Erosion

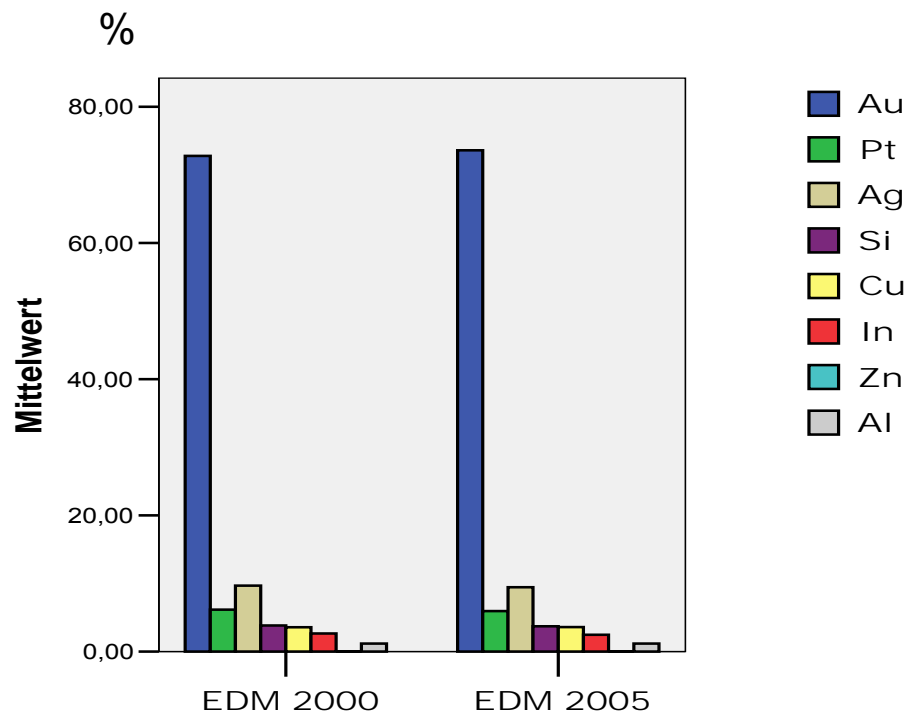


Abbildung 4-14: Grafik Darstellung der Goldsuprastrukturen vor Erosion

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche vor der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Gold 72,78 %, Silber 9,70 %, Platin 6,17 %, Kupfer 3,60 %, Indium 2,68, Aluminium 1,20 % und Silizium 3,84 %.

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche vor der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Gold 73,61 %, Silber 9,45 %, Platin 5,95 %, Kupfer 3,60 %, Indium 2,48 %, Aluminium 1,20 % und Silizium 3,74 %.

4.7.4 Mittlere Elementarzusammensetzung der Goldsuprastrukturen nach Erosion

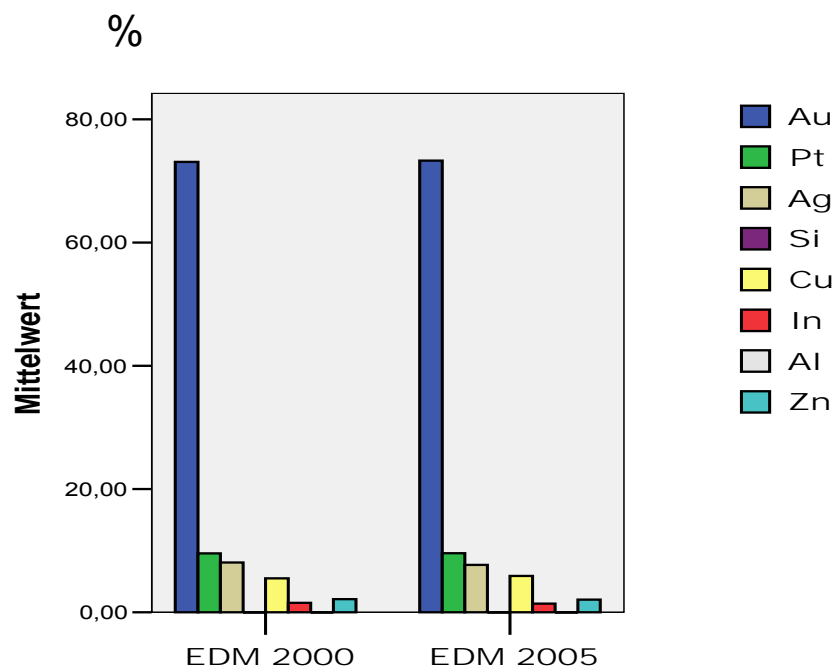


Abbildung 4-15: Grafik Darstellung der Goldsuprastrukturen nach Erosion

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche nach der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Gold 73,10 %, Silber 8,09 %, Platin 9,58 %, Kupfer 5,52 %, Indium 1,55 %, und Zink 2,16 %.

An den sechs Proben die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2005

geprüft wurden fanden sich an der Oberfläche nach der Erosion die folgenden Element in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Gold 73,30 %, Silber 7,70 %, Platin 9,61 %, Kupfer 5,92 %, Indium 1,42 %, und Zink 2,0 %.

4.7.5 Mittlere Elementarzusammensetzung der Kobalt-Chromsuprastrukturen vor Erosion

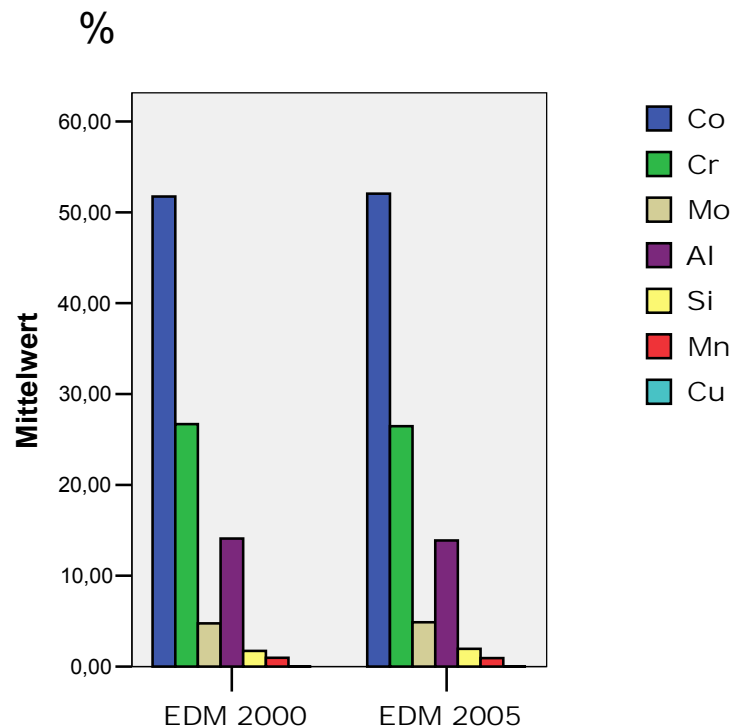


Abbildung 4-16: Grafik Darstellung der Kobalt- Chromsuprastrukturen vor Erosion

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche vor der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Kobalt 51,73 %, Chrom 26,96 %, Molybdän 4,75 %, Mangan 0,98 %, Silizium 1,73 % und Aluminium 14,10 %.

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2005 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche vor der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Kobalt 52,06 %, Chrom 26,46 %, Molybdän 4,87 %, Mangan 0,93 %, Silizium 1,96 % und Aluminium 13,87 %.

4.7.6 Mittlere Elementarzusammensetzung der Kobalt-Chromsuprastrukturen nach Erosion

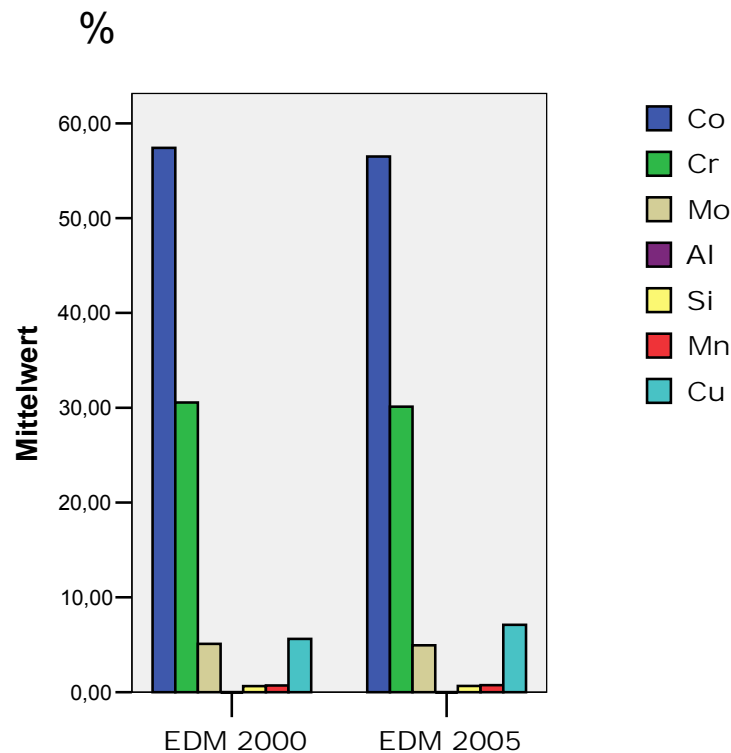


Abbildung 4-17: Grafik Darstellung der Kobalt-Chromsuprastrukturen nach Erosion

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche nach der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Kobalt 57,41 %, Chrom 30,55 %, Molybdän 5,09 %, Mangan 0,69 %, Silizium 0,64 % und Kupfer 5,62 %.

An den sechs Proben, die auf der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 geprüft wurden, fanden sich an der Oberfläche nach der Erosion die folgenden Elemente in der aufgeführten prozentualen Verteilung:

Kobalt 56,51 %, Chrom 30,12 %, Molybdän 4,94 %, Mangan 0,73 %, Silizium 0,64 % und Kupfer 7,11 %.

4.8 Standardabweichungen der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse

4.8.1 Standardabweichung der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse für alle Titansuprastrukturen vor und nach Funkenerosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005

Standardabweichung (SD) in Masseprozent (%)	Ti	Al	Si	Cu
SD EDM 2000 vor Erosion	1,98	2,03	0,25	-
SD EDM 2005 vor Erosion	3,32	2,76	0,45	-
SD EDM 2000 nach Erosion	0,45	-	-	0,45
SD EDM 2005 nach Erosion	1,51	-	-	1,06

Tabelle 4-31: Standardabweichungen bei der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse aller Titansuprastrukturen vor und nach Bearbeitung der Maschine EDM 2000 und 2005

Der höchste Wert der Standardabweichung vor Bearbeitung der Proben mit der EDM 2000 betrug 2,03 % und war für das Element Titan zu verzeichnen.

Nach Bearbeitung betrug der Wert 0,45 %.

Der höchste Wert vor Bearbeitung der Proben mit der EDM 2005 betrug 3,32 % und war für das Element Titan zu verzeichnen.

Nach Bearbeitung betrug der Wert 1,51 %.

4.8.2 Standardabweichung der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse für alle Goldsuprastrukturen vor und nach Funkenerosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005

Standardabweichung (SD) in Masseprozent (%)	Au	Ag	Pt	Cu	In	Al	Si	Zn
SD EDM 2000 vor Erosion	0,94	0,34	0,39	0,15	0,41	0,21	0,31	-
SD EDM 2005 vor Erosion	0,89	0,30	0,32	0,11	0,25	0,16	0,30	-
SD EDM 2000 nach Erosion	0,33	0,07	0,50	0,19	0,10	-	-	0,07
SD EDM 2005 nach Erosion	0,32	0,26	0,36	0,32	0,05	-	-	0,18

Tabelle 4-32: Standardabweichungen bei der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse aller Goldsuprastrukturen vor und nach Bearbeitung der Maschine EDM 2000 und 2005

Der höchste Wert der Standardabweichung vor Bearbeitung der Proben mit der EDM 2000 betrug 0,94 % und war für das Element Gold zu verzeichnen. Nach Bearbeitung betrug der Wert 0,33 %.

Der höchste Wert vor Bearbeitung der Proben mit der EDM 2005 betrug 0,89 % und war für das Element Gold zu verzeichnen.

Nach Bearbeitung betrug der Wert 0,32 %.

4.8.3 Standardabweichung der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse für alle Kobalt- Chromsuprastrukturen vor und nach Funkenerosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005

Standardabweichung (SD) in Masseprozent (%)	Co	Cr	Mo	Mn	Al	Si	Cu
EDM 2000 vor Erosion	0,65	0,43	0,30	0,07	0,55	0,26	-
EDM 2005 vor Erosion	0,90	0,61	0,51	0,15	1,49	0,70	-
EDM 2000 nach Erosion	0,91	0,47	0,23	0,05	-	0,04	1,45
EDM 2005 nach Erosion	0,69	0,27	0,16	0,06	-	0,03	1,11

Tabelle 4-33: Standardabweichungen bei der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse aller Kobalt -Chromsuprastrukturen vor und nach Bearbeitung der Maschine EDM 2000 und 2005

Der höchste Wert der Standardabweichung vor Bearbeitung der Proben mit der EDM 2000 betrug 0,65 % und war für das Element Kobalt zu verzeichnen.

Nach Bearbeitung stieg der Wert auf 0,91 %.

Der höchste Wert vor Bearbeitung der Proben mit der EDM 2005 betrug 1,49 % und war für das Element Aluminium zu verzeichnen.

Nach Bearbeitung war das Element nicht mehr nachzuweisen.

4.9 Vergleichende Statistik der Kupferauflagerung

4.9.1 Vergleichende Statistik für abhängige Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005

In der Tabelle 4-34 werden die auftretenden Kupferspuren der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse der Prüfkörper vor und nach Bearbeitung statistisch miteinander verglichen. Der Vergleich erfolgt getrennt für die Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005.

Statistische Auswertung für abhängige Proben

Vergleich zwischen	
Proben 1-6 EDM 2000 vor Bearbeitung	Proben 1-6 EDM 2000 nach Bearbeitung
Proben Titan	+
Proben Gold	+
Proben Kobalt- Chrom	+
Vergleich zwischen	
Proben 1-6 EDM 2005 vor Bearbeitung	Proben 1-6 EDM 2005 nach Bearbeitung
Proben Titan	+
Proben Gold	+
Proben Kobalt- Chrom	+

- = $p > 0,05$ nicht signifikant

+ = $p < 0,05$ signifikant

++ = $p < 0,01$ hoch signifikant

Tabelle 4-34: Ergebnisse des Wilcoxon-Tests nach F. Wilcoxon der energiedispersiven mikrostrahlanalytischen Untersuchung vor und nach Funkenerosion. Vergleich für die Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und 2005 getrennt

Es lässt sich erkennen, dass ein signifikanter Unterschied in der Elementarzusammensetzung in Hinblick auf das Element Kupfer vom Ausgangszustand nach dem zahntechnischen Guss zum bearbeiteten Zustand durch Funkenerosion bei allen drei verwendeten Legierungen bestand. Diese Signifikanz ist bei beiden verwendeten Funkenerosionsmaschinen zu verzeichnen.

4.9.2 Vergleichende Statistik für unabhängige Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005

In der Tabelle 4-35 werden die auftretenden Kupferspuren der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse nach Bearbeitung statistisch miteinander verglichen. Es werden die Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 mit der EDM 2005 verglichen.

Statistische Auswertung für unabhängige Proben

Vergleich zwischen	
Proben 1-6 EDM 2000 nach Bearbeitung	Proben 1-6 EDM 2005 nach Bearbeitung
Proben Titan	-
Proben Gold	++
Proben Kobalt- Chrom	-

- = $p > 0,05$ nicht signifikant

+ = $p < 0,05$ signifikant

++ = $p < 0,01$ hoch signifikant

Tabelle 4-35: Ergebnisse des U-Testes nach Mann und Whitney der energiedispersiven mikrostrahlanalytischen Untersuchung nach Funkenerosion zwischen Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005

Beim statistischen Vergleich der Proben die auf den zwei verschiedenen Funken-erosionsmaschinen bearbeitet worden sind ist ein signifikanter Unterschied für die Proben der Goldlegierung zu erkennen.

Beim Vergleich der Proben der Titan- und Kobalt-Chrom-Legierung ist dagegen kein signifikanter Unterschied erkennbar.

4.10 Ausgewählte Fotografien der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse; Spezielle Untersuchung der Kupferauflagerung

4.10.1 Sekundärelektronenbilder

Die Abbildungen 4-18 bis 4-21 zeigen Sekundärelektronenbilder der Titansuprastrukturen nach Bearbeitung durch Funkenerosion bei 2000facher Vergrößerung. Grau dargestellt ist die Suprastruktur. Der obere schwarze Bildbereich resultiert aus der elektronenneutralen Kunststoffeinbettmasse. Am Phasenübergang der beiden Farben befindet sich die Zone der Erosion.

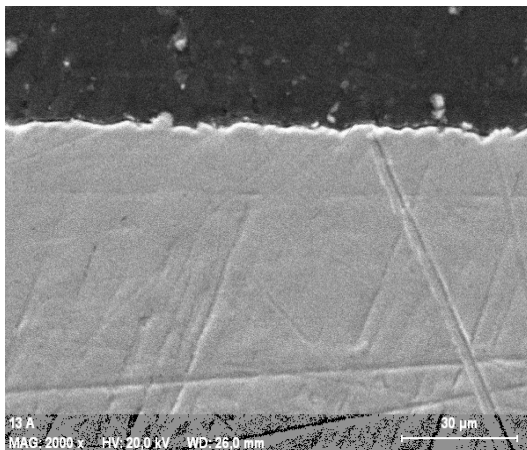


Abbildung 4-18: Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 1a mit EDM 2000

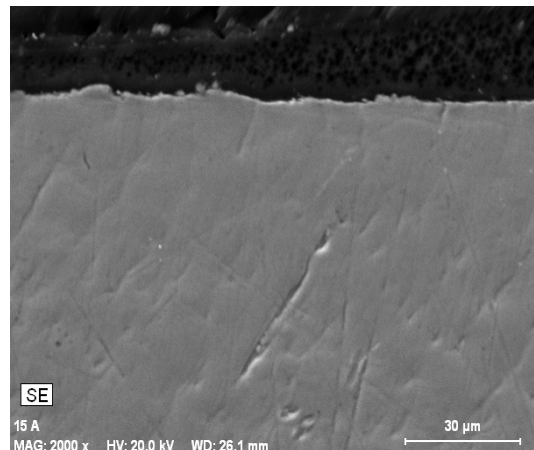


Abbildung 4-19: Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 3a mit EDM 2000

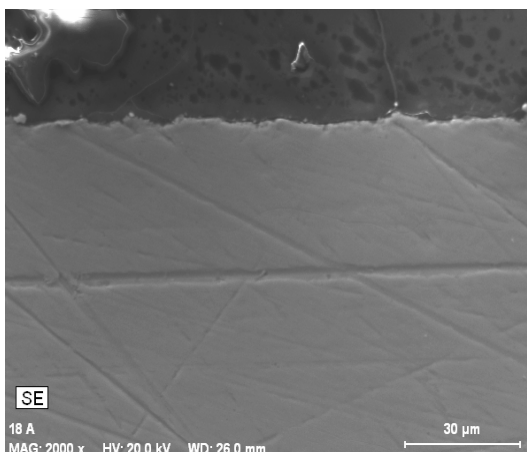


Abbildung 4-20: Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 6a mit EDM 2005

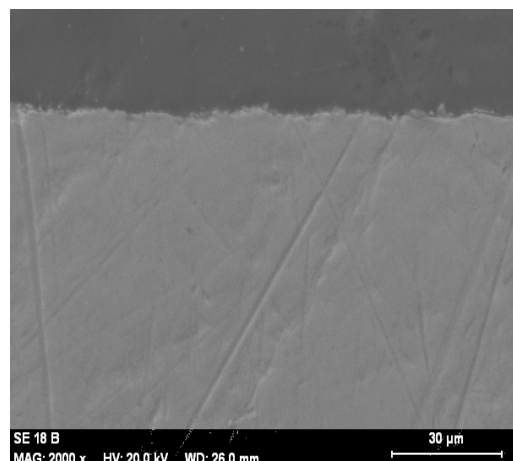


Abbildung 4-21: Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 6b mit EDM 2005

4.10.2 Farbige unterlegte Sekundärelektronenbilder

Die Abbildungen 4-22 bis 4-25 zeigen farbig unterlegte Sekundärelektronenbilder der Titansuprastrukturen nach Bearbeitung durch Funkenerosion bei 2000facher Vergrößerung. Grün dargestellt ist das Element Titan, rot dargestellt ist das Element Kupfer. Der obere schwarze Bildbereich resultiert aus der elektronenneutralen Kunststoffeinfettmasse.

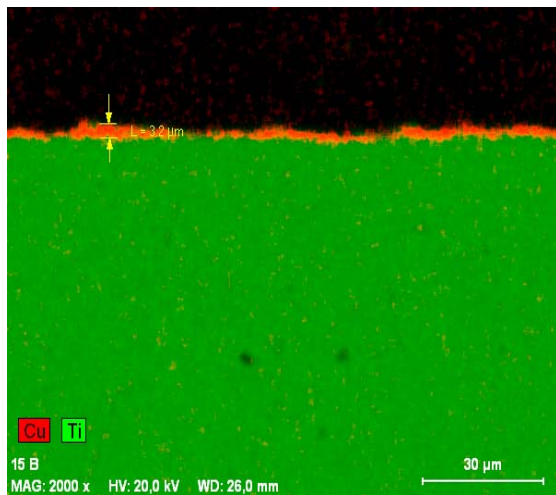


Abbildung 4-22: farbiges Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 3 mit EDM 2000

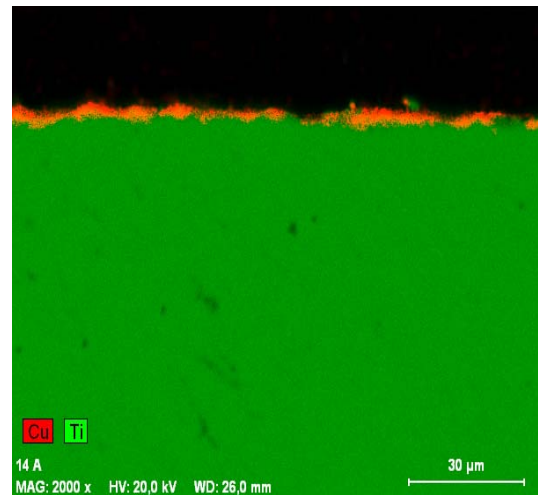


Abbildung 4-23: farbiges Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 2 mit EDM 2000

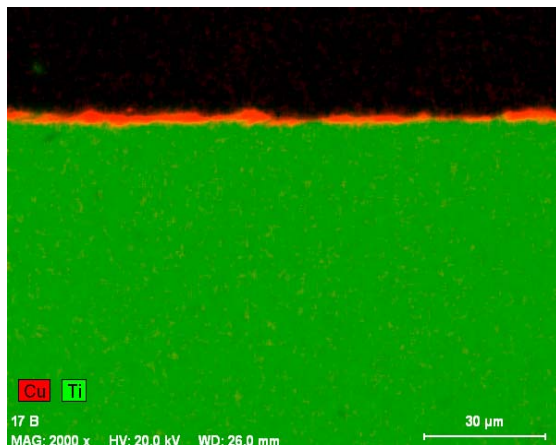


Abbildung 4-24: farbiges Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 5 mit EDM 2005

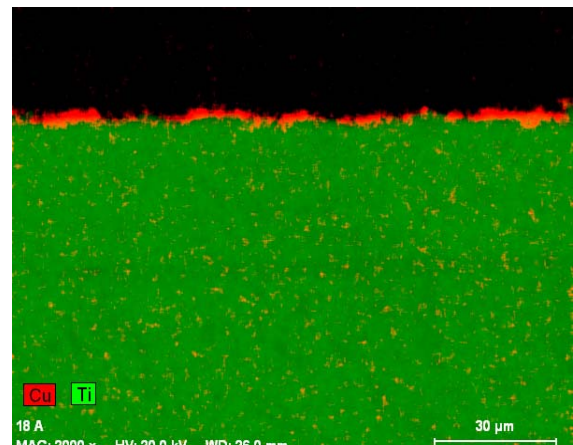


Abbildung 4-25: farbiges Sekundärelektronenbild der erodierten Titansuprastruktur 6 mit EDM 2005

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Rauigkeitsmessung

Für die Rauigkeitsmessungen wurden insgesamt 720 Einzelmessungen angefertigt. Davon 360 Messungen vor Funkenerosion und weitere 360 Messungen nach Funkenerosion.

Weiterhin wurden zusätzlich von jeder Suprastruktur Fotos angefertigt um die Veränderungen sichtbar zu machen.

Die Messung der Rauigkeit erlaubt es Veränderungen der Oberflächenqualität vom unbearbeiteten Ausgangszustand zum fertig erodiertem Werkstück zu beurteilen.

Es wurden mehrere unterschiedliche Messparameter in die Untersuchung einbezogen um die Aussagekraft für die Auswertung und Interpretation für die Veränderung der Mikrostruktur detaillierter darzustellen. Nur so ist es möglich zu beurteilen, wie bei der dentalen Funkenerosion die Oberfläche des Werkstückes bearbeitet wird.

Die Rauigkeitsmessungen ergaben, dass es bei den verschiedenen Legierungen in Abhängigkeit von der verwendeten Funkenerosionsmaschine bei der Erosion zu unterschiedlichen Veränderungen in der Oberflächenmorphologie kommt.

Bei den Titansuprastrukturen haben sich die Mittenrauwerte R_a sowohl bei der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 als auch bei der EDM 2005 nach der Bearbeitung gegenüber dem Ausgangswert vor der Erosion verkleinert. Bei beiden Maschinen verkleinerte sich der Wert um $0,28 \mu\text{m}$.

Die Werte der maximalen Rauheit R_{max} haben sich bei den Proben der EDM 2000 nach der Erosion um $1,09 \mu\text{m}$ verkleinert, bei denen der EDM 2005 hingegen ganz leicht mit $0,01 \mu\text{m}$ erhöht.

Der arithmetische Mittelwert der Rautiefen R_z war bei den Proben der EDM 2000 vor dem Bearbeiten um $0,97 \mu\text{m}$ größer als nach der Erosion. Bei den Proben der EDM 2005 hingegen kam es nach der Erosion zu einem geringfügigen Anstieg um $0,05 \mu\text{m}$ gegenüber dem Ausgangszustand.

Die Profilspitzen R_p haben sich nach der Erosion gegenüber dem Ausgangszustand bei den Proben der EDM 2000 um $0,34 \mu\text{m}$ und bei den Proben der EDM 2005 um $0,09 \mu\text{m}$ verringert.

Die Profiltäler R_v haben bei den Suprastrukturen der EDM 2000 gegenüber dem unbearbeiteten Ausgangszustand um $0,69 \mu\text{m}$ abgenommen. Bei den Proben die mit der EDM 2005 bearbeitet worden sind haben sie um $0,14 \mu\text{m}$ zugenommen.

Bei den Goldsuprastrukturen haben sich die Mittenrauwerte R_a bei den Proben die mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 erodiert wurden gegenüber dem Ausgangszustand um $0,3 \mu\text{m}$ erhöht. Hingegen haben sich die Proben der EDM 2005 nach der Erosion gegenüber dem Ausgangszustand mit $0,06 \mu\text{m}$ geringfügig verkleinert.

Die Werte der maximalen Rautiefe R_{max} haben sich bei den Proben sowohl bei der EDM 2000 um als auch der EDM 2005 vom Betrag her vergrößert.

Bei der EDM 2000 erfolgte eine Vergrößerung des Wertes um $2,45 \mu\text{m}$. Bei der EDM 2005 erhöhte sich der Wert um $0,42 \mu\text{m}$.

Der arithmetische Mittelwert der Rautiefe R_z erhöhte sich nach der Bearbeitung. Er erhöhte sich bei den Probenserien der EDM 2000 um $2,32 \mu\text{m}$ und bei den Proben der EDM 2005 um $0,34 \mu\text{m}$ gegenüber dem unbearbeiteten Ausgangszustand.

Die Profilspitzen R_p haben sich nach der Erosion gegenüber dem Ausgangszustand bei der EDM 2000 um $1,28 \mu\text{m}$ erhöht. Bei den Proben der EDM 2005 hingegen kam es zu einer leichten Abnahme um $0,02 \mu\text{m}$.

Die Profiltäler R_v haben sich bei den Suprastrukturen beider Maschinen erhöht. Bei den Proben der EDM 2000 betrug der Anstieg $0,99 \mu\text{m}$ und bei den Proben der EDM 2005 $0,37 \mu\text{m}$.

Bei den Kobalt- Chromsuprastrukturen haben sich alle fünf untersuchten Rauigkeitsparameter nach dem funkenerosiven Bearbeiten gegenüber dem Ausgangszustand vom Betrag erhöht. Dies war bei allen Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005 zu beobachten.

Der Mittenrauwert R_a hat sich bei den Proben der EDM 2000 um $0,03 \mu\text{m}$ und bei den Proben der EDM um $0,17 \mu\text{m}$ erhöht.

Die Werte der maximalen Rautiefe R_{max} erhöhten sich bei den erodierten Suprastrukturen der EDM 2000 um $0,45 \mu\text{m}$ und bei denen der EDM 2005 um $0,77 \mu\text{m}$.

Der arithmetische Mittenrauwert R_z erhöhte sich um $0,42 \mu\text{m}$ bei den Proben der EDM 2000 und um $0,89 \mu\text{m}$ bei denen der EDM 2005.

Die Profilspitzen R_p haben sich gegenüber dem Ausgangszustand bei der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 nach Erosion um $0,39 \mu\text{m}$ erhöht, bei der EDM 2005 um $0,29 \mu\text{m}$.

Auch die Profiltäler haben sich nach der Erosion gegenüber dem Ausgangszustand erhöht. Bei den Proben der EDM 2000 erhöhte sich der Wert um $0,10 \mu\text{m}$ und bei denen der EDM 2005 um $0,47 \mu\text{m}$.

5.1.1 Allgemeine Diskussion Rauigkeit

Die Auswertungen der Ergebnisse ermöglicht eine genauere Beurteilung der Vorgänge des Materialabtrages der Funkenerosion.

Beim Erosionsvorgang kommt es nicht wie bei der spannabhebenden oder polierenden Oberflächenbearbeitungen zu einem nur oberflächlichem Abtrag von Material. Es werden nicht nur die größten Profilspitzen des Rauheitsprofils abgetragen. Dies hätte eine alleinige Reduktion des Messwertes für die Glättungstiefe R_p bedeutet. Eine Zunahme der Glättungstiefe R_v bedeutet eine Erhöhung der Tiefe des größten Profiltales im Rauheitsprofil. Dies wird verursacht durch einen Abtrag von Material auch in der Tiefe des Rauheitsprofils innerhalb einer Einzelmessstrecke.

Das auch die Tiefen der größten Profiltäler R_v vom Betrag nach Funkenerosion abnehmen können, zeigen die Messwerte der Titanproben der EDM 2000. Sie haben sich nach Funkenerosion verringert. Gleichzeitig verringerten sich auch bei diesen Proben die Messwerte der Profilspitzen R_p . Insgesamt haben sich bei diesen Proben alle gemessenen Rauheitsparameter verringert. Es ist also möglich mit Hilfe der Erosion Oberflächenqualitäten zu erreichen die ein glatteres Oberflächenprofil besitzen als die unbearbeitete Suprastruktur nach dem zahntechnischen Guss.

Das eine Verringerung der Profilspitzen R_p nicht zwangsläufig mit einer Verringerung der Profiltäler einhergehen müssen zeigen die Titanproben der EDM 2005 und die Goldproben der EDM 2005. Hier verhalten sich die Messergebnisse gegenläufig.

Der arithmetische Mittenrauwert R_z nahm mit Ausnahme der Probenserie Titan der EDM 2000 bei allen anderen Proben zu. Da er definiert ist als der arithmetische Mittelwert vieler aufeinander folgender Einzelmessstrecken wird klar ersichtlich, dass die Oberfläche in der Struktur insgesamt an Rauheit zugenommen hat.

Die maximale Rautiefe R_{max} ist die größte Einzelrautiefe innerhalb der Gesamtmessstrecke. Bei allen Kobalt-Chromproben nahm Sie zu. Bei allen Goldproben nahm Sie ab. Bei den Titanproben die mit der EDM 2000 erodiert worden sind nahmen Sie ab, während Sie bei den Proben der EDM 2005 zunahm.

Dieser Wert wurde gemessen, da der arithmetische Mittenwert R_a unempfindlich ist gegenüber extremen Profilspitzen ist. Diese Veränderungen hätten nicht dargestellt werden können. Sie zeigen aber, dass es zu einzelnen Extremwerten innerhalb des Profils kommt. Diese lassen sich durch den explosionsartigen Charakter des Materialabtrages der Erosion erklären, der nicht an allen Stellen mit der gleichen Intensität erfolgt.

Bei der Funkenerosion hat die gewählte Stromstärke und die Funkenentladefrequenz Einfluss auf die erreichte Oberflächenqualität. Genau wie beim spanabhebenden Bearbeiten können auch beim Erodieren feine oder grobe Oberflächen erzeugt werden. Es besteht eine Abhängigkeit zwischen der Größe der gewählten Stromstärke und der erreichten Rauigkeit (große Stromstärke führt zu großer Rauigkeit und umgekehrt) (39). Die Qualität Rautiefe und Abtragsvolumen sind direkt abhängig von der Funkenentladefrequenz. Je höher die Frequenz, umso geringer ist das Abtragsvolumen, aber umso geringer ist auch die Rautiefe.

Die Unterschiede in der Ausprägung der Veränderung mögen einerseits in der verschiedenen Materialbeschaffenheit und Materialeigenschaft liegen, zum anderen aber auch in den unterschiedlichen Einstellungsparametern der Erosionsmaschinen.

Die verschiedenen Probenserien der unterschiedlichen Legierungen wurden nach Herstellerangaben mit jeweils unterschiedlichen Einstellungsparametern der Funkenerosionsgeneratoren EDM 2000 und EDM 2005 erodiert. So erklären sich die unterschiedlich erreichten Oberflächen. Hier liegt letztendlich auch der größte Faktor in der Beeinflussung der Oberflächenmorphologie. Veränderungen dieser Parameter lassen mit Sicherheit noch andere Oberflächen erreichen.

Es ist festzustellen, dass bei der Erosion nicht nur oberflächliche Störstellen beseitigt werden. Auch wenn mit Hilfe der Funkenerosion die Spaltbreiten von Implantat und Suprastruktur deutlich verringert werden können, geschieht diese Verringerung der Spaltbreiten nicht in erster Linie nur durch den Abtrag von Metallanteilen die vermeintlich zuerst in Kontakt mit der Modellelektrode stehen.

Vielmehr wird an der gesamten Kontaktzone zwischen Modellelektrode und Suprastruktur im Funkenspalt Material abgetragen. Das Funkenerosionsverfahren hat einen ganz anderen Einfluss auf das bearbeitete Material als herkömmliche Bearbeitungsverfahren.

Die auf das Werkstück auftreffenden elektrischen Funken erhitzen die äußerste Schicht des Materials so hoch, dass der Werkstoff verdampft.

Diesem Materialabtrag kann man explosionsartigem Charakter zuschreiben. Durch den Abtrag werden neue oberflächliche Krater geschaffen. Metallanteile werden aus der Oberfläche herausgeschleudert.

5.2 Diskussion der Ergebnisse der energiedispersiven Elektronenmikrostrahlanalyse

Zur Ergänzung der Rauigkeitsmessungen wurden 144 energiedispersive Elektronenmikrostrahlanalysen zur Bestimmung der elementaren Oberflächenzusammensetzung der funkenerosiv bearbeiteten Oberflächen angefertigt. Hierbei wurden 72 Analysen nach dem zahntechnischen Guss vor Funkenerosion angefertigt. Nach Bearbeitung durch Funkenerosion erfolgten 72 Analysen.

Weitere 12 Messungen erfolgten nach Funkenerosion an speziell präparierten Proben. Bei diesen Messungen wurden Sekundärelektronenbilder angefertigt.

Die energiedispersive Mikrostrahlanalyse ermöglicht im Bereich der Untersuchung von Materialproben eine sehr genaue Analyse der Elementarzusammensetzung. Sie eignet sich für diesen Versuchsaufbau, da Veränderungen der Elementarzusammensetzungen der Materialproben an der Oberfläche in den verschiedenen Bearbeitungszuständen untersucht werden sollten.

Die Untersuchungen ergaben deutliche Veränderungen der Elementarzusammensetzungen nach dem funkenerosiven Bearbeiten gegenüber dem unbearbeiteten Ausgangszustand. Es traten Veränderungen bei allen untersuchten Legierungen auf.

Bei den Titansuprastrukturen erhöht sich der Anteil des elementaren Titans an der Oberfläche um 14,46 % bei den Proben der EDM 2000 und um 9,19 % bei den Proben der EDM 2005. Die Elemente Aluminium und Silizium waren nach der Funkenerosion an der Oberfläche nicht mehr nachweisbar. Als bisher nicht nachweisbares Element an der Oberfläche trat nach der Erosion Kupfer auf. Bei den Proben der EDM 2000 waren es 5,53 % und bei der EDM 2005 6,95 %

Das Auftreten des Kupfers nach Erosion war bei beiden Probenreihen statistisch signifikant ($p < 0,05$).

Bei den Goldsuprastrukturen erhöhte sich der Anteil des elementaren Goldes bei der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 um 0,32 %, während er bei der EDM 2005 keinerlei Veränderung erfuhr. Der Anteil des elementaren Silbers verringerte sich nach der Erosion bei der EDM 2000 um 1,61 % und bei der EDM 2005 um 1,75 %.

Der Anteil des elementaren Platins erhöhte sich um 3,41 % bei den Proben der EDM 2000 und um 3,66 % bei den Proben der EDM 2005. Der Anteil an Indium nahm bei der EDM 2000 um 1,13 % und bei der EDM 2005 um 1,06 % ab. Der Anteil an elementarem Kupfer erhöhte sich bei der EDM 2000 um 1,92 % und bei der EDM 2005 um 2,32 %. Als bisher nicht nachweisbares Element trat Zink nach der Funkenerosion an der Oberfläche auf. Bei der EDM 2000 waren es 2,16 % und bei der EDM 2005 2,0 %.

Die Elemente Aluminium und Silizium waren nach der Erosion auf keiner Probe mehr nachzuweisen. Das vermehrte Auftreten von Kupfer war bei beiden Probenreihen statistisch signifikant ($p < 0,05$).

Bei den Kobalt- Chromsuprastrukturen erhöhte sich der Anteil des elementaren Kobalts bei der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 um 5,68 %, während er bei der EDM 2005 um 4,45 % stieg. Der Anteil des elementaren Chroms erhöhte sich bei der EDM 2000 um 3,59 %, bei der EDM 2005 um 3,66 %.

Der elementare Molybdänanteil stieg bei der EDM 2000 um 0,34 % und bei der EDM 2005 um 0,07 %. Der elementare Anteil von Mangan und Silizium verringerte sich nach Funkenerosion. Der Anteil an Mangan verringerte sich bei der EDM 2000 um 0,33 % und bei der EDM 2005 um 0,20 %. Der Siliziumanteil verringerte sich bei der EDM 2000 um 1,09 % und bei der EDM 2005 um 1,32 %. Aluminium konnte als Element nach Funkenerosion nicht mehr nachgewiesen werden. Neu aufgetreten nach Funkenerosion ist das Element Kupfer. Bei den Proben der EDM 2000 waren nach Erosion 5,62 % elementaren Kupfers zu messen und bei den Proben der EDM 2005 7,11 %.

Das Auftreten des Kupfers nach Erosion war bei beiden Probenreihen statistisch signifikant ($p < 0,05$).

Bei allen hergestellten Titan- und Goldproben war bei den Messungen nach dem zahntechnischen Guss und vor Funkenerosion das Element Aluminium und Silizium in der Oberfläche nachweisbar.

Nach Funkenerosion waren bei den Titan- und Goldproben beider Funkenerosionsmaschinen keinerlei elementare Spuren dieser Stoffe nachweisbar.

Bei allen Proben der Kobalt- Chrom Legierung waren nach dem zahntechnischen Guss deutliche Spuren von Aluminium und Silizium nachweisbar. Nach der Erosion waren von Aluminium keinerlei Spuren bei den Proben der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005 nachzuweisen. Vom Element Silizium hingegen waren deutliche Spuren auch nach Funkenerosion bei beiden Prüfreihe nachweisbar.

Da bei den Titan- und Goldproben in der vergossenen Ausgangslegierung kein Aluminium und Silizium enthalten sind, muss es nach dem zahntechnischen Guss beim Abstrahlen der Einbettmasse zu einer Verunreinigung der Proben gekommen sein. Die Aluminium- und Siliziumpartikel werden mit Druck in die Oberfläche der Proben eingebracht. Dort verbleiben sie zunächst. Da es bei der Funkenerosion zu einem Materialabtrag der oberflächlichen Schicht kommt, werden diese eingebrachten Partikel mit entfernt. In der unberührten Ausgangslegierung die nach der Erosion an die Oberfläche tritt, sind die Elemente nicht enthalten, so dass nach Erosion ein Nachweis negativ ausfällt.

Bei der Kobalt- Chrom Legierung hingegen ist das Element Silizium in der Ausgangslegierung enthalten, so dass auch nach Erosion Spuren des Elementes in den Proben nachgewiesen werden kann.

Die Ausgangslegierungen der Titan- und Kobalt-Chrom- Proben enthalten keinerlei Kupfer. Nach der Erosion wurde eine deutliche Konzentration an elementarem Kupfer nachgewiesen.

Beim Prozess der Funkenerosion kommt es zu einem Einschmelzen von Kupfer in die Oberfläche der Proben. Die einzig mögliche Kupferquelle stellen die Modellelektroden aus Kupfer dar. Sie werden durch einen oberflächlichen Abtrag während der Erosion um Kupfer reduziert. Durch die hohe Temperatur im Funkenspalt schmilzt das Kupfer auf, und schlägt sich beim Abkühlen auf der Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstückes nieder.

Da bei den Goldproben in der Ausgangslegierung Kupfer enthalten ist, ist es nicht weiter verwunderlich nach der Erosion Spuren von elementarem Kupfers nachzuweisen. Bei diesen Proben erhöhte sich der prozentuale Anteil des Kupfers an der Gesamtzusammensetzung. Auch hier ist Kupfer von den Modellelektroden in die Legierung des Werkstückes überführt worden.

In der Ausgangslegierung für die Goldproben ist das Element Zink enthalten. Bei den Messungen vor funkenerosiver Bearbeitung ist es bei keiner Probe nachweisbar. Nach Funkenerosion ist es bei den Proben der EDM 2000 und EDM 2005 nachweisbar. Durch Überlagerung von Aluminium- und Siliziumpartikeln nach dem Abstrahlen der Einbettmasse sinkt es unterhalb der Nachweisgrenze. Nach Erosion mit Entfernung der Elemente Aluminium und Silizium fällt es wieder in die Nachweisgrenze der für die Messung verwendeten Sonde.

5.3 Diskussion der klinischen Bedeutung

Anhand dieser Untersuchung wurde deutlich, dass das Bearbeiten durch Funkenerosion von Suprastrukturen eine unterschiedliche Beeinflussung auf die Rauigkeit haben kann. In Abhängigkeit von der verwendeten Funkenerosionsmaschine, den vom Hersteller vorgegebenen Einstelldaten und der verwendeten Legierung werden unterschiedlich raue Oberflächen erzielt.

Nach dem mechanischen Wirkungsprinzip vergrößert Rauigkeit die Möglichkeit zur Anlagerung mikrobieller Beläge. Trotzdem zeigt das Plaqueakkumulationsverhalten der Dentalmaterialien keine Übereinstimmung mit den auf Zahnersatz ermittelten Rauigkeitsprofilen sowie Rauigkeitskenngrößen (20). Die Beseitigung von Rauigkeiten an allen Therapiemitteln vor ihrer Inkorporation in die Mundhöhle bleibt sicherlich eine grundsätzliche klinische Forderung. Glatte und glänzende Oberflächen sind aber offensichtlich nicht die entscheidenden Faktoren für geringere Belagshaftung an unterschiedlichen Dentalmaterialien (45).

Eine erhöhte Rauigkeit bedeutet eine größere Oberfläche. Von einer größeren Oberfläche können mehr Ionen in Lösung gehen.

Metallische Werkstoffe besitzen das Phänomen in einem Elektrolyten (Speichel, Sulkusflüssigkeit, Entzündungsekret) unter Abgabe von Metallteilen sich elektrochemisch zu lösen und von biologischen Systemen aufgenommen zu werden. Dentallegierungen gehen durch korrosive Einflüsse in der Mundhöhle in Lösung. Legierungen unterliegen im Mund der Korrosion, die zu Schäden an der Restauration, an Implantaten und zu lokal- und systemtoxischen bzw. sensibilisierenden

Wirkungen führen kann. Durch den Schleimhautkontakt können die Korrosionsprodukte lokal und durch Resorption systemisch wirken.

Untersuchungen an gegossenen nicht funkenerosiv bearbeiteten Suprastrukturen zeigen, dass die Korrosionsraten der entstehenden galvanischen Elemente so gering sind, dass davon ausgegangen werden kann, dass Suprakonstruktionen aus Gold- und Kobalt-Chrom-Legierungen auf Titanimplantate geschraubt werden können. Über das klinische Verhalten von Implantaten und Suprakonstruktionen aus den bei dieser Untersuchung verwendeten Dentallegierungen wird in der Literatur wenig berichtet. Dies mag ein Hinweis auf die Korrosionsbeständigkeit dieser Konstruktionen sein.

Ein klinischer Fall der möglicherweise durch Korrosion zum Misserfolg führte wird von Wirz genannt (94). Er weist aber darauf hin, dass dieser nicht durch die Ausbildung eines galvanischen Elementes sondern möglicherweise durch Spaltkorrosion verursacht wurde (94, 95).

Aussagekräftige Nachuntersuchungen zu Suprakonstruktionen die mit der Funken-erosion passiviert worden sind liegen derzeit nicht vor.

In wieweit der festgestellte Kupferniederschlag von funkenerodierten Suprastrukturen die Korrosionsraten beeinflusst, bleibt fraglich.

Bei den Titansuprastrukturen war ein signifikanter Anstieg von Kupfer zu verzeichnen. Der Forderung nach einer monometallischen Versorgung aus reinem Titan kann den Ergebnissen nach nicht hundertprozentig entsprochen werden.

Im Bereich der nachgearbeiteten Passung zwischen Implantat und Suprastruktur kommt es durch die Erosion zu einer Anlagerung einer Kupferschicht. Da diese Flächen nicht weiter nachgearbeitet werden können wird so das Element Kupfer in die Mundhöhle der prothetisch versorgten Patienten eingebracht

Es stellt sich nun die Frage ob es zu einer Kupferionenabgabe kommt. Möglicherweise sind aber die in vitro freigesetzten Ionenmengen geringer als die Mengen, die mit der täglichen Nahrung aufgenommen werden. Die Verdünnung durch den Speichelfluss reduziert noch die Möglichkeit einer lokaltoxischen Wirkung. Interessant ist die Frage wie die oberflächliche Kupferschicht die mögliche Affinität von

Plauebakterien an der Implantatschulter beeinflusst. Kupfer kann konzentrationsabhängig zytotoxisch sein.

Das durch die Erosion auf die Oberflächen der Suprastrukturen aufgebrachte Element Kupfer ist ein essentielles Spurenelement und wird in einer bestimmten Menge täglich aufgenommen. Kupfer besitzt aber in höheren Dosen eine toxische Potenz.

Dieser Problematik müsste man sich in einer weiteren Untersuchung widmen um hier ein abschließendes Urteil zu bilden.

Will man das Risiko einer möglichen Korrosion durch ein durch die Funkenerosion geschaffenes mögliches galvanisches Element vermeiden sollte man den Versuch unternehmen, Modellelektroden aus den gleichen Legierungen zu verwenden die bei den jeweiligen Suprastrukturen zum Einsatz kommt. So scheint gewährleistet zu sein das es zu keinem Niederschlag eines Fremdmetalls auf den Suprastrukturen kommt.

5.4 Allgemeine Diskussion

Anhand dieser Untersuchungen wurde deutlich, dass das funkenerosive Bearbeiten von Implantatsuprastrukturen zu einer Veränderung der oberflächlichen Elementarzusammensetzung der bearbeiteten Werkstücke führt.

Weitere Untersuchungen müssten die dringende Frage klären ob der passiv fit einer funkenerodierten Suprastruktur wichtiger für die langjährige Osseointegration ist, oder ob die festgestellten Kupferverunreinigungen zu einem progredienten Verlauf des Knochenabbaus führen können.

Es schließen sich nun Untersuchungen an, die das Korrosionsverhalten der funkenerodierten Suprastrukturen untersuchen. Als in-vitro- Verfahren kommt das Eintauchen von Proben in Elektrolyte, Simulierung der Spaltkorrosion und potentiokinetische Verfahren in Frage.

Ergänzende in-vivo-Verfahren sind die Bestimmung der Metallkonzentration im Speichel nach dem Tragen erosiv bearbeiteten Suprastrukturen sowie Gewebeuntersuchungen.

5.5 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass es durch das SAE-Seotec-Funkenerosionsverfahren zu unterschiedlichen Veränderungen in der Oberflächenmorphologie der im zahntechnischen Guss hergestellten Suprastrukturen kommt. Diese Veränderungen wurden durch Rauigkeitsmessungen nachgewiesen. In Abhängigkeit von der verwendeten Ausgangslegierung und der benutzten Funkenerosionsmaschine wurden mit denen vom Hersteller vorgegebenen Einstellparametern die untersuchten Rauheitsparameter in unterschiedlicher Weise gegenüber dem Ausgangszustand verändert. Es konnte gezeigt werden, dass die Werte der Rauigkeit abnehmen und zunehmen können. Dies kann ganze Probengruppen in ihrer Gesamtheit betreffen oder auch nur einzelne Messwerte innerhalb einer Probengruppe. Es können Rauheitsparameter innerhalb einer Probengruppe gegenläufig beeinflusst werden.

Durch das SAE-Secotec-Funkenerosionsverfahren kommt es zu einer Anlagerung einer oberflächlichen Kupferschicht auf den Suprastrukturen im Bereich der nachbearbeiteten Auflageflächen zur Implantatschulter.

Dies wurde mit energiedispersiver Mikrostrahlanalyse nachgewiesen. Durch das Funkenerosionsverfahren kommt es unabhängig vom Material der erodierten Suprastruktur zu einem Niederschlag von elementarem Kupfer aus den bei der Erosion verwendeten Kupfermodellelektroden.

6 Zusammenfassung

Mit Hilfe von Rauigkeitsmessungen und energiedispersiver Röntgenmikrostrahlanalyse sollte in dieser Studie untersucht werden, wie sich gegossene Titan-, Gold- und Kobalt-Chrom Suprastrukturen durch Nacharbeiten mit dem SAE-Serotec-Funkenerosionsverfahren in der Rauigkeit und im Materialgefüge verändern. Weiteres Ziel war es dabei gerätespezifische Unterschiede zwischen der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 des Herstellers SAE und seinem Nachfolgemodell EDM 2005 herauszuarbeiten.

Mit Hilfe der präformierten Kunststoffformteile für das Ankylos Implantatsystem der Firma SAE wurden 36 Suprastrukturen (12 aus Titan Biotan, 12 aus Bio RD 1 Goldlegierung und 12 aus Vi-Comp Kobalt-Chrom Legierung) mittels zahntechnischer Gusstechnik hergestellt. Diese wurden mit Hilfe des SAE-Serotec-Funkenerosionsverfahren nachgearbeitet. Jeweils sechs Prüfkörper einer Legierung wurden mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000, die anderen sechs mit dem Nachfolgemodell EDM 2005, nach Herstellerangaben bearbeitet.

Ein weiterer Satz von 6 Prüfkörpern aus Titan wurde erstellt und jeweils die Hälfte mit der neuen und alten Funkenerosionsmaschine bearbeitet. Nach der Bearbeitung wurden diese Suprastrukturen in Modellkunststoff eingebettet und die zylindrischen Körper der Längsachse nach in der Mitte geteilt. Mit Hilfe dieser Proben sollte überprüft werden wie tief mögliche Gefügeveränderungen bei der Funkenerosion im Material erfolgen (Schichtstärkenmessung).

Die Rauigkeit der Suprastrukturen wurde vor Bearbeitung direkt nach dem zahntechnischen Guss und nach Funkenerosion untersucht und die Ergebnisse ausgewertet. Die Gefügeveränderungen der Suprastrukturen wurden mit der energiedispersiven Röntgenmikrostrahlanalyse vor Bearbeitung und nach Funkenerosion untersucht. Die Schichtstärkenmessung des durch die Erosion veränderten Metalls wurde mit derselben Methode nach Funkenerosion untersucht. Beide Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet.

Mit Hilfe der Rauigkeitsmessungen konnte gezeigt werden, dass es zu keiner einheitlichen Veränderung in den untersuchten Rauigkeitsparametern während des funkenerosiven Prozesses an allen untersuchten Materialproben kommt. In Abhängigkeit von der verwendeten Ausgangslegierung und denen vom Hersteller für die jeweilige Legierung vorgeschlagenen Einstellungsparametern der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und dem technischen Nachfolger EDM 2005 werden unterschiedliche Veränderungen in der Oberflächenmorphologie erreicht. Die Erosion kann die Oberfläche des bearbeiteten Werkstückes in seiner Oberflächenstruktur glätten, so dass eine glattere Oberfläche als nach dem zahntechnischen Guss entsteht. Die Oberfläche kann aber auch insgesamt rauer werden.

Weiter konnte gezeigt werden, dass es bei der Funkenerosion nicht nur zu einem Abtrag von Material an den höchsten Profilstrukturen der Oberfläche kommt, sondern dass die Erosion tiefer in das Material der bearbeiteten Suprastrukturen eingreift. Es werden Materialanteile mit explosionsartigem Charakter aus dem Materialgefüge herausgerissen.

Mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenmikrostrahlanalyse konnten bei allen untersuchten Proben vor der Erosion Spuren von Aluminium und Silizium in der Oberfläche nachgewiesen werden. Nach der Erosion der Oberfläche waren diese Verunreinigungen, verursacht durch das Abstrahlen der Einbettmasse nach dem zahntechnischen Guss, wieder entfernt worden. Eine Ausnahme bestand bei der Kobalt-Chrom Legierung wo Silizium ein Bestandteil der Ausgangslegierung ist.

Es konnte gezeigt werden, dass es bei der Funkenerosion mit den verwendeten Kupfermodellelektroden zu einem Niederschlag des Kupfers auf das erodierte Werkstück kommt. Es sind unabhängig von der verwendeten Titan-, Gold- und Kobalt-Chromlegierung auf allen Proben Spuren von elementarem Kupfer nach der Erosion nachweisbar. Bei den Probengruppen der beiden Funkenerosionsmaschinen EDM 2000 und EDM 2005 war die Zunahme an Kupfer in der Oberfläche statistisch signifikant. Im energiedispersiven rasterelektronenmikroskopischen Bild ist diese Kupferauflagerung als Schicht sichtbar.

Es konnte gezeigt werden, dass die Funkenerosionmaschine EDM 2005 keine deutlichen Veränderungen in der Oberflächenqualität gegenüber dem Vorgänger EDM 2000 erreicht.

Diese Studie zeigt, dass eine Nacharbeitung mit der SAE- Funkenerosionstechnik in Abhängigkeit von der verwendeten Ausgangslegierung und denen vom Hersteller SAE für die jeweilige Funkenerosionsmaschine vorgegebenen Einstellungsparametern unterschiedlich raue Oberflächen erreicht werden.

Weiterhin zeigt diese Studie, dass das Nacharbeiten mit der SAE- Funkenerosionstechnik zu einer signifikanten oberflächlichen Anlagerung einer elementaren Kupferschicht im Bereich der erosiv nachbearbeiteten Flächen bewirkt. Dies ist unabhängig von der bearbeiteten Legierung.

7 Summary

With the help of roughness measuring and energy dispersve x-ray spectrometry you should examine in this study as poured titanium, gold and cobalt chrome superstructures change by afterwork with the SAE-Serotes spark erosion procedure in the roughness and in the material structure. It was a broader aim to work out equipment specific differences between the spark erosion machine EDM 2000 of the manufacturer SAE and its successor EDM 2005.

With the help of the prefabricated synthetic material moldings for the Ankylos implant system of the company SAE 36 superstructures (12 from titanium Biotan, 12 from Bio RD 1 gold based alloy and 12 made of Vi-Comp Kobalt-Chrom alloying) were produced by means of tooth technical cast. These were the SAE-Serotec spark erosion procedure after worked with help. Six test bodies of an alloying each became 2000, the other six with the spark erosion machine EDM with the successor EDM 2005, processed according to manufacturer's indications.

Further sentence of 6 test bodies from titanium was prepared and works on the half with the new and old spark erosion machine respectively. After the processing these superstructures into model synthetic material embedded and the cylindrical bodies of the longitudinal axis were after divided in the middle. With the help of these samples it should be checked structure changes are carried out at the spark erosion in the material as deeply possible (layer strength measuring).

The roughness of the superstructures was examined and the results evaluated directly before processing after the tooth technical cast and after spark erosion. The structure changes of the superstructures became examines with the energy dispersve x-ray spectrometry before processing and after spark erosion. The layer strength measuring of the metal changed by the erosion was examined with the same method after spark erosion. Both results were evaluated statistically.

With the help of the roughness measuring it could be shown that it does not come to any uniform change in the examined roughness parameters during the spark erosive process at all examined material samples. In dependence of the used exit alloying and adjusting parameters of the spark erosion machine EDM 2000 and the technical successor EDM 2005 suggested for the respective alloying by the manufacturer these different changes in surface morphology are reached. The erosion can smooth the surface of the finished workpiece in its surface structure so that a more slippery surface than after the tooth technical cast arises. However, the surface can get rougher also altogether.

Further you could point, that it at the spark erosion only to one not take down from material at the highest profile structures of the surface comes, but that the erosion intrudes on the material of the finished superstructures more deeply. It be material amount pulled out from the material structure with an explosive character.

With the help of the energy dispersive x-ray spectrometry traces could be detected by aluminium and silicon in the surface at all examined samples before the erosion. These pollutions were after the erosion of the surface, causes emitting the one bed mass after the tooth technical cast through been, removed again. An exception insisted at the cobalt chrome alloying where silicon is a component of the exit alloying.

You could point that it comes onto the eroded workpiece at the spark erosion with the used copper model electrodes to a precipitation of the copper. These are traces of elementary copper traceably on all samples independently of the used titanium, gold and cobalt chrome alloying after the erosion. With the sample groups of the two spark erosion machines

EDM 2000 and EDM 2005 the increase was significant in the surface statistically to copper. In grid electron microscopic picture the copper in the energy dispersive on-storage as layer visible.

It could be shown that the spark erosion machine EDM 2005 does not reach any clear changes in the surface quality opposite the predecessor EDM 2000.

This study points that a processing be reached by adjusting parameters differently rough surfaces provided for the respective spark erosion machine for the manufacturer SAE with SAE spark erosion technology into dependence of the used exit alloying and these.

Furthermore this study shows that this causes after-work with SAE spark erosion technology to a significant superficial accumulation of an elementary copper layer in the area of the erosiv after worked areas. This is independent of the finished alloying

8 Literaturverzeichnis

1. **Adell, R., Lekholm, U., Rockler, B., Branemark, P.-I.:**
15-year study of osseointegrated implants.
Int J Oral Surg, 1981; 10, 387-416
2. **Augthun, M., Brauner, A.:**
Antibakterielle Wirkung unterschiedlicher Dentallegierungen auf Keime der oralen Mikroflora in vitro.
Dtsch Zahnärztl Z, 1988; 43, 869-873
3. **Beague, T.P.:**
Galvanic Corrosion of Class II Amalgam Restorations in Contact with Orthodontic Brackets/ Bands.
New York State dent J, 1992; 58, 48-49
4. **Bentheim, H. v., Vahl, J.:**
Korrosionsversuche an Dentallegierungen vor und nach Laserschweißen.
Dtsch Zahnärztl. Z. 1985; 40, 286-289
5. **Best, T.:**
Mikromorphologische Oberflächenanalyse lichtgehärteter Füllungen der Klasse V Kavität.
Med. Diss Charite Berlin, 2004
6. **Buchanan, R. A., Griffin, C. D., Lemons, J. E.:**
In vitro electrochemical corrosion study of coupled surgical implant materials.
J. Biomed. Mater. Res. 1983, 17; 489-500
7. **Brucker Advanced X-Ray Solutions:**
Microanalysis Solutions-Die Quantax Familie.
Brucker AXS, 2006
8. **Carter, R.:**
Electolytic action in the presence of gold crowns placed over amalgam restorations.
Aus. Dent. J.; 1965, 8, 317-319
9. **Chung, K.- H.:**
Effects of finishing and polishing procedures on the surface texture of resin composites.
Dent Mater, 1994; 10, 325-330

10. **Eichner, K.:**
Anwendung von Metall- Legierungen in der Zahnheilkunde – ein Überblick.
ZWR, 1983; 2, 28-36
11. **Eisenmann, E., Mokaberi, A., Walter, M.H., Freesmeyer, W.B.:**
Improving the Fit of Implant-Supported Superstructures Using the Spark
Erosion Technique.
The Int. Jour. of Oral & Maxillofacial Implants, 2004; 6 ,810- 818
12. **Eisenmann, E., Rübeling, G.:**
Die monometallische , spannungsfreie Versorgung auf Implantaten.
Quintessenz Zahntechnik, 1997; 12, 1440-1452
13. **Eisenmann, E., Rübeling, G.:**
The Monometallic, Strain-free Restoration on Implants.
Quintessence of Dental Technology, 1999; 128-138
14. **Fischer, O., Rübeling, G.:**
Herstellung einer implantatgetragenen herausnehmbaren Brücke mittels
Funkenerosion.
Quintessenz Zahntechnik, 1989; 15, 1139-2014
15. **Freesmeyer, W. B., Ebersbach, O. W., Lindemann, W., Hüttemann, H.:**
Schleimhautverfärbungen nach Versorgung mit Kronen und Brücken.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1986; 41, 464-467
16. **Frauenhofer, J.A., Staheli, P.J.:**
Gold-amalgam galvanic cells.
British dent J, 1972; 132,357-362
17. **Gasser, Künzl, Hennig:**
Metall im Mund.
Quintessenz Bibliothek, 1984
18. **Geis-Gerstorfer, J., Sauer, K.-H., Weber, H.:**
In-vitro Korrosionsuntersuchungen zum Massenverlust von
Nichtedelmetallegierungen.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1986; 41, 519-524
19. **Geis-Gerstorfer, J., Sauer, K.-H., Weber, H.:**
In Vitro Substance Loss Due to Galvanic Corrosion in Ti Implant/ Ni-Cr.
Supraconstruction Systems.
Int. J. Oral Maxillofac Impl. 1989; 4, 119-123

- 20. Grimm, W., Georgi, K., Knak, G.:**
Mikrobiell bedingte Plaqueakkumulation an verschiedenen
Dentalwerkstoffen.
Die Quintessenz, 1989; 6, 1133-1141
- 21. Heimrath, S.:**
Zytotoxikologische Untersuchung an vierzehn Metallen unter besonderer
Berücksichtigung des Cu- und Pd- Gehaltes mit Hilfe zweier verschiedener
Testmethoden und der ICP- Analyse.
Med Diss FU Berlin, 1994
- 22. Herrmann, D.:**
Allergie auf zahnärztliche Werkstoffe, Sonderdruck aus Fortschritte der
zahnärztlichen Prothetik und Werkstoffkunde, Band 4.
Carl Hanser Verlag München, Wien, 1989
- 23. Herrmann, D.:**
Unerwünschte Einflüsse durch zahnärztliche Werkstoffe.
Zahnärztliche Werkstoffkunde und ihre Verarbeitung Band 2, 1985; 9-19
- 24. Herrmann, D.:**
Allergie und Zahnheilkunde aus zahnärztlicher Sicht.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1985; 40, 358-363
- 25. Hoffmann, Hielscher:**
Lehrbuch der Zahntechnik. Band 3.
Quintessenz
- 26. Hondrum, S. O., Fernandez, R.:**
Contouring, Finishing, and Polishing Class 5 Restorative Materials.
Operative Den., 1997; 22, 30-36
- 27. Hopp, M.:**
Freunde der Funkererosion in Italien.
Quintessenz Zahntechnik, 2001; 10, 1205-1207
- 28. Hummel, Ch., Homa, M., Stachniss, V.:**
Funkerosive Passungskorrektur von Gussobjekten , insbesondere
Teilkronen.
Zahnärztl. Mitteilungen, 1987; 21, 2410-2414

29. **Joniot, S. B., Gregoire, G. L., Auther, A. M., Roques, Y. M.:**
Three-Dimensional Optical Profilometry Analysis of Surface States Obtained After Finishing Sequences of Three Composite Resins.
Operative Den., 2000; 25, 311-315
30. **Kaplan, B., Goldstein, G., Vijayaraghavan, T., Nelson, I.:**
The effect of three polishing systems on the surface roughness of four hybrid composites: A profilometric and scanning electron microscopy study.
J. Prosthet. Dent., 1986; 1, 34-38
31. **Kappert, H. F., Ulbrich, J. Gläß, P., Huber, H., Neumüller, H.:**
Schwellenwertbestimmung für die Auslösung sensibler Reaktionen durch galvanische Potentiale in der Mundhöhle.
Dtsch Zahnärztl Z, 1989; 44, 50-52
32. **Kawahra, H., Yamagami, A., Nakamura, M.:**
Biological testing of dental materials by means of tissue culture.
Int Dent J, 1968; 18, 443-467
33. **Klaschka, F., Galandi, M.E:**
Allergie und Zahnheilkunde aus dermatologischer Sicht.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1985; 40, 364-371
34. **Klötzer, W. T., Reuling, N.:**
Biokompatibilität zahnärztlicher Materialien: Teil II. Materialien mit Schleimhautkontakt.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1990; 45, 437-442
35. **Klötzer, W. T.:**
Grenzen der Biokompatibilitätstestung zahnärztlicher Materialien in der Zellkultur.
Quintessenz, 1988; 12, 2147-2156
36. **Klötzer, W.T.:**
Welche Risiken bestehen bei der Verwendung neuartiger Legierungen.
Quintessenz. 1986; 9, 1519-1531
37. **Klötzer, W.:**
Biologische Aspekte der Korrosion.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1985; 40, 1141-1145

38. **Kollmannsperger, P.:**
Untersuchung der Diffusionszone gelöteter Edelmetall und Nichtelegierungen.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1986; 41, 253-258
39. **Körber, E., Lindemann, W., Pielsticker, W.:**
Herstellung einer Metallhülsekrone aus Vollmaterial mit Hilfe der Funkenerosion.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1986; 41, 525-526
40. **Körber, E., Lindemann, W.:**
Neue Technologie zur Herstellung von festsitzendem Zahnersatz.
Zahnärztl. Mitteilungen. 1987; 21, 2406-2409
41. **Kratzenstein, B., Koppenburg, P., Sauer, K.-H., Geis-Gerstorfer, J., Weber, H.:**
Speichelanalyse kieferorthopädischer Patienten zum Nachweis gelöster metallischer Bestandteile.
Die Quintessenz, 1988; 4, 693-703
42. **Kratzenstein, B., Sauer, K.-H., Weber, H.:**
In-vivo Korrosionserscheinungen von gegossenen Restaurationen und deren Wechselwirkungen mit der Mundhöhle.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1988; 43, 343-348
43. **Kratzenstein, B., Sauer, K.-H., Weber, H., Geis-Gerstorfer, J.:**
In-vivo-Korrosionsuntersuchungen goldhaltiger Legierungen.
Dtsch Zahnärztl. Z. 1986; 41: 1272-1276
44. **Kratzenstein, B., Weber, H., Geis-Gerstorfer, Koppenburg, P.:**
In-vivo-Korrosionsuntersuchungen an kieferorthopädischen Apparaten.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1985; 40, 1146-1150
45. **Krekler, G., Kappert, H., Pelz, K., Graml, B.:**
Die Affinität der Plaque zu verschiedenen Werkstoffen.
Schweiz. Mschr. Zahnmed., 1984; 7, 647-651
46. **Lain, E. S., Schriever, W. Caughorn, G. S.:**
Problem of electrogalvanism in the oral cavity caused by dissimilar dental materials.
J. Am. Dent. Assoc, 1940; 27, 1765-1772

47. **Leistner, M.:**
Korrodiert die zervikale Amalgamfüllung an der Goldkrone.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1986; 761-764
48. **Marigo, L., Rizzi, M., La Torre, G., Rumi, G.:**
3-D Surface Profile Analysis: Different Finishing Methods for
Design Composites.
Operative Den., 2001; 26, 562-568
49. **Mears, C.:**
The Use of Dissimilar Metals in Surgery.
J. Biomed. Mater Res. 1975, 16; 133-148
50. **Meiners, H., Lehmann, K.M.:**
Klinische Materialkunde für Zahnärzte.
Carl Hanser Verlag, 1998
51. **Mierau, H.:**
Beziehung zwischen Plaquebildung, Rauigkeit der Zahnoberfläche und
Selbstreinigung
Dtsch. Zahnärztliche Z. 1984; 39, 691- 698
52. **Mokabberi A., Freesmeyer W.B., Eisenmann E., Walter M., Böning, K.:**
Untersuchung zur Verbesserung des passiven Sitzes der
implantatgetragenen Suprastrukturen mit Hilfe der Funkenerosion.
Med Diss FU Berlin, 2002
53. **Oel-Held:**
Wissenswertes zur Senkerosion
Oel-Held GmbH, Stuttgart, 1996
54. **Patyk, A.J., Ohm, H.:**
Die Wirkung von fluoridhaltigen Prophylaxemitteln auf Titanoberflächen.
Dtsch Zahnärztl Z, 1997; 52, 364-367
55. **Pröbster, L., Bachmann, R., Weber, H.:**
Custom-made resin-bonded attachment supporting a removable partial
denture using the spark erosion technique: a case report.
Quintessence International, 1991; 5, 349-354

56. **Rabe, U., Pantke, H.:**
Die Erfassung der Oberflächenverhältnisse biologischer Objekte mit charakteristischen Messzahlen.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1982; 37, 869-873
57. **Ravnholt, G., Jensen, J.:**
Corrosion investigation of two materials for implant supraconstructions coupled to a titanium implant.
Scan. J. Dent. Res., 1991; 181-186
58. **Ravnholt, G.:**
Corrosion current and ph rise around titanium coupled to dental alloys.
Scan. J. Dent. Res. 1988 ; 466-472
59. **Reppel, P.-D.:**
Gefügeveränderungen einer hochgoldhaltigen Aufbrennlegierung durch der Brennvorgang.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1986; 41, 259-263
60. **Reppel, P.:**
Untersuchungen von Verfärbungen an hochgoldhaltigen Legierungen im Rasterelektronenmikroskop.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1985; 40, 1155-1159
61. **Romero, G., Engelmeier, R., Powers, J., Canterbury, A.:**
Accuracy of three corrective techniques for imlantat bar fabrication.
The Journal Of Prosthetic Dentistry, 2000; 84, 602-607
62. **Rübeling, G., Freesmeyer, W. B., Eisenmann, E., Stiller, M., Klar, A., Popall, K.:**
Qualitätssicherung interdisziplinärer Zusammenarbeit am Beispiel zahnloser und teilbezogener Patienten.
Quintessenz Zahntechnik, 2002; 10, 1114-1137
63. **Rübeling, G.:**
New techniques in spark erosion: The solution to an accurately fitting screw retained implant restoration.
Quintessenz International, 1999; 1, 38-48
64. **Rübeling, G., Kreylos, H.-A.:**
Einsatz der Funkenerosion zur Montage von Friktionsstiften.
Quintessenz der Zahntechnik, 1985; 11, 1204-1213

65. **Rübeling, G., Kreylos, H.-A.:**
Einsatz der Funkenerosion zur Montage eines Verblockungsgeschiebes.
Quintessenz der Zahntechnik, 1985; 12, 1363- 1367
66. **Rübeling, G., Kreylos, H.-A.:**
Einsatz der Funkenerosion zur Montage eines Präzisions-T-Geschiebes.
Quintessenz der Zahntechnik, 1984; 11, 1223- 1228
67. **Rübeling, G., Kreylos, H.-A.:**
Montage eines Steckriegels mit Hilfe der Funkenerosion.
Quintessenz der Zahntechnik, 1984; 10, 1107-1113
68. **Rübeling, G.:**
Funkenerosion in der Zahntechnik- Möglichkeiten und Grenzen.
dental-labor, 1982; 12, 1697-1702
69. **Rump, I., Schulte, A.:**
Oberflächenrauheit von Zahnhartsubstanz und Restaurationen nach
Reinigung mit einem Wasser-Pulverstrahlgerät.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 2002; 57, 345-348
70. **SAE-Produkt-Katalog:**
SAE Dental Vertriebs GmbH. Bremerhaven, 2005
71. **Schierbock, P., Weckerle, D.:**
Erodiertechnik.
Soester Fachbuchverlag GmbH, 1998
72. **Schwickerath, H., Merk, H.F.:**
Ergebnisse des Epikutan-Testes mit verschiedenen Legierungen.
Dtsch Zahnärztl Z, 1986; 41, 1253-1256
73. **Schwickerath, H.:**
Zur Löslichkeit von Dentallegierungen.
Dtsch Zahnärztl Z, 1988; 43, 339-342
74. **Schwickerath, H.:**
Verträglichkeit von Dentallegierungen unter besonderer
Berücksichtigung „alternativer“ Verfahren zur Diagnostik -
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben.
Deutscher Ärzte-Verlag Köln, 1989

- 75. Sectos, J., Tarim, B., Suzuki, S.:**
Surface finish produced on resin composite by new polishing systems.
Quintessenz international, 1999; 3, 169-173
- 76. Siebert, G.K.:**
Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik.
Carl Hanser Verlag München Wien, 1989
- 77. Siebert, G.K.:**
Dentallegierungen in der Zahnärztlichen Prothetik-Technologie
Klinik- Biokompatibilität.
Carl Hansa Verlag, 1989
- 78. Steinemann, S.G.:**
Titan als Werkstoff in der Zahnmedizin, Teil 1:
Korrosion und Gewebereaktion.
Quintessenz, 1996; 7, 961-970
- 79. Steinmann, S. G.:**
Titan als Werkstoff der Chirurgie und Zahnmedizin, Teil 2:
Korrosion und Hydrolyse der Reaktionsprodukte.
Quintessenz, 1996; 47, 1107-1115
- 80. Striezel, R.:**
Korrosion aus Sicht des Zahntechnikers.
dental-labor, 1994; 9, 1237-1239
- 81. Sullivan., D. Y., Rübeling, G.:**
Neue Wege in der Präzisionspassung: die Problemlösung zur sicheren
Präzisionspassung.
Dental-labor, 1997; 2
- 82. Toljanic, J.A., Antonius, D., Clark, S., Graham, L.:**
A longitudinal assesment of spark erosion technology in implantretained
overdenture protheses: A preliminary report.
J Prosthet Dent, 1997; 5, 490-495
- 83. Vetter, C.:**
Gestörter Kupferhaushalt und seine Folgen.
Zahnärztlich M., 2006; 7, 60-62

84. **Waki, E.:**
Potential difference between various kinds of metals applied in the oral cavity and their physiological effects.
J. Am. Dent. Assoc., 1936; 23, 1000-1006
85. **Weber, H., Sauer, K.-H., Paulssen, W.:**
In-vivo-Korrosionsuntersuchungen an edelmetallfreien Legierungen.
Dtsch. Zahnärztl. Z., 1985; 40, 838-841
86. **Weber, H., Frank, G., Diehl, J., Geis-Gerstendorfer, J.:**
Klinik der Funkenerosionstechnik: Kombiniert
feststzender/herausnehmbarer Zahnersatz aus Nichtedelmetall.
Zahnärztl. Mitteilungen, 1988; 17, Sonderdruck
87. **Weber, H., Frank, G., Diehl, J., Geis-Gerstorfer, J.:**
Kombiniert feststehend/ herausnehmbarer Zahnersatz aus Nichtedelmetall.
Zahnärztl. Mitteilungen, 1988; 17, 1879-1884
88. **Weikart, P.:**
Korrosion und Verfärbungen von Goldlegierungen.
Dtsch Zahnärztl. Z. 1960;15, 1417-1427
89. **Wirz, J., Dillena, P., Schmidli, F.:**
Metalle im Speichel.
Quintessenz 1992; 42, 869-874
90. **Wirz, J., Rateitschak, E., Schmidli, F.:**
Werkstoffbedingte Gingivaentzündungen.
Quintessenz 1987; 38, 1903-1909
91. **Wirz, J.:**
Klinische Material und Werkstoffkunde.
Quintessenz Verlags GmbH, Berlin, 1993
92. **Wirz, J., Amberg, A., Schmidli, F.:**
Polierbarkeit nichtmetallischer Werkstoffe.
Quintessenz, 1993; 44, 1685-1695
93. **Wirz, J., Schmidli, F.:**
Ein Mißerfolg Teil II: Klinische Lösung.
Quintessenz, 1991;9, 1475-1479

94. **Wirz, J., Schmidli, F.:**
Ein Mißerfolg Teil I: Mögliche Ursachen.
Quintessenz, 1991;8, 1319-1326
95. **Wirz, J.:**
Oberflächenbeschaffenheit von Kronenstümpfen und Implantat-Pfeilern.
Quintessenz, 1987; 12, 2069-2076
96. **Wirz, J.:**
Klinische Material- und Werkstoffkunde.
Quintessenz Verlags-GmbH, 1993

9 Anhang

9.1 Tabellenanhang

9.1.1 Messergebnisse der Rauigkeitsmessungen aller Suprastrukturen vor und nach Funkenerosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005

	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messung in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1 a α	1,029	6,121	5,676	2,719	2,957
1 b α	0,923	5,059	4,954	1,799	3,155
2 a α	0,996	5,521	5,210	2,315	2,895
2 b α	1,023	4,620	4,460	1,791	2,669
3 a α	0,851	5,415	4,697	1,864	2,833
3 b α	1,166	7,133	6,651	3,167	3,484
4 a α	1,365	8,762	7,253	2,731	4,522
4 b α	0,735	5,439	4,799	2,489	2,310
5 a α	1,268	6,043	5,842	3,038	2,804
5 b α	0,930	6,569	5,417	2,253	3,163
6 a α	1,051	5,505	5,089	2,470	2,619
6 b α	0,512	2,412	2,352	0,949	1,403
EDM 2000					
1 a β	0,875	5,070	4,235	1,667	2,569
1 b β	1,256	8,206	6,685	2,505	4,179
2 a β	1,118	5,880	5,340	2,135	3,205
2 b β	0,923	5,911	5,158	2,973	2,185
3 a β	1,148	7,651	5,832	2,631	3,201
3 b β	0,667	4,410	3,887	1,607	2,280
4 a β	0,885	6,206	5,443	2,476	2,967
4 b β	0,997	5,152	4,980	2,348	2,632
5 a β	0,799	4,136	3,926	1,904	2,022
5 b β	1,213	6,363	5,922	2,440	3,482
6 a β	0,911	5,338	4,872	1,889	2,984
6 b β	1,099	6,981	5,883	2,348	3,534
EDM 2005					

Tabelle 9-1: Rauigkeitsmessungen Titan vor Funkenerosion, alle Angaben in μm

	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messung in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1 a α	0,739	4,169	4,144	2,172	1,971
1 b α	0,794	5,310	5,190	2,110	3,081
2 a α	0,696	6,142	5,160	2,264	2,896
2 b α	0,730	4,898	4,683	2,078	2,605
3 a α	0,542	3,507	3,241	1,602	1,639
3 b α	0,692	4,134	3,756	1,636	2,120
4 a α	0,700	5,546	4,661	2,206	2,455
4 b α	0,865	5,923	5,274	2,742	2,532
5 a α	0,589	3,567	3,275	1,397	1,878
5 b α	0,745	4,031	3,874	1,991	1,883
6 a α	0,724	4,414	3,939	2,090	1,849
6 b α	0,669	3,543	3,498	1,816	1,682
EDM 2000					
1 a β	0,642	5,040	4,364	1,823	2,541
1 b β	1,006	6,040	5,378	2,433	2,945
2 a β	0,745	6,199	5,167	1,722	3,445
2 b β	0,875	5,932	5,292	2,771	2,520
3 a β	0,827	6,939	5,395	2,504	2,891
3 b β	1,689	9,867	8,391	3,424	4,967
4 a β	0,574	5,567	4,204	1,416	2,788
4 b β	1,291	7,351	6,986	2,757	4,229
5 a β	0,564	5,507	4,318	1,494	2,825
5 b β	0,905	5,173	5,120	2,056	3,064
6 a β	0,498	3,597	3,386	1,635	1,751
6 b β	0,641	5,139	4,844	1,768	3,077
EDM 2005					

Tabelle 9-2: Rauigkeitsmessungen Titan nach Funkenerosion, alle Angaben in μm

	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messung in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1 a α	0,468	3,003	2,604	1,333	1,271
1 b α	0,578	3,020	2,812	1,800	1,012
2 a α	0,549	3,411	2,913	1,541	1,372
2 b α	0,437	2,684	2,522	1,364	1,158
3 a α	0,621	4,508	3,728	2,375	1,352
3 b α	0,550	3,479	3,360	1,853	1,507
4 a α	0,451	2,540	2,510	1,296	1,214
4 b α	0,556	3,110	2,884	1,510	1,374
5 a α	0,537	2,570	2,534	1,370	1,228
5 b α	0,500	3,463	3,130	1,605	1,525
6 a α	0,396	2,586	2,448	1,129	1,319
6 b α	0,491	3,804	3,082	1,752	1,330
EDM 2000					
1 a β	0,686	3,847	3,112	1,813	1,299
1 b β	0,635	3,700	3,388	1,571	1,817
2 a β	0,565	3,289	3,177	1,579	1,599
2 b β	0,458	3,101	2,680	1,448	1,232
3 a β	0,586	3,212	3,056	1,767	1,288
3 b β	0,622	3,571	3,460	1,732	1,728
4 a β	0,648	3,699	3,543	2,284	1,259
4 b β	0,538	2,971	2,892	1,343	1,549
5 a β	0,472	2,897	2,504	1,311	1,193
5 b β	0,637	3,704	3,575	1,972	1,603
6 a β	0,477	3,118	2,928	1,687	1,240
6 b β	0,944	5,995	5,488	2,430	3,058
EDM 2005					

Tabelle 9-3: Rauigkeitsmessungen Gold vor Funkenerosion, alle Angaben in μm

	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messung in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1 a α	0,786	4,900	4,742	2,444	2,298
1 b α	0,776	5,076	4,669	2,125	2,544
2 a α	0,858	5,473	5,460	3,073	2,387
2 b α	0,836	6,196	5,277	2,556	2,721
3 a α	0,759	4,736	4,736	2,601	2,101
3 b α	0,773	5,286	5,286	2,818	2,004
4 a α	0,800	5,168	4,547	2,376	2,171
4 b α	0,832	6,555	6,345	4,484	1,861
5 a α	0,775	4,646	4,541	2,339	2,202
5 b α	0,864	7,554	6,488	3,884	2,605
6 a α	0,877	5,489	4,909	2,665	2,245
6 b α	0,795	6,469	5,313	2,912	2,401
EDM 2000					
1 a β	0,512	3,332	3,299	1,505	1,794
1 b β	0,632	4,278	4,203	1,892	2,311
2 a β	0,602	4,945	4,021	2,010	2,011
2 b β	0,511	3,633	3,535	1,483	2,052
3 a β	0,712	5,762	4,956	2,046	2,910
3 b β	0,724	4,576	4,551	1,746	2,805
4 a β	0,446	3,427	3,242	1,606	1,636
4 b β	0,518	3,459	3,393	1,856	1,537
5 a β	0,447	3,515	3,231	1,683	1,548
5 b β	0,492	4,182	3,377	1,914	1,462
6 a β	0,474	3,268	2,973	1,369	1,604
6 b β	0,473	3,759	3,173	1,570	1,603
EDM 2005					

Tabelle 9-4: Rauigkeitsmessungen Gold nach Funkenerosion, alle Angaben in μm

	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messung in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1 a α	0,505	3,065	2,924	0,987	1,937
1 b α	0,651	3,447	3,148	1,683	1,465
2 a α	0,832	4,886	4,544	1,756	2,788
2 b α	1,119	6,161	5,586	2,021	3,565
3 a α	0,545	3,467	3,417	1,258	2,160
3 b α	0,538	3,069	2,994	1,385	1,609
4 a α	0,670	4,740	4,541	1,961	2,580
4 b α	1,537	8,932	8,170	4,651	3,519
5 a α	0,821	5,448	4,808	2,286	2,521
5 b α	0,548	3,058	3,057	1,419	1,638
6 a α	0,940	6,536	5,717	2,397	3,319
6 b α	0,700	4,924	4,294	1,631	2,663
EDM 2000					
1 a β	0,933	4,931	4,606	2,311	2,295
1 b β	0,658	5,271	4,106	1,657	2,431
2 a β	0,458	3,429	2,952	1,495	1,457
2 b β	0,820	7,922	5,994	2,739	3,254
3 a β	0,547	3,269	3,089	1,510	1,579
3 b β	0,661	4,067	3,865	1,741	2,124
4 a β	0,530	3,595	2,980	1,264	1,716
4 b β	0,809	4,526	4,148	1,853	2,295
5 a β	0,444	2,886	2,755	1,293	1,462
5 b β	0,873	5,582	4,591	2,443	2,148
6 a β	0,454	2,705	2,442	0,996	1,446
6 b β	0,599	3,475	3,365	1,543	1,823
EDM 2005					

Tabelle 9-5: Rauigkeitsmessungen Kobalt- Chrom vor Funkenerosion, alle Angaben in μm

	Mittenrauwert	Rautiefe		Glättungstiefe	
Messung in μm	Ra	Rmax	Rz	Rp	Rv
1 a α	0,516	4,040	3,744	1,521	2,224
1 b α	0,541	3,745	3,689	1,685	2,004
2 a α	0,787	5,263	5,170	2,504	2,665
2 b α	0,985	6,166	5,916	2,256	3,660
3 a α	0,932	5,506	5,448	2,834	2,613
3 b α	0,886	5,563	4,801	2,354	2,447
4 a α	1,046	6,643	6,320	3,082	3,238
4 b α	0,699	5,134	4,032	1,967	2,065
5 a α	0,640	4,685	3,898	1,959	1,939
5 b α	1,059	5,744	5,608	2,235	3,375
6 a α	0,857	5,519	5,223	3,176	2,047
6 b α	0,874	5,153	4,690	1,927	2,763
EDM 2000					
1 a β	0,874	5,744	5,744	2,407	2,333
1 b β	0,846	4,948	4,948	2,491	1,997
2 a β	0,817	5,976	5,180	2,390	2,841
2 b β	0,712	4,331	4,230	1,740	2,490
3 a β	1,020	6,540	5,497	2,156	3,341
3 b β	0,787	4,462	4,360	2,081	2,279
4 a β	0,592	4,196	3,430	1,548	1,882
4 b β	0,950	5,442	4,820	1,988	2,832
5 a β	0,659	4,860	4,715	1,986	2,747
5 b β	0,745	5,158	4,183	1,681	2,502
6 a β	0,830	4,531	4,372	1,850	2,522
6 b β	0,844	4,606	4,048	2,098	1,950
EDM 2005					

Tabelle 9-6: Rauigkeitsmessungen Kobalt- Chrom nach Funkenerosion, alle Angaben in μm

9.1.2 Messergebnisse der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse aller Suprastrukturen vor und nach Funkenerosion mit der Funkenerosionsmaschine EDM 2000 und EDM 2005

Messung	Element		
	Ti	Al	Si
1 a α	73,28	24,17	2,54
1 b α	79,60	18,51	1,89
2 a α	77,71	19,95	2,34
2 b α	85,98	12,43	1,59
3 a α	85,42	13,23	1,34
3 b α	71,41	25,90	2,70
4 a α	80,12	17,65	2,23
4 b α	79,23	18,12	2,65
5 a α	85,99	12,06	1,95
5 b α	75,44	21,84	2,72
6 a α	83,74	13,82	2,44
6 b α	78,32	18,91	2,77
EDM 2000			
1 a β	86,36	11,60	2,04
1 b β	85,70	12,45	1,85
2 a β	89,05	9,78	1,17
2 b β	87,47	11,03	1,49
3 a β	77,83	19,68	2,49
3 b β	86,13	12,24	1,63
4 a β	78,32	19,28	2,40
4 b β	88,74	9,19	2,06
5 a β	77,95	19,64	2,40
5 b β	86,37	11,74	1,88
6 a β	73,72	22,97	3,32
6 b β	84,68	13,19	2,13
EDM 2005			

Tabelle 9-7: EDAX Analyse der Titan Suprastrukturen vor Funkenerosion, alle Angaben in %

Messung	Element	
	Ti	Cu
1 a α	92,18	7,82
1 b α	93,06	6,94
2 a α	93,29	6,71
2 b α	92,78	7,22
3 a α	93,73	6,27
3 b α	93,72	6,28
4 a α	92,52	7,48
4 b α	92,44	7,56
5 a α	93,16	6,84
5 b α	93,33	6,67
6 a α	93,55	6,45
6 b α	92,83	7,17
EDM 2000		
1 a β	93,67	6,33
1 b β	94,70	5,30
2 a β	94,98	5,02
2 b β	96,49	3,51
3 a β	96,12	3,88
3 b β	94,28	5,72
4 a β	92,29	7,71
4 b β	94,23	5,77
5 a β	94,87	5,13
5 b β	94,82	5,18
6 a β	92,87	7,13
6 b β	90,34	9,16
EDM 2005		

Tabelle 9-8: EDAX Analyse der Titan Suprastrukturen nach Funkenerosion, alle Angaben in %

	Element						
Messung	Au	Pt	Ag	Si	Cu	In	Al
1 a α	75,49	6,04	8,87	3,33	3,81	1,19	0,78
1 b α	72,42	6,15	9,99	3,74	3,49	2,84	1,38
2 a α	72,43	6,22	10,45	3,39	3,30	2,77	1,45
2 b α	74,46	5,16	9,71	4,19	3,61	2,21	0,67
3 a α	71,66	6,73	9,64	3,91	3,73	2,60	1,72
3 b α	71,17	6,09	10,31	4,35	3,80	2,88	1,39
4 a α	72,27	6,75	8,97	4,29	3,38	3,38	0,97
4 b α	71,64	6,84	9,45	4,28	3,45	3,01	1,33
5 a α	72,81	6,95	9,65	3,31	3,65	2,49	1,14
5 b α	73,15	5,28	10,16	3,70	3,40	3,45	0,85
6 a α	71,50	5,92	10,42	4,03	3,63	2,66	1,84
6 b α	74,37	5,88	8,74	3,54	3,90	2,68	0,89
EDM 2000							
1 a β	74,59	6,27	9,23	3,46	3,70	1,94	0,81
1 b β	73,39	5,71	9,47	3,65	3,83	2,77	1,18
2 a β	73,01	5,75	9,89	3,75	3,58	2,71	1,31
2 b β	72,83	6,39	9,34	4,06	3,55	2,81	1,01
3 a β	74,61	5,58	8,98	3,74	3,73	2,37	0,98
3 b β	73,68	6,73	9,56	3,22	3,37	2,31	1,13
4 a β	74,98	4,56	9,44	3,58	3,92	2,09	1,44
4 b β	74,36	6,25	9,33	3,22	3,48	2,33	1,04
5 a β	74,66	6,16	8,52	3,94	3,76	2,02	0,94
5 b β	72,77	5,41	9,74	4,31	3,34	2,80	1,63
6 a β	71,35	5,65	10,00	4,47	3,62	2,98	1,95
6 b β	73,09	6,98	9,95	3,51	3,32	2,69	0,94
EDM 2005							

Tabelle 9-9: EDAX Analyse der Gold Suprastrukturen vor Funkenerosion, alle Angaben in %

Messung	Element					
	Au	Pt	Ag	Cu	In	Zn
1 a α	73,27	8,80	7,83	6,06	1,59	2,45
1 b α	73,74	8,76	8,29	5,57	1,60	2,05
2 a α	72,35	11,22	8,05	4,69	1,70	2,00
2 b α	72,97	9,48	7,97	5,76	1,40	2,43
3 a α	73,25	9,29	8,13	5,66	1,38	2,29
3 b α	73,34	9,76	8,09	5,39	1,39	2,04
4 a α	72,74	10,17	8,10	5,35	1,70	1,95
4 b α	73,13	9,35	7,99	5,69	1,60	2,24
5 a α	72,70	9,66	8,11	5,66	1,70	2,17
5 b α	73,00	9,49	8,30	5,51	1,58	2,12
6 a α	73,08	9,74	8,13	5,48	1,59	1,98
6 b α	73,59	9,20	8,08	5,55	1,40	2,18
EDM 2000						
1 a β	73,28	9,75	8,09	5,44	1,37	2,07
1 b β	73,82	8,86	7,76	5,85	1,53	2,19
2 a β	73,17	9,43	8,03	5,62	1,53	2,22
2 b β	73,62	8,99	7,85	5,67	1,43	2,44
3 a β	72,41	9,81	7,85	6,34	1,30	2,28
3 b β	72,93	8,85	8,01	6,67	1,44	2,10
4 a β	73,29	9,97	7,27	6,01	1,57	1,89
4 b β	73,26	9,83	7,39	6,36	1,28	1,89
5 a β	73,34	10,21	7,48	5,64	1,61	1,72
5 b β	73,63	9,89	7,53	5,72	1,35	1,88
6 a β	72,94	10,75	7,69	5,39	1,38	1,85
6 b β	73,87	8,92	7,50	6,26	1,36	2,08
EDM 2005						

Tabelle 9-10: EDAX Analyse der Gold Suprastrukturen nach Funkenerosion, alle Angaben in %

	Element					
Messung	Co	Cr	Mo	Al	Si	Mn
1 a α	52,72	25,82	4,21	14,35	1,88	1,01
1 b α	50,03	27,71	6,20	13,21	1,81	1,03
2 a α	53,43	25,83	4,72	13,20	1,82	0,99
2 b α	50,99	27,23	5,04	13,97	1,68	1,09
3 a α	53,17	26,68	4,71	12,84	1,81	0,79
3 b α	51,83	27,04	4,02	15,21	0,81	1,09
4 a α	53,43	26,31	4,88	12,96	1,50	0,92
4 b α	50,77	26,72	4,50	15,37	1,84	0,81
5 a α	51,69	25,35	4,36	15,66	1,95	0,99
5 b α	49,94	26,80	5,32	14,60	2,25	1,09
6 a α	49,94	27,84	4,93	14,25	2,01	1,03
6 b α	53,28	26,92	4,08	13,47	1,36	0,88
EDM 2000						
1 a β	53,45	26,68	3,97	13,99	0,95	0,97
1 b β	49,98	26,70	5,23	15,40	1,91	0,78
2 a β	50,61	26,23	3,89	16,68	2,01	0,58
2 b β	51,36	26,41	4,66	15,33	1,44	0,80
3 a β	51,79	24,45	4,88	16,50	1,44	0,93
3 b β	52,37	27,95	4,18	13,06	1,41	1,03
4 a β	54,17	26,98	3,61	13,36	1,20	1,20
4 b β	49,52	28,18	7,47	11,74	2,09	0,99
5 a β	54,57	24,84	5,73	12,08	1,63	1,15
5 b β	52,87	27,35	3,94	12,89	2,00	0,96
6 a β	50,28	26,98	4,23	15,32	2,33	0,85
6 b β	53,76	24,79	6,62	12,12	1,76	0,95
EDM 2005						

Tabelle 9-11: EDAX Analyse der NEM Suprastrukturen vor Funkenerosion, alle Angaben in %

Messung	Element					
	Co	Cr	Mo	Si	Mn	Cu
1 a α	55,58	29,44	5,07	0,68	0,59	8,63
1 b α	55,88	29,99	4,66	0,52	0,61	8,34
2 a α	57,78	30,48	5,29	0,66	0,65	5,14
2 b α	57,68	30,61	4,90	0,56	0,71	5,53
3 a α	58,42	31,21	4,89	0,61	0,79	3,97
3 b α	58,24	30,39	5,35	0,71	0,67	4,65
4 a α	56,81	30,93	5,38	0,69	0,78	5,41
4 b α	57,40	30,99	5,42	0,69	0,61	4,89
5 a α	57,67	30,63	5,15	0,68	0,67	5,19
5 b α	57,94	30,10	5,13	0,63	0,77	5,43
6 a α	57,37	30,99	5,04	0,58	0,75	5,27
6 b α	57,71	30,85	5,15	0,63	0,73	4,93
EDM 2000						
1 a β	55,01	29,88	4,96	0,65	0,69	8,82
1 b β	56,19	29,63	4,73	0,62	0,76	8,06
2 a β	55,94	30,20	5,11	0,62	0,84	7,30
2 b β	57,18	30,27	4,94	0,61	0,80	6,19
3 a β	57,63	30,44	5,20	0,69	0,68	5,36
3 b β	57,79	30,66	5,21	0,65	0,78	4,91
4 a β	56,18	30,14	4,75	0,66	0,76	7,51
4 b β	56,78	29,76	4,61	0,63	0,72	7,50
5 a β	56,15	30,07	4,82	0,59	0,65	7,73
5 b β	56,31	29,90	4,97	0,72	0,60	7,50
6 a β	56,74	30,20	4,84	0,64	0,69	6,89
6 b β	56,15	29,86	4,86	0,66	0,67	6,15
EDM 2005						

Tabelle 9-12: EDAX Analyse der NEM Suprastrukturen nach Funkenerosion, alle Angaben in %

9.2 Verwendete Geräte und Materialien beim zahntechnischen Ablauf

9.2.1 Geräteverzeichnis

Gerät/ Werkzeug	Hersteller	Vertrieb
SAE- Funkenerosionsgerät EDM 2000 UND EDM 2005, Melotte, Kupferlitze, Zentrierbuchse	SAE Vertriebs GmbH International Langener Landstr.173 27580 Bremerhaven	SAE Vertriebs GmbH International Langener Landstr.173 27580 Bremerhaven
Tiegelschleuder TS 3	Degussa AG Postfach 1364 Hanau	Degussa AG Postfach 1364 Hanau
Biotan- Vacuumdruckgussgerät	Schütz Dental GmbH Dieselstr. 5-6 61186 Rosbach	Schütz Dental GmbH Dieselstr. 5-6 61186 Rosbach
Phoenix Alpa Grinder Polisher	Buehler GmbH In der Steele 2 40599 Düsseldorf	Buehler GmbH In der Steele 2 40599 Düsseldorf
Isomet Low Speed Saw	Buehler GmbH In der Steele 2 40599 Düsseldorf	Buehler GmbH In der Steele 2 40599 Düsseldorf

Tabelle 9-13: Geräteverzeichnis

9.2.2 Verwendete Materialien

Material	Hersteller	Vertrieb
Ankylos Standard-Laborteile 1. Implantatelektrode 2. Kunststoffzylinder	SAE Vertriebs GmbH International Langener Landstr.173 27580 Bremerhaven	SAE Vertriebs GmbH International Langener Landstr.173 27580 Bremerhaven
Titan Biotan	Schütz Dental GmbH Dieselstr. 5-6 61186 Rosbach	Schütz Dental GmbH Dieselstr. 5-6 61186 Rosbach
Okta C Legierung CoCrMo	SAE Vertriebs GmbH International Langener Landstr.173 27580 Bremerhaven	SAE Vertriebs GmbH International Langener Landstr.173 27580 Bremerhaven
Bio-RD-1 Legierung Au	SAE Vertriebs GmbH International Langener Landstr.173 27580 Bremerhaven	SAE Vertriebs GmbH International Langener Landstr.173 27580 Bremerhaven
Wachsdraht auf Rollen 3 mm Durchmesser	Orbis-Dental GmbH 63067 Offenbach	Multident GmbH & Co. Friedrichstr. 106c 10117 Berlin
Brennspiritus	AVG Chemie GmbH Kurfürstendamm 119 10711 Berlin	OBI Heimwerkermarkt
K+B Einbettmasse MG- Einbettmasse Vlies	Schütz Dental GmbH Dieselstr. 5-6 61186 Rosbach	Schütz Dental GmbH Dieselstr. 5-6 61186 Rosbach
Eurocast-Einbettmasse	Saure-Dentale Einkaufsgesellschaft in Brandenburg 15732 Eichwalde	Saure-Dentale Einkaufsgesellschaft in Brandenburg 15732 Eichwalde

Material	Hersteller	Vertrieb
EPO PLAST Einbettmasse für die Metallografie	Buehler GmbH In der Steele 2 40599 Düsseldorf	Buehler GmbH In der Steele 2 40599 Düsseldorf
Nass-Schleifpapier	Buehler GmbH In der Steele 2 40599 Düsseldorf	Buehler GmbH In der Steele 2 40599 Düsseldorf
Strahlmittel	Adolf Würth GmbH Reinhold-Würth Str. 12-17 74653 Künzelsau Gaisbach	Adolf Würth GmbH Reinhold-Würth Str. 12-17 74653 Künzelsau Gaisbach
Pattern Resin	GC-Corporation Toyo Japan	Multident GmbH&Co. Friedrichstr. 106c 10117 Berlin
Spezial-Superhartgips- grün	Giulini Chemie GmbH Giulinistr. 2 Ludwigshafen	SAE Vertriebs GmbH International Langener Landstr.173 27580 Bremerhaven

Tabelle 9-14: Verwendete Materialien

Danksagung

Herrn Prof. Dr. W. B. Freesmeyer möchte ich meinen herzlichen Dank für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas und die Unterstützung bei der vorliegenden Arbeit aussprechen.

Danken möchte ich der Firma Mahr in Göttingen, besonders Herrn Imke und der Firma Brucker AXS in Berlin, hier besonders Herrn Arndt, für die Beratung und unterstützende Hilfe bei der Durchführung der Rauigkeitsmessungen und der energiedispersiven Mikrostrahlanalyse.

Herrn Dr. Roggensack möchte ich mein großen Dank für die Anleitung zur statistischen Auswertung aussprechen.

Ganz herzlich danke ich Herrn ZTM G. Rübeling und Herrn ZTM A. Klar für die Unterstützung und kostenlose Bereitstellung von Untersuchungsmaterialien sowie den Mitarbeitern vom Rübeling & Klar Dentallabor Berlin für die Unterstützung beim zahntechnischen Ablauf.

Lebenslauf

„Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.“

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Jesco Lorenz Vetter, geb. 10.03.1978 eidesstattlich, die Dissertationsschrift eigenhändig und ohne Hilfe Dritter verfasst zu haben. Die Dissertationsschrift stellt keine Kopie anderer Arbeiten dar.

Die benutzten Hilfsmittel sowie die verwendete Literatur sind vollständig angegeben.

Ort, Datum

Unterschrift