

## 7. Diskussion

Die berechneten Korrosionsgeschwindigkeiten der Tabelle 7.1 sind in Abb.7.1 graphisch dargestellt. Die Kurvenverläufe zeigen deutlich, dass es einen Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung des Elektrolyten, seinem pH – Wert sowie der Korrosionsgeschwindigkeit der getesteten Legierungen gibt.

Tab.7.1 Korrosionsrate der verwendeten Materialien pro Jahr ( mmPY )

Material	Corr Rate gemessen in 1%iger NaCl – Lösung ( mmPY )			Corr Rate gemessen in Coca Cola light ( mmPY )			Corr Rate gemessen in Eistee ( mmPY )		
	Anlieferungs-Zustand	Zustand nach Bearbeitung		Anlieferungs-zustand	Zustand nach Bearbeitung		Anlieferungs-zustand	Zustand nach Bearbeitung	
		MW	Stabw		MW	Stabw		MW	Stabw
<b>Krone</b>	0,1053	0,0393	0,0202	0,1154	0,0962	0,0652	0,1797	0,0656	0,0228
<b>Draht</b>	0,1262	0,3077	0,424	0,4315	0,0988	0,0514	0,0474	0,0396	0,0144
<b>Laser</b>	-	0,4425	0,585	-	0,0677	0,012	-	0,0649	0,0394
<b>Stangenlot</b>	5,7959	2,779	0,349	1,6598	6,3205	3,14	0,206	0,1314	0,0732
<b>Ballot</b>	2,2956	2,961	0,85	1,1586	0,8534	0,182	0,0734	0,1491	0,0632
<b>Hartlot</b>	1,2456	2,2813	0,083	0,1516	0,2761	0,0193	0,1255	0,0952	0,0471

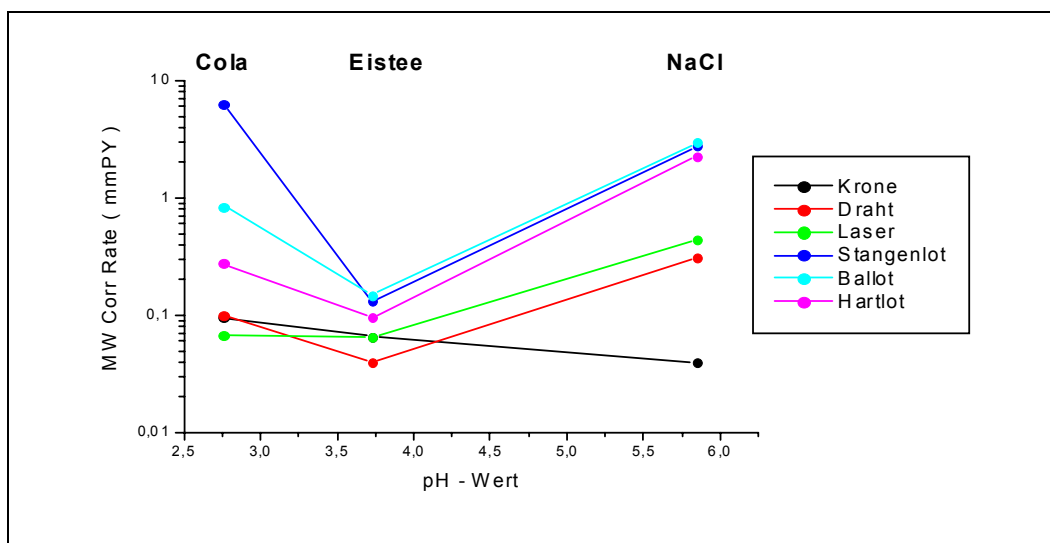


Abb.7.1 Mittlere Korrosionsrate [ Corr Rate ] ( mm/Jahr ) der bearbeiteten Materialien in Abhängigkeit vom pH – Wert ( Coca Cola light: 2,76 ; Eistee: 3,73 ; 1%ige NaCl – Lösung: 5,85 )

Man kann im Vergleich zum Eistee eine deutlich stärkere Korrosion sowohl in 1%iger NaCl – Lösung als auch in Coca Cola light beobachten ( Abb.7.1 ). Grund dafür sind vor allem die leicht löslichen Chlorid – Ionen (  $\text{Cl}^-$  ) der NaCl – Lösung bzw. die Phosphat – Ionen ( bei einem pH – Wert von 2,76 überwiegend  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ) der Coca Cola light. Diese Anionen dringen je nach Qualität der Oxidschicht in diese ein und bilden mit den Metall – Ionen leicht lösliche Metallsalze ( Metallchloride [  $\text{MeCl}_2$  ] bzw. Metaldihydrogenphosphate[  $\text{Me}^1\text{H}_2\text{PO}_4$  ] ). Die Passivschicht und damit der Korrosionsschutz der Legierung werden dadurch zerstört. Des Weiteren bedeutet der niedrige pH – Wert, wie er bei allen drei Elektrolyten vorhanden ist, eine hohe Wasserstoffionen – Konzentration (  $\text{H}^+$  ). Diese stören das Gleichgewicht zwischen der Metall –, Metallionenbildung (  $\text{Me} \leftrightarrow \text{Me}^{z+} + z\text{e}^-$  ), indem sie dem System unter Bildung von Wasser Elektronen entziehen (  $4\text{e}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}_2$  ;  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  ). Auch diese chemische Reaktion fördert die Metallauflösung ( siehe MATERIAL&METHODEN S.39ff ).

In der Abb.7.3 sind die mittleren gemessenen Korrosionsraten der Kronen und Drähte nach der Verbundherstellung sowie aller gelaserten und gelöteten Fugestellen als Säulendiagramme dargestellt. Deutlich sichtbar ist die wesentlich höhere korrosive Aktivität der Lotverbindungen insbesondere in 1%iger NaCl – Lösung aber auch Coca Cola light. Zur genaueren Betrachtung der Krone – Draht – Laserwerte sind diese deshalb in der Abb.7.5 separat dargestellt. Entsprechendes gilt für die Korrosionswerte der Legierungen im Anlieferungszustand ( Abb.7.2, Abb.7.4, Abb.7.16 S.103 ). Auch hier zeigen die fabrikneuen Kronen und Drähte im Vergleich zu den unverarbeiteten Loten eine insgesamt höhere Korrosionsstabilität.

Korrosionsrate aller Materialien im Anlieferungszustand

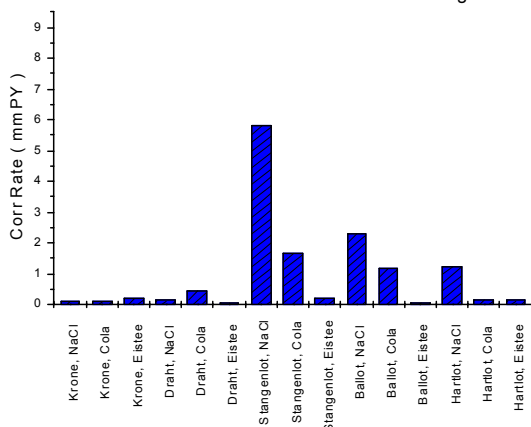


Abb.7.2 Korrosionsrate ( mm/Jahr ) der verwendeten Materialien im Anlieferungszustand

Korrosionsrate aller Materialien nach Bearbeitung

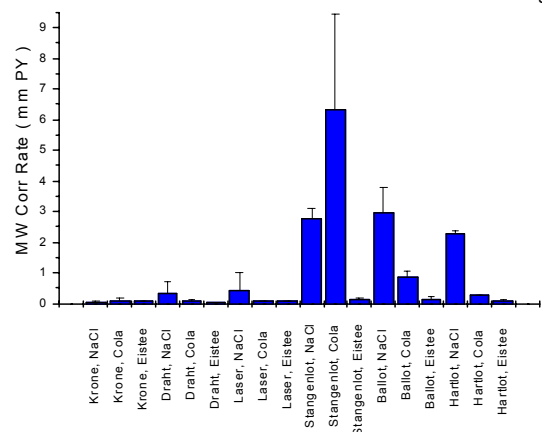


Abb.7.3 Korrosionsrate ( mm/Jahr ) der verwendeten Materialien nach ihrer Verarbeitung

Korrosionsrate von Krone u. Draht im Anlieferungszustand

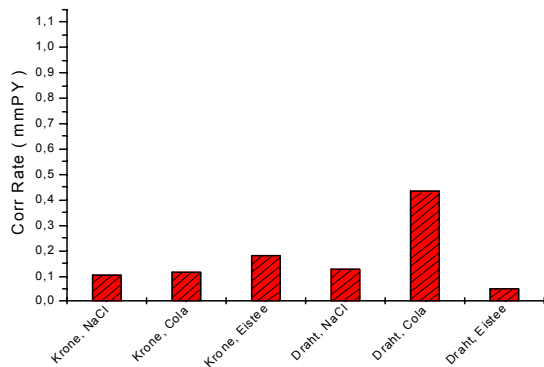


Abb.7.4 Korrosionsrate ( mm/Jahr ) von Krone und Draht im Anlieferungszustand

Korrosionsrate von Krone, Draht, Laser nach Bearbeitung

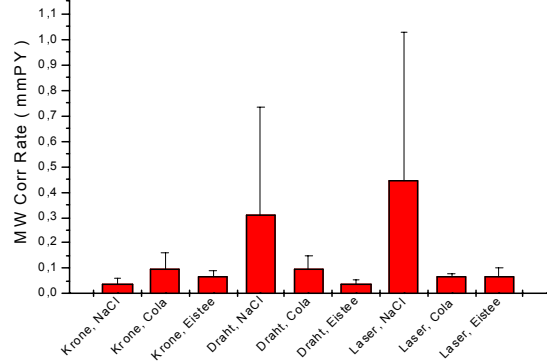


Abb.7.5 Korrosionsrate ( mm/Jahr ) von Krone, Draht und Laser nach ihrer Verarbeitung

Ein Vergleich der Säulendiagramme der Abbildungen 7.4 und 7.5 sowie der Ergebnisse der Tab.7.1 lässt in allen Elektrolyten insgesamt eine Reduktion der Korrosionsraten nach Bearbeitung der Materialien gegenüber dem Anlieferungszustand erkennen.

Bei den zyklischen Messungen von Krone bzw. Draht in Eissee sind die Unterschiede so groß, dass es im Kapitel ERGEBNISSE notwendig ist, zur detailgenaueren Ansicht eine zweite Graphik zu erstellen ( Tab.6.3 und 6.7 ). Grund für die Verbesserung der elektrochemischen Stabilität ist vermutlich die Wärmebehandlung während des Löt – bzw. Schweißvorganges. Nur beim Draht gemessen in 1%iger NaCl – Lösung stellt sich nach der Bearbeitung scheinbar eine Verschlechterung der Korrosionsstabilität ein. Wenn man sich jedoch die dazugehörige

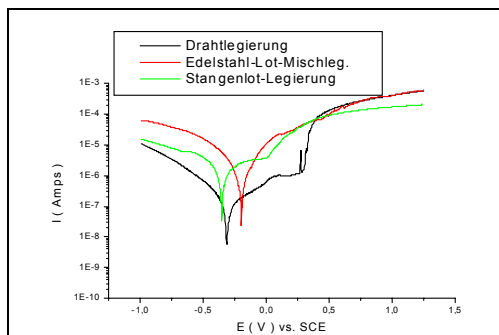


Abb.7.6 Graphische Darstellung von Draht – und Stangenlotleg. im Vergleich zu der auf dem Draht gemessenen Mischleg. ( in 1%iger NaCl – Lösung )

Messreihe genauer ansieht ( Tab.6.7 und 6.9:

Single sweep Voltammetrie ), muss man feststellen, dass die Strom – Spannungs – Daten des zweiten Messpunkts ( 210E1S1 ) deutlich von dem zu erwarteten Kurvenverlauf einer Edelstahloberfläche abweichen. Vielmehr könnte es sich um eine Edelstahl – Stangenlot – Mischlegierung handeln.

In der Abbildung 7.6 sind dieser Messpunkt sowie je eine Beispielkurve für Draht – und Stangenlotlegierung graphisch dargestellt. Lässt man diese zweite Messung außer Acht, ergibt sich eine mittlere Korrosionsrate von 0,0633 mmPY, welche

sich dann ebenfalls unterhalb des Vergleichswertes des fabrikneuen Materials ( 0,1262 mmPY ) befindet. Dieses Beispiel zeigt, dass es während des Lötvorganges zu einer Streuung von

Lotresten weit außerhalb der Fügestelle kommen kann, die optisch nicht sichtbar sind.

Das Lot bewegt sich dabei entlang der erwärmten Metalloberflächen von der ursprünglichen Verbindungsstelle weg bzw. Schmelzprodukte von diesem werden mit Hilfe der Flamme, die das Lot auf über 1000° C aufheizt, in Dampfform zu entfernten Bereichen des Prüfkörpers transportiert. Durch diese Vorgänge bilden sich Mischpotentiale zwischen der Edelmetalllegierung ( EM: Silberlot ) und den Nichtedelmetalllegierungen ( NEM: Edelstahl ), welche wiederum die Ausbildung galvanischer Elemente und damit eine Kontaktkorrosion zur Folge haben.

Die Korrosionsraten der Laserschweißverbindungen geben ein Mischpotential der Werte von Krone und Draht wieder und verhalten sie sich dementsprechend ähnlich zu diesen ( Abb.7.5 ). Damit erklären sich die im Vergleich auffallend korrosiven Reaktionen der Laserfügestellen in 1%iger NaCl – Lösung, bedenkt man die ähnlich starke Aktivität des Drahtes in diesem Elektrolyten.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass es bei einer Verbindung von Krone und Draht ( NEM ) mit Hilfe von Loten ( EM ) zwangsläufig zu einer Kontaktkorrosion kommt. Die unedlen Elemente bilden hierbei die Anode und werden infolgedessen herausgelöst, z.B. Chrom und Nickel. Beim Laserschweißen hingegen tritt diese Korrosionsform nicht auf, da man hier gleichartige Legierungen miteinander verbinden kann.

In der graphischen Darstellung Abbildung 7.5 sind zusätzlich zu den mittleren Korrosionsraten auch die Standardabweichungen ( Stabw ) eingezeichnet. Sie geben die Schwankungsbreite, z.T. bis zu mehr als 50%, der einzelnen Messungen wieder. Je größer die Schwankung ist, desto größer ist die Standardabweichung. Ausgehend davon, dass es sich immer um die gleichen Legierungen handelt, dürften eigentlich keine Unterschiede messbar sein. Jedoch könnte es trotzdem zu geringen produktionsbedingten Unterschieden in der Zusammensetzung der Legierung kommen. Geht man nun davon aus, dass alle für diese Arbeit verwendeten Kinderkronen und Drähte aus jeweils einer Charge stammen, bleibt zu bedenken, dass es durch die Verarbeitung des Grundmaterials bei der Kronen – bzw. Drahtherstellung sowie der Weiterverarbeitung auf jeden Fall zu Veränderungen in den Oberflächenstrukturen kommt. So wird bei der Fertigung der Kronen das Tiefziehblech durch Ziehen und Dehnen, z. B. zur Ausmodellation der Kaufläche, in Form gebracht, der Draht durch Kaltverformung gefertigt. Bei der Herstellung von kieferorthopädischen Apparaturen und anderem wird der Draht erneut gebogen und geknickt.

All diese Verformungen führen unweigerlich zu mechanischen Spannungen innerhalb des Systems, welche wiederum elektrochemische Potentialdifferenzen und somit

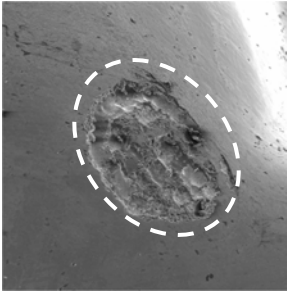
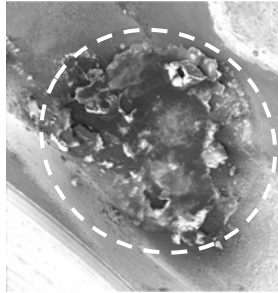
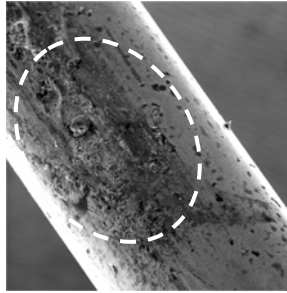
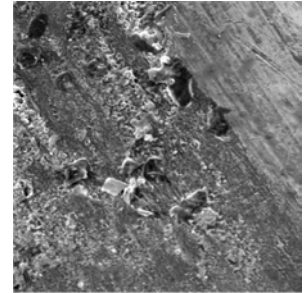
Spannungsrisskorrosion zur Folge haben. Die verformten Zonen reagieren dabei anodisch, die unverformten verhalten sich kathodisch.

Auch die Wärmebehandlung durch das Laserschweißgerät bzw. den Bunsenbrenner während der Prüfkörperfertigung übt Einfluss auf das System aus. Sie führt insgesamt, wie bereits erwähnt, zu einer messbaren Reduktion der Korrosionsraten der bearbeiteten Kronen und Drähte gegenüber den entsprechenden fabrikneuen Produkten. Im Detail betrachtet, zeigt sich dabei, dass die gelaserten Proben im Gegensatz zu den gelöteten und dem Anlieferungszustand anfangs sogar noch korrosionsstabiler sind. Erst unter der Dauerbelastung der zyklischen Messungen gehen diese Unterschiede verloren. Alles korrodiert jetzt ähnlich stark. Eine starke ( $> 3000^{\circ}\text{C}$ ), wenige ms dauernde ( Laser – Impulsdauer 6,6ms ), punktuelle Erwärmung der Fügestelle ist also für die Korrosionsstabilität der diesen Bereich umgebenden Edelstahllegierung besser, als ein minutenlanges, großflächiges Aufheizen mittels der Flamme ( je nach Lot ca.  $750^{\circ}\text{C}$  –  $1100^{\circ}\text{C}$  ). Da sich beim Lötvorgang keine festen Parameter ( Dauer der Erwärmung, Abstand und Richtung der Flamme ) einstellen lassen, könnte es zu weiteren Abweichungen kommen.

Durch die immer wieder neu gewählte Position des Mini – Cell – Systems ( MCS ) für die Messungen auf den Kronen ( Höckerfläche, Höckerspitze oder Seitenfläche der Krone ) sowie den Drähten ( Lage zum geknickten Ösenende ) und dem Abstand von den gelaserten bzw. gelöteten Fügstellen, der immer so groß wie möglich gehalten werden sollte, werden alle diese beschriebenen Unterschiede mit gemessen und beeinflussen die Ergebnisse nachhaltig. Dabei ist es vor allem die besonders kleine Messfläche ( nur  $0,008\text{cm}^2$  ) des MCS, die das hoch differenzierte Bild von den Oberflächenstrukturen der Proben ermöglicht. Die meisten der Unterschiede können den Messkurven der Single sweep Voltammetrie entnommen werden, während sich bei der zyklischen Dauerbelastung vor allem Tendenzen aufzeigen, z.B. Lochfrass, Korrosionswachstum. Im Gegensatz dazu sind bei anderen Verfahren, bei denen die Proben komplett in den Elektrolyten eingetaucht werden, solch feine Unterschiede nicht sichtbar, da sich die gesamten Korrosionsprodukte aller Bereiche des Testmaterials miteinander vermischen. Diesem Ergebnis entspricht unser Mittelwert.

Die REM – Aufnahmen der Abb. 7.7 – 7.10 ( Tab.7.2 ) geben an Beispielen die korrosiv veränderten Oberflächen von Krone und Draht nach der Messung mit dem MCS wieder.

Tab.7.2 Exemplarische REM – Aufnahmen von Messflecken auf der Krone und dem Draht

			
<p>Abb.7.7 REM nach Messung mit dem MCS auf der Krone ( 20-fach ) ( S. 80 )</p>	<p>Abb.7.8 REM nach Messung mit dem MCS auf der Krone ( 80-fach ) ( S. 83 )</p>	<p>Abb.7.9 REM nach Messung mit dem MCS auf dem Draht ( 100-fach ) ( S. 80 )</p>	<p>Abb.7.10 Ausschnitts – vergrößerung der Abb.7.9 ( 250-fach ) ( S. 80 )</p>

Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei der Korrosion auf der Lasernaht in allen Elektrolyten um Lochfrass ( pitting corrosion ) handelt, der einmal vorhanden, auch weiterhin immer präsent ist. Vermutlich sind die herstellungsbedingt zusätzlich geschaffenen Unebenheiten der Kronen – Draht – Oberflächen ( Laserpunkte ) die Ursache dafür. Krone und Draht dagegen lassen dieses Phänomen nur bei den Messungen in 1%iger NaCl – Lösung erkennen, in Coca Cola light und Eistee variieren die Ergebnisse. Hier ist pitting corrosion vor allem bei den unbearbeiteten Materialien zu finden. Das Auftreten von Lochfrass wird also durch den Kontakt mit besonders aggressiven Elektrolyten begünstigt. Grundsätzlich neigen jedoch alle Stahloberflächen zum Lochfrass, auch wenn nicht jede Messung einen klassischen Kurvenverlauf wiedergibt, wie er z.B. in Abb.5.4 dargestellt ist. Grund dafür sind die ungleichmäßige Struktur der Oberfläche und die dadurch bedingte unterschiedliche Verteilung der Aktiv – Passivbereiche in den Messflecken. Man trifft mit der Pipettenspitze also beim Messen nicht zwangsläufig nur aktive oder passive Bereiche bzw. Löcher, sondern möglicherweise Kombinationen, die sich behindern oder auch unterstützen können. Benachbarte Bereiche werden dabei unterminiert, und können somit einbrechen. Dem Lochfrass können sowohl selektive –, Kontakt –, Spalt – als auch Spannungsrisskorrosion vorausgehen ( 2.6.2 Korrosionsformen ).

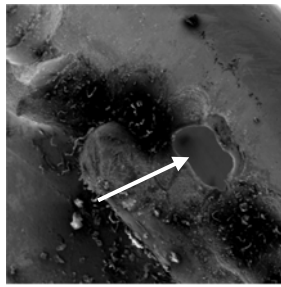


Abb.7.11 Loch in der Kronenwand neben der gelaserten Fügstelle ( 40-fach ) ( S. 80 )

Auch grobe Verarbeitungsfehler, wie die neben der eigentlichen Schweißnaht vom Laserstrahl perforierte Kronenwand, ( Abb.7.11 ) begünstigen korrosive Prozesse. Grund dafür ist die so geschaffene raue Oberfläche, welche die Anlagerung von Plaque begünstigt, wodurch es wiederum zu einem Abfall des pH – Wertes in den sauren Bereich kommt. Auch der Kariesschutz des Zahnes ist unter solch einer Krone nicht mehr gewährleistet. Deshalb müssen solche Herstellungsfehler unbedingt vermieden oder aber sofort aussortiert werden.

Tab.7.3 Exemplarische REM – Aufnahmen von herstellungsbedingten Defekten an gelöteten Fügstellen

A scanning electron microscope (REM) image showing a dark, linear crack or gap in a metallic surface. A black arrow points to the crack.	A scanning electron microscope (REM) image showing a dark, irregular cavity or hole in a metallic surface. A white arrow points to the cavity.	A scanning electron microscope (REM) image showing a metallic surface with several dark, linear grooves and a small circular hole. A white arrow points to one of the grooves.	A scanning electron microscope (REM) image showing a metallic surface with a highly porous, irregular texture. A black arrow points to the porous area.
<p>Abb.7.12 Spalt an der gelöteten Fügstelle ( S. 82 )</p>	<p>Abb.7.13 Hohlraum an der gelöteten Fügstelle ( S. 82 )</p>	<p>Abb.7.14 Riefen und Loch an der gelöteten Fügstelle ( S. 81 )</p>	<p>Abb.7.15 Poröser Lotbereich an der Fügstelle ( S. 82 )</p>

Natürlich können Herstellungsfehler auch beim Löten auftreten. Einige Beispiele sind in den Abb.7.12 – 7.15 ( Tab.7.3 ) zu sehen. Spalten ( Abb.7.12 ) können entstehen, wenn die Materialien nicht ausreichend erwärmt werden. Flussmittel – und Oxideinschlüssen und oder eine unvollständige Lötung führen wiederum zu Lunkern und Poren ( Abb.7.13 – 7.15 ). Durch all diese Defekte kommt es zur Spaltkorrosion und in deren Folge zu einem Zugfestigkeitsverlust und zu Verfärbungen. Hierbei bilden die schlecht belüfteten Spalträume, mit der erhöhten Wasserstoffkonzentration die Anode und die Nachbarregionen mit der im Vergleich höheren Sauerstoffkonzentration die Kathode. Die Anlagerung von Plaque forciert die Vorgänge zusätzlich.

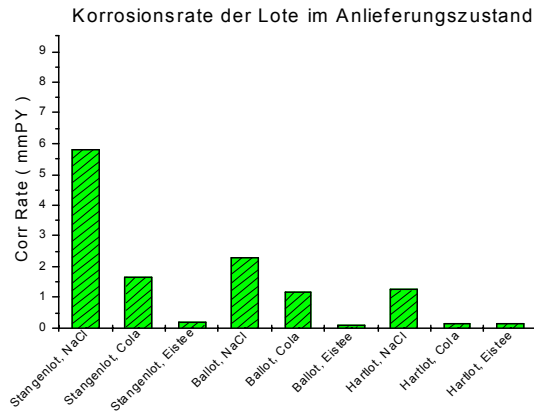


Abb.7.16 Korrosionsrate ( mm/Jahr ) der Lote im Anlieferungszustand

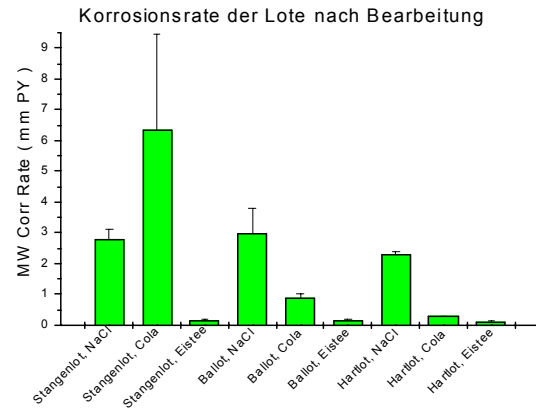


Abb.7.17 Korrosionsrate ( mm/Jahr ) der Lote nach ihrer Verarbeitung

In den Abbildungen 7.16 und 7.17 sowie der Tab.7.1 sind die Korrosionsraten der Lotlegierungen dargestellt. Die Werte der Anlieferungszustände aller drei Silberlote weisen in Eistee eine Reduktion der Korrosion gegenüber den Messungen in Coca Cola light auf und beide wiederum gegenüber den Messungen in 1%iger NaCl – Lösung. Nach Verarbeitung der Lotlegierungen kann man dieses Ergebnis sowohl beim Ballot als auch beim Hartlot wieder finden. Nur das Stangenlot reagiert in Coca Cola light stärker als in der 1%iger NaCl – Lösung.

Bei einem direkten Vergleich der Korrosionsstabilität vor und nach der Bearbeitung lässt sich keine Tendenz ableiten. Letztlich ist es jedoch nicht die Aufgabe dieser Arbeit gewesen, einen adäquaten Vergleich zwischen den Anlieferungszuständen und den Materialien nach der Verarbeitung durchzuführen. Deshalb wurden die fabrikneuen Produkte nur jeweils einmal gemessen. Infolgedessen ist keine aussagekräftige Statistik vorhanden und nur ein grober Vergleich beider Zustände möglich. Es müssten also weitere Testreihen unter diesem Gesichtspunkt durchgeführt werden.

Theoretisch betrachtet, sollten die Korrosionsraten vom Silberlot mit der größten Menge edler Bestandteile, zu dem mit dem geringsten Anteil ansteigen. Das würde bedeuten, dass das Stangenlot ( Ag 78%, Cu 15%, Zn 7% ) am korrosionsstabilsten reagieren müsste, gefolgt vom Ballot ( Ag 71,5%, Cu 17%, Zn 11,5% ). Das Hartlot ( Ag 44%, Cu 30%, Zn 26% ) wäre am aktivsten. Das Gegenteil ist jedoch der Fall. Das Ballot korrodiert unerwarteter Weise in 1%iger NaCl – Lösung und Eistee am stärksten, das Stangenlot in Coca Cola light.

Grund dafür ist vermutlich, dass bei der Ballot – Messung nicht das reine Silberlot gemessen wurde, sondern eine Mischlegierung, welche sich während des Lötvorgangs aus dem Messingdraht ( Cu 68,5 %, Zn 31,5% ) und der sich um diesen herum befindenden Silberlotkugel



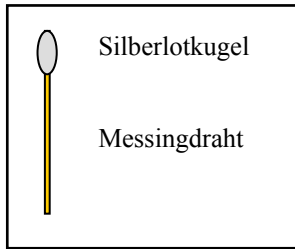


Abb.7.18 Schematische Darstellung des Ballotes

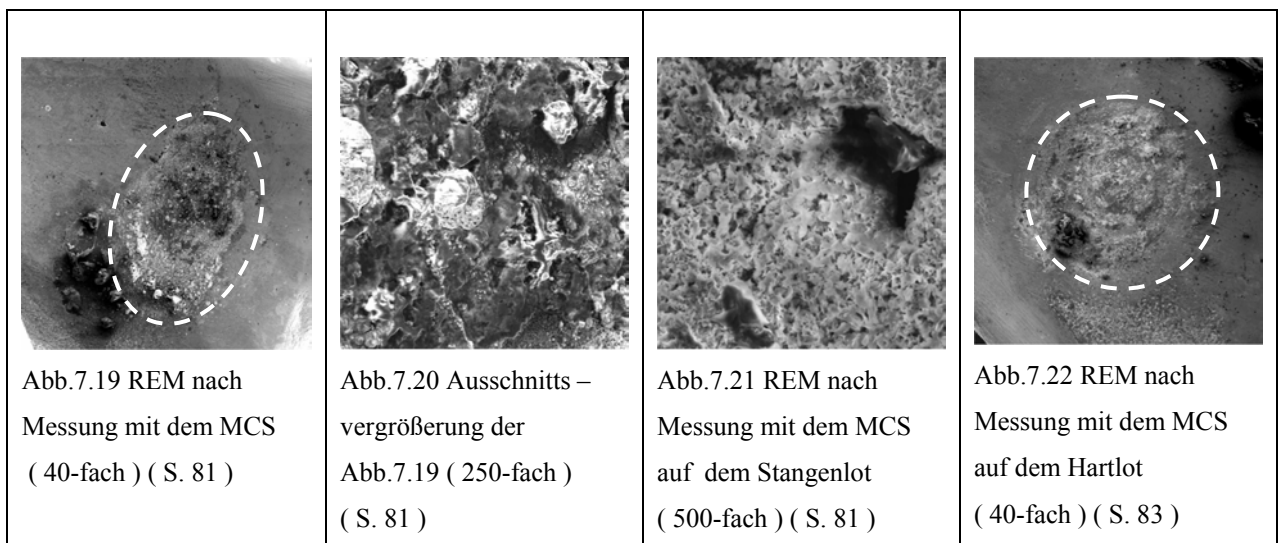
gebildet hat ( Abb.7.18 ). Dies wiederum führte zu einer Zunahme der unedlen Bestandteile, wodurch die Qualität der Lotverbindung deutlich reduziert wurde.

Nur die Stangenlot – Fugestelle ist, wie bereits erwähnt, zumindest in Coca Cola light gemessen noch aktiver. Während normalerweise das Flussmittel direkt auf die zu verlötenden Bereiche gegeben wird, befindet es sich hier innerhalb des Lotdrahtes. Dadurch ist ein kontrolliertes Auftragen nicht mehr möglich, so dass es zu einer Durchmischung mit der Lotnaht kommt. Nach dem Abkühlen werden die Flussmittelreste, die sich eventuell an den Rändern der Lotstelle befinden, durch das Erhitzen des Werkstückes in 10 %iger Schwefelsäure entfernt. Auf Grund der vielen Flussmittel – und Oxideinschlüsse im Stangenlot führt diese Säuberung zur Bildung von Porositäten an dessen Oberfläche, welche wiederum eine verstärkte Korrosion zur Folge haben. Überdies scheinen die Phosphat – Ionen der Coca Cola light besonders stark mit dem Flussmittel zu reagieren, wodurch sich erklärt, warum das Stangenlot nur in diesem Elektrolyten stärker korrodiert als das Ballot.

Im Vergleich der drei untersuchten Silberlote weist Hartlot als vermeintlich unedelstes Lot die geringste Korrosionsaktivität auf.

Die REM – Aufnahmen der Abb. 7.19 – 7.22 ( Tab.7.4 ) geben an Beispielen die korrosiv veränderten Oberflächen der gelöteten Fugstellen nach der Messung mit dem MCS wieder.

Tab.7.4 Exemplarische REM – Aufnahmen von Messflecken auf den gelöteten Fugstellen





Tab.7.5 Theoretisch freigesetzte Mengen der einzelnen Legierungsbestandteile (  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  Tag ) im Vergleich zum täglichen Bedarf (  $\mu\text{g}/\text{Tag}$  bei 70kg KG ) angegeben in **Prozent ( % )**

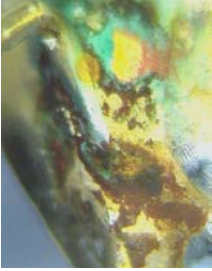
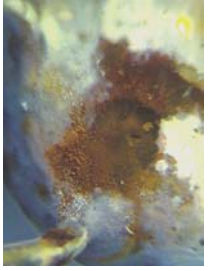

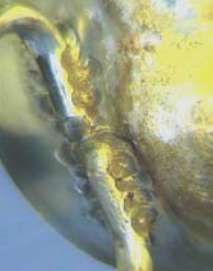

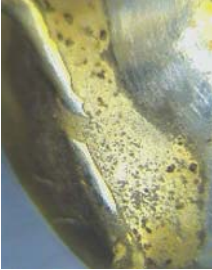




	Chrom ( 200 $\mu\text{g}/\text{d}$ )	Nickel ( 460 $\mu\text{g}/\text{d}$ )		Kupfer ( 2000 $\mu\text{g}/\text{d}$ )	Zink ( 15000 $\mu\text{g}/\text{d}$ )	
KroneNaCl	15,94 <b>8,0</b>	10,90 <b>2,4</b>	StangenlotNaCl	1142,05 <b>57,1</b>	532,96 <b>3,6</b>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ d ) ( % )
KroneCola	39,06 <b>19,5</b>	26,73 <b>5,8</b>	StangenlotCola	2597,47 <b>129,9</b>	1212,15 <b>8,1</b>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ d ) ( % )
KroneEistee	26,63 <b>13,3</b>	18,22 <b>4,0</b>	StangenlotEistee	54,00 <b>2,7</b>	25,20 <b>0,2</b>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ d ) ( % )
DrahtNaCl	113,58 <b>56,8</b>	50,30 <b>10,9</b>	BallotNaCl	1351,51 <b>67,6</b>	914,26 <b>6,1</b>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ d ) ( % )
DrahtCola	36,46 <b>18,2</b>	16,15 <b>3,5</b>	BallotCola	389,54 <b>19,5</b>	263,51 <b>1,8</b>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ d ) ( % )
DrahtEistee	14,60 <b>7,3</b>	6,46 <b>1,4</b>	BallotEistee	68,04 <b>3,4</b>	46,03 <b>0,3</b>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ d ) ( % )
LaserNaCl	171,47 <b>85,7</b>	97,48 <b>21,2</b>	HartlotNaCl	1715,69 <b>85,8</b>	1486,93 <b>9,9</b>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ d ) ( % )
LaserCola	26,22 <b>13,1</b>	14,91 <b>3,2</b>	HartlotCola	207,66 <b>10,4</b>	179,97 <b>1,2</b>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ d ) ( % )
LaserEistee	25,13 <b>12,6</b>	14,29 <b>3,1</b>	HartlotEistee	71,59 <b>3,6</b>	62,05 <b>0,4</b>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ d ) ( % )

Berücksichtigt man die Standardelektrodenpotentiale ( Abb.7.23 ) könnten die Chrom – und Zinkwerte noch höher liegen, die Nickel – und Kupferwerte eventuell etwas niedriger sein. Entscheidend ist aber, dass all diese Mengen zu der täglichen Aufnahme dieser Spurenelemente aus Nahrung, Wasser und Luft noch hinzukämen und Verletzungen der Gingiva, die häufig unbemerkt auftreten, diesen Vorgang zusätzlich begünstigen. Weiterhin bleibt zu bedenken, dass das Körpergewicht von Kindern und Jugendlichen weit unter 70kg liegt, die zusätzliche Belastung für den kindlichen Körper demzufolge noch viel größer ist. Handelt es sich auch nicht um toxische Mengen, die durch die Korrosion freigesetzt werden, so sind jedoch die Langzeitfolgen, z.B. Allergien, nicht abzusehen.

Auch bei den gelagerten Proben ( S.84 – 95, Tab.7.6 ) erkennt man vor allem in der 1%igen NaCl – Lösung deutlich die Ablagerung von Korrosionsprodukten ( Abb.7.25, 7.26 ), vermutlich handelt es sich um Kupferoxide ( rotbräunlich ) und Kupferchloride ( grünlich ), sowie das Herauslösen der Legierungsbestandteile, wodurch sich sichtbar aufgeraute Oberflächen gebildet haben. Diese begünstigen die Anlagerung von Plaque und fördern damit die Korrosion.

Bei den gelöteten Verbindungen mehr noch als bei den gelaserten kann man sogar mit bloßem Auge erkennen, dass es bei einem Vergleich der geputzten ( Abb.7.28, 7.30, 7.32, 7.34 ) mit den nicht geputzten ( Abb.7.27, 7.29, 7.31, 7.33 ) Proben zu einer unterschiedlich starken Korrosion gekommen ist. Durch die tägliche Entfernung der Deckschicht mit Hilfe der Zahnbürste sind die entsprechenden Prüfkörper immer wieder dem direkten Angriff des Elektrolyten ausgesetzt gewesen, bevor sie ihre Passivschicht erneut aufbauen konnten. Die Korrosion wird dadurch sichtbar gesteigert. Im Mund wird dieser Prozess durch Kauen und Knirschen noch verstärkt.

Tab.7.6 Beispiele gelagerter Prüfkörper nach 487 Tagen

				
Abb.7.25 Stangenlot – Probe in NaCl ( S. 87 )	Abb.7.26 Hartlot – Probe in NaCl ( S. 93 )	Abb.7.27 Gelaserte Probe in Cola ohne Putzen ( S. 85 )	Abb.7.28 Gelaserte Probe in Cola mit Putzen ( S. 86 )	Abb.7.29 Stangenlot – Probe in Cola ohne Putzen ( S. 88 )
				
Abb.7.30 Stangenlot – Probe in Cola mit Putzen ( S. 89 )	Abb.7.31 Ballot – Probe in Cola ohne Putzen ( S. 91 )	Abb.7.32 Ballot – Probe in Cola mit Putzen ( S. 92 )	Abb.7.33 Hartlot – Probe in Cola ohne Putzen ( S. 94 )	Abb.7.34 Hartlot – Probe in Cola mit Putzen ( S. 95 )

Obwohl KAPPERT et al. [ 51 ] 1988 wie auch FITJER [ 32 ] 1999 und WIRZ et al. [ 105 ] 2001 wiederholt feststellten, dass Chrom – Nickel – Stähle besonders korrosionsanfällig sind, werden diese bis heute in der Kieferorthopädie eingesetzt. Aus diesem Grund empfehlen WIRZ et al. [ 105, 106, 107 ] anstatt nickelhaltiger Stähle bei der Herstellung von kieferorthopädischen Geräten z.B. Titan und seine Legierungen zu verwenden.

Die ebenfalls untersuchten Silberlote ( EM ) werden vor allem für die Verbindung von Nichtelegmetallen, besonders von Edelstahl, verwendet und kommen deshalb bevorzugt bei

der Anfertigung von kieferorthopädischen Geräten zum Einsatz [ 12, 14, 29 ]. Sie bestehen zu einem Großteil aus niedrig schmelzenden Elementen ( Nichtedelmetalle ), um einen zu den zu verbindenden Legierungen passenden Liquiduspunkt zu erhalten. Die Folge davon ist jedoch die selektive Korrosion innerhalb der Lotlegierung und damit eine Abnahme der Korrosionsbeständigkeit [ 69 ]. Deshalb besitzen in der Tabelle 7.1 die edleren Silberlote bei der Messung mit dem Mini – Cell – System im Vergleich zu den eigentlich unedleren Edelstahllegierungen die wesentlich höheren Korrosionswerte.

Eine Kombination der beiden Materialien führt wiederum zur Ausbildung von galvanischen Elementen, wie 1982 von BERGE et al. [ 4 ] belegt werden konnte, und damit zur Kontaktkorrosion. Auf Grund dessen kommt es zu einer verstärkten Freisetzung unedler Legierungsbestandteile. So konnten z.B. WIRZ et al. [ 108 ] 1997 zweifelsfrei feststellen, dass sich bei Jugendlichen mit intraoral feststehenden kieferorthopädischen Geräten im Vergleich zu Kontrollgruppen ohne diese Geräte ein signifikant höherer Nickelanteil im Speichel nachweisen ließ. Auch GJERDET et al. [ 38 ] kamen 1991 zu diesem Ergebnis. In der Tabelle 7.5 sind die aus den gemessenen Korrosionsraten ( mmPY ) berechneten theoretisch freigesetzten Mengen von Chrom, Nickel, Zink und Kupfer ( in Prozent ) angeführt. Sie verdeutlichen die zusätzliche tägliche Belastung für den kindlichen Körper. Auch wenn die Langzeitfolgen, z.B. Allergien, von kieferorthopädischen Behandlungen noch nicht ausreichend genug erforscht wurden, handelt es sich zumindest bei Nickel, Chrom und Kupfer um bekannte Allergene, die sowohl lokale als auch systemische Reaktionen hervorrufen können [ 86 ].

Die Korrosionsraten der Tabelle 7.1 belegen auch, dass die gelaserten Fügstellen eine im Vergleich zu den Lötstellen deutlich geringere korrosive Aktivität besitzen. STRIETZEL et al. [ 93 ] kamen 1996 ebenfalls zu diesem Ergebnis.

Da der Zusammenhang zwischen Biokompatibilität und Korrosionsstabilität eindeutig nachgewiesen ist [ 86 ], sollte also das Laserschweißen zur Risikominderung alternativ zum Löten verwendet werden [ 43, 46, 63, 93, 98, 104, 107 ]. Hinzu kommt, dass auf eine begrenzte Einsatzdauer der kieferorthopädischen Geräte sowie auf eine entsprechende Ernährung zur Minimierung des Risikos seitens des Arztes geachtet werden sollte.